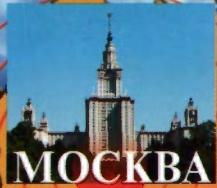


НАУКУ –
ВСЕМ!



Л. А. Ашкинази

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

Из прошлого в будущее



ШЕДЕВРЫ
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
• Инженерные науки •

НАУКУ — ВСЕМ!
Шедевры научно-популярной литературы

Л. А. Ашкнази

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

Из прошлого в будущее

Издание второе



URSS

МОСКВА

ББК 32.85

Ашкенази Леонид Александрович

Электронные лампы: Из прошлого в будущее. Изд. 2-е.

М.: Издательство ЛКИ, 2013. — 224 с. (НАУКУ — ВСЕМ!

Шедевры научно-популярной литературы.)

Настоящая книга хотя и посвящена такой специальной области техники, как электронные вакуумные лампы, тем не менее является научно-популярной. В доступной и увлекательной форме рассмотрены классификация электронных приборов, их история и эволюция, место электронных вакуумных ламп среди других приборов, их роль в развитии цивилизации, попытки гибридизации вакуумных и полупроводниковых либо вакуумных и газоразрядных приборов. Рассказано о принципах работы, конструкции и технологиях сеточных ламп, кристаллов, ламп бегущей волны, магнетронов и вообще приборов М-типа, о гиротроне, оротроне, виркаторе, проблемах увеличения мощности, частоты и КПД. Отдельно и более подробно рассмотрены проблемы источников электронов для приборов — термоэлектронных, вторично-электронных и иных катодов, а также антиэмиттеров, принципы конструирования и работы композиционных материалов.

Книга адресована широкому кругу читателей, интересующихся техникой и ее историей. Немало полезного в ней найдут инженеры, специализирующиеся в области электроники, преподаватели и студенты технических вузов.

Издательство ЛКИ. 117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56.

Формат 60×90/16. Печ. л. 14.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-382-01432-6

© Издательство ЛКИ, 2008, 2012

13132 ID 166960



9 785382 014326



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Оглавление

Глава 1. В начале пути	6
1. Об этой книге	6
2. Как от лампы электрической произошла лампа электронная	9
3. Одна сетка и целый мир впридачу	11
4. Электронное дерево и что на нем растет	15
5. Задачи, поставленные жизнью	16
Глава 2. Самые простые лампы и их непростые проблемы	23
1. Возвращение на Итаку	23
2. Черный ящик, его параметры и начинка	27
3. Авоська для электронов	30
4. Вторая сетка помогает первой	33
5. Что позволено триоду, то не позволено тетроду	35
6. Аппетит приходит во время еды	40
7. Магия мегаваттов	42
8. «Прибор нового вида»	47
9. Лампа без деталей	50
10. Последний ВИС моды 1926 года	52
Глава 3. Электронный прибой	62
1. Как он образуется	62
2. Как его использовать	64
3. Зачем частотам быть сверхвысокими	66

Оглавление

4. Нельзя объять необъятное... с помощью обычной электронной лампы	68
5. Обратим недостатки в достоинства	69
6. Некоторые не мелкие подробности	73
7. Осталось только сделать	77
Глава 4. Длинная дорога от входа к выходу	85
1. Вверх по идущей вверх лестнице	85
2. Танцуем от печки, то есть от клистрона	87
3. Архитектура ЛБВ	90
4. ЛБВ должна быть экономной	91
5. Одна волна сменить другую спешит...	93
6. Алмаз не для прикрас	96
Глава 5. Поля скрещиваются	101
1. ЭВП СВЧ: кушать подано!	101
2. Электрон в скрещенных полях	102
3. Есть ли разница, куда падать	106
4. Разложим по полочкам	110
5. Маленький катод позволяет выкинуть большую схему	112
6. Когда все упирается в технологию	115
Глава 6. Гибридные электронные приборы	124
1. Поле боя при лунном свете, или польза и вред от конкуренции	124
2. Тезис, антитезис, синтез	125
3. Полупроводник в вакууме	126
4. «Газ или вакуум» или «газ и вакуум»?	130
5. Как компенсировать пространственный заряд	133
6. Виртуальный анод, или когда кажущееся хуже настоящего	134

Оглавление

7. КПД > 90 %	136
8. «Гепард» электроники	137
Глава 7. Вторая эпоха	143
1. Вращаясь в резонаторе	143
2. Пролетая над стиральной доской	146
3. Когда не вмещается	148
4. Как нарисовать не-функцию	156
Глава 8. Сердце электронного прибора	161
1. Что и почему человек называет сердцем	161
2. Почему с годами катоды становились лучше во всех смыслах	162
3. Много плохих или один хороший?	163
4. Как заглянуть в будущее	165
5. Вольфрам: он был первым	167
6. Польза от зубного порошка	168
7. Эра композитов	171
8. Диффузионная проблема и катоды без этой проблемы	174
9. Эмиттирует, а не катод (динод)	177
10. Катоды, эмиттирующие под дождем	178
11. Должно ли сердце ЭВП быть горячим?	183
12. Что не поделили антиэмиттеры с эмиттерами?	186
13. Шумим, братцы, шумим...	188
14. Печка для катода	189
15. Автоэлектронная эмиссия	194
16. Фотоэлектронная эмиссия	203
Что еще вырастет на дереве, или вместо заключения . . .	221

Глава 1

В начале пути

1. Об этой книге

Все, кто узнавал о намерении написать книгу, которую Вы держите в руках, говорили: «Как? Разве электронные лампы еще где-то применяются? Наверное, их полностью вытеснили полупроводники». Впрочем, нет — те, кто занимается электронными лампами, реагировали иначе. Они пожимали плечами и говорили: «Разве о лампах можно написать интересно? Вот о полупроводниках...»

И то, и другое неверно. Каждый новый прибор, или материал, претендующий на часть уже освоенной области применения, конечно, теснит старые. Но железобетон не вытеснил дерева, алюминий и стекло не вытеснили бетона, и транзистор не вытеснил лампы. Обязательное условие успешного развития — и техники и природы — разнообразие. Или, как иногда говорят — плюрализм (от английского plural — множественный). Это подтвердит любой инженер и любой биолог.

Здоровая конкуренция идет на пользу. Если истребить волков («санитаров леса»), начинают болеть зайцы. В технике то же самое — наличие полупроводниковых приборов способствует совершенствованию ламп. Причем техника разнообразнее природы — волки с зайцами не дают жизнеспособных гибридов, а лампы с транзисторами, как вы узнаете из этой книги, дают.

Почему эта книга написана именно об электровакуумных приборах? Не так уж велика вероятность того, что вы будете заниматься электронными приборами и уж совсем ничтожна — что именно ЭВП. Но я вас к этому и не склоняю! Одному нравятся маленькие плотненькие брюнетки, другому —

1. Об этой книге

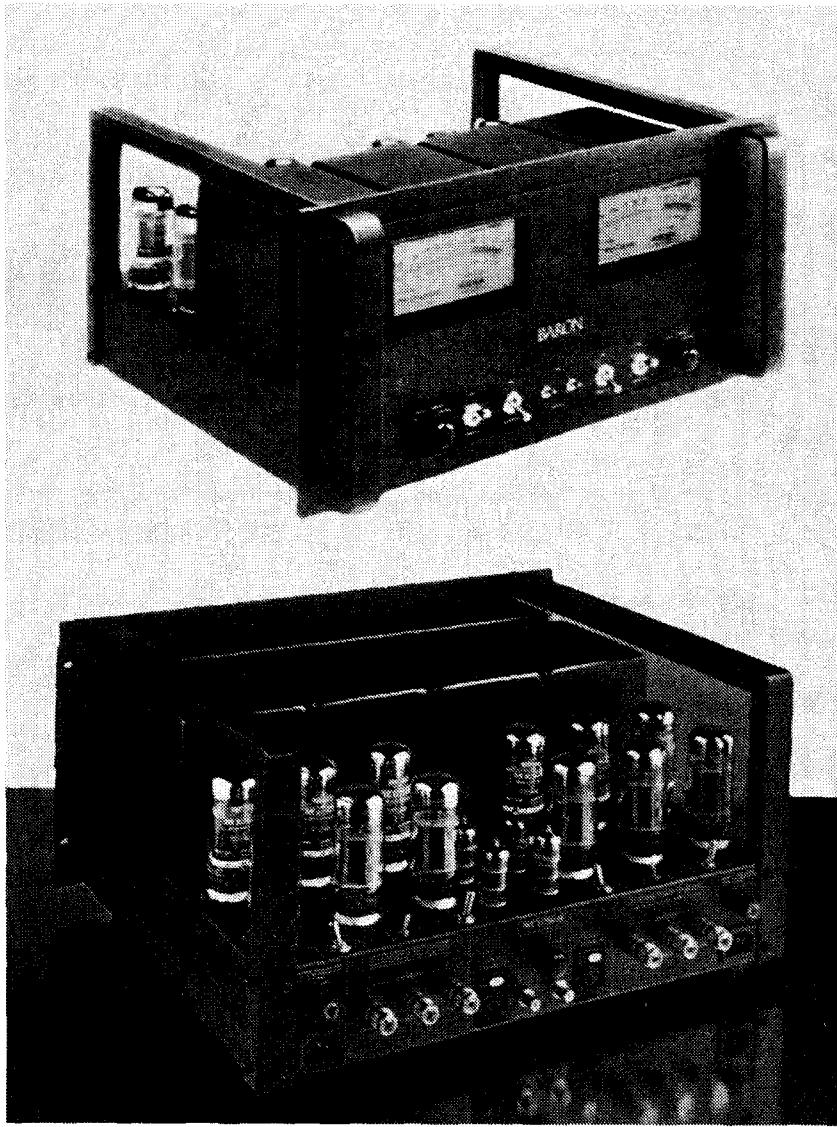


Фото 1. Лампы в High End аппаратуре (журнал Class A)

высокие худощавые блондинки. Важно то, что их объединяет, так же как важно то, что объединяет разные области науки и техники, которыми стоит заниматься. Их объединяет то, что их цель — познание мира и создание на основе этого знания чего-то, нужного людям.

Однако трудно сказать что-то дельное о науке вообще, о технике вообще, о женщинах вообще — ведь занимаемся то мы конкретно физикой поверхности, конкретно техникой ЭВП и любим вполне конкретную (150/47) Машу. Поэтому и книга эта о конкретной области физики и техники, но вы извлечете из нее больше пользы, если за частностями постараитесь увидеть общие свойства физики и техники. А я в этом постараюсь вам помочь.

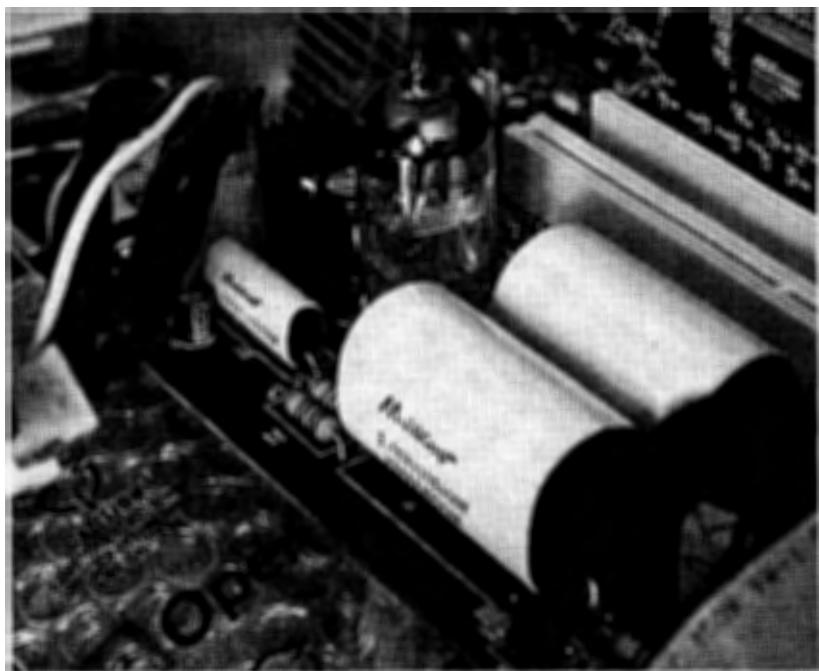


Фото 2. Лампа в аудиокарте (Интернет)

2. Как от лампы электрической произошла лампа электронная

Что же касается возможности написать интересно... об этом судить читателю. Но, мне кажется, написать интересную книгу о лампах проще, чем о транзисторах. Человеку интересно новое, а о транзисторах читали все. Правда, говорят, что новое — это хорошо забытое старое, но истина не перестает быть истиной из-за того, что она забыта. Конечно, в этом случае о ней надо напомнить. Об интересной истории электронных ламп и об их широком применении в наше время слышали, наверное, немногие. А когда вы прочитаете эту книгу, вы тоже станете к ним принадлежать.

И в заключение нашего предисловия — краткий ответ на вопрос, где сегодня применяются лампы. Они применяются везде, где нужны высокие частоты и мощности, то есть в дальней (в том числе — спутниковой) связи, в радиолокации, в ускорительной технике. Кроме того, есть несколько других областей применения (например, генерация рентгеновского излучения), в том числе связанных с высокими температурами или радиацией. И наконец — особо высококачественное звуково-спроизведение, так называемый High End (фото 1): лампы меньше искажают сигнал. Дело дошло до того, что недавно лампу применили в компьютере — в аудиокарте (фото 2).

2. Как от лампы электрической произошла лампа электронная

Электронная лампа возникла из электрической, той, что с начала века освещает мир. Создал первую электронную лампу Т. А. Эдисон, и создал он ее по ошибке. Произошло это так.

Свет в электрической лампе излучался в те времена накаленной угольной нитью. Однако от нити летели во все стороны не только электроны, но и нечто, оседавшее на баллоне и вызывавшее его потемнение. Эдисон считал, что это «нечто» — отрицательно заряженные угольные пылинки, и если ввести в лампу дополнительный электрод и подать на него положительный относительно нити потенциал, то пылинки будут притягиваться к этому электроду и не попадать на баллон.

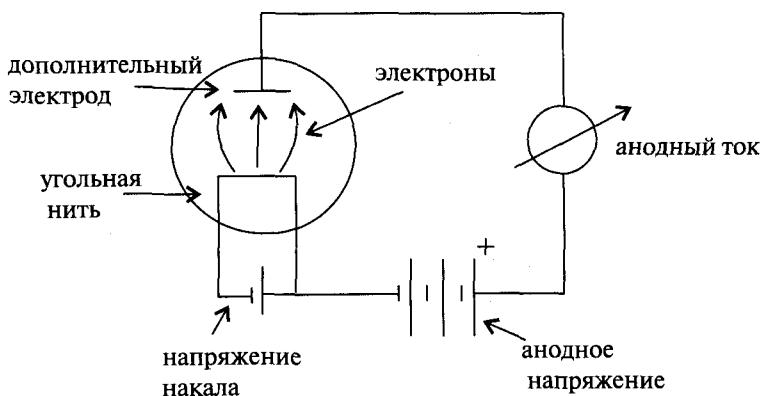


Рис. 1. Эффект Эдисона

Сказано — сделано (так было принято работать в его мастерских), но баллоны все равно темнели. Жалко, конечно, но зато Т. А. Эдисон обнаружил, что в цепи дополнительного электрода протекает ток. Так в 1883 году он обнаружил два новых явления — протекание тока через вакуум и термоэлектронную эмиссию — испускание электронов нагретыми веществами. Позже эти два явления вместе (по отдельности их тогда еще не наблюдали) были названы «эффектом Эдисона» (рис. 1).

Как человек, мыслящий практически (автор более 1000 патентов) он тут же и придумал прибор на основе этих эффектов. Поскольку ток, текущий в цепи дополнительного электрода, сильно зависел от напряжения, приложенного к нити (называемого напряжением накала), то он предложил использовать этот эффект для обнаружения малых изменений напряжения или контроля его стабильности. Для этого следовало подключить контролируемое напряжение к «лампе Эдисона» в качестве накального и следить за постоянством тока, текущего в цепи дополнительного электрода. Собственно говоря, возникновение проводимости в воздухе, находящемся рядом с накаленным металлом, было известно еще с начала XVIII века. В конце XIX века, одновременно с Т. А. Эдисоном, ученые Ю. Эльстер и Г. Гейтель обнаружили, что электрод,

3. Одна сетка и целый мир впридачу

расположенный рядом с накаленной, нитью, заряжается в вакууме отрицательно. Казалось бы, все ясно... но так кажется лишь теперь. Природа «эффекта Эдисона» была понята лишь в 1896—1903 годах.

Дж. Дж. Томсон установил в 1887 году, что ток в лампе Эдисона переносят электроны. Но, быть может, это свойство именно угля? Нет, если нить металлическая или покрытая окисью кальция, тоже возникает электронный ток в вакууме. Внимание! Не забудьте — 1904 год, А. Венелт, катод из окиси кальция на металлической нити (или керне, от английского kern — ядро). Это оксидный катод, которому предстоит завоевать мир электронных ламп. Но об этом еще никто не знает.

Основная формула, описывающая термоэлектронную эмиссию (зависимость тока от температуры нити и свойств ее материала), была получена в результате работ Дж. А. Флеминга и О. У. Ричардсона и названа позже формулой Ричардсона—Дэшмана. Но до этого мы еще доберемся.

Познание природы состоит из обнаружения новых явлений и из их понимания. «Понимание» не должно сильно отставать от «обнаружения» — хотя бы потому, что в этом случае и «обнаружение» идет успешнее. Именно Дж. А. Флеминг обнаружил в 1904 году явление, лежавшее «под ногами» — явление односторонней проводимости или «детектирования». Если к дополнительному электроду (называемому обычно анодом) присоединить не положительный, а отрицательный полюс анодной батареи, ток идти не будет. Действительно, электроны, эмиттированные нитью (называемой обычно катодом), не полетят к отрицательно заряженному электроду, а вернутся к нити. Не странно ли, что на то, чтобы перекинуть два провода, идущих от батареи, потребовался 21 год? Это была цена, заплаченная за понимание.

3. Одна сетка и целый мир впридачу

В 1906 году Ли де Форест ввел в лампу третий электрод — сетку (назвали ее так потому, что она и была сеткой из тонких

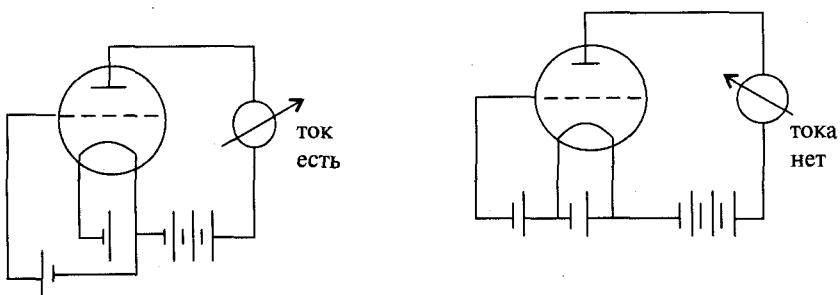


Рис. 2. Принцип работы триода

проводочек), расположив ее между катодом и анодом (рис. 2). При положительном (относительно катода) напряжении на сетке электроны, эмиттированные катодом, притягивались сеткой, пролетали сквозь нее и устремлялись к аноду. При отрицательном напряжении на сетке электроны отталкивались ею и ни до нее, ни, тем более, до анода не долетали.

Так был открыт принцип работы всех электронных ламп — напряжение в одной (сеточной) цепи управляет током в другой (анодной) цепи. Поскольку управляющее воздействие — напряжение, такое управление называют электростатическим. Передача сигнала из одной цепи (цепи управления) в другую осуществлялась тогда посредством устройств, называемых «реле». Ток управления протекал по катушке, железная деталь перемещалась и контакты в другой цепи замыкались или размыкались. По аналогии с реле первые электровакуумные приборы — триоды — называли «пустотные реле». «Пустотные» — вместо «вакуумные».

Почему электронная лампа была создана не в конце XIX, а в начале XX века? Иногда говорят, что для создания чего-то нового должен быть достигнут соответствующий уровень развития техники. Конечно, синхрофазotron не мог быть построен в XVIII веке, но развитие техники обеспечивало возможность создания триода — а вместе с этим и начало развития радиотехники и до 1906 года. Могут сказать, что у людей еще не возникло потребности в радиотехнике. Но это просто не-

3. Одна сетка и целый мир впридачу

верно — быстрое развитие радио и телефона показывает, что людям они были нужны, а уж для чего их использовать, люди придумали бы и на сто лет раньше. Даже король Артур сообразил бы, как управлять своими рыцарями по радио и сэр Ланселот догадался бы назначать по телефону свидания своей любимой — королеве Дженевре... Что же это за мифический «общий уровень» развития, который все определяет? Это общий уровень людей, которые по своим знаниям и области деятельности «технически» способны совершить то или иное открытие. А уровень сознания людей не может изменяться слишком быстро. Идеям, мыслям, отношению к той или иной области применений нужно время на созревание. Время, поддержка других людей, общество коллег и единомышленников. Все это было нужно и тем, кто создавал первые электронные лампы.

Что такое электронные лампы, те, о которых эта книга? Точные определения обычно ищут всего лишь для того, чтобы обосновать, почему автор писал о чем-то одном и не писал о другом. Но и из поиска определений можно извлечь пользу. Действительно, пытаясь дать определение кошки, надежно отличающее ее от собаки, мы узнаем много интересного о кошках и собаках. В частности, то, что все кошки имеют, в отличие от собак, втяжные когти. Все, кроме гепарда. Итак, даже отличить кошку от собаки не так-то просто.

Можно попробовать дать определение так: указать, частью объектов какого, более широкого, класса являются искусственные и чем они отличаются от объектов этого более широкого класса. Например: электронная лампа — прибор, частью которого являются электроны в вакууме, отличающийся тем, что эти электроны используются для преобразования энергии и информации. Давая такое определение, мы «отстроились» от приборов, в которых электроны используются для воздействия на материю (например, электронно-лучевых сварочных установок или приборов, в которых электроны используются для ионизации газа — масс-спектрометров). А также от приборов, цель которых — изменение самого потока электронов (например, электронных микроскопов). Правда, в таком опре-

Глава 1. В начале пути

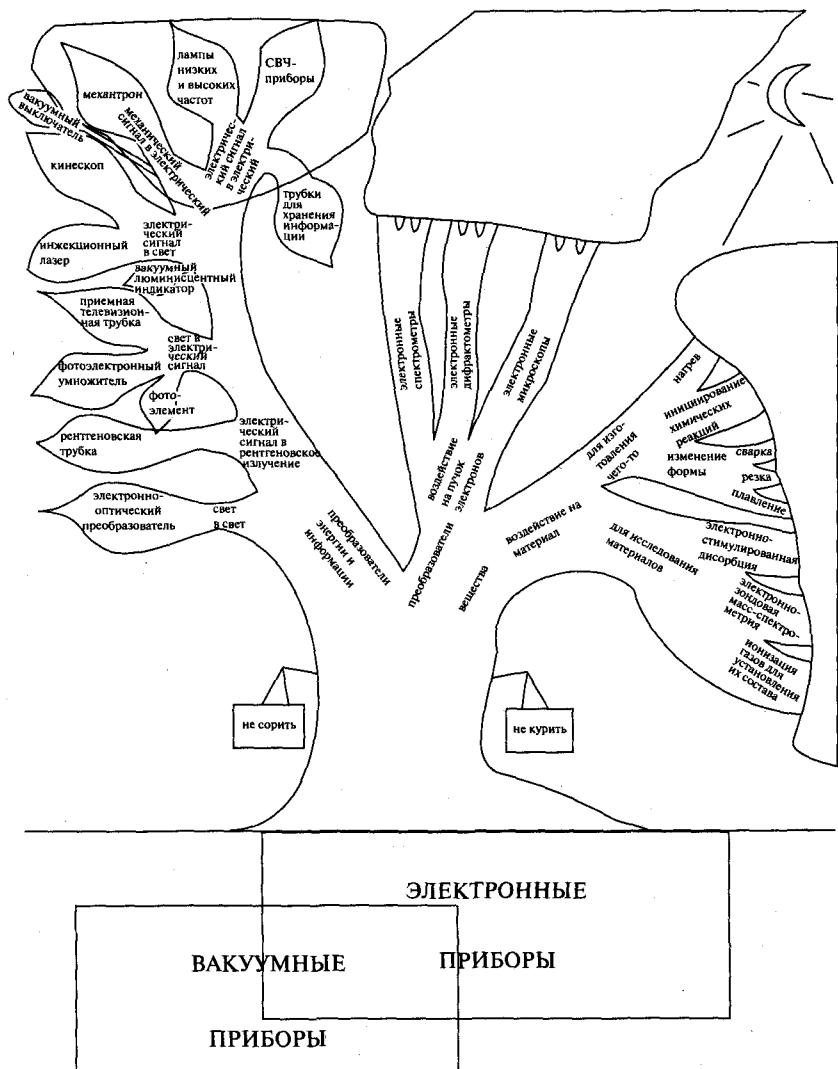


Рис. 3. Дерево, на котором растут лампы

4. Электронное дерево и что на нем растет

делении есть свой «гепард», но о нем позже. А пока что — изобразим дерево, на котором растут электронные лампы (рис. 3).

4. Электронное дерево и что на нем растет

Дерево это растет из «строительного материала» — вакуума и электронов, а кончается конкретными приборами, осуществляющими те или иные функции. Там, где нам не важно, чем кончаются ветви, они не видны из-за облаков. Что поделаешь, наши знания в данный момент всегда ограничены и только поэтому существует наука. Впрочем, для ее успешного существования нужна уверенность в том, что они ничем не ограничены «в принципе», что любая истина об устройстве Природы и Общества когда-то (может быть, завтра) и кем-то (может быть, вами) будет найдена.

Одни и те же функции могут осуществляться приборами, построенными из разных строительных материалов, поэтому кроны разных деревьев могут сближаться. Так, преобразование электрического сигнала в свет может осуществляться и обычной электрической лампочкой и полупроводниковыми приборами, которые растут на другом дереве (ибо вакуум для их работы не обязателен). В левой части дерева «ветви» доведены до «листьев» — конкретных типов приборов. Впрочем, если присмотреться повнимательнее, то и внутри типа есть подтипы и так далее... Но пока остановимся на этом.

Что же понимают под электронными лампами? В литературе бытует разные понимания — и более широкие, и более узкие. Область приборов, обсуждаемых в этой книге, обведена контуром в левой верхней части дерева.

Классифицировать электровакуумные приборы можно, конечно, не только по виду преобразуемых сигналов. Например, можно в качестве основы для классификации использовать особенности движения электронов. Приборы, в которых электроны движутся в виде узкого и длинного луча, называют электронно-лучевыми. Объединение этих приборов в один класс имеет определенный смысл — такие приборы имеют

в конструкции много общего. Можно выделить класс мощных приборов, имеющих свои особенности, класс высоковольтных приборов и другие классы. При этом один и тот же прибор окажется входящим в несколько классов. Ничего удивительного в этом нет — вы и школьник (или студент или...), и читатель этой книги, и мальчик (или девочка), и житель такого-то города (или села, или...), и дочь (или сын) и так далее. Каждый человек, как говорят психологи, исполняет несколько «социальных ролей». Или, как сказал Шекспир, «мир — театр, люди — актеры». И для человека и для электронного прибора важно хорошо справляться со всеми ролями.

5. Задачи, поставленные жизнью

В правилах поведения руководящих инженеров фирмы «Дженерал электрик» первым пунктом, значится: «твоя задача — проводить общую техническую политику и решать ежедневно возникающие затруднения» (фото 3). Развитие — это и есть решение возникающих задач и проведение общей политики, которая есть не что иное, как накопленный десятилетиями опыт решения задач, позволяющий готовиться к решению завтрашних задач. Поэтому при рассказе о каждом электронном приборе в этой книге удалено внимание возникающим задачам и путям их решения. Но откуда берутся задачи? Есть такое выражение — «задача, поставленная самой жизнью». Жизнь электронных ламп — это удовлетворение требований, предъявляемых заказчиками, предъявление требований к тем, для кого «заказчиком» являются лампы (например, разработчики материалов), и самоусовершенствование, которое — по крайней мере у ламп — есть интегрированная и опережающая реакция на потребности жизни.

Лампы нужны человеку не сами по себе, а в радиоприемниках, радиопередатчиках, телевизорах, усилителях и так далее. Свойства ламп, которые надо знать для их использования, называют параметрами, а такое их изменение, которое позволяет сделать, например, телевизор, лучше — улучшением

5. Задачи, поставленные жизнью

Из правил поведения руководящих инженеров фирмой „Дженерал электрик.“

1. Твоя задача приводить общую техническую политику и решать ежедневно возникающие затруднения.
2. Будь внимателен к пригласке и улучшающим предложение, даже если они тебе неофициально ничего не дают.
3. Будь внимателен к чужому мнению, даже если это неберно.
4. Умей бесконечное терпение.
5. Будь беспристрастен, никогда не раздражайся.
6. Будь практик.
7. Будь спрятанный, особенно к подчиненным.
8. Не делай замечание подчиненному, в присутствии третьего лица.
9. Всегда благодаря подчиненным за хорошую работу.
10. Никогда не делай того, что могут сделать твои подчиненные, за исключением случаев, когда это связано с опасностью для жизни.
11. Выбор и обучение лучшего подчиненного всегда более благородной задачи, чем выполнение работы самим.
12. Если то, что делают твои сотрудники не расходится с твоим мнением, давай им полную самостоятельную свободу действий.
13. Не спорь по мелочам, мелочи только затрудняют работу.
14. Никогда не используй свою власть до тех пор, пока все остальные средства не испольованы, и в этом случае примени ее в максимально возможной степени.
15. Не бойся, если твои подчиненные умнее тебя, а гордись твоими подчиненными.
16. Если твои распоряжения оказались ошибочными, признай ошибку.
17. Всегда старайся во избежание недоразумений обрасти распоряжения в письменном виде.

Фото 3. Правила поведения руководящих инженеров ГЕ. Перевод Минэлектротехпрома, 50-е годы прошлого века (архив А. Е. Ашкинази)

параметров. Чтобы синее было синим, зеленое — зеленым, и можно было временами понять, «чего он хочет сказать», этот несчастный диктор.

Электронные лампы — это единство теории, конструирования и технологии, как и любой технический объект. Технология, конструирование и теория электронных ламп взаимодействуют не только друг с другом, но и с технологией, конструированием и теорией других приборов и устройств. Действительно, проблемы соединения разных материалов или проблемы очистки — классические проблемы электронных ламп, но и соединять и чистить приходится не только лампы. Даже у свиней, когда их содержат в чистоте, привесы увеличиваются. Или, например, проблема охлаждения элементов, в которых выделяется много тепла — общая проблема ламп, реакторов, самолетов, полупроводниковых приборов. Проблема теплоизоляции, конечно, тоже — в итоге материалы, конструкторские приемы и методы расчета, созданные в одной области техники, находят применение в других. Мир — по крайней мере мир техники — един. Можно быть узким специалистом, но чтобы быть специалистом, хотя бы узким, надо быть широко образованным.

Ясным пониманием этой истины, любовью к физике и технике электровакуумных приборов, уважением к большому пути, пройденному их создателями и желанием рассказать вам об этом автор обязан своим учителям, сотрудникам НИИ «Исток» (многие из них одновременно преподавали в моем вузе, МИЭМе): А. В. Дружинину, С. А. Зусмановскому, В. Г. Кармазину, А. Б. Киселеву, В. Ф. Коваленко, М. Л. Любимову, Н. В. Чепренину. Разумеется, я учился у многих... всех и не перечислить. Эта книга — часть моего неоплатного долга перед нашими учителями.

Цепь знания не должна прерываться. Каждый, кто узнаёт что-то и рассказывает другим, — звено в этой цепи. Можно не знать, как применить то или иное знание, не уметь или не иметь возможности его применить, но передать его другим надо суметь при всех условиях. Цепь культуры не должна

прерываться. Иначе людям опять придется добывать огонь трением двух хорошо высушенных деревянных деревяшек.

Мы росли не в самые удобные для выращивания детей годы. Например, моими игрушками были почти исключительно разобраные, а чуть позже — разбирающиеся мною, сначала с помощью отца, а потом и самостоятельно — электрические и радиоприборы. Но при этом были привиты интерес к технике и ее истории, за что я и благодарен моему отцу, заслуженному энергетику РСФСР Александру Ашкинази.

Отступление 1 — политico-историческое

Впервые я оказался перед этим музеем летом 1989 года. События назревали, но внешне это было заметно слабо. Ибо большинство людей либо не верило, что что-то изменится, либо твердо верило, что изменится, но не знало когда. Следующий раз я попал сюда летом 1990 года. Каждые 15 минут над городом с грохотом пролетал очередной истребитель. По улице Вильняус, мимо дома 174 шли редкие прохожие. Тени листьев шевелились на камнях, которыми выложена эта пешеходная улица, на украшающих ее скульптурах и фонтанах, на забавных каменных знаках-символах — ботинком перед обувным магазином, рыбой и капустным кочаном перед продуктовыми, чашей и змеей перед аптекой, почему-то двумя мудрыми обезьянами перед банком, фотокамерой перед фотоателье. Казалось — единственный, кто замечал ежепятнадцатиминутные демонстрации «грозных боевых машин» был я. А за стеклянной витриной *Siaulių visnomeninės radijo-televizijos muziejus* молча стояли радиоаппараты.

Мы открываем дверь и входим внутрь. Музей невелик — два небольших зальчика, скорее — комнаты, витрины по стенам (фото 4), около 20 экспонатов (на складе музея — примерно втрое больше, но экспозиционная площадь «не позволяет»). Самый древний экспонат — фонограф 1908 года. За стеклом — граммофоны, патефоны, радиоприемники, телевизоры и макеты телестудий, первые транзисторные приемники. Они



Фото 4. Музей радио и телевидения,

стоят, преисполненные чувства собственного достоинства — сколько лет, скольким людям они успели верно послужить. Я бы все же иногда включал их — наверное, им это было бы приятно. И человеку, долгой зимней ночью сидящему у старого приемника, какого-нибудь «Казахстана» или «Фестиваля» или даже Р-250 делается хорошо... он теплый, он как будто живой, и его шкала светится в полутьме комнаты... И Человек делается не одинок в этом мире.

Не потому ли спокойно шли люди, вроде бы даже и не замечая грохота над городом? Не потому ли, что здесь были такие музеи? Конечно, нет — но такие музеи есть признак определенного душевного здоровья, определенной гармонии. Как кошки, мирно дремлющие на газоне посреди города (или задумчиво созерцающие прохожих). Как чистые мостовые. Как три уникальные музея в одном городе — музей радио



Шяуляй, Литва (фото автора)

и телевидения (не единственный ли в мире?), музей старинных велосипедов и, наконец, музей кошек, точнее — всяческих их изображений (есть еще один — в Швейцарии). Я разговаривал с разными людьми и, показывая глазами вверх, произносил «разлетались, да?» Один улыбнулся и сказал «праздник отмечают» (была годовщина пакта Молотова — Риббентропа), другой заметил «раньше они, заходя на посадку, сливали над городом горючее». Большинство — по крайней мере внешне — игнорировало мальчишеские демонстрации «старшего брата».

Музей радио и телевидения — общественный. Это означает, что вход в него бесплатный, что живет он за счет местных радиопредприятий. Собственно, это тоже элемент цивилизованности — ибо цивилизованный бизнес всегда поддерживает культуру. Это его свойство, как свойство его представителей есть ножом и вилкой, а не руками. Открытие музея в Шяу-

Глава 1. В начале пути

ляе можно рассматривать как закономерность — ибо первые в Литве опыты с радио были сделаны в 1918 году именно здесь, в 1924 году здесь была основана радиолаборатория, в 1930 — осуществлен прием телепередачи (из Берлина) и, наконец, в 1957 — были введены в строй первые любительские радиостанции. Названия «Темп» и «Щилялис» в СССР были общеизвестны. И это — тоже Шяуляй. Здесь была сделана радиоаппаратура для обеспечения предвыборной кампании Ельцина. Здесь были смонтированы передвижные ТВ-передатчики, когда потерявшие голову политики нашли не обремененных моральными тормозами военных и захватили телебашню в Вильнюсе.

Во многих городах были и есть радиолюбители и радиопромышленность. Значит дело и в том, что в 1978 году энтузиасты устроили в Шяуляе радио и телевизионную выставку. А в 1982 году был открыт музей. Так проявилась культурная преемственность — видимо в ней и дело.

Легко доказывать, что нужны вещи очевидные — хлеб, нефть. Легко призывать к тому, что (как известно психологам и политикам) находит отклик в сердцах. Трудно доказывать, что нужны музеи. Можно, конечно, долго говорить об образовательной и педагогической деятельности, которую можно вести на их базе, о подготовке кадров для радиопромышленности, о пропаганде радиолюбительства, об использовании музеев в качестве туристских объектов. И все это будет верно. Но есть куда более убедительный довод «за» музеи: в нормальных обществах они есть. Создавая и поддерживая музеи, мы создаем нормальное будущее и поддерживаем ростки нормы в настоящем.

Глава 2

Самые простые лампы и их непростые проблемы

1. Возвращение на Итаку

Чтобы наше изложение развивалось так же успешно, как электронные лампы, будем следовать логике их развития — задачам и их решениям. Изложение построено так: лампа — ее параметры — чем определяются — чем ограничиваются — пути расширения ограничений: технологические, в том числе применение новых материалов, конструктивные, теоретические, в том числе применением новых принципов работы — итак, новая лампа — теперь все это о новой лампе и так далее. Конечно, лампы развивались не последовательно — одна за другой, а сразу по нескольким путям. Ведь улучшать хотелось сразу все или хотя бы несколько параметров — хоть немного, «на эн процентов». Это было традиционное для СССР планирование «от достигнутого» — впрочем, понятно, что планировать технический прогресс так не надо. Гоночный автомобиль и микролитражка имели, конечно, общего предка, глотавшего бензин литр за литром и развивавшего бешеную скорость 40 км/час, но конструкторы, создавая их, преследовали разные цели, хотя и работали одновременно. В книге же об автопрогрессе рассказываться о них будет последовательно, в главах «битва за километры» и «схватка за литры». Другое дело, что после чтения хорошей книги читатель должен видеть историю развития такой, какой она была, параллельной и одновременной.

Обратимся к истории. Перед нами, в дымке почти вековой дальности лежит остров Итака. Помните — сюда вернулся

Одиссей, он был отсюда родом. Предпримем же «возвращение на Итаку» и посмотрим, откуда родом электронные лампы. Волны — не электромагнитные, с ними мы еще встретимся, а средиземноморские — бьют в берег, дерево — не дерево электронных приборов (рис. 3), а оливковое — вцепилось корнями в берег. Камера наезжает и мы видим эскиз первой электронной лампы.

На дворе — 1883 год, Эдисон набросал эскиз, позвал помощника и сказал — «сделайте, пожалуйста». Он мог бы сказать — «начните, пожалуйста, новую эру». Но он не знал, что она начинается — хотя и знал, как ее начать.

Кое-что о начале этой эпохи вы уже знаете. В диодах Эдисона, Венельта и Флеминга протекал электронный ток. Но Содди обнаружил в 1908 году, что при улучшении вакуума ток уменьшается. Эти результаты были подтверждены в 1912–1914 годах Фриденхагеном, Принтом и Паркером. Возникло естественное — хотя и неверное — предположение, что в абсолютном вакууме тока не будет совсем. Вакуумная электроника, казалось, была готова умереть, не родившись. Пророческую догадку высказал еще в 1908 году Лилиенфельд: уменьшение тока при улучшении вакуума вызвано образованием в лампе отрицательного заряда. Действительно, уже летящие через зазор катод-анод электроны имеют отрицательный заряд, отталкивают электроны, только вылетевшие из катода, и уменьшают этим ток, текущий через зазор. А при наличии газа электроны ионизуют его, новые электроны начинают двигаться вместе со старыми к аноду, а положительные ионы, имеющие в среднем в 60 000 раз большую массу, уходят из зазора медленно и создают в нем поэтому большой положительный заряд, компенсирующий заряд электронов. Даже наоборот, они могут вытягивать из катода дополнительные электроны... но стоп! Мы перескочили от Лилиенфельда прямо в сегодняшний день. Ибо эти эффекты являются сейчас объектом исследований, о чем ниже будет рассказано.

Триод Ли де Фореста тоже работал с компенсацией пространственного заряда, а чисто вакуумные лампы создали:

1. Возвращение на Итаку

диод — в 1913 году У.Д. Кулидж и в 1915 году С. Дэшман, триод — И.Лэнгмюр и Г.Арнольд в 1915 году. Для получения в них того же тока, что и в лампах с частичной компенсацией пространственного заряда требовались большие напряжения катод-анод, но зато они работали стабильнее. Ибо хотя хороший вакуум и труднее получить, чем плохой, но для работы лампы с компенсацией нужен не просто плохой вакуум, а стабильно плохой. А это обеспечить уже много сложнее и в данном случае сложнее, чем хороший вакуум.

Основная формула, описывающая работу электронных ламп, была получена И.Лэнгмюром в 1915 году. Называют ее чаще всего не формулой Лэнгмюра, а «законом 3/2». Люди с совестью могут утешить себя рассуждением, что человек, сделавший для физики и химии столько, сколько сделал Ирвинг Лэнгмюр, не стал бы тратить время на приоритетные споры. Итак: ток, текущий через вакуумный зазор, пропорционален площади электродов, напряжению на зазоре в степени 3/2 и обратно пропорционален квадрату зазора (рис. 4). При этом предполагается, что из катода эмиттируется в вакуум столько электронов, сколько надо для протекания любого тока, или, как говорят, «эмиссия катода неограничена».

Формула Лэнгмюра была выведена для случая, когда размеры электродов велики по сравнению с зазором, электроды плоски и параллельны, а электроны покидают катод с начальной скоростью, равной нулю. К последнему условию мы еще вер-

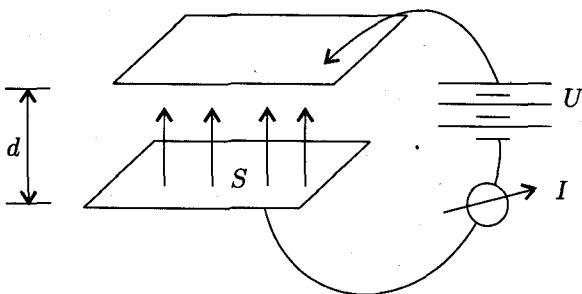


Рис. 4. Ток в вакуумном зазоре

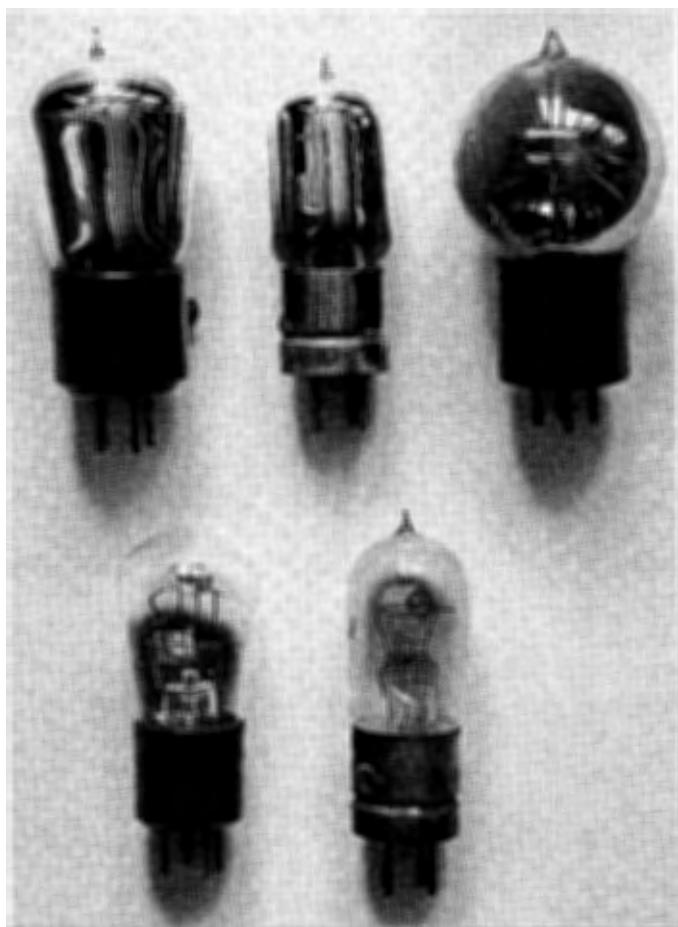


Фото 5. Первое поколение советских ламп. Вверху — МикроДС, Микро, УТ-1, внизу — П-7, Р-5 (20-е годы прошлого века) (фото 5-10, 12-14 — Б. З. Кантора, поле снимка примерно 20 см на 15 см)

немся, а пока укажем, что позже были получены формулы для электродов и других форм. Но все это было позже, а пока что стало ясно, почему в лампах с хорошим вакуумом ток меньше, но стабильнее. И электроника пошла по пути малых,

2. Черный ящик, его параметры и начинка

но стабильных токов, чтобы много десятилетий спустя заинтересоваться древним способом увеличения тока... «Впрочем, все это было в начале, а начало прекрасно всегда» (А. Галич).

В заключение этого параграфа поясним, что данная книга не призвана стать учебником именно по истории ЭВП, и к вопросу, кто, что и когда предложил, мы обращаемся далеко не везде. В сети и бумажных книгах есть довольно много материалов по этой теме, хотя они несколько разрознены — в одном источнике речь идет об одном приборе, в другом — о другом. В одной книге назван один изобретатель, в другой статье — другой, на сайте — третий. Может быть, когда-нибудь и мы обратимся к этой теме. А пока — к лампам (фото 5).

2. Черный ящик, его параметры и начинка

Вернемся к диоду Эдисона и посмотрим на него снаружи. Это «черный ящик» (так в технике называют то, внутренним устройством чего пока не интересуются) с тремя клеммами для подключения внешних цепей (рис. 5).

«Черный ящик» характеризуется входной характеристикой $I_{\text{вх}}(U_{\text{вх}})$ и передаточной характеристикой — $I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$. Качество «ящика» тем выше, чем меньше $I_{\text{вх}}$ и больше $I_{\text{вых}}$ при некотором значении $U_{\text{вх}}$. Малое значение $I_{\text{вх}}$, или, как говорят, высокое входное сопротивление $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$ означает, что ящик потребляет мало энергии из цепи управления, большое $I_{\text{вых}}$ означает, что ящик имеет большое усиление

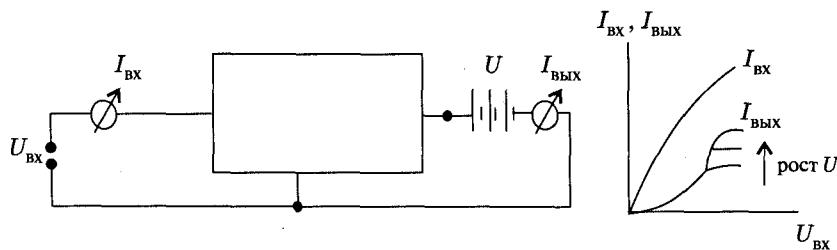


Рис. 5. Черный ящик (слева) и его характеристики (справа)

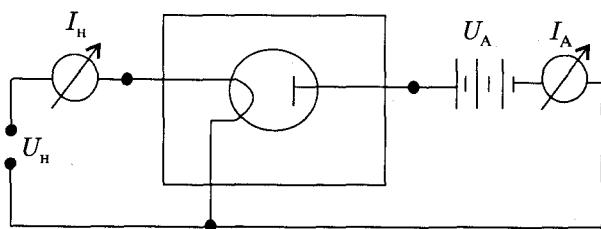


Рис. 6. Содержимое «черного ящика» — диод Эдисона

по току $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ или крутизну $S = I_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, то есть хорошо усиливает сигнал. Переходя на радиолюбительский язык, можно сказать, что низкое входное сопротивление не дает возможности подключать ко входу высокоомный источник сигнала, например, пьезоэлектрический звукосниматель, а малое усиление требует наличия большого количества таких элементов, чтобы слабенький сигнал от микрофона прозвучал на всю площадь. Мы рассматриваем довольно подробно параметры диода лишь потому, что параметрами $R_{\text{вх}}$ и S характеризуют работу и других ламп тоже. Впрочем, для них потребуется введение и других параметров. Теперь вернемся к «черному ящику» и заглянем внутрь него (рис. 6).

Входное напряжение и ток теперь будут называться напряжением и током накала, выходной ток станет анодным током, напряжение, подключенное в выходной цепи, — анодным напряжением.

Крутизна характеристики зависит от соотношения тока, определяемого законом $3/2$, и тока эмиссии — тока электронов, покидающих катод. Если ток эмиссии меньше, то весь он и приходит на анод, если ток эмиссии больше, то часть электронов возвращается на катод, а доля, определяемая законом $3/2$, приходит на анод. Ток эмиссии очень сильно зависит от температуры катода, формула для тока эмиссии была получена О. У. Ричардсоном в 1902 году и позже мы с ней познакомимся. Температура катода, в свою очередь, определяется напряжением накала. Так и получаются зависимости, показанные на рис. 5 справа и на рис. 7 слева. Крутизна накальной

2. Черный ящик, его параметры и начинка

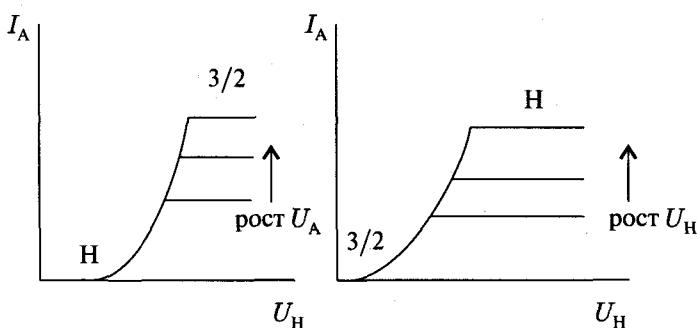


Рис. 7. Накальная (слева) и вольт-амперная (справа) характеристики диода. «Н» — область насыщения, ток анода равен току эмиссии, «3/2» — ток анода определяется законом 3/2 и меньше тока эмиссии

характеристики диода весьма велика, а вот по части входного сопротивления в схеме рис. 6 диод подкачал. Сопротивление нити накала даже для очень тонких нитей не превосходит десятков Ом. Это сопротивление намного меньше тех входных сопротивлений, с которыми хотели бы иметь дело радиотехники, и надежды исправить положение конструктивными или технологическими мерами нет. Лампу с нитью длиною в километр сделать можно (хотя и работать с нею будет неудобно), а вот проволоку с диаметром в 1 мкм сделать очень трудно. Вдобавок у лампы с таким тонким катодом будет малая крутизна — ведь чем меньше площадь катода, тем меньше ток эмиссии и, следовательно, его изменения. Для диода Эдисона вопрос о компромиссе между параметрами не успел встать остро, но в дальнейшем облик конкретных электронных ламп определялся во многом именно так... ну что ж, крутизу увеличить можно, но уменьшится прочность... при той же прочности? — можно, но увеличатся габариты... в тех же габаритах? — можно, но будет дороже... и так далее.

Принципиально новое решение — и в технике, и в жизни — это такое, которое улучшает одно не в ущерб другому. Оптимальное сочетание компромиссных и принципиально новых решений — это и есть инженерное мастерство.

Заметим, что если на анод подать отрицательное напряжение, то, как вы уже знаете, ток через лампу течь не будет. Поэтому диод можно применять как выпрямитель, для преобразования переменного (например, синусоидального) напряжения в пульсирующее (нижние половинки синусоиды «срезаются»). Но полупроводниковые диоды выполняют эти же функции настолько успешно, что к настоящему времени вакуумные диоды в аппаратуре широкого применения практически не применяются. Впрочем, у полупроводниковых приборов есть два очень слабых места — эти приборы не выдерживают высоких температур и сильной радиации. К этому вопросу мы еще вернемся. Но как «усилитель» применить диод при подаче напряжения на анод нельзя — ведь зависящий от напряжения ток будет протекать в той же, входной цепи. Конечно, можно было бы включить лампу «наоборот», подавая сигнал на анод, но ток, протекающий по нити накала, слабо зависел бы от напряжения на аноде — только за счет ухода части тока накала в вакуум и на анод. Крутизна при таком включении была бы очень мала. Впрочем, спустя десятилетия, как мы позже узнаем, похожая идея возникла и была реализована.

Существуют ли иные, кроме изменения температуры катода и напряжения на аноде, способы управления движением электронов? Конечно. Совсем не обязательно изменять напряжение на аноде — ведь движение электронов зависит от электрических полей, созданных наличием зарядов и потенциалов на любых электродах, стоящих на пути электронного потока или рядом с ним.

3. Авоська для электронов

Ли де Форест поставил на пути электронов сетку. Разумеется, она была не из капрона, а из проволочек, и отличалась от авоськи еще и тем, что должна была не задерживать картошку, а пропускать через себя электроны, управляя их движением.

3. Авоська для электронов

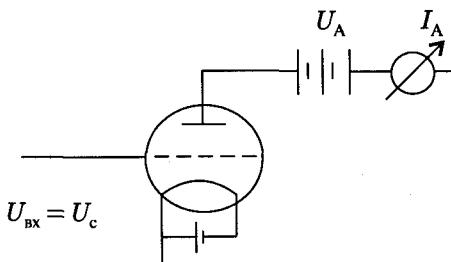


Рис. 8. Триод: входной сигнал подается на сетку

Теперь управляющий сигнал надо было подавать на сетку (рис. 8), а выходным сигналом по-прежнему был анодный ток I_A . Посмотрим, что произошло с недостатком диода — низким входным сопротивлением. Недостаток устранен, причем радикально. Входное сопротивление увеличено на 7 порядков, а некоторые дополнительные меры, о которых будет рассказано дальше, позволяют увеличить входное сопротивление еще во столько же раз. Почему входное сопротивление возросло так сильно? При отрицательном потенциале сетки относительно катода электроны, эмиттированные катодом, вообще не попадают на сетку (она их отталкивает) и входной ток может протекать только по стеклу. Конечно, стекло не идеальный изолятор, но довольно хороший. Правда, некоторые электроны попадают все же на сетку, но их оказывается немного. С этими электронами мы еще встретимся, когда речь зайдет о лампах, специально сделанных так, чтобы входное сопротивление было очень велико, а пока нам важно знать, что при отрицательном напряжении на сетке (относительно катода) входное сопротивление лампы настолько велико, что удовлетворяет большинству требований заказчиков. Но будет ли работать лампа при отрицательном напряжении на сетке U_c ? Может быть, отрицательное напряжение на сетке вообще прекратит движение электронов к аноду? Зависимость тока анода от напряжений на сетке и аноде триода показана на рис. 9.

Влияние сеточного и анодного напряжения на анодный ток аддитивно, причем анодное напряжение влияет слабее,

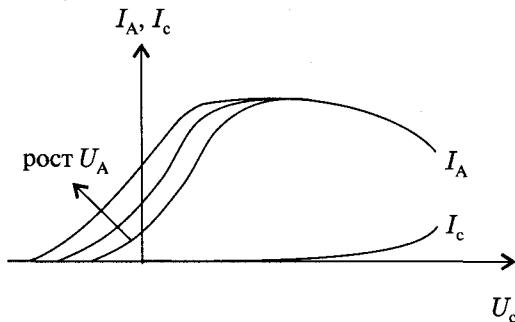


Рис. 9. Анодно-сеточные характеристики триода

ибо поле, созданное анодным напряжением в районе катода, ослабляется сеткой. Итак,

$$I_a = \sqrt{\left(U_c + \frac{U_A}{m} \right)^3},$$

величину m называют *усилением* (смысла такого странного названия станет ясен из дальнейшего), и говорит она о том, во сколько раз изменение напряжения на сетке влияет на ток сильнее, чем изменение напряжения на аноде. Итак,

$$m = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_c} : \frac{\Delta I_A}{\Delta U_A}.$$

Крутизна зависимости I_a от U_c — $(\Delta I_A)/(\Delta U_c)$, где ΔI_A — изменение анодного тока, вызванное изменением сеточного напряжения U_c так, естественно, и называется — крутизной. При положительных напряжениях на сетке появляется сеточный ток I_c , а при его росте начинает уменьшаться анодный ток. Но этот режим для работы триодов уже нехарактерен.

Итак, работа триода характеризуется двумя основными независимыми параметрами — крутизной и усилением. Иногда вводят еще и третий — отношение усиления к крутизне. Оно равно

$$\frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$$

4. Вторая сетка помогает первой

и называют его, естественно, внутренним сопротивлением.

За что же надо бороться? Оказывается, крутизна определяет способность лампы усиливать радиосигналы, а коэффициент усиления — способность лампы усиливать низкочастотное (звуковое) напряжение. Поэтому в зависимости от предназначения лампы надо бороться (как и следовало ожидать) за разные параметры.

4. Вторая сетка помогает первой

Но, однако, история триодов началась с другого. Для работы первых триодов нужно было анодное напряжение во много десятков вольт. Питались тогда радиосхемы от батареи, а соединять последовательно сто элементов не хотелось. Позже, когда радиоаппаратура стала питаться в основном от сетей переменного напряжения, допускающих легкое его повышение путем трансформации, острота проблемы уменьшилась. Но проблема не исчезла совсем, а кроме того, на путях уменьшения анодного напряжения было найдено и решение проблемы большого усиления.

Итак, почему триоду нужно иметь большое анодное напряжение? Потому, что при этом получается большой анодный ток. Если анодное напряжение уменьшить, то уменьшится ток и, следовательно, крутизна. Как разорвать эту цепочку? Как получить большой анодный ток при малом напряжении? Казалось бы, ответ прямо следует из формулы Лэнгмюра — приблизив анод к катоду. Да, но при этом анодное напряжение начинает сильнее действовать на ток и, следовательно, — действие — то сетки остается таким же! — уменьшается усиление. А это тоже не здорово. Итак, надо и приблизить анод к катоду и не приблизить его... Наверное, примерно так рассуждал И. Лэнгмюр, предложивший в 1913 году ввести в триод дополнительную сетку, находящуюся ближе всего к катоду, и подать на нее положительное напряжение. Эти лампы были названы «двухсетками», и они действительно работали при меньших анодных напряжениях — 10—20 В против

100 В. Но с годами получать высокие напряжения становилось все легче и легче и, казалось, век двухсеток кончился, не начавшись. До возрождения идеи «двухсетки» в электрометрических лампах (о них мы узнаем позже) было еще далеко.

Второе рождение второй сетки произошло в 1926 году. В. Шоттки и А. Холл предложили расположить вторую сетку наоборот, ближе к аноду. Прианодная сетка экранировала катод от анода и, следовательно, увеличивала усиление. Эта лампа была названа тетродом. Так была решена проблема малого усиления триода.

Теперь вспомним о третьем недостатке триода — малой крутизне. Из формулы Лэнгмюра видно, как ее увеличить — приблизить сетку к катоду. На этом пути за двадцать лет (с начала сороковых до конца пятидесятых годов прошлого века зазор сетка—катод был уменьшен в 10 раз — с 200 мкм до 20 мкм. Но это потребовало создания технологии изготовления проволоки диаметром 7 мкм (в 7 раз тоньше волоса) и радикального изменения технологии и конструкции ламп. Ведь мало изготовить эту проводку, надо еще сделать из нее сетку, на что-то намотать, как-то закрепить... Все это было сделано, и крутизна была увеличена, но все же лампы с такими сетками были сложными в производстве и дорогими. Другой путь — это был опять путь «двухсеток». Положительная прикатодная сетка увеличивала ток и увеличивала крутизну.

Впрочем, лампы с прикатодными сетками даже с третьего захода не вытеснили прочие. У всякой хорошей вещи есть недостатки, кроме того, малый зазор катод—сетка оказался нужен и для ламп, работающих на высоких частотах (порядка 1 ГГц). Зачем — мы узнаем позже, а пока заметим, что чем меньше зазор, тем больше влияет на параметры лампы его изменение. Так что мало сделать зазор малым, надо его сделать мало изменяющимся и от лампы к лампе и в процессе эксплуатации. С другой стороны, сильная зависимость параметров лампы от положения ее электродов использована в приборе, именуемом «механотрон». Оболочка этой лампы

5. Что позволено триоду, то не позволено тетроду

сделана гибкой и, нажимая на нее, можно перемещать один из внутренних электродов.

Такие приборы позволяют замечать перемещения около 2 нм или измерять силу $2 \cdot 10^{-7}$ н. Это примерно вес слова «механотрон», написанного хорошей (то есть пишущей тонко) шариковой ручкой. Существует еще один способ увеличения крутизны ламп. Но он применим не только к триодам, а к любым лампам, и мы рассмотрим его позже.

А теперь попробуем воспользоваться результатами наших стараний. «Он устанавливал и настраивал радиоприемник, и теперь он включил громкоговоритель... вслушайтесь, человечишка, вслушайтесь без патетики и без насмешки, как за покровом этого смешного прибора... маячит далекий образ этой музыки богов!.. вы слышите не только изнасилованного радиоприемником Генделя, который и в этом мерзейшем виде еще божественен, — вы слышите и видите,уважаемый, заодно и превосходный символ жизни вообще. Слушая радио, вы слышите и видите извечную борьбу между идеей и ее проявлением, между вечностью и временем, между божественным и человеческим». Так считал лауреат Нобелевской премии по литературе Герман Гессе, так он написал в 1927 году в книге «Степной волк». Сейчас нам трудно понять, как было воспринято людьми той эпохи радио. Но ясно одно — без радио, телевидения и связи наша эпоха была бы совсем другой. Поглядев со стороны, мы бы не назвали ее нашей. А лампы понемногу совершенствовались — фото 6 и 7, разрабатывались мощные лампы — фото 8 и 9.

5. Что позволено триоду, то не позволено тетроду

При больших напряжениях на сетке в триоде начинал уменьшаться анодный ток (рис. 9). Ну что ж, ничего странного — электроны перехватывались сеткой и не доходили до анода. Стало быть, этот эффект должен быть у любого триода. Однако нет! В некоторых случаях при увеличении сеточного напряжения ток сетки начинал уменьшаться, а ток анода,

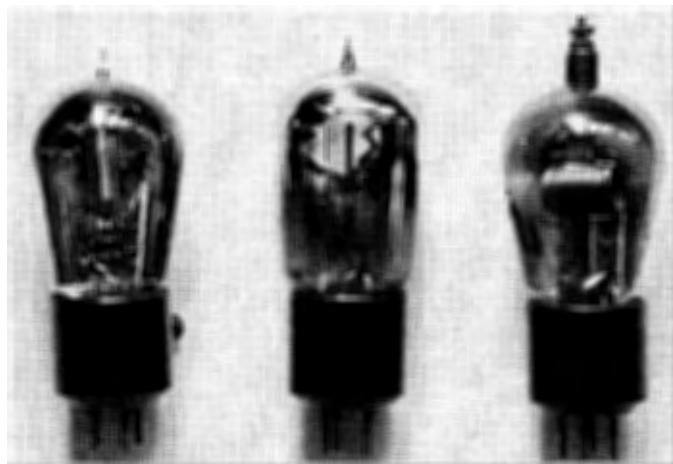


Фото 6. Представители второго поколения — ПО-74, ТО-76, СТ-80
(20-е – 30-е годы XX века)

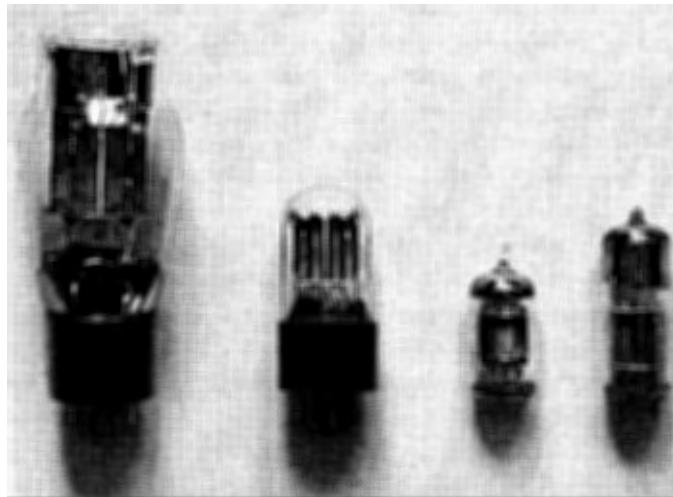


Фото 7. Представители третьего («октального», слева) и четвертого («пальчиковые», справа) поколения

5. Что позволено триоду, то не позволено тетроду

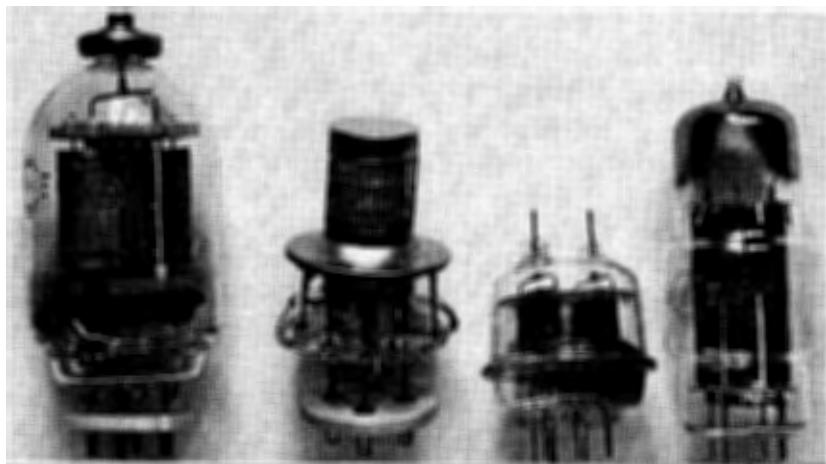


Фото 8. Более мощные лампы, вторая слева вскрыта,
видны катод и две сетки

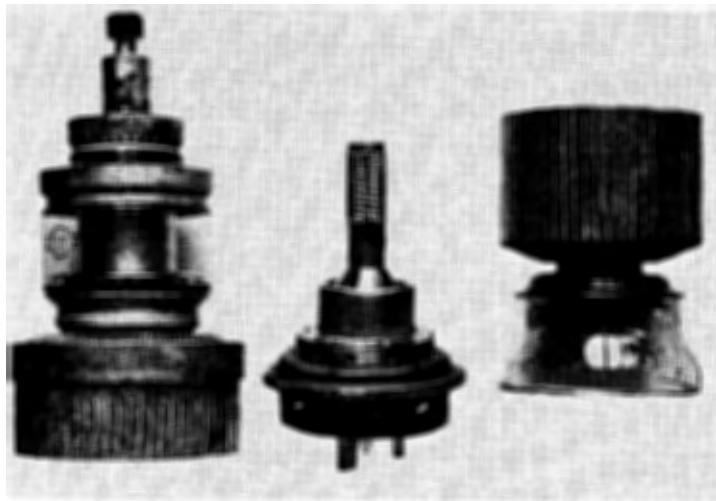


Фото 9. Еще более мощные лампы, в центре — катод и две
сетки, справа — баллон и анод той же лампы, аноды обеих
ламп — с форсированным воздушным охлаждением

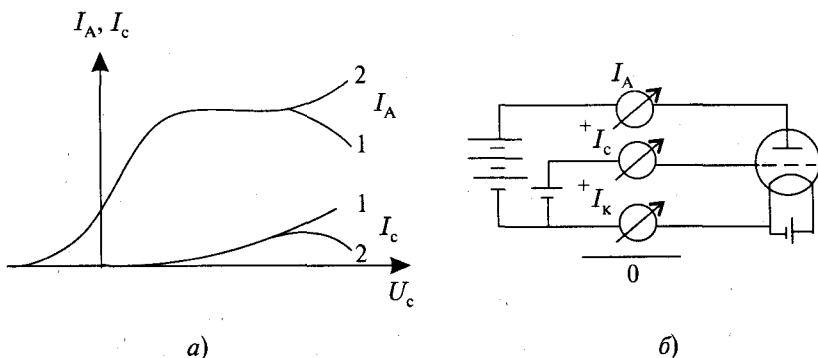


Рис. 10. Динатронный эффект в триоде (а) и 1 закон Кирхгофа (б);
1 — нормальный токоперехват, 2 — динатронный эффект сетки

соответственно, растя. Заметим, что сумма токов анода, сетки и катода должна быть равна нулю, ибо в лампе электроны не возникают и не пропадают (рис. 10). Этот закон называется первым законом Кирхгофа. Впечатление такое, что либо с сетки начинают уходить какие-то дополнительные электроны и приходит на анод, либо с анода уходят положительные ионы и приходят на сетку. Ионам в лампе взяться неоткуда — вакуум хороший, электроды не разрушаются. Итак, почему из сетки вылетают электроны? По очень простой причине — потому, что на нее попадают электроны. Входя в материал, они передают свою энергию и электронам материала и атомам. Передача энергии атомам — это нагрев материала, а получившие энергию электроны либо опять же отдают ее атомам, либо за счет этой энергии вылетают из материала сетки и летят к аноду. Явление это называется вторичной электронной эмиссией, а то, что изображено на рис. 10, называется динатронным эффектом сетки. Разумеется, вторичная эмиссия имеет место и на аноде. Но покуда анодное напряжение больше сеточного, вторичные электроны с анода не попадают на сетку (энергия основного количества вторичных электронов мала), а возвращаются на анод и на ток в цепи не влияют. Если же сеточное напряжение становится больше анодного,

5. Что позволено триоду, то не позволено тетроду

то вторичные электроны с анода достигают сетки, и ток анода все-таки начинает уменьшаться, а ток сетки опять растет.

Впрочем, для триода все это настолько важно, так как обычно триоды работают при малых сеточных напряжениях, а чаще всего — при отрицательных. Иная ситуация в тетроде. На вторую сетку (сетки принято нумеровать от катода) при работе лампы подается обычно довольно большое напряжение — сто и более вольт. В этом случае на зависимости анодного тока от анодного напряжения возникает падающий участок. При напряжении на аноде, меньшем напряжения на второй сетке, с увеличением напряжения на аноде ток на него убывает, так как с увеличением напряжения на аноде вторичные электроны, вылетевшие с него, начинают на него возвращаться.

Но с точки зрения радиотехники падающая анодная характеристика — это плохо, и многие схемы не могут работать с такими лампами. Вторичную эмиссию можно уменьшить выбором материала электродов, но этот путь мы рассмотрим позже, в главе, посвященной эмиссии. Можно бороться со вторичной эмиссией конструктивными мерами, например, сделав «камерный анод» в виде полости, в которой вторичные электроны будут «запутываться», попадать со стенки на стенку, и не будут вылетать в объем лампы. Между прочим, если сделать электрод сильно шероховатым, то он будет вести себя как «камерный анод» — электроны будут запутываться во впадинах. Так смыкаются конструирование и технология.

Но есть и третий путь борьбы с динатронным эффектом. В 1926 году фирмой Филипс был выпущен пентод — лампа с пятью электродами или тремя сетками. Третья сетка находилась между второй и анодом. На нее подавалось напряжение, более низкое, чем на второй сетке и чем на аноде, чаще всего ее просто соединяли с катодом. В этом случае все вторичные электроны возвращались на тот электрод, с которого вылетели. Проблема была решена.

6. Аппетит приходит во время еды

Вторая сетка была введена для получения большего усиления, третья — для избавления от динатронного эффекта. Но ниоткуда не следует, что их нельзя применить и для чего-нибудь другого. Например, если на одну сетку подать переменное напряжение частоты f_1 , а на другую — частоты f_2 , то в цепи анода лампы будут протекать токи с частотами $f = nf_1 \pm mf_2$, где $n = 0, 1, 2 \dots$ и $m = 0, 1, 2 \dots$ (конечно, n и m могут быть только такие, чтобы f было больше нуля). Частоты с $nf_1 + mf_2$ называются суммарными, $nf_1 - mf_2$ — разностными. Фильтрами, настроенными на соответствующие частоты, эти токи можно выделить. На «смешивании» частот f_1 и f_2 и выделении разностной частоты $f = f_1 - f_2$, где f_1 — частота принимаемого сигнала, а f_2 — частота сигнала, генерируемого в приемнике специальным генератором (гетеродином), основана вся современная радиотехника. Лампа, в которой смешиваются сигналы, называется «смесителем».

Существуют лампы с 4-мя сетками (гексод), 5-ю (гептод) и 6-ю (октод). В некоторых случаях часть лампы выполняет роль «лампы гетеродина», а часть «лампы смесителя». В этом случае передача сигнала из гетеродина в смеситель происходит не по проводам, а путем попадания электронов из одной части лампы в другую. Применение нескольких сеток позволяет улучшить параметры ламп и создать лампы, реализующие сложные функции. Но некоторые проблемы остаются, конечно, нерешенными, более того, иногда «многосеточность» и вредна.

Посмотрим, как работает обычный триод при подаче на него высокочастотного переменного напряжения. Пока напряжение на сетке больше среднего, на электроны, летящие от катода, действует большее ускоряющее поле. Если напряжение меньше среднего, ускоряющее поле тоже меньше. Если, пока электрон летел, прошел период переменного напряжения, то итоговое воздействие на электрон отсутствует — полпериода его толкали, полпериода тормозили. Итак, на частоте, на которой период переменного напряжения равен вре-

6. Аппетит приходит во время еды

мени пролета электрона, лампа работать уже совсем не можем. Чему же равно время пролета? Время пролета

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}}, \quad \text{где } d - \text{зазор, } a - \text{ускорение.}$$

Далее, $a = F/m$, где F — сила, m — масса электрона. Со своей стороны $F = eE$, где e — заряд электрона, E — поле. Наконец, $E = \frac{U_c + U_a/m}{d}$. Подставляя, получаем

$$t = \frac{d\sqrt{2m}}{\sqrt{e\left(U_c + \frac{U_a}{m}\right)}}, \quad \text{или} \quad t \approx 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d}{\sqrt{U_c + \frac{U_a}{m}}}.$$

Обычное значение знаменателя около 2, тогда $t \approx 2 \cdot 10^{-6}$ и для $d = 100-10$ мкм $t = 2 \cdot 10^{-10}-2 \cdot 10^{-11}$ с. Следовательно, лампы с зазором сетка—катод в 100–10 мкм полностью прекратят работу на частотах 5–50 ГГц. Практически ситуация, как всегда, сложнее и хуже, чем на бумаге, и лучшие СВЧ-лампы работают до 10 ГГц. Достигается это уменьшением d до 10 мкм с соответствующим ростом сложности изготовления и стоимости и уменьшением надежности и мощности. О мощности мы поговорим чуть ниже, а пока не надолго вернемся к диоду.

Чем больше сеток, тем сложнее теория, конструирование и технология, но и тем больше функций может выполнять лампа. Поэтому основной вектор развития сеточных ламп был направлен «на усложнение». Как, впрочем, и во всей технике. Однако и простые варианты не следует забывать — не исключено, что именно диоды потребуются человечеству. Причем на одном из генеральных направлений — на энергетическом.

Одно из предлагаемых решений энергетической проблемы — вывод на орбиту Земли спутников с большими-пребольшими солнечными батареями и передача полученной энергии на Землю. Поскольку провод со спутника опустить трудно (на низкой орбите провод будет запутываться при движении,

скользящие контакты на Земле построить трудно, а для геостационарной орбиты много провода потребуется), то передавать энергию надо электромагнитной волной. У лазеров мал КПД, поэтому можно попробовать передавать СВЧ-волны. Приемником излучения может быть автоэмиссионный диод. Идея А. В. Галдецкого такова — поскольку автоэмиссия сильно зависит от напряжения, то катод эмиттирует только в момент достижения максимальной мощности и электронный сгусток сначала ускоряется полем и набирает энергию. Но зазор диода выбран так, что за время пролета напряженность поля сменяется на противоположную, тормозящую, и сгусток тормозится (примерно как в клистроне), отдавая свою энергию. А теперь вернемся к вопросу о мощности.

7. Магия мегаваттов

То, что большая мощность нужна, сомнения не вызывает, дальность действия радиолокатора и радиопередатчика и способность работать в условиях помех зависят от мощности. Но большую мощность можно получить по-разному. Можно сделать один прибор с большой мощностью, а можно несколько — с меньшей и полученные сигналы сложить. По какому пути следует идти? Как и всегда, это зависит от требований, предъявляемых к другим параметрам. Например, требований к весу, габаритам, надежности.

Мощность можно увеличить либо путем увеличения тока лампы, либо путем увеличения напряжения. Поскольку максимальная плотность тока, отбираемого с катода, ограничена (в главе о катодах мы узнаем, чем именно), надо либо увеличивать площадь катода, либо напряжение. И то, и другое означает увеличение размеров лампы, поскольку при увеличении напряжения приходится увеличивать зазоры между электродами во избежание возникновения электрического пробоя. Конечно, если удвоить мощность, просто заменив один прибор на два, вес и габариты увеличатся, не менее, чем в два раза, а надежность не менее, чем в два раза уменьшится. Ведь

нужно еще устройство сложения сигналов, со своими не нулевыми весом и габаритами и своей не бесконечной надежностью. Но и прибор с вдвое большей мощностью тоже будет и тяжелее, и больше, да и разработка его отнимает какое-то время и силы. Решение проблемы зависит от того, какое решение лучше, а это, конечно, зависит от «цены» параметров — от того, что важнее. Не следует забывать, что при использовании нескольких ламп вместо одной или одной, но более мощной, проблемы, которые приходится решать разработчикам схем, в которых применены эти лампы, оказываются различными. Для принятия грамотного решения надо иметь ясное представление и о своих проблемах и о проблемах «соседей». Иначе, если и я, и мой сосед — узкие специалисты, решение примет третий, слабо разбирающийся и в том, и в другом.

Иногда — и это самое интересное — решение бывает промежуточным, когда новая лампа не является «просто увеличенной» старой, а состоит как бы из нескольких ламп в общей вакуумной оболочке. Иногда эти лампы имеют и еще какие-то общие детали. Например, стандартным решением является

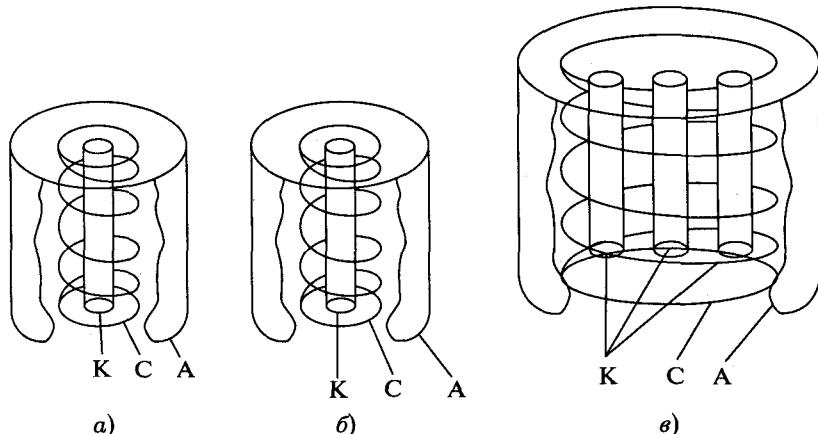


Рис. 11. Лампа-прототип (а), мощная лампа с большим катодом (б), мощная лампа с несколькими катодами (в). К — катод, С — сетка, А — анод

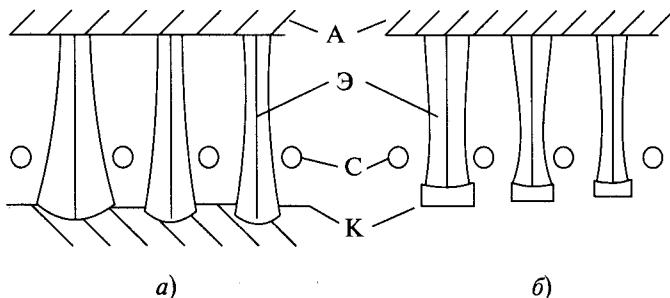


Рис. 12. Варианты многолучевой лампы (разрез).
Э — электронные потоки

наличие в лампе нескольких катодов при одной сетке и одном аноде (рис. 11).

Иногда граница между «общим» и «частным» проходит так хитро, что и не сразу разберешься. Например, в многолучевой лампе (идея многолучевой лампы была высказана В. Ф. Коваленко в 1940 году), показанной на рис. 12 а, катод нагрет весь, но покрытие, эмиттирующее электроны, заполняет не всю его поверхность, а только участки между стержнями сетки. Дополнительный прок от вариантов, показанных на рис. 12 — уменьшение тока сетки (электроны пролетают в основном мимо даже при положительном напряжении на ней).

В некоторых случаях, чтобы еще лучше защитить сетку от попадания на нее электронов, лампу помещают в сильное магнитное поле, направленное по нормали к аноду. При попытке электронов лететь поперек магнитного поля возникает сила Лоренца, закручивающая траектории электронов. Электроны «навиваются» на силовые линии магнитного поля и летят до анода, минуя сетку (рис. 13).

Проблема малых сеточных токов особо важна для ламп, которые должны иметь очень высокое сопротивление. Казалось бы, достаточно подать на сетку «достаточно отрицательное» напряжение, и задача решена. Однако ток сетки имеет несколько источников. Не даром сказочные драконы имели по нескольку голов. Технические проблемы редко решаются

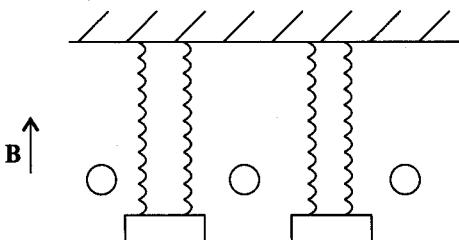


Рис. 13. Лампа с магнитным полем (разрез).

Стрелка В — направление магнитного поля

одним — даже очень могучим — ударом. Например, электроны ионизируют молекулы остаточных газов и положительные ионы летят к отрицательной сетке. Далее, при торможении электронов в материале анода возникает рентгеновское излучение и его кванты выбивают электроны (этот эффект называется фотоэмиссией) из сетки. Поэтому электрометрические лампы эксплуатируются при малых (< 10 В) анодных напряжениях, когда и рентгеновское излучение и ионизация резко убывают. Для сохранения усиления такие лампы часто выполняют с прикатодной сеткой и подают на нее положительное (относительно катода) напряжение. Так использует современная техника древнюю «двухсетку». Наконец, стараются уменьшить и утечку тока по баллону лампы, покрывая стекло гидрофобными (водоотталкивающими) покрытиями. Впрочем, все это область «изящных» ламп. Вернемся к мегаваттам.

Как бы хитро ни сочетались несколько ламп в одну, проблема противоречий между мощностью и весом/габаритами остается. Всегда желательно, чтобы было поменьше и полегче... Общая ситуация такова: чем лампа мощнее и меньше, тем у нее — внимание! — меньше надежность. В действие вступил третий фактор. Теперь важно не заблудиться в трех соснах, тем более, что это место — одно из узловых мест географии электронных ламп.

Начнем со смелого эксперимента. Подключим электронную лампу к источникам энергии и начнем увеличивать текущий через нее ток. При этом будет увеличиваться мощность,

выделяющаяся на ее сетке, так как часть тока сеткой все-таки перехватывается. Будет также увеличиваться мощность, выделяющаяся на аноде. Если ток увеличить достаточно сильно, лампа выйдет из строя. Как именно? Трудно сказать... Может быть, расплавится сетка, может быть, расплавится анод, может быть, лопнет из-за тепловых напряжений баллон, может быть, сетка или анод будут испаряться с такой скоростью, что металл напылится на изоляторы и закоротит электроды, может быть, из-за напыления выйдет из строя катод. Большинство вариантов выхода из строя связано с высокой температурой каких-то элементов лампы. Итак, чтобы сделать лампу мощную, но маленькую, надо ее хорошо охлаждать. Но это — как и многое другое — легче сказать, чем сделать. Во-первых, если мощность, которую надо отводить от электрода, достаточно велика, то и вода закипит... Во-вторых, у любого электрода есть толщина, и если электронный поток бьет в одну его сторону, то струя воздуха или воды охлаждает другую. При достаточно большом тепловом потоке охлаждение одной стороны не сможет спасти другую от перегрева. Правда, есть еще такой способ охлаждения, как излучение. Он хорош тем, что излучать может та самая поверхность, которая и греется: теплу не надо далеко ходить по материалу, чтобы излучиться. Но зато излучается оно в этом случае, как правило, внутрь прибора, совершенно зря нагревая другие детали. Конечно, внешняя сторона электрода излучает тепло наружу, вон — но до этой поверхности, как и в случае воздушного или водяного охлаждения, теплу надо еще добраться. Выделение тепла в приборе можно уменьшить, увеличивая его КПД или долю полезного использования мощности электронного потока. И это всегда стараются сделать, не столько, впрочем, из-за трудностей охлаждения, сколько просто экономия энергии. Но КПД подавляющего большинства электронных приборов не превосходит 70 % и ощутимо увеличить его не удается (об одном исключении, когда КПД можно поднять выше 90 %, будет рассказано ниже). Желательно, конечно, чтобы мощность выделялась равномерно на всей отведенной

8. «Прибор нового вида»

для нее площади. Так, в приборах с узким и длинным пучком электронов его стараются в конце пути «распустить», распределить по относительно большой площади анода. А вот в приборах для генерации рентгеновского излучения, в которых важно именно, чтобы электроны попадали в маленькое пятнышко на аноде применено такое экзотическое решение: анод сделан вращающимся, чтобы металл быстро убегал из-под пучка и не успевал перегреваться. В обычных же случаях вылезти из ловушки между тремя соснами — мощностью, весом/габаритами и надежностью — можно двумя путями — совершенствованием охлаждения приборов и созданием приборов высокотемпературных, то есть сделанных из тугоплавких материалов, соединенных методами, допускающими сильный нагрев (сварка или пайка тугоплавкими припоями). Проблемы высокотемпературных материалов и их соединения вообще довольно сложны и являются они ключевыми не только для мощных электронных ламп. Атомная техника, авиация, космическая техника... многие, очень многие технические и научные задачи зависят от того, сколько выдержит этот материал... люди держат в руках пластинку или бруск, пристально и с надеждой его разглядывают...

Проблема высоких мощностей для электронных ламп особенно важна. Это область, в которой транзисторы не смогут их заменить. Вся надежда только на электрон в вакууме. Есть еще области, где лампам никто не поможет и эти области также связаны с термостойкостью. Но сначала небольшое отступление.

8. «Прибор нового вида»

Основные современные области применения ламп, в которых полупроводниковые приборы их не заменят и не составят им конкуренции, это приборы:

- а) мощные,
- б) высокочастотные,
- в) термо- и радиационно-стойкие.

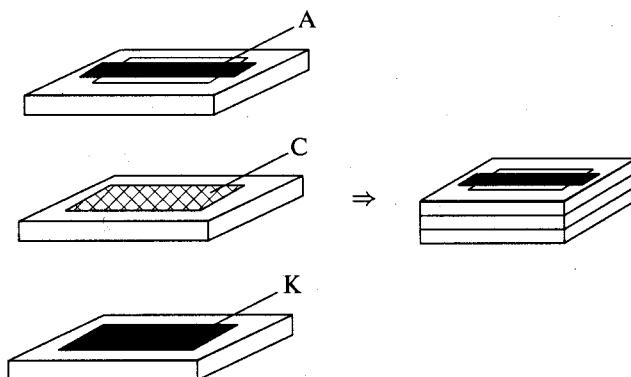


Рис. 14. Штабельная лампа

Однако совершенствованию способствует конкуренция, и поэтому посмотрим, чем ответили лампы на транзисторный вызов. Но прежде всего — в чем он состоял?

Транзисторы можно сделать маленькими и их можно делать механизированными и групповыми методами. Групповые методы — изготовление сразу нескольких приборов; когда нужны миллионы приборов, технологичность может стать определяющим фактором. Заметим, что говорить про транзистор «маленький» — нельзя. Его можно сделать таким, но если нужен транзистор мощный, то малым его не сделать — выделяющееся при работе тепло выведет его из строя. Казалось бы, в этом смысле у лампы есть преимущество: будучи сделана из высокотемпературных материалов, она могла бы быть меньше транзистора той же мощности. Да, но уж очень много в лампе деталей и очень уж сложную форму они имеют. Это же мешает механизации сборки. Нельзя ли сделать лампу из небольшого количества простых деталей?

В 1934 году Ю. А. Кацман и А. А. Шапошников предложили конструкцию «штабельной лампы». На керамических рамках закреплялись отдельные электроды, потом рамки складывались штабелем, стопкой (рис. 14). Такая лампа могла быть маленькой, ее сборку можно было механизировать. Она, кстати, была термостойкой (рамки из керамики) и высокочастот-

8. «Прибор нового вида»

ной (малые зазоры). Дальнейшее развитие этой идеи привело к созданию фирмой General Electric ламп диаметром и высотой около 1 мм. Электроды в этих лампах делались из титана, который хорошо спаивается с керамикой. Лампа состояла из чередующихся керамических и титановых дисков, керамические служили изоляторами и определяли зазор между электродами, а титановые диски выполняли одновременную роль выводов и несли в своей средней части электроды лампы.

Другой путь, впрочем, тоже основанный на напайке металлов с керамикой, позволил фирме RCA выпустить в 1959 году прибор, названный нувистором (от nuevo vista — новый вид). В этих лампах, успешно применяющихся по сей день, все

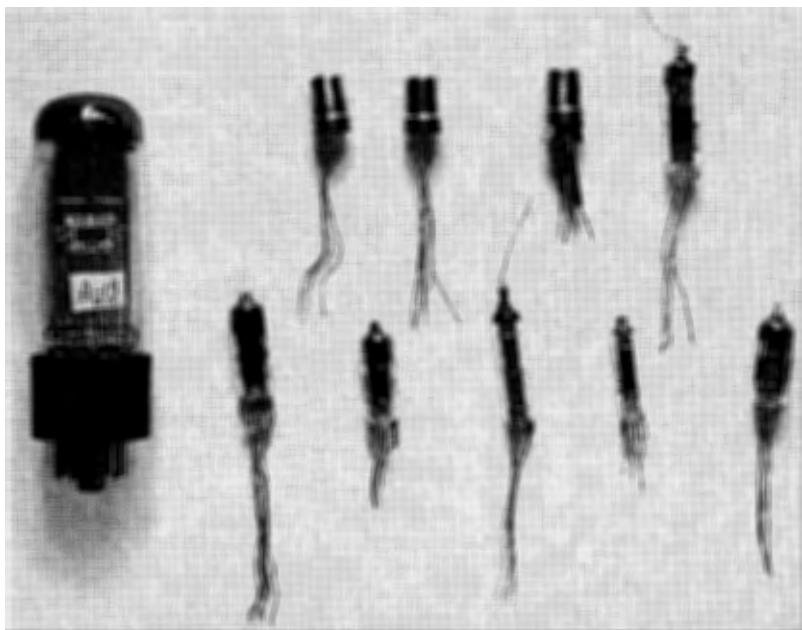


Фото 10. Слева — вакуумный полевой триод, виден пленочный подогреватель на обратной стороне катодной подложки, верхний ряд — слева три нувистора, справа — электрометрическая лампа, нижний ряд — миниатюрные стеклянные лампы

электроды крепились пайкой к керамической пластине, которая впаявалась в металлический стаканчик, служивший оболочкой лампы. Они успешно работали до температуры 550° С, их сборка была механизирована (фото 10). Электронным лампам оставался последний шаг на пути уменьшения количества деталей. Они немного подумали и сделали его.

9. Лампа без деталей

А что в этом странного? В самом деле, сколько деталей в транзисторе? А это смотря в каком. Если транзистор является частью микросхемы, то деталей в нем нет ни одной, так же, как нет отдельных деталей во всей микросхеме. Роль проводников выполняют напыленные пленки металлов, роль изоляторов — пленки окислов. Подробнее о том, что такое детали и нужны ли они, мы поговорим позже, а пока вернемся к лампам.

Первая попытка сделать лампу с уменьшенным количеством деталей посредством напыления проводящих пленок основывалась на конструкции штабельной лампы. Пленки, выполнявшие роль электродов, напылялись на керамические пластины (рис. 15).

Однако в этой лампе еще были отдельные детали, хотя серьезный шаг по пути избавления от них был сделан. Следующий вариант был уже чисто пленочный (рис. 16). Электроны летели с катода на анод над сеткой. Но наиболее эффективной оказалась некая «смесь» штабельной лампы и планар-

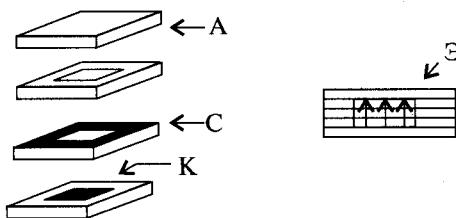


Рис. 15. Штабельная пленочная лампа. Э — электронный поток

9. Лампа без деталей

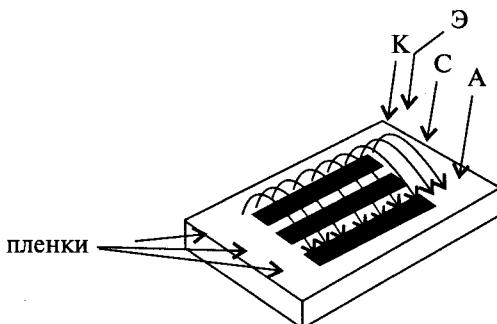


Рис. 16. Пленочный триод

ной (рис. 17). Анодная пленка нанесена на одну керамическую пластину, а катодная и сеточная — на другую. Такие лампы были созданы в 1977 году в Лос-Аламосской лаборатории. Схемы, содержащие такие лампы и другие детали и изготовленные по полупроводниковой технологии получили название вакуумных интегральных схем (ВИС). В 80-е годы прошлого века они были способны работать свыше 10 000 часов при температуре 500 °C и могли размещаться на подложках с плотностью 3000 шт./см². С тех пор они понемногу совершенствуются, то есть в частности делаются меньше, и сейчас уже могут быть размером около 100 нм. В этом случае плотность размещения может — пока теоретически — достигнуть вполне «транзисторных» значений. Кстати, катоды в них применяются в этом случае не термоэлектронные, а автоэлектронные — столбики

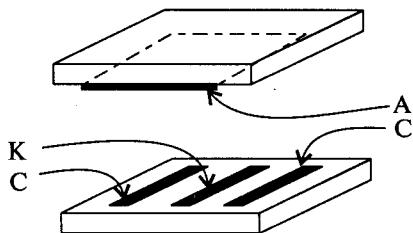


Рис. 17. Пленочный триод на двух подложках

высотой 10 нм с радиусом острия 1 нм. На минуточку — это несколько атомов.

Наиболее острой проблемой этих ламп является выбор материалов — при таких температурах керамика начинает по-немногу взаимодействовать с металлами, да и сопротивление у керамики уже несколько уменьшается. Словом, рекордные параметры даром не даются.

Пленочная технология была успешно применена и в мощных лампах. А именно, оказалось возможным не делать сетку отдельно, а наносить на катод изолирующие полосочки, а на них — проводящие полоски, выполняющие роль сетки. Зазор катод—сетка в этом случае получается малым (что увеличивает крутизну лампы) и стабильным. Так пленочная технология, получившая широкое распространение благодаря развитию полупроводниковой техники, способствовала улучшению параметров электронных ламп.

10. Последний ВИС моды 1926 года

ВИС — это вакуумные интегральные схемы. Что означает слово «вакуумные» — понятно. Но что вообще означает слово «интегральные»? В общечеловеческом смысле это означает — объединенные. Например, в полупроводниковой технике интегральная схема — это устройство, прибор и т. д., в котором отдельные схемные элементы (транзисторы, диоды, сопротивления и др.), а также соединяющие их проводники невозмож но взять в руки по отдельности. Потому что они реализованы на одном кристалле, на одном куске «твердого тела». Почему и когда применяется такое решение?

Любая вещь состоит из частей, элементов. Даже у абсолютно однородной (химически и физически) вещи можно выделить, скажем, левую и правую, верхнюю и нижнюю часть. Если этих частей выделить совсем нельзя, вещь, пожалуй, назовут веществом. Например, вода в океане — это все же вещество, а кусок льда, у которого есть верх и низ, уже можно назвать вещью. Хотя и веществом тоже — это нечто промежуточное.

В технике ситуация проще и яснее — все состоит из разнородных частей, деталей. Конструктор, когда придумывает то или иное устройство, мыслит разными уровнями. Схема радиоприемника складывается в его мозгу из сопротивлений, конденсаторов, катушек, диодов, транзисторов. Радиостанция — из более крупных блоков: приемника, передатчика, антенны и т. д. Радиооборудование самолета — из еще более крупных: радиостанции, другой радиостанции, постановщика помех, локатора и далее. Остановимся в нашем рассмотрении на уровне простейших схемных элементов (транзисторов, диодов, сопротивлений) и схем из них. Собственно, на этом уровне так мыслили радиоинженеры в течение половины века. За некоторыми мелкими, но забавными исключениями, о коих — позже.

Устройства делались так — бралась пригоршня сопротивлений, конденсаторов, диодов и посредством проводочек, припоя, канифоли и паяльника соединялась вместе. Выше описан и предшествующий этап, когда радиолюбители сами делали схемные элементы. Может ли возникнуть мысль объединить несколько схемных элементов в одну «вещь»? Да, конечно, можно собирать на маленькой плате какую-то схемку, например, усилительный каскад, вставить эту схемку в корпус и собирать схемы из таких блочков. И разработчик схем вполне сможет мыслить и конструировать такими блочками. Но возникнут по крайней мере две проблемы. Во-первых, в некоторых случаях радиоинженеру нужен доступ «внутрь» усилительного каскада, а он окажется этого лишен. Во-вторых, номенклатура даже простых усилительных каскадов будет на много-на много больше, чем и без того не маленькая номенклатура схемных элементов. Причем больше она будет не просто так, а — что хуже — по количеству равнозначных, равноважных параметров. Это сложное и важное место в наших рассуждениях, поэтому снизим скорость и повысим внимание.

У конденсатора два основных параметра — емкость и рабочее напряжение, причем довольно часто второе существенно менее важно, чем первое. Конечно, бывают важны тер-

мостабильность, паразитная индуктивность, вес и габариты, но все это вторично. Та же история с сопротивлениями: у них есть один самый главный параметр — сопротивление, один просто главный — мощность — и куча второстепенных — паразитная индуктивность, вес, габариты, шумы, термостабильность. Поэтому номенклатура сопротивлений и конденсаторов, пассивных элементов схем, проста. Даже у диодов — элементов более сложных, ибо нелинейных — номенклатура сравнительно проста, поскольку основных параметров у них два: максимальный прямой ток и максимальное обратное напряжение. Несколько сложнее ситуация с активными элементами — транзисторами, ибо у них по крайней мере три равнозначных параметра: ток, напряжение и частота. Конечно, всего у них многое больше параметров, но главные — эти.

С усилительными каскадами и прочими схемками ситуация еще сложнее. У простейшего усилительного каскада параметров, во-первых, много, во-вторых, многие из них примерно одинаково важны. Поэтому если мы хотели бы собирать все из схемок, то номенклатура была бы намного шире, а сам процесс конструирования — дороже. По этому пути радиотехника все же пошла, но намного позже, когда возникли полупроводниковые микросхемы, точнее — когда их производство стало относительно простым и дешевым. А в те далекие времена?

На заре электроники, то есть в эпоху вакуумной электроники, особых причин собирать «интегральные схемы» из ламп, сопротивлений и конденсаторов не было. Разве что для упрощения и удешевления сборки приемника, ибо если в вакуумном баллоне разместить не только две лампы (как это часто делалось и позже), но и всякие там сопротивления и конденсаторы, то есть готовый усилительный каскад, то весь остальной, внешний монтаж может выполняться низкоквалифицированным персоналом. Однако помещение деталей внутрь баллона ухудшает вакуум и в итоге это оригинальное решение не закрепилось. Хотя в некотором смысле это была настоящая микросхема: ее нельзя было разобрать, не испортив.

Разумеется, сейчас, когда говорят или пишут слова «вакуумная интегральная схема», имеют в виду не сопротивления и конденсаторы, запаянные вместе с электродами лампы в стеклянную колбу, а нечто тонкое и плоское, скорее всего на кремниевой пластине, изготовленное методами полупроводниковой техники, «одним куском», содержащее тысячи и миллионы ламп, для которых придумано даже специальное название — «нанотриоды». А потом будут нанотетроды, нанопентоды и... и история пойдет дальше, впитав в себя теорию и технологию предыдущих поколений.

Вот что рассказывает об этом в сетевой «Энциклопедии ламповой радиоаппаратуры» (13.05.2004. № 349) Сергей Комаров. Впервые «интегральные схемы» были реализованы в 1926 году фирмой "Loewe" в Германии. Они были вакуумными и аналоговыми и в качестве усилительных элементов

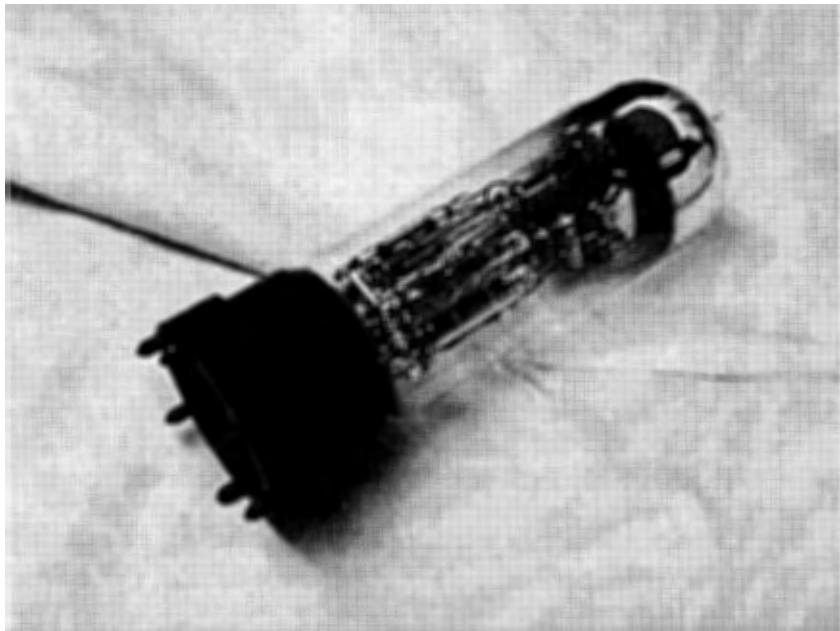


Фото 11. «ВИС» начала прошлого века (фото А. В. Казарновского)

в них использовались «бескорпусные» радиолампы, резисторы и конденсаторы. Фирме "Loewe" удалось решить серьезную техническую проблему обеспечения вакуума в общем баллоне «микросхемы» — «газящие» элементы (в основном — конденсаторы) размещались внутри баллона в индивидуальных герметичных стеклянных колбочках. Фирмой "Loewe" к 1929 году выпускался целый набор таких изделий, которые содержали два или три триода, или два тетрода, или два триода и тетрод, или тетрод и пентод, или два пентода, или три пентода, а также несколько резисторов и конденсаторов. Использовались эти схемы в производстве массовых радиоприемников. Перенеся часть схемы радиоприемника внутрь радиолампы, фирма значительно упростила его монтаж и удешевила производство. Максимально простой радиоприемник получался при подключении к интегральной схеме колебательного контура, громкоговорителя и батарей питания. На фото 11 вы можете видеть такую лампу. Да, давненько же это было...

Отступление 2 — технико-историческое

«Я родился в 1911 году, когда я начал заниматься радиолюбительством, мне лет 12 было тогда... Радиолюбители тогда собирали только лишь детекторные радиоприемники. Поскольку первая лампа Р-5 односеточная, сделанная в Нижегородской радиолаборатории, я не помню, когда точно, может быть в середине 20-х годов, до нас еще не дошла. Наиболее распространенный был радиоприемник, так называемый, Шапошникова. Катушка вертикальная стояла у меня, диаметр примерно сантиметров 10, которая моталась из звонковой проволоки, потому что тогда были электрические звонки в квартирах, проволока была диаметром 0,8 мм, медная и с двойной бумажной изоляцией, сейчас таких проводов, наверное, не делают. Вот из него мотали эту катушку цилиндрическую. Внутри у этой катушки была катушка меньшего размера, коротенькая, на которой была намотка из этой же проволоки. И она соединялась гибкими пружинками из этой же проволоки с основной катушкой. И внутренняя катушка была на оси,

и ось торчала наружу с ручкой, а от катушки большой были отводы, и был переключатель. Пуговички медные, и по ним двигался скользящий медный ползунок. И ты мог настроиться на волну. Грубая настройка была этим переключателем, переключением, а точная — ты поворачивал катушку, индуктивность или вычиталась, или прибавлялась. Детектор делался тоже, назывался этот кристалл „гален“ (от названия минерала — галенит). Это был сернистый свинец PbS. Конечно, его тоже приобрести, купить было невозможно, хотя правительство, вообще говоря, много уделяло внимания распространению радио по стране. И в то время магазины были, фирма такая была дореволюционная Зингер, швейных машин, у которой была масса магазинов по всей стране со швейными машинками и запасными частями для них. И специальным постановлением (они после революции были организованы в трест Госшвеймашина) их обязали торговать радиопринадлежностями. Потому что это была наибольшая распространенная по всей стране торговая сеть. Гален делался следующим образом: расплавлялся свинец, и очень осторожно надо было внести в него кусок серы, все это размешать и получался при остывании кристалл. И когда вылился этот свинец с серой мне на палец, и вот сколько лет прошло, почти сто лет, вот тут видно такое от ожога свинцом... Значит вот этот кристалл, когда он застывал, то молотком его разбивали, и получались грани.

Сpirаль делалась следующим образом: любая стальная проволочка, срезался ее конец наискосок, чтобы был очень острый кончик, и она навивалась в виде пружинки. А надо было двигать чем-то. Тогда были такие циркули, продавались, на карандаш надевался циркуль, и от него шла дужка такая с иголочкой. Называлась „козья нога“. Так вот, брались эти циркули. То место, которое к карандашу, разгибалось, и к пластинке приклепывалось или привинчивалось. А эта самая штучка, на конец эта самая пружинка закреплялась, вместо иголки закреплялась пружинка с острым концом, стальная. И, поворачивая и двигая, потому что шарнир же там был

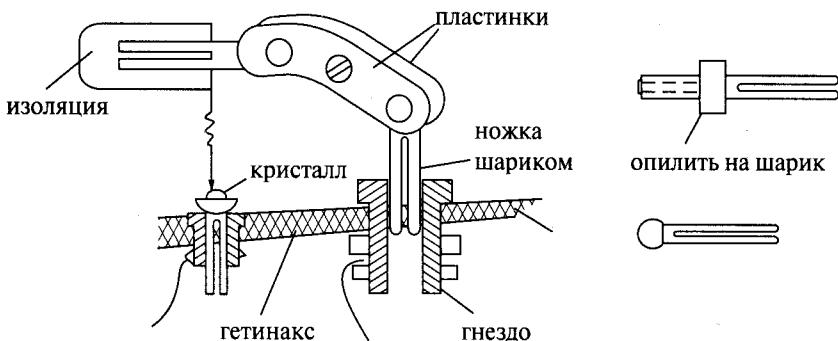


Рис. 18. Детектор и компоненты

от карандаша к этой штуке, и ты находил точку с односторонней проводимостью на этом кристалле...

Конечно, детектор из „козьей ножки“ имел совершенно неиндустриальный вид, да и места занимал много, и поэтому у следующих детекторных приемников детектор мною делался следующим образом. В вилках в то время были ножки следующего вида (рис. 18 а), так вот эта часть вручную опиливалась на шарик (рис. 18 б). Далее брались латунные пластиинки от распределительных коробок и собиралось устройство, показанное на рис. 18 в. Это была традиционная конструкция, в большинстве случаев мы все так делали.

Антenna была такая: между двумя домами, трехэтажными, на коньке крыши пробиты были две дырки, и были выставлены квадратные здоровущие длинные штанги, купленные на базаре, деревянные, для чего, неизвестно, эти штанги были, от них шли растяжки, чтобы они не упали. Все это мне стоило скандала с домуправом. И вот между двумя домами было метров 50, наверное, расстояние, не меньше, был натянут антенный канатик уже. Можно было купить в Госшвеймашине, „антенный канатик“ назывался. Был натянут антенный канатик на изоляторах, а изоляторами были просто ролики обыкновенные. В то время проводок было много на роликах фарфоровых. Была гирлянда, делалась из фарфора, и отвод в квартиру. Так вот на такую антенну, детекторным приемником, я помню, тишина,

город спит, и вдруг я слышу в наушниках: „Алло, алло, радио Вин“. То есть даже Вену можно было поймать на каких-то длинных волнах, в то время были мощные передатчики. В памяти почему-то название Давентри и позывные 2ЛО.

Первые детекторные приемники не имели конденсаторов, но сразу после приемника Шапошникова появились приемники с емкостями. Конденсаторы постоянной емкости делались очень просто, в любой поликлинике или медпункте выпрашивали немятую парафинированную бумагу, это была изоляция, а электроды делали из станиоля, оловянной фольги, в которую тогда заворачивали конфеты. С конфетами тогда было труднее, чем с парафинированной бумагой. Короткие ленточки станиоля соединялись в „кровельный“ замок. Правда нужно отдать должное промышленности — очень скоро конденсаторы появились в продаже, сначала они были бумажные, так и назывались „бумажные“.

Конденсаторы переменной емкости было сделать сложнее, но поскольку все члены нашего кружка РОУ учились в одной школе и урок труда у нас был в слесарных мастерских, мы вырезали пластины на уроке.

Был журнал, „Радио“, по-моему, он так и назывался. Журнал был, по-моему, союзный. А в Харькове было РОУ, Радио Общество Украины. И у нас был радиокружок, квартальный. Нас было там мальчишек человек 5 или 7. У нас даже были удостоверения такие „РОУ“, выдавались. Значит, наш кружок был зарегистрирован в этом РОУ.

Ламповая эпоха началась позже. Сначала были с обратной связью ламповые приемники. Да, на постоянном токе, обычно, без выпрямителя вот этого сначала, а покупали батареи. Вот эти самые, Лекланше. Или ты делал сам их или покупал. Ламповая эпоха началась с того, что в этой Госшвеймашине появились в продаже лампы Р-5, триод, потом „Микро“, тоже триод, потом „Микро ДС“ или „двухсетка“. Сначала использовалось усиление только на низкой частоте. Потом — и по высокой, и по низкой. Четырехламповые приемники 1V2, пятиламповые 2V2, то есть имевшие два каскада

усиления до детектора, детектор и два каскада — после. Потом началась эпоха супергетеродинных приемников.

Была и передающая техника. В Харькове был такой радиолюбитель Коган. Он большущий филателист был, у него была колоссальнейшая, известная на весь город коллекция марок. И вот у него был самодельный радиопередатчик. Вообще этот Коган был инженером-электриком, он постарше меня был. Потом он работал на Харьковском электромеханическом заводе. И была им спроектирована серия асинхронных двигателей, которая называлась „Украина“. А харьковская радиостанция работала на волне 477 метров, и частично она вела передачи на эсперанто. Радиостанция эта помещалась в маленьком домике. Главным инженером был товарищ Жиронкин. Я у него учеником был, у этого Жиронкина. Тогда там большие генераторные лампы были, причем когда ты находился вблизи генераторных шкафов, то на тебе индуктировалось напряжение, и если ты брал железную отвертку и приближался к шкафу с оборудованием, то из этой отвертки горела дуга к шкафу, то есть ты был источником этого напряжения. На первом этаже стояли электромашины и высокочастотные генераторы. Генератор был с зубчатым ротором, а обмотка возбуждения постоянного тока была на статоре, и обмотки переменного тока тоже были на статоре. Катушка неподвижная постоянного тока намагничивала зубчатый ротор, зубчатый ротор давал приращении высокую частоту. Передавалось в пение, и концерты, и политическая тематика. Однажды приезжал какой-то знаменитый бас. И когда я был на этом самом пульте, где выдача идет высокой частоты в пространство; так сказать, радиопередача, сидевший там радиооператор показывал на амперметр и говорил: „Во, такого еще никто не достигал“. Такая модуляция была сильная. Это какой-то бас, но какой бас, я уже не помню».

Вы слушали воспоминания Александра Ашкнази (1911–2005). Источники: Ашкнази А. Е. 70 и еще пять лет в строю. М., 2001; а также — www.n-t.org и другие сайты.

10. Последний ВИС моды 1926 года

Итак, мы изучили один тип электронных приборов, так называемые «лампы с электростатическим управлением». Впереди у нас много других электронных приборов. Но пугаться не надо! В самом деле — маленькая мышь съедает, как известно, большой кусок сыра. Делает она это очень просто — отъедая один маленький кусок за другим. Мы один кусок уже «отъели». Можно переходить к следующему.

Глава 3

Электронный прибой

1. Как он образуется

Раз есть электронный поток, то должен быть электронный океан, море или хотя бы поток? Действительно, термин «электронный поток» применяется. Что же до океана... «Не знаю, кем я кажусь миру. Себе же я кажусь маленьким мальчиком, играющим на берегу океана и время от времени находящим более красивую раковину или камешек». Эти слова принадлежат Исааку Ньютону и совсем не случайно они часто цитируются. У их автора можно поучиться и личной скромности и пониманию скромности познанной человеком части океана-природы.

На берегу океана Ньютона можно увидеть еще кое-что интересное. Например изобретатели — братья Р. и З. Вариан и независимо В. Хан и Г. Меткалф увидели там в 1939 году прибой, причем не обычный, а электронный. Заметим, что Ньютон, выражаясь образно, этого прибоя заметить не мог. Не потому, что у него было недостаточно острое зрение, а потому, что не был еще создан язык, на котором можно было бы рассказать об увиденном. Природа, как сказали бы программисты — «файл последовательного доступа» — для того, чтобы что-то узнать, надо что-то узнать, а для этого надо что-то узнать и так далее. На каждом этапе познания расширяется возможность для дальнейшего познания, а на многих этапах создается необходимый для этого язык. Для того, чтобы увидеть электронный прибой, надо было сначала узнать, хорошо узнать, что такое электрон. По-видимому, братья Вариан, Хан и Меткалф хорошо это знали.

Представьте себе электронный поток, пронизывающий две близко расположенные сетки. Пока между сетками нет напряжения, стало быть, в зазоре между ними — поля, каждый электрон вылетает из зазора с той же энергией и скоростью, с которой влетает в него. Если напряжение между сетками есть, то скорость электронов будет увеличиваться, если поле между сетками — ускоряющее, и уменьшаться, если — тормозящее. Что произойдет, если напряжение изменяется, например, синусоидально? Электроны, пересекавшие зазор при ускоряющем поле, будут двигаться быстрее тех, которые пересекали зазор при тормозящем поле. В результате электроны начнут собираться в сгустки, состоящие из про летевших зазор раньше, но при тормозящем поле и позже, но при ускоряющем поле. При дальнейшем полете сгустки начнут разваливаться, ибо более быстрые электроны будут выбегать из сгустков вперед, а медленные — отставать.

Поток электронов, вышедший из сеточного зазора, называется модулированным по скорости — ибо скорость разных электронов в нем различна. Поток электронов в области, где образовались сгустки, называется модулированным по плотности — ибо плотность электронов в сгустках большая, а вне них — малая.

Так и образуется электронный прибор — сгустки электронов, электронные волны накатываются на берег... Идея, конечно, красавая, но зачем все это нужно? Как и для чего это можно использовать?

Не следует думать, будто человеческое мышление строго логично и последовательно. И, восстановливая ход мышления ученых и инженеров, не следует изображать его слишком уж логичным. Так что, придумав прибор, названный ими «клистрон» — от греческого слова, означающего ударять, окатывать волной, изобретатели, может быть и не были строго логичны. Просто было интуитивно ясно, что на сетки можно подать и очень малое напряжение и все равно электроны собираются в сгустки, лишь бы дать им добежать до этого заветного места. Ну, а электронные сгустки — это что-то мощное,

серьезное, почти осязаемое. Так что вроде бы можно малое напряжение преобразовать во что-то большее. Только во что? Вот тут от полета интуиции пора переходить к логичности и последовательности.

2. Как его использовать

Модуляцию по скорости мы создали, пропустив электронный поток между двумя сетками. Попробуем использовать эту же систему для отбора энергии от электронных сгустков. А энергии у них много — ведь до того, как подвергнуть поток модуляции по скорости, его можно разогнать высоким напряжением, сообщив электронам большую энергию. Пусть электронные сгустки пролетают через зазор между сетками; в зазоре имеется тормозящее поле (рис. 19).

Из зазора электроны выйдут с меньшими энергиями, нежели те, с которыми они вошли в него. Но куда девалась потерянная ими энергия? Доля тока, перехватываемая сетками, мала, поэтому в данном случае энергией, идущей на нагрев сеток, можно пренебречь.

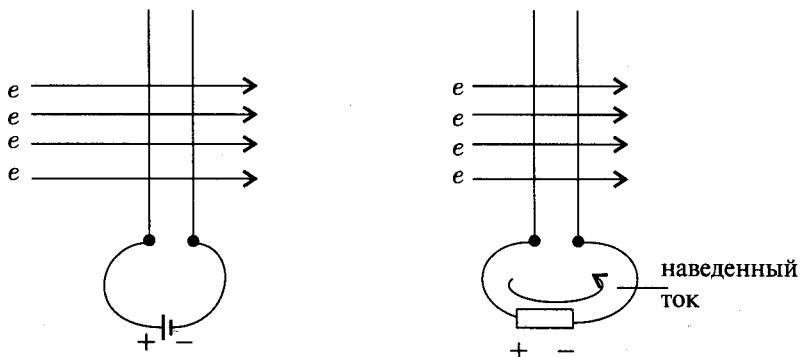


Рис. 19. Электронный поток, тормозящийся в сеточном зазоре. Слева — тормозящее поле создается источником ЭДС, справа — наведенным током, протекающим через сопротивление

Рассмотрим подробнее поведение тока в цепи электрода, к которому подлетает электронный сгусток. Сейчас мы введем принципиально важное для техники электровакуумных приборов понятие «наведенный ток».

По мере подлета сгустка от левого электрода к правому, напряженность поля между левым электродом и сгустком убывает, а между сгустком и правым электродом возрастает. Действительно, разности потенциалов между левым электродом и сгустком и между сгустком и правым электродом равны. Напряженность же поля будет больше в том зазоре, который меньше. Но раз напряженности поля слева и справа от сгустка изменяются, то изменяются и плотности зарядов на электродах и, наконец, протекает ток в цепи, соединяющий эти электроды (рис. 20).

Теперь вернемся к рис. 19 и увидим, что наведенный ток протекает не так, как ток в батарее, питающей какую-то нагрузку, а так, как ток в заряжаемом аккумуляторе. Итак, энергия, теряемая электронами, может заряжать аккумулятор или использоваться как-либо иначе. Теперь сделаем последний шаг — заменим источник ЭДС сопротивлением (рис. 19), справа. Обратите внимание на полярность напряжения, образующегося на сопротивлении в результате протекания по нему тока. Полярность такая, «как надо». Пучок будет тормозить

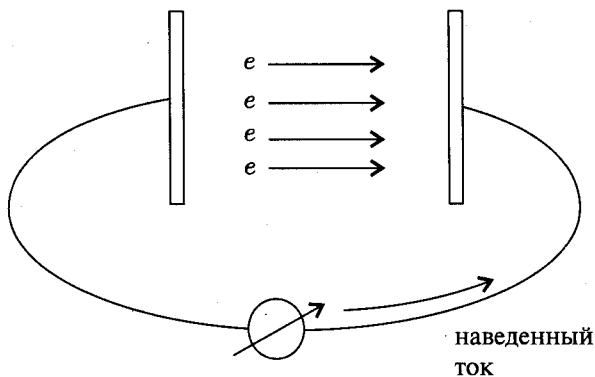


Рис. 20. Наведенный ток

сам себя, если сопротивление не равно нулю или бесконечности. Действительно, если полярность напряжения была бы иной, пучок сам собой бы ускорялся. Как тогда быть с законом сохранения энергии? А так все в порядке — энергия, потерявшаяся пучком, поступает в нагрузку и если это простое сопротивление — переходит в тепло. Конечно, можно поступить и умнее, и сейчас мы узнаем, как. Но сначала подведем кратко итог — с помощью двухсеточного зазора можно создать у электронного пучка модуляцию по скорости, затем она преобразуется в модуляцию по плотности, с помощью двухсеточного зазора можно отнять энергию у такого пучка. Это все вместе и есть пролетный клистрон. Он остался бы очередной забавной игрушкой, начало которым положил паровой двигатель Герона, если бы... если он не был нужен, позарез нужен. Именно тогда на протяжении нескольких лет были изобретены все основные электровакуумные приборы, применяющиеся по сей день в области так называемых сверхвысоких частот — СВЧ. Этот термин применяют обычно, говоря об электромагнитных колебаниях с частотами больше 3 ГГц или длинами волн короче 10 см. Такое «кучное» изобретение говорит о больших усилиях, вкладывавшихся в данную область. А «большие усилия» вкладываются людьми неспроста.

3. Зачем частотам быть сверхвысокими

Представьте себе, что надо передавать информацию с большой скоростью и в вашем распоряжении имеется передатчик, работающий на некоторой частоте f . С какой скоростью можно передавать информацию при наличии такого передатчика? Пусть мы можем управлять передаваемым сигналом, вырезая из него отдельные периоды колебаний (рис. 21).

Таким способом можно передавать информацию со скоростью f бит/с (1 бит — это один выбор из двух ситуаций — есть полуволна или нет; для передачи буквенного текста надо 5 бит на букву $2^5 = 32$ символа). Конечно, существует много видов модуляции и скорость передачи информации с их помощью различна. Но порядок величины будет таким, как мы

3. Зачем частотам быть сверхвысокими

напряжение

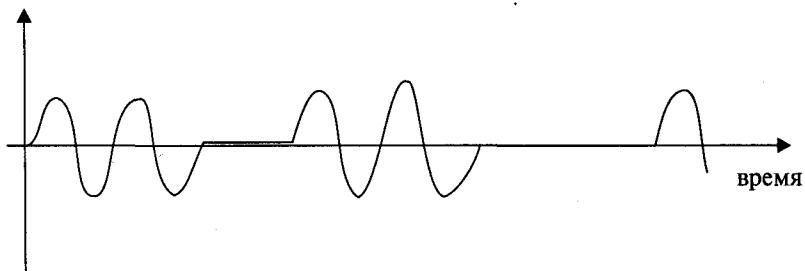


Рис. 21. Передача информации с помощью модуляции (пример)

получили. Оценим теперь, какой частоты сигнал надо иметь, чтобы передать 100 текстов со скоростью нормальной речи или одну телевизионную передачу.

При нормальной речи человек произносит порядка 20 букв/с, то есть надо передавать порядка 100 бит/с, а для передачи 100 разговоров одновременно достаточно иметь передатчик на частоте 10 кГц. Реально к радиочастотам относят частоты больше 100 кГц (волны короче 3000 м), то есть любой радиопередатчик при соответствующей модуляции с этой задачей справится. Совсем иная ситуация с телевидением. Изображение содержит около $2 \cdot 10^5$ элементов. Положим, что нам достаточно 8 градаций яркости. Таким образом, для передачи одного элемента изображения надо иметь 3 бита, а для передачи всего изображения $6 \cdot 10^5$ бит. Чтобы глаз не замечал мелькания, изображение должно меняться не реже 20 раз в секунду. Итак $20 \cdot 6 \cdot 10^5$ бит/с = 10^7 бит/с, а частота передатчика должна быть не менее 10^7 Гц = 10 МГц. Эта частота соответствует длине волны 30 м, то есть середине коротковолнового диапазона. Но это для передачи черно-белого изображения. Для передачи цветного изображения частота должна быть выше, поэтому телевизионные передачи ведут на частотах метрового диапазона и еще более коротких волнах. Для передачи информации со все большей и большей скоростью нужны все более высокие и более высокие частоты. Инфор-

мация — это знание. Люди хотят знать, причем хотят очень давно: «и познаете истину и истина сделает вас свободными» — это ведь было сказано уже 19 веков, сто поколений назад! Кроме того, высокочастотные электромагнитные колебания используются в радиолокации (об этом мы узнаем в одной из следующих глав), для питания ускорителей и для многих других целей, вплоть до варки и парки в бытовых СВЧ-печах. Но не для жарки — СВЧ электромагнитная волна проникает сквозь бифштекс и нагревает весь его объем равномерно, а для жарки надо греть через поверхность, тогда и получается (сглотнем слону, читатель?) румяная корочка.

Теперь, когда необходимость в ЭВП, работающих в СВЧ-диапазоне стала ясна, посмотрим, что могут и чего не могут в этом смысле обычные электронные лампы, рассмотренные нами в двух первых главах.

4. Нельзя объять необъятное... с помощью обычной электронной лампы

Возьмем обычную электронную лампу или, как их называют, лампу с электростатическим управлением и начнем по-немногу увеличивать частоту сигнала, подаваемого на ее сетку. Как уже рассказывалось, когда время пролета электрона станет сравнимо с периодом переменного напряжения, электрон начнет часть времени пролета ускоряться, а часть... тоже ускоряться, но уже меньшим напряжением. Усиление на таких частотах оказывается меньше. При еще более высоких частотах часть периода электрон летит вообще в тормозящем поле. Наконец, наступает ситуация, когда электрон вообще не будет чувствовать управляющее (сеточное) напряжение — за время его полета от катода до сетки успеет пройти период входного напряжения, и суммарное влияние двух полуволн этого напряжения окажется очень малым (но не равным нулю — подумай, почему). На какой частоте это произойдет? Пусть напряжение на сетке равно 1 В, зазор сетка—катод 10 мкм. Тогда время полета электрона от катода до сетки составит 0,35 нс

5. Обратим недостатки в достоинства

(формулу $t = d\sqrt{2m/eV}$, где t — время полета, d — зазор, m и e — масса и заряд электрона, V — напряжение — выведите сами), соответствующая частота — примерно 3 ГГц. Это и есть предельная частота, на которой можно заставить работать обычную лампу. Но проблема с временем пролета электрона от катода до сетки не единственная проблема, возникающая при увеличении частоты.

Время пролета от сетки до анода тоже не равно нулю и ничего хорошего это за собой не влечет. Поскольку напряжение на сетке изменяется, то электроны влетают в зазор сетка—анод с разными скоростями. Такие электроны могут «перепутываться» — влетевшие позже, но с большими скоростями могут обгонять влетевшие раньше, но с меньшими скоростями. Вам ничего не вспоминается? Это же преобразование скоростной модуляции в модуляцию по плотности! Но лампам прока от этого нет, а в импульсном режиме — чистый вред — искажение формы импульса.

Наконец, резонансная частота контура возрастает с уменьшением индуктивности и частоты (формула Томпсона). Если лампа работает на некоторой частоте, обычно в ее сеточной и анодной цепях применяются контура, настроенные на эту частоту. Но лампа имеет собственную емкость (между электродами) и индуктивность (вводов). Ни меньше этой емкости, ни меньше этой индуктивности емкость и индуктивности контура сделаны быть не могут.

Итак, вот три проблемы — время пролета катод—сетка, время пролета сетка—анод, емкость/индуктивность лампы. Посмотрим, как решались эти проблемы.

5. Обратим недостатки в достоинства

Начнем с самого простого. Из формулы для времени пролета следует, что уменьшить его можно только уменьшением зазора или увеличением напряжения (то есть увеличением скорости). Вы ведь не собираетесь изменять заряд и массу электрона? (Ее можно только увеличить. Не удивляйтесь,

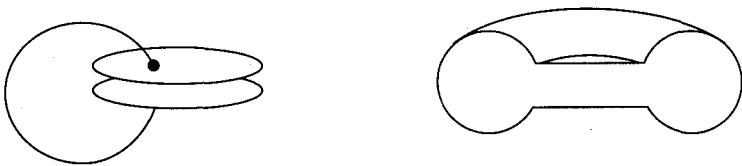


Рис. 22. СВЧ-контуры

а вспомните, как.) Уменьшать зазор можно, конечно, не беспредельно. Сделать его меньше 10 мкм нельзя. Обратимся к напряжению или скорости электрона. Естественно предложение — сначала ускорить электрон и лишь затем подвергать «управлению». Это и сделано в клистроне. Сначала электрон ускоряется относительно высоким напряжением и лишь затем вводится в двухсеточный управляющий зазор. Время пролета сетка—анод тоже обращено на пользу — именно в это время, как вы уже знаете, скоростная модуляция преобразуется в модуляцию по плотности.

Но что делать с емкостями и индуктивностями? Представим себе контур, настроенный на очень высокую частоту. Конденсатор в нем — две пластины, индуктивность — кусок провода (рис. 22), слева. У такого контура есть недостаток — он будет сильно излучать в окружающее пространство. Как с этим бороться? Известно, экранированием. Прокрутим провод, соединяющий пластины конденсатора, вокруг вертикальной оси. Получится то, что называется «объемный резонатор». Где у него емкость — видно. Индуктивность — все остальное.

Точнее было бы сказать — электрическое поле сосредоточено в зазоре, магнитное — в остальной части. Конечно, такой резонатор настроить на сколь угодно высокую частоту нельзя. Но все-таки... И главное — как хорошо объемный резонатор сочетается с двухсеточным зазором! Надо только сделать зазор из двух сеток, либо на лампу с двухсеточным зазором надеть снаружи (можно уже вне вакуума) «индуктивную» часть резонатора — «бублик». Для невооруженного глаза он выглядит пустым изнутри. Но мы-то знаем — внутри у него электромагнитное поле.

5. Обратим недостатки в достоинства

Как легко на двух—трех страницах изложить путь месяцев и лет, бессонных ночей, мыслей, опять и опять пробегающих привычный путь, чтобы на сотом разе заметить ответвление вбок, с замирающим сердцем рвануться туда, увидеть решение и еще не веря разумом, интуицией понять — это оно. Человеку, никогда не видевшему горы и пещеры, трудно объяснить, что это такое. Объяснить, что такое творчество, наверное так же трудно. Но это такие вещи — поверьте мне, я видел их все — увидев которые, невозможно удержаться от попытки — нет, не объяснить — но хотя бы рассказать (фото 12).

В конце концов, поэты уже тысячи лет пытаются рассказать, что такое любовь.

А вот объемные резонаторы были применены в электронных лампах для работы в области СВЧ вполне успешно. Один резонатор «обивался» вокруг зазора катод—сетка, другой — вокруг зазора сетка—анод. Все лампы, работающие на частотах свыше 1 ГГц, используют объемные резонаторы. В клистроне же использовано все, о чем рассказано выше, сразу.

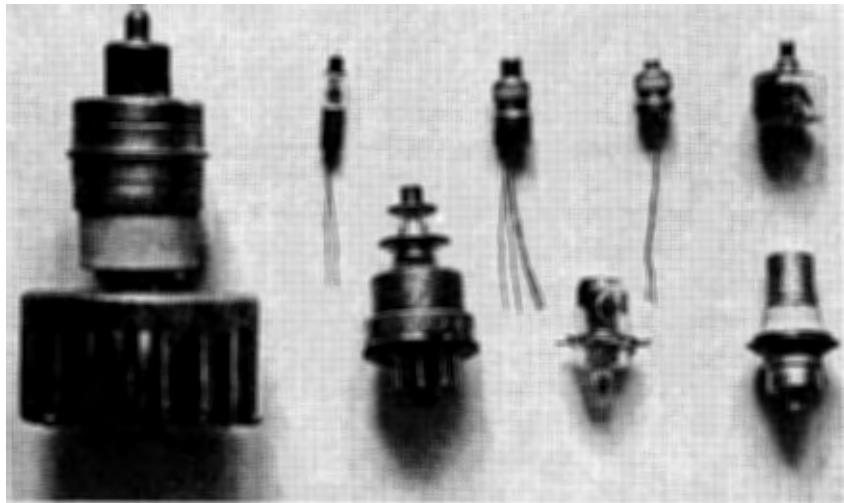


Фото 12. СВЧ сеточные лампы

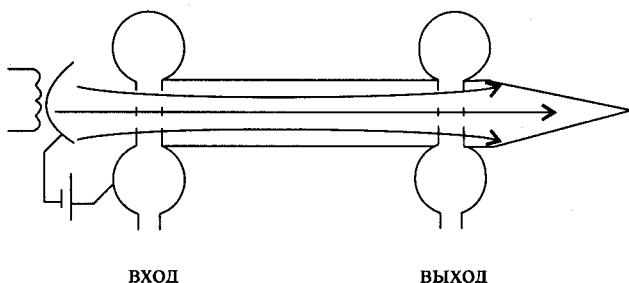


Рис. 23. Пролетный клистрон

Итак, вот он, первый СВЧ ЭВП: катод, электроны ускоряются, входной зазор (входной резонатор, пролетная труба, выходной зазор) выходной резонатор и, наконец, коллектор-электрод, на который прибудут уже не нужные нам электроны, отдавшие свою энергию в выходном зазоре (рис. 23). Теперь поговорим об этом приборе (фото 13) чуть подробнее.

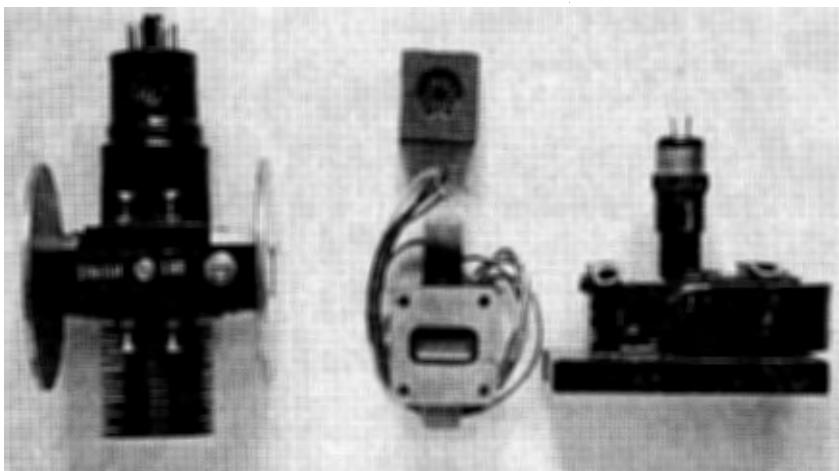


Фото 13. ЭВП СВЧ, слева — пролетный клистрон, в центре — отражательный клистрон со слюдяным окном вывода энергии, справа — магнетрон, вверху — анодный блок магнетрона

6. Некоторые не мелкие подробности

Начнем с начала — с катода. Важное отличие клистрона от его предшественников — ламп с электростатическим управлением — состоит в том, что катод, как говорят, «вынесен из пространства взаимодействия». Это значит, что катод не знает про электромагнитное поле. Электроны встречаются с ним только в резонаторе. А до него им еще лететь и лететь. Пока же электронам предстоит сделать важную работу — с помощью электрических полей перестроиться, собраться в плотный пучок. Посмотрите (рис. 23) — катод сферический, электроны будут собираться — но они отталкиваются друг от друга и собираться «в точку» не могут. Форма прикатодного электрода (он, естественно, находится рядом с катодом) подбирается так, чтобы собрать электроны в возможно более плотный и аккуратный пучок. Слово «аккуратный» означает — с примерно постоянным диаметром, то есть не пульсирующий (пульсирующий пучок иногда можно использовать, но надо размещать резонаторы в местах, где пучок сжимается) и ламинарный, то есть с непересекающимися траекториями (рис. 24). Существует целая наука — «электронная оптика», занимающаяся вопросом, как сделать такой пучок, как надо. А почему это «надо»? Какие параметры ЭВП зависят от пучка? Ответ прост — основные. Диаметр пучка не может быть больше длины волны — иначе электрическое поле в разных местах зазора будет разным и сгустки перестанут «собираться». А ток пучка входит множителем в мощность ЭВП — мощность, как известно, есть произведение напряжения на ток. Итак, плотность электронного пучка влияет на

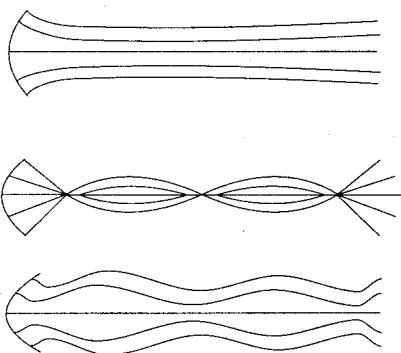


Рис. 24. Электронные пучки сверху вниз: аккуратный-неламинарный-пульсирующий

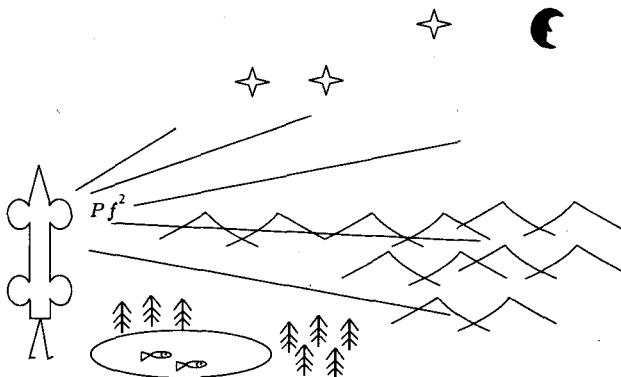


Рис. 25. За что идет борьба

достижимое произведение мощности P на квадрат частоты f . Понятно, что квадрат частоты — это величина, обратная площади пучка? Этот параметр Pf^2 и есть критерий совершенства ЭВП. Вы уже знаете — чем больше f , тем можно больше передать информации, а чем больше P , тем дальше ее смогут принять. Так что за что бороться — есть (рис. 25). Один из хороших путей этой борьбы — вынос катода из пространства взаимодействия, позволяющий оптимально сформировать электронный пучок.

Нечто подобное происходит и на другом конце электронного потока. Мощный электронный пучок, если его прямо направить на металл, как это часто (но не всегда, вы это уже знаете) делается в обычных лампах, «как нечего делать» расплавит этот металл. Сквозная дырка в атмосферу это не то, что нужно вакуумному прибору. Поэтому пучок перед «посадкой» на анод «распускается» (рис. 23), «растаскивается» на возможно большую площадь. Слова, взятые в кавычки так называемый технический жаргон, жизнь показала, что в технике на одном литературном языке формула разговаривать трудно.

Теперь еще несколько деталей к портрету клистрона. Поскольку Pf^2 -ограничение связано с электронным пучком, один из путей его преодоления — создавать в одном приборе несколько электронных пучков (аналогичное решение использу-

зуется и в ЭВП с электростатическим управлением). Многое может быть не только электронных пучков, но и резонаторов. Кроме входного и выходного резонаторов, по ходу движения электронный пучок может проходить еще через несколько резонаторных зазоров. В каждом из них электронные сгустки наводят поле, которое их самих слегка «поджимает», подформировывает, делает более плотными. Наконец, как создавать исходные сгустки, так снимать с пучка усиленный сигнал можно не резонатором, а другими устройствами. Но о них пойдет речь в следующей главе, поскольку эти устройства применяются в основном в других ЭВП.

И наконец, многое может быть не только лучей и резонаторов, но и «частот». Выходной резонатор может быть настроен не на частоту f сигнала, введенного во входной резонатор, а на «гармонику» — частоту nf . Действительно, качели будут раскачиваться, даже если мы их будем подталкивать через раз или через два раза на третий. Амплитуда колебаний при этом, конечно, уменьшится. Таким образом, пролетный клистрон может быть применен не только как усилитель, но и как умножитель частоты. От умножения один шаг до генерации. Сделать этот шаг не трудно. Действительно, выведем часть сигнала из выходного резонатора и вернем ее во входной. Если сдвиг фазы в самом клистроне и в цепи обратной связи такой, что «кусочек» выходного сигнала, возвращаясь на вход, совпадает по фазе со входным сигналом, усилитель может превратиться в генератор. Для этого еще надо, чтобы «кусочек» был не слишком маленьким — чтобы вернувшийся сигнал был больше исходного. Что происходит на сцене, если усиление сигнала микрофона достаточно велико и на него попадает звук от динамиков? О фазе в этом случае заботиться не приходится — генерация возбуждается на той частоте, на которой сдвиг фазы во всей цепи составит 2π .

Заметим, что «сигналом» является в некотором смысле и сам электронный поток, точнее — распространяющиеся в нем электронные сгустки. Что, если заставить возвращаться их во входной резонатор? Пусть, например, вместо второ-

Глава 3. Электронный прибор

го резонатора стоит «отражатель» — электрод, на который подано отрицательное напряжение. Сгусток подлетит к нему, развернется и полетит назад, к входному зазору. Но полетит уже в виде сгустка. Проходя через «входной» зазор, такой сгусток вызовет появление электрического поля. Если фаза этого поля такова, что оно будет усиливать модуляцию электронного потока, прибор начнет генерировать. Ясно, что изменением напряжения на отражателе можно управлять временем полета сгустка между первым и вторым проходом через резонатор. Чем отрицательное напряжение на отражателе больше, тем на большем расстоянии от себя он остановит сгусток и заставит вернуться его в зазор. Напротив, уменьшением напряжения можно добиться ситуации, когда сгусток вернется не в первый «удачный момент», а во второй (аналогия с качелями!). Впрочем, мощность сигнала, генерируемого прибором — его называют отражательный клистрон (фото 13) — будет в этом случае меньше. У отражательного клистрона есть одно приятное свойство — частота генерируемых им колебаний немного меняется при изменении напряжения на отражателе. Естественно — он генерирует на той частоте, на которой выполняется условие совпадения фаз (помните микрофон и динамик на эстраде?). А время полета сгустка и фаза его прибытия зависят, как вы уже знаете, от напряжения на отражателе.

Отражательный клистрон был создан в 1940 году В. Ф. Коваленко и независимо от него — Н. Д. Девятковым, Е. Н. Данильцевым, И. В. Пискуновым. В течение десятилетий он был основным типом генератора СВЧ-колебаний. Его главным преимуществом перед другими была возможность «электрической перестройки» — управлением частотой путем изменения напряжения. Позже полупроводниковые приборы составили отражательному клистрону весьма серьезную конкуренцию. Однако в диапазоне миллиметровых длин волн ЭВП по прежнему «дают фору» полупроводникам, а на малые габариты полупроводниковых приборов отражательные клистроны смогли ответить. Ответ получил название «минитрон». Приме-

7. Осталось только сделать

нение современных технологических методов позволило создать отражательные клистроны, сравнимые по размеру с полупроводниковыми приборами. Вспомним, что нечто подобное произошло и с обычными электронными лампами (нувистор, ВИС). По-видимому, каждый класс приборов живет — в технике и в сознании людей — со своим комплексом технологических приемов и со своим комплексом конструктивных решений. Класс приборов — это принцип их действия; принцип действия может быть воплощен в разных конструкциях. Возможность выполнения той или иной конструкции определяется уровнем развития технологии. Мораль — если мы хотим, чтобы техника развивалась гармонично, а каждый класс приборов жил долго и счастливо, конструкторы должны внимательно следить за новыми технологическими методами. Минитрон, нувистор и ВИС — хорошие тому примеры.

Пора, однако, поговорить немного и о технологии.

7. Осталось только сделать

Надеюсь, не требуется пояснить, что это шутка? Обычно те, кто создают теорию прибора, хорошо понимают, как тяжел хлеб конструктора и технолога, да и конструкторы технологов очень уважают. Автору — хотя сам он теорию приборов не создавал — чаще приходилось наблюдать неуважение в обратную сторону. «Напридумают там, а нам отдуваться...»

У меня был соблазн — использовать в названии параграфа мотив знаменитой Блохи. Но это было бы так тривиально! Пришлось удержаться. А вот в тексте удержаться не удалось. Сделаем оценку «по порядку величины». Блоха — 1 мм, нога блохи — 0,1 мм, гвоздь — 0,01 мм, шляпка гвоздя — 0,001 мм, 1 мкм. Конечно, 1 микрон — это немного, но современная технология умеет достигать и такой точности, и в несколько раз большей. Правда, применяющиеся в ней методы для ковки блох не использовались даже в художественной литературе. Эти методы называют часто общим словом «электрофизические» и относят к ним электроэррозионную обработку, электрохимическую, обработку электронным, ионным и лазерным

лучом и другие. Именно прогресс в технологии позволил ЭВП соревноваться в размерах с полупроводниковыми приборами. Но малые габариты — это не главное. Так же как и не самое главное — конкуренция, борьба и соревнование с кем бы то ни было. Гораздо важнее то, где ничего этого нет — дело, которое никто за нас не сделает. И в области больших мощностей ЭВП никто не заменит.

А проблем в этой области оказалось немало. Проще сказать, что там все — проблема. Во-первых, сетки, образующие зазор в резонаторе. Какая-то доля электронов оседает на этих сетках, мигом превращая всю свою кинетическую энергию в тепловую. Сетки делали и тугоплавкие, и с тонкими высокими ребрами (чтобы они лучше передавали тепло на охлаждаемую часть резонатора), но все равно — в мощных приборах их нет. Электронный пучок летит через отверстие, как бы сетку с одним большим окном. Рыболовная сеть такого типа позволила бы сохранить нетронутыми богатства всех морей и океанов! СВЧ ЭВП с бессеточными зазорами, однако, работают неплохо, да и другого выхода нет.

Следующая проблема — «окно для вывода энергии». Мощные электромагнитные колебания генерируются в вакууме, а нужны они нам снаружи прибора, в воздухе. Казалось бы, особой проблемы нет — любое стекло или керамика прозрачны для электромагнитного излучения и «не прозрачны» для воздуха. Но не все так просто! Часть электромагнитного излучения поглощается стеклом или керамикой и нагревает ее. Керамика материал сам по себе термостойкий, но при нагреве увеличивается ее проводимость, она начинает сильнее поглощать электромагнитное излучение, еще сильнее нагреваться и так далее. Этот процесс называется тепловой пробой, а кончается он сквозным проплавленным отверстием, соединяющим вакуумный объем прибора и атмосферу. Дальнейшее в пояснениях не нуждается.

Многие технологические проблемы, как и проблема изготовления сетки, сводятся к выбору материала. Причем ситуация обычно устроена так, что материал, который способ-

7. Осталось только сделать

бен выдерживать более высокие температуры (например, тугоплавкие и прочные при высоких температурах молибден и вольфрам) будет и нагреваться сильнее (например, из-за плохой проводимости и плохой теплопроводности). Чистых металлов в природе не так уж много, но сплавов — не счесть. Вдобавок, есть еще композиционные материалы — например, смесь (не сплав!) вольфрама и меди — сочетающий высокую проводимость, теплопроводность и прочность.

Многие ЭВП СВЧ работают в импульсном режиме. Это значит, что электронный поток обрушивается на поверхность коллектора импульсами, скажем 1 мкс ток идет, а потом 1 мс тока нет. Здесь, на коллекторе кончается короткая, но яркая биография электрона — в вакууме он ускорялся, тормозился и генерировал, а в металле есть только безликий «электронный газ», там электроны не отличаются друг от друга. Но напоследок электрон делает вот что — отдав остаток энергии на нагрев коллектора, он способствует его разрушению. Действительно, когда ток идет, поверхность коллектора нагревается, в паузе — остывает. При нагреве и охлаждении возникают термические напряжения, в материале коллектора понемногу накапливаются дислокации, потом возникают трещины и в итоге коллектор начинает разрушаться.

На уровне хорошего детектива обо всем этом рассказано в прекрасной книге «Теплофизические процессы и электровакуумные приборы», написанной В. Ф. Коваленко и изданной в 1975 году издательством «Советское радио». Много хороших книг написано об электровакуумных приборах, много хороших книг написано о теплофизических процессах, но лучше этой — нет. Конечно, это — мое личное мнение и я его никому не навязываю. Мне нравится, как писал Вадим Коваленко. И пусть все те, кто десятилетиями работал в области ЭВП СВЧ, но кого я не назвал в этой книге, не обижаются. Во-первых, для того, чтобы написать хорошую книгу, недостаточно быть прекрасным специалистом, и даже, наверное, не обязательно им быть. Надо уметь изложить ясно, доступно, интересно, в общем — увлекательно. Нужно иметь свой взгляд на мир

и на ЭВП СВЧ. Надо, наконец, просто захотеть написать книгу! И еще надо это сделать. Так же, как и любую работу — надо захотеть сделать и надо сделать. Так же, как и окна для вывода энергии из ЭВП СВЧ.

Мы остановились на том, что окна перегреваются и разрушаются из-за поглощения в них энергии электромагнитной волны. Казалось бы, созданием диэлектриков с очень малой проводимостью эту задачу можно решить. Но дракон оказался многоглавый. Электрон, ударяясь о любой материал, выбывает из него вторичные электроны. Ну и что? Пусть даже шальной электрон ударился в керамическое окно вывода энергии — ну, выбьет он сколько-то вторичных, ну и разлетятся они куда попало, и все. Увы, не все. Во-первых, выбьет он вторичных довольно много — несколько штук. Во-вторых, раз окно это для вывода энергии, то значит вокруг него и в нем самом всегда есть сильное электромагнитное поле. Поле, заметьте себе, переменное. Вторичные электроны ускорятся этим полем, наберутся от него энергии, врежутся в керамику, выбьют из нее еще больше вторичных электронов, они опять ускорятся полем и пошло-поехало. Электронная лавина нарастает, энергия отнимается от электромагнитной волны и идет на нагрев окна. Такого издевательства — а оно называется высокочастотный вторично-электронный разряд — не выдерживает самая высокотемпературная керамика. Много сил и времени было потрачено на поиск материалов и конструкций окон, допускающих вывод больших мощностей.

В одном из ранних вариантов рукописи этой книги данный параграф назывался «рекорд мощности и почему он до сих пор не побит». Рекорд мощности клистрона был тогда равен 30 МВт (импульсная мощность, при длине импульса несколько мкс). Достигнуто это значение мощности было одновременно в США и СССР. Продолжался этот рекорд около 20 лет. Но название параграфа пришлось все же искать другое. В 1983 году в Стэнфордском университете был разработан клистрон мощностью 50 МВт, а еще через 2 года, там же, американские и японские специалисты сделали кли-

строн мощностью не много ни мало 150 Мвт. Забавно, что именно там, где давным-давно, братья Вариан...

Кроме всего прочего, оказался важным выбор антиэмиссионного покрытия для окна вывода энергии. Ни в одном виде спорта рекорды не бываются таким способом — после 20 лет превышение скачком в 1,7, а потом еще в три раза. Впрочем, такое и в технике бывает не часто.

Отступление 3 — о приключениях на пути к рекорду

На пути к рекордной мощности встречаются препятствия. Естественно, иначе путь был бы пройден сразу и о нем никто бы не сказал «путь». Препятствия эти проявляются по-разному для приборов разных классов. В итоге складывается ситуация, когда для приборов каждого класса имеется своя зависимость максимальной достигнутой мощности (в стационарном режиме) от частоты. Эти зависимости показаны на рис. 26. Видно, что в разных диапазонах частот рекордные мощности достигнуты на приборах разных классов, что полупроводниковые приборы уступают электровакумным по мощности на 3–4 порядка. Поскольку в импульсных режимах мощность ЭВП существенно больше (на 1,5–2 порядка), чем в стационарных, а для полупроводниковых эта разница существенно меньше, то в импульсных режимах преимущество ЭВП выглядит еще более угрожающее.

Гладко было на бумаге, но забыли про овраги... Рассмотрим два типа оврагов (из великого их множества), выбрав те, которые встречаются не в одном, а во всех типах ЭВП СВЧ.

Первая сложность возникает потому, что в любом ЭВП есть электронный пучок, который попадает на коллектор и тормозится на нем, отдавая свою кинетическую энергию ионной решетке металла — то есть нагревая ее. Нагретый металл испаряется, загрязняя прибор, отравляя катод и нарушая изоляцию путем образования пленок на них. Он расширяется при каждом нагреве и сжимается при каждом охлаждении, а в итоге трескается, трещины преграждают путь теплу, уходящему

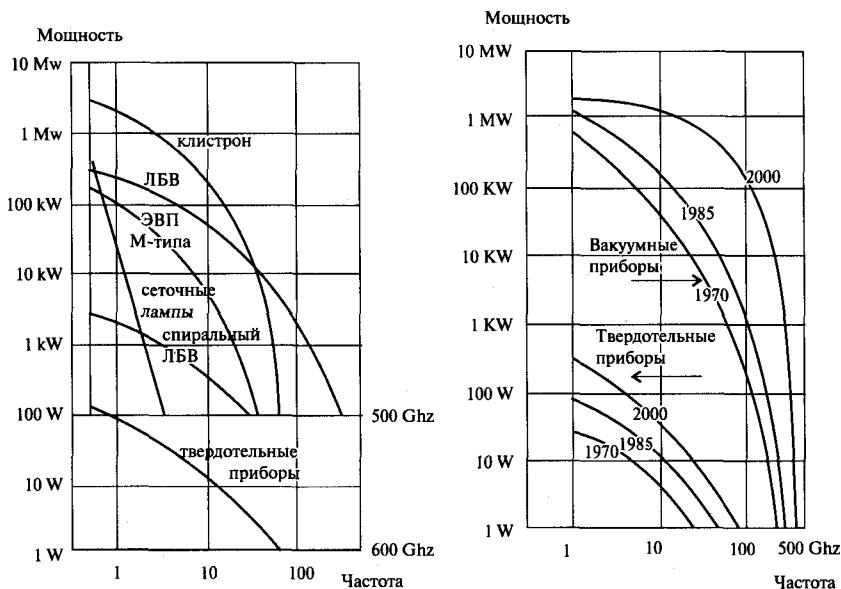


Рис. 26. Связь максимальных мощности и частоты для приборов различных типов (слева — 1984 год)

вглубь электрода, нагрев нарастает и — см. выше. Для уменьшения испарения логично было бы покрыть медный (хорошо проводящий тепло) электрод вольфрамом или молибденом, металлами, которые мало испаряются. Так и делают, но разница в термических расширениях этих металлов и меди порождает проблему отслоения покрытия при многократных нагревах-охлаждениях. Другая проблема — высокое сопротивление вольфрама и молибдена, увеличивающее поглощение в них СВЧ-мощности. В технике преодоление одной проблемы всегда порождает другую и хорошо, если одну. Как говорил мой учитель Р. С. Гутер «жизнь без компромиссов невозможна, особенно семейная». Справедливости ради отметим, что о разумности компромиссов часто говорят люди, которые в реальной жизни идут на них реже «бескомпромиссных борцов» за что-то там.

7. Осталось только сделать

Нагрев металла электронным пучком растет, если металл шероховатый. Бугорки нагреваются сильнее и понемногу испаряются. Металл, так сказать, полируется электронным пучком. Само по себе это хорошо, но только все испарившееся опять же попадает в прибор. Здесь комментарии очевидны — не нужно ставить в прибор шероховатые поверхности. Все должно блестеть...

Второе явление, мешающее получать высокие мощности СВЧ, имеет в своей основе то, что ЭВП СВЧ это приборы вакуумные, а электромагнитные волны СВЧ нужны нам на воздухе. Как вывести их из вакуума? Конечно, через диэлектрическую стенку или, как принято говорить, «вакуумное окно». Делается это окно чаще всего из керамики (фото 14), реже из стекла, когда-то использовали слюду (фото 13). Известен случай, когда была применена полимерная (майларовая) пленка, но в этом случае труднее получить высокий вакуум. Керамика, как правило, эта содержит в основном окислы Al, Be и в меньшем количестве других элементов II и III группы. Важно то, что у этих окислов высокий коэффициент вторичной эмиссии.

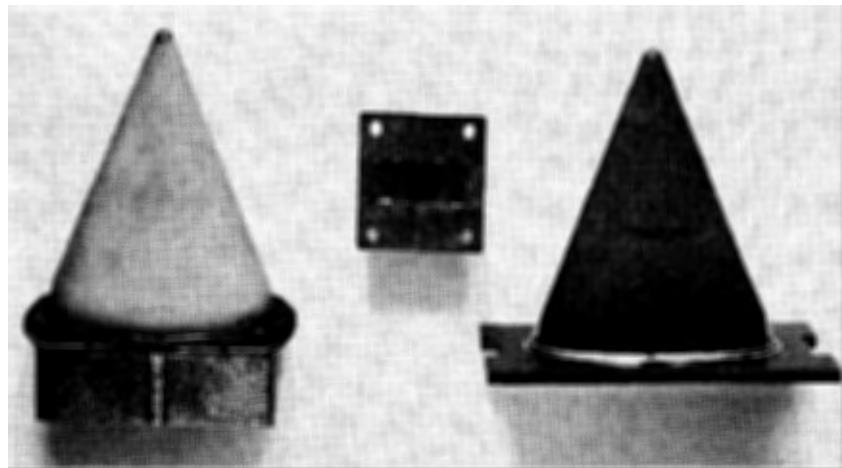


Фото 14. Керамические выводы энергии ЭВП СВЧ

Глава 3. Электронный прибор

Дальше происходит следующее. Случайный электрон (иногда просто эмиттированный близлежащим электродом) попадает в зону мощного поля вблизи окна. Ускорившись полем, он ударяется о керамику и выбивает из нее несколько вторичных электронов. Эти вторичные также ускоряются полем, ударяются о керамику. Здесь важно то, что эти электроны отбирают энергию у СВЧ-колебаний и тратят ее на нагрев керамики. Ситуация развивается лавинно и кончается тем, что керамика попросту проплавляется. После чего она, конечно, отделять вакуум от атмосферы перестает. Для борьбы с этим явлением надо уменьшить коэффициент вторичной эмиссии керамики. Идея сама по себе не новая, еще в самом начале 70-х годов предпринимались попытки нахождения покрытий, которые снижали бы вторичную эмиссию керамики без ухудшения всех остальных ее свойств. Например, не помешает ли покрытие прохождению электромагнитной волны, генерируемой ЭВП. Оказалось, что тонкая металлическая пленка (толщиной менее 0,1 мкм) пропускает СВЧ-волну (эта тема особенно близка мне, ибо моя самая первая работа была выполнена и соответственно, первая статья написана именно по этой теме). В ходе дальнейших исследований человечество обнаружило, что наилучшим покрытием для СВЧ-окон является слой нейтрида титана (TiN) толщиной менее 0,01 мкм (им же покрывают металлические коронки для зубов и купола некоторых храмов — чтобы сияло пoyerче). И тогда произошло чудо — мощность приборов удалось увеличить сразу в несколько раз до 150 МВт (в течение импульса длительностью около 1 мкс).

Глава 4

Длинная дорога от входа к выходу

1. Вверх по идущей вверх лестнице

Вполне возможно, что изобретатель лампы бегущей волны Р. Компфнер придумал ее в 1944 году, поднимаясь по какой-нибудь лестнице. Особенно удобно это было бы ему сделать, если в середине медленно двигался лифт. И человек, быстро поднимавшийся по лестнице мог заглядывать в кабину. Или, скажем, чуть-чуть от нее отставать.

Конечно, восстановить, как было сделано изобретение, трудно. Можно иногда выявить ход рассуждений изобретателя, но движение ощущений, предчувствий, интуиции? Технический детектив чем-то, по-видимому, сильно отличается от просто детектива, ибо хороших детективов много, а хороших технических детективов почти нет. И это несмотря на то, что детективы пишут обычно люди, профессионально убийствами, грабежами и отравлениями не занимавшиеся (разве что литературными!), а за технический детектив могли бы взяться люди, знающие все это «своими руками».

Неутоленное желание «делать науку» и технику может сублимироваться в желание увлекательно рассказать об этом. Хорошие книги и хорошие лекции нужны людям, отсюда вывод — некоторому количеству людей нужно мешать работать. Они и будут писать книги и учить других.

Итак, представьте себе, что лифт движется в начале лестницы чуть быстрее и из него подталкивают бегущего по винтовой лестнице человека — быстрее, быстрее! Согласно 3-му закону Ньютона, на лифт будет действовать сила, направленная против движения, он будет тормозиться и отдавать свою

энергию человеку, бегущему по лестнице. В итоге их скорости уравняются (к этому моменту аналогия уже не работает — от непрерывных криков «быстрее» человек упадет; но сознание изобретателя, захваченное аналогией, уже не замечает несоответствий).

Не обвивайся лестница вокруг шахты лифта, ничего бы не получилось — человек движется по прямой лестнице быстрее лифта. А если она обвивается, длина ее — сообразите сами, во сколько раз — увеличивается. И можно подобрать угол наклона витков лестницы-спирали и скорость электронов-лифта так, чтобы электромагнитная волна, бегущая по спирали, имела почти ту же скорость... но мы забежали чуть вперед.

Итак, вернемся от строительства к электронике. Чем выше частота, тем ближе к поверхности металла сосредотачивается ток. Это явление называется скин-эффект (англ. skin — кожа). На частотах СВЧ-диапазона толщина скин-слоя единицы микрон. Как в море — электронные волны есть только на поверхности, а в глубине рыбы шторма не замечают. Так же, прижимаясь к проводу, распространяется вдоль него и электромагнитная волна, отдаляясь от поверхности не далее, чем на расстояние порядка длины волны. Но бежит эта волна «по и около» проводника быстро, ее скорость сравнима со скоростью света. И хотя разогнать до такой скорости электроны можно, но для этого нужны напряжения в сотни киловольт, а это неудобно. Но ничего — мы уже знаем, как «замедлить» волну — надо заставить ее бегать по спирали, по «лестнице». Итак, возьмем проволоку, свернем ее в спираль и запустим в один ее конец электромагнитную волну. По оси же пропустим электронный пучок и начнем варьировать энергию (скорость) электронов. Надо полагать, что когда энергия электронов будет такая, что скорость их станет чуть больше скорости волны («осевой» скорости!), то начнется «перекачка» энергии от электронов к волне и с выходного конца спирали мы получим более мощную волну и хилые — с уменьшенной энергией — электроны.

2. Танцуем от печки, то есть от клистрона

Как это все просто на бумаге! Особенno «на пальцах»... Длиннохвостыми интегралами, взволнованно повествующими о нелегкой судьбе электронов и волн в ЛБВ, заполнены тома. И в этом смысле — в смысле интегралов — первым изобретателям было легче. Они интегралов не писали. Сейчас техника ушла в смысле насыщенности физикой так далеко, а физика ушла так далеко в смысле насыщенности математикой, что человечество стремительно распадается на два подвида — людей знающих и людей делающих, впрочем, научные фантасты писали об этом еще десятки лет назад. Единственный путь борьбы с этой небиологической эволюцией — знать математику — язык физики и знать физику — язык техники. Тогда вы будете делать, зная.

Правда, математика и физика прекрасны и сами по себе. Тяга к знанию увеличивала выживаемость наших только что слезших с деревьев предков; тебе, читатель, она досталась по наследству.

Реальная ситуация в ЛБВ, конечно, сложнее. Оказывается, в спирали, а точнее в «спиральной замедляющей системе» могут распространяться не одна, а несколько волн. Но не все они двигаются чуть медленнее пучка, не все они усиливаются... Но об этом уже «на пальцах» рассказать нельзя. А о том, о чем можно рассказать просто, удобнее рассказывать, опираясь на то, что мы уже знаем.

2. Танцуем от печки, то есть от клистрона

В конце концов, он был изобретен раньше, да и «идеология» его проще. Так вот в ЛБВ, как и в клистроне, происходит преобразование модуляции по скорости в модуляцию по плотности. Только напряженность поля у спирали меньше, чем в резонаторе (в резонаторе есть резонанс!). Поэтому нужен большой путь, и электронам и волне надо пройти много витков спирали, чтобы возникла заметная модуляция, а потом, по мере преобразования модуляции, волна начинает усиливаться, отбирая энергию от собирающихся в густки электронов (рис. 27). Собираются электроны в те места волны, где

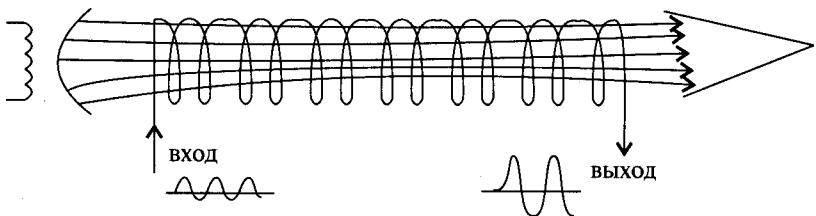


Рис. 27. ЛБВ

поле меняет знак — сзади оно ускоряющее, спереди тормозящее — как люди перед входом в метро в час пик. Принцип, как говорится, ясен. Теперь посмотрим подробнее на то, что объединяет и что отличает ЛБВ и клаистрон. Первое и важнейшее отличие — у клаистрона резонаторы, у ЛБВ — спираль, нерезонансная замедляющая система. Поэтому клаистрон — прибор узкополосный, а ЛБВ — широкополосный. Вы помните, как важно это свойство для систем передачи информации. Правда, замедляющая система может быть не только спиральная — ясно, что если мы поставим вдоль электронного пучка просто резонаторы и надлежащим образом возбудим в них колебания, то такая ЛБВ тоже будет работать. Надлежащим образом — это так, чтобы разность фаз между колебаниями в соседних резонаторах была такой, чтобы подлетающие электроны встречали волну в нужной фазе. Такие замедляющие системы называются «системы со связанными резонаторами». Связь — это как раз то, что нужно для организации «нужных фаз». Теперь на пять фраз отвлечемся от ЛБВ.

Ясно, что можно взять один конец от одного прибора, а другой — от другого. Если создавать исходную модуляцию как в ЛБВ, потом давать электронам подрейфовать, а снимать сигнал с пучка резонатором, как в клаистроне, получится один гибридный прибор. Если же создавать исходную модуляцию, как в клаистроне, а снимать сигнал с пучка, как в ЛБВ, получится другой гибридный прибор. Этот прибор сочетает (в некоторой мере) сильные стороны ЛБВ и клаистрона и называется «твистрон». Позже мы более подробно поговорим о гибридных приборах, а теперь вернемся к собственно ЛБВ.

2. Танцуем от печки, то есть от клистрона

Мы можем провести границу между замедляющими системами на связанных резонаторах и многорезонаторными клистронами именно здесь — в клистроне резонаторы связаны только электронным пучком, в ЛБВ еще и электромагнитной волной. Эта связь имеет важное следствие — в ЛБВ электромагнитная волна может бегать и туда и обратно. Конечно «туда» ее усиливает электронный поток, а обратно она только затухает, но если усиление окажется больше затухания, лампа возбудится, превратится в генератор. Генератор СВЧ-колебаний тоже вещь нужная, но такой генератор — это плохой генератор, и лучше бы ЛБВ-усилителю в генератор не превращаться. Для защиты от возбуждения в ЛБВ вводится «поглощающая вставка» — деталь из вещества, сильно поглощающего электромагнитное излучение. Она устанавливается в середине ЛБВ и полностью поглощает электромагнитную волну (как бегущую «туда», так бегущую «обратно»). Усиление при этом, конечно, уменьшается, но не очень сильно, так как через участок с поглощающей вставкой энергию проносит электронный пучок. Зато обратная волна поглощается начисто и возбуждаться такая лампа не будет. Конечно, каждая из половинок ЛБВ — это тоже и ЛБВ и она тоже может возбуждаться... Одним словом, реальная ситуация всегда будет сложнее, сколько ни рассказывай. Повидимому, так уж устроена Природа. И поэтому компьютерные модели не могут полноценно заменить натуральный физический эксперимент — ни в преподавании, ни в настоящей физике.

И в заключение этого параграфа взглянем чуть внимательнее на поглощающую вставку и спросим — из чего ее делать? В диэлектрик электромагнитная волна проникает, но в нем она не поглощается, а в металле — поглощается, но в него она почти не проникает. Так что поглощающие вставки должны делаться из «плохого проводника» — чего-то такого, во что электромагнитная волна проникает и в чем она поглощается. Часто вставки делают из углерода, точнее — из тонких углеродных пленок, нанесенных на диэлектрик.

3. Архитектура ЛБВ

Эта глава началась с аналогии между лестницей и спиральной замедляющей системой. Правда, в архитектуре лестница играет меньшую роль, чем замедляющая система в ЛБВ. Раньше всех была использована в качестве замедляющей системы спираль. Конструктивно простая, технологичная и позволяющая создавать широкополосные ЛБВ, она стала символом ЛБВ. Но время шло, требования к мощности и рабочей частоте ЛБВ увеличивались. Заметим, что спираль трудно охлаждать — она закрепляется на диэлектрических опорах, а диэлектрики проводят тепло плохо. Далее, при длине волны короче 5 мм сделать спираль становится трудно. Для работы в области больших мощностей и малых длин волн применяются другие замедляющие системы. На рис. 28 показаны несколько таких систем, состоящих из отдельных резонаторов, связанных отверстиями, через которые электромагнитное поле проникает из одного в другой.

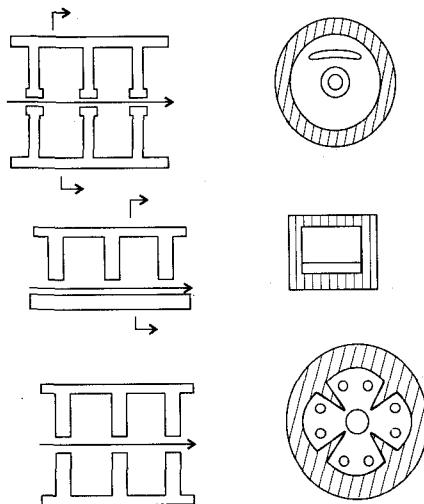


Рис. 28. Замедляющие системы. Стрелка — электронный поток. Нижняя замедляющая система называется поэтично — «клеверный лист»

4. ЛБВ должна быть экономной

Никакой ЭВП СВЧ не превращает 100 % подводимой к нему мощности в мощность электромагнитной волны на выходе. А жаль! И особенно этого жаль, когда прибор должен летать, например, на спутнике. Энергия, подводимая к ЛБВ, превращается в кинетическую энергию электронов. И вот она начала передаваться электромагнитной волне. Энергия электронов уменьшается, летят они все медленнее и, наконец, скорости их уравниваются со скоростью волны. Передача энергии прекращается. Как сделать, чтобы то, что у электронов осталось, было поменьше? Как выкачать из электронов побольше? Один из путей — сделать так, чтобы скорость волны уменьшилась при ее движении вдоль ЛБВ. Например, можно сделать спираль с переменным шагом. Таким способом можно уменьшить энергию, остающуюся у электронов. Ну, а с ней что делать?

Ведь вся энергия, с которой электроны долетают до коллектора, во-первых, нагревает его, порождая свой круг проблем (охлаждение, перегрев и так далее), а, во-вторых, течется зря. Поскольку на коллекторах ЛБВ яичницы пока не жарят (в космическом корабле яичницу жарили пока только один раз — Йон Тихий, герой рассказов Станислава Лема). Решение этой задачи вам уже известно и называется оно — рекуперация. На коллектор подается потенциал ниже, чем

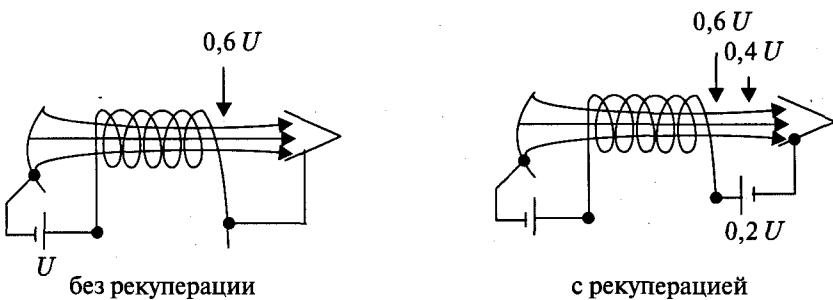


Рис. 29. Питание ЛБВ

Таблица 1

Параметры	Значения	
	без рекуперации	с рекуперацией
Потенциал спирали относительно катода	U	U
Потенциал коллектора относительно катода	U	$0,8 U$
Ток коллектора	I	I
Энергия электронов на выходе из спирали	$0,6 U$	$0,6 U$
Энергия, отданная волне	$0,4 U$	$0,4 U$
Энергия электронов на входе в коллектор	$0,6 U$	$0,4 U$
Мощность питания	IU	$0,8 IU$
Мощность, выделяющаяся на коллекторе	$0,6 U$	$0,6 U$
КПД	40 %	50 %

у замедляющей системы и электроны, прежде чем поглотиться металлом коллектора, «подтормаживаются». Расход энергии на питание лампы уменьшается. На рис. 29 показана схема питания без рекуперации и с ней. Сравним параметры этих схем (см. табл. 1).

В нашем примере рост КПД — 10 %. Это немало. Бывает, что удается получить и больше, в частности, если применен многоступенчатый коллектор. В нем более быстрые электроны добираются до более глубоких участков, находящихся под более низким относительно потенциалам. Каждый электрон тормозится в таком коллекторе почти «до полной остановки».

5. Одна волна сменить другую спешит...

А куда она спешит? В ЛБВ, например, она могла спешить в обе стороны. Только в одну сторону она усиливалась, подкачиваясь от пучка, а в другую бежала сама по себе, понемногу затухая. За счет этой обратной, отраженной от конца замедляющей системы волны ЛБВ возбуждалась, поэтому обратную волну подавляли поглощающей вставкой. Заметим теперь, что генераторы СВЧ-приборы не менее нужные, чем усилители и даже более нужные — ведь чтобы что-то усиливать это что-то надо сначала где-то генерировать. Может быть, за тысячу километров, но надо.

Нельзя ли сделать некое подобие ЛБВ, в которой будет усиливаться обратная волна? Тогда замыкание цепи обратной связи будет автоматическим, даже без учета отражений на концах — в одну сторону энергия будет переноситься электронами, в обратную — волной. Возникать колебания будут от случайных флюктуаций, а поддерживаться за счет возбуждения колебаний в электронном пучке усиленной волной (в начале пучка) и за счет возбуждения волны тормозящимся при этом пучком (в конце пучка). Заметим, при малом токе пучка колебания возникать не будут и такой прибор можно будет использовать как усилитель, а в генераторном режиме его можно будет использовать синхронизовать маломощным высокостабильным генератором (рис. 30).

Все это очень увлекательно, непонятно только, как сделать, чтобы электроны отдавали энергию волне, спешащей навстречу к ним. Нам кажется — и не без причин — что

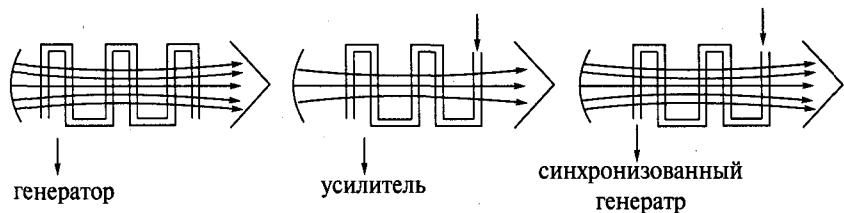


Рис. 30. Лампа обратной волны (ЛОВ)

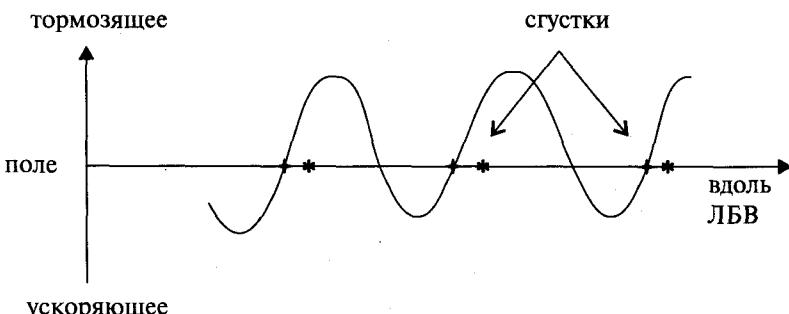


Рис. 31. Волна и электронные сгустки

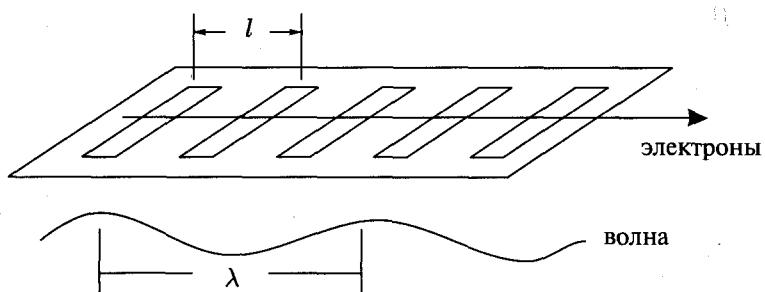


Рис. 32. Электроны заглядывают в окна

это невозможно. Зная, как работает ЛБВ, мы прямо видим, как летит слева направо волна и электронный сгусток в месте перехода от ускоряющего поля к тормозящему (точка * на рис. 31), как он чуть-чуть обгоняет волну, попадая в область тормозящего поля (рис. 31) и начинает тормозиться, отдавая свою энергию (больше некому) волне. Если же волна бежит навстречу электронам, электроны не будут отдавать энергию волне потому, что они не будут долго лететь рядом с нужным для отдачи энергии местом (точка * на рис. 31). А обязательно ли лететь рядом с этим местом долго? Собственно, нет...

Представьте себе для начала, что электронный поток летит с одной стороны от металлического экрана с окнами, а волна бежит с другой (рис. 32). Пусть электронный сгусток, проле-

5. Одна волна сменить другую спешит...

тая мимо окна, увидел там тормозящее поле, притормозился, отдал часть энергии и полетел дальше. У следующего окна он опять увидел тормозящее поле и опять пострадал. Вы сразу же видите, что таким способом можно усиливать волну, не обязательно имеющую ту же скорость, что и электронный сгусток. Важно лишь, чтобы электрон, пробегая мимо окон, видел в них одинаковые фазы колебаний. Пусть скорость электронов V_e , волны V_w , шаг окон l , длина волны λ (рис. 32). Тогда за время l/V_e путь l может пробежать не один период волны λ , а n периодов, то есть для «правильного» взаимодействия с величиной l/V_e может совпадать не только l/V_w , а любое $(l+n\lambda)/V_w$. Итак, условие работоспособности

$$\frac{l}{V_e} = \frac{l + n\lambda}{V_w}.$$

При этом сгусток будет в следующем окне видеть не то место волны, с которым взаимодействовал в предыдущем окне, а другое. Но что с того? Он будет отдавать энергию, а волна усиливаться.

Теперь сделаем последний шаг в наших рассуждениях — скажем, что n может быть и отрицательно. Тогда электрон будет взаимодействовать в следующем окне не с «тем местом» волны, с которым взаимодействовал в прошлом окне, и не с «местом», лежавшим сзади него (как при $n \geq 1$), а с «местом», лежавшим впереди него. Волна будет бежать навстречу и — усиливаться!

Конечно, заглядывать в «окошки» заставлять электрон не надо. Ведь если волна бежит с другой стороны от экрана, то взаимодействовать с электронами она будет слабо. Замедляющая система лампы обратной волны — ЛОВ может выглядеть по-разному, например так, как показано на рис. 33.

Помните, как в кино вертится назад винт самолета или колесо у телеги? Попробуйте решить задачу — как видимое направление вращения зависит от истинной угловой скорости колеса при частоте кадров 24 кадра в секунду.

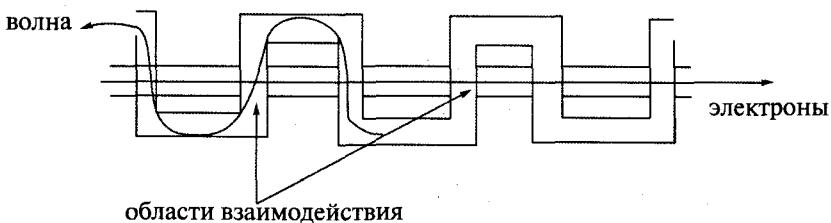


Рис. 33. Замедляющая система ЛОВ

Вот нечто подобное и «видит» электрон, заглядывая в окошки или пролетая через области взаимодействия. Только видит он не 24 кадра в секунду, а существенно больше. Вот такое кино...

6. Алмаз не для прикрас

Конструирование — это компромисс. Если больше мощность — то меньше диапазон частот, а если нет — то короче срок службы или дороже прибор... И так одно за другое, то за третье, пятое и девяносто девятое... Заказчики, как правило, желают улучшения одних параметров, но вовсе не согласны допустить ухудшения других параметров. Посмотрим, к чему это приводит в технике ЭВП.

При определенной длине волны резонаторы в кlyстроне и спираль в ЛБВ имеют определенные размеры. Какая-то доля электронного пучка перехватывается сеткой в зазоре резонатора или спиралью. Пучок перехватывается — мощность выделяется. Раз размеры определенные — то и плотность мощности ($\text{Вт}/\text{см}^2$) определенная. Мощность выделяется — деталь нагревается. Плотность мощности определенная — температура определенная. Деталь нагревается — металл испаряется или плавится. Если плавится, то все ясно. А если испаряется, то пары оседают или на изоляторах, превращая их в проводники, или на катоде, изменяя его состав до потери работоспособности. Вы видите — чем короче длина волны и больше мощность, тем быстрее испаряется и плавится. Это оно, Pf^2 -ограничение.

Посмотрим, как можно — нет, не выйти, но хотя бы выходить из этого положения. Во-первых, можно искать конструкции, в которых меньше плотность мощности, выделяющейся на поверхностях ЭВП. Ну, конечно, электронный пучок не должен перехватываться тем, чем не должен — действительно, что это электроны повадились оседать на сетках и спиралах? Но при попытке сжать пучок посильнее он теряет ламинарность. Такой пучок не удается сильно затормозить (рекуперировать) на коллекторе. Вот это и есть одно за другое, третье, пятое... не будем разматывать эти клубки до девяносто девятого, но поверьте — преувеличена эта цифра не потому, что клубок мал, а потому, что ни один даже самый гениальный конструктор не удерживает в оперативной памяти структуру из девяноста девяти связей. Он заменяет это опытом и интуицией... Вернемся, однако, от конструкторов к конструкциям.

Когда-то люди имели в своем распоряжении три материала — камень, дерево и жилы. Одно привязывали к другому третьим, получали добротный каменный топор и шли завоевывать жизненное пространство. Оно простипалось до горизонта, поросшее лесом, покрытое озерами и валунами, оставленными отступившим ледником... Количество материалов, имеющихся в распоряжении людей понемногу возрастило, наконец люди стали соединять материалы так, что их уже было нельзя разъединить.

Действительно, каменный топор можно разобрать, а железобетонную плиту нельзя. Теперь отметим еще различия:

- 1) арматура, залитая бетоном сразу в виде стены или плотины — готовая конструкция,
- 2) плита из железобетона — готовая деталь и, наконец,
- 3) бесконечная лента из железобетона, из которой уже после застывания бетона вырезают необходимые детали.

Вот в этом третьем случае, впрочем, кажется, не применяющемся в строительстве, можно говорить о композите... но терминологический спор оставим философам. Дело физиков и инженеров — понять и создать.

Итак, композиты. Если, например, взять вольфрамовый порошок, спрессовать его и нагреть, чтобы поверхностная диффузия соединила порошки в губку (процесс называется спекание), а потом эту губку пропитать расплавленной медью, то получится материал, почти такой же прочный, как вольфрам и с почти такой же высокой теплопроводностью, как у меди (у вольфрама низкая теплопроводность, а у меди — прочность). Высокая теплопроводность — это очень хорошо. Тепло отводится и поверхность, день и ночь тысячи и сотни тысяч часов молча принимающая на себя электронный ливень, нагревается меньше. Правда, испаряться вольфрам-медная композиция так же хорошо, как медь — и это плохо. Но вот если покрыть медь или медно-вольфрамовый композит с поверхности тонким слоем вольфрама, то испарение станет таким, как у вольфрама — то есть очень малым. Поэтому коллектор электронов делать таким из такого материала стоит. Со спиралью в ЛБВ ситуация иная.

Для того, чтобы затухание электромагнитной волны в спирали было мало, она должна быть сделана из металла с высокой проводимостью, например, меди. Но у меди же мала прочность! Ничего страшного, сделаем спираль из вольфрама, а с поверхности покроем медь. Да, но испаряться этот материал будет как медь. Кстати — дороже не значит лучше — у серебра проводимость выше, но испаряется оно быстрее, а у золота скорость испарения меньше — но меньше и проводимость. Одно за другое, то за третье, пятое и так далее. Кстати, некоторые сплавы меди (меди-бериллий, меди-титан, меди-хром) имеют большую, чем у меди прочность. Но — как и следовало ожидать — у них хуже проводимость. Так что надо смотреть конкретно — что больше, а что меньше, и на сколько именно.

Совсем не обязательно покрывать металл для уменьшения испарения металлом. Можно было бы покрыть медь, например, тонким слоем диэлектрика — окиси алюминия. Вы уже знаете, что в диэлектрике электромагнитная волна поглощается меньше, чем в плохом проводнике. Да, но это отно-

сится к хорошему диэлектрику. А что такое хороший? У него должна быть мала проводимость. Но электромагнитная волна затухает не только из-за наличия проводимости. При колебаниях ионов, вызванных изменением напряженности электрического поля, происходит превращение энергии электромагнитной волны в тепло и волна затухает. Причем «потери» энергии волны даже в хорошем диэлектрике таковы, что стараются иметь диэлектрика вокруг спирали поменьше — скажем, не загоняют спираль в сплошную трубу, а зажимают между тремя стержнями. И вот — одно за другое! — чем «меньше» этого диэлектрика, тем хуже отвод тепла от спирали и тем сильнее она нагревается. С уже известными вам последствиями.

Поиски диэлектриков с высокой теплопроводностью привели к алмазу — диэлектрику с теплопроводностью большей, чем у меди. Даже у керамики из окиси берилля теплопроводность меньше, чем у меди в два раза, у керамик же на основе окиси алюминия, наиболее употребительных в ЭШ СВЧ, а также перспективных керамик на основе нитрида бора и нитрида алюминия — в несколько десятков раз.

Вернемся к композитам — эта тема стоит еще нескольких абзацев. В предисловии к этой книге упоминалось, что за проблемами ЭВП полезно видеть или, скажем — узнавать — проблемы общетехнические. Композиты — вполне общетехническая проблема. Скажем, авиация и космическая техника только ими и живут. Когда в технику придете вы, композитами будут жить все. А в технике ЭВП традиции применения композитов вполне почтенные — например, один из двух основных типов катодов ЭВП — «вольфрамбариевый» — композит, смесь W и солей на основе системы Ba—Ca—Al—O. Он был предложен не столь давно — в 1954 году, но из трех самых старых катодов — вольфрамового (1884 год), оксидного (1904 год) и вольфрамториевого (1913 год) один — последний — был композитным и состоял из вольфрама и окиси тория.

Два материала, приведенных в соприкосновение, начинают взаимодействовать друг с другом. Если температура до-

Глава 4. Длинная дорога от входа к выходу

статочно высока, чтобы диффузия уводила из зоны взаимодействия продукты реакции, то состав материала будет изменяться. А раз состав, то и все свойства. Причем чем меньше детали, тем быстрее изменение состава захватит всю деталь. Поэтому сделать приборы миниатюрные, долговечные и высокотемпературные принципиально сложно. Надо искать композиты из материалов, плохо взаимодействующих друг с другом. Проблема взаимодействия материалов встала во весь свой рост на пути вакуумных интегральных схем (малогабаритные и высокотемпературные), монолитных катодно-сеточных узлов (на катод нанесена пленка диэлектрика с отверстиями, на нее, в свою очередь, металлическая пленка — «сетка»), высокотемпературных полупроводниковых приборов. Так что если вас тянет к технике, сразу и начните — с книги Б. С. Бокштейна «Атомы блуждают по кристаллу» (Библиотечка Кванта. 1984. Вып. 28.).

В этом параграфе рассказано не о всех технологических проблемах ЛБВ. Не рассказано даже о тысячной их доли! К технологии ЭВП СВЧ мы еще вернемся.

Глава 5

Поля скрещиваются

1. ЭВП СВЧ: кушать подано!

Прибор, получивший название «магнетрон», был изобретен Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым в 1939 году. Разумеется, у них были предшественники, придумавшие нечто близкое и вместе с тем достаточно далекое, чтобы считать магнетрон новым прибором. Но в этой книге мы не анализируем вопрос о развитии идей и о том, в какой момент и на какой почве возникает то, что потом назовут новой идеей. Своих предшественников имеют любая идея и любой прибор. Гораздо важнее, имеет ли она своих потомков.

Каждая вещь чем-то интересна, и чем-то интересен каждый ЭВП СВЧ. И если некоторые ЛБВ интересны тем, что изготавливаются лишь в нескольких десятках экземпляров (ЛБВ для спутников связи), то магнетрон (фото 13) интересен тем, что это был первый действительно массовый СВЧ прибор. Ибо те магнетроны, которые используются в СВЧ-печах, выпускаются в Японии более чем миллионными «тиражами». Традиционная японская кухня предпочитает варить, парить и тушить, а не жарить. Румяная корочка (содержащая канцерогенные продукты термолиза низкосортных жиров) — не ее цель. Так вот, СВЧ-печи как раз и делают нечто похожее на варку, парку и тушение, ибо электромагнитная волна СВЧ поглощается всем объемом сразу. Поэтому в печи, предназначенные для запада (для японцев — востока), встраивались инфракрасные лампы именно для «подрумянивания».

Возможно, магнетрон — это и последний массовый ЭВП СВЧ. Дело в том, что ЭВП СВЧ применяются преимущественно в области высоких частот и мощностей, а в этих областях

много одинаковых приборов не надо. А когда данная область частот и мощностей осваивается, то лампы успевают продвинуться дальше, а к этой области уже подбираются полупроводниковые приборы.

Пора, наконец, сказать, что такое магнетрон. Это — исторически первый представитель ЭВП СВЧ со «скрещенными полями». А именно — с магнитным полем, перпендикулярным электрическому. Как видите, определение просто. Сложны следствия из него.

2. Электрон в скрещенных полях

Заметим прежде всего, что магнитное поле в ЭВП СВЧ уже нам встречалось. Во многих ЛБВ и кластронах оно было направлено вдоль электронного пучка и удерживало электроны от разбегания в стороны. Действительно — пока скорость электрона направлена параллельно полю, на электрон не действует со стороны этого поля никаких сил. Но как только боковая скорость возникает, то возникает и сила Лоренца, перпендикулярная полю и скорости. Электроны начинают двигаться по спиралям, «навиваясь» на силовые линии магнитного поля. Что произойдет, если электрон начнет двигаться в «скрещенных полях», то есть в условиях, когда $H \perp E$?

Пусть электрон вылетает из катода (рис. 34) и начинает двигаться к аноду. Магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка. Пока электрон пролетел мало и скорость его мала (сила, действующая на электрон со стороны электрического поля постоянна и равна eE , где E — напряженность поля), сила, действующая со стороны магнитного поля тоже мала, и электрон летит почти по прямой. По мере «падения» на анод скорость электрона растет, сила Лоренца evB увеличивается, траектория изгибается. При малой индукции магнитного поля электрон отклонится от прямой, но анода все же достигнет. При большой индукции поля B траектория электрона анода не достигает. Когда скорость на рис. 34 становится направлена горизонтально, электрон начинает возвращаться к катоду.

2. Электрон в скрещенных полях

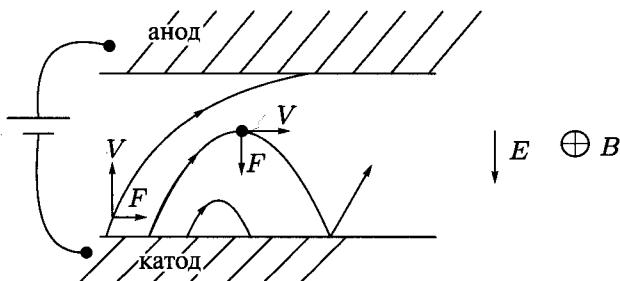


Рис. 34. Движение электрона в скрещенных полях

Теперь он движется против электрического поля и скорость его уменьшается. Наконец, подлетев к катоду, электрон уменьшает свою скорость до нуля. И все повторяется сначала (рис. 34).

В ЭВП СВЧ со скрещенными полями применяется и другое расположение электродов — коаксиальные катод и анод (рис. 35). Скоро мы узнаем, зачем, а пока скажем, что и в этом случае при малых B ток идет в цепи катод-анод, а при больших B протекание тока прекращается. На качественном уров-

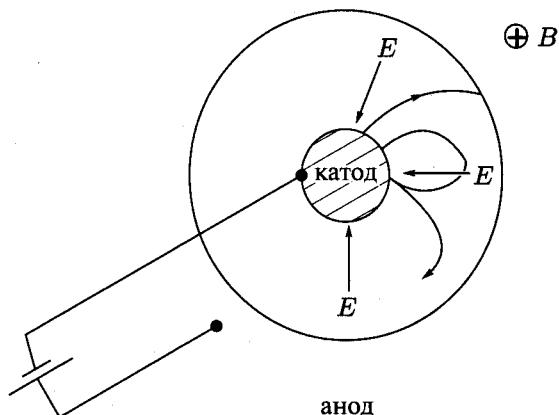


Рис. 35. Движение электрона в скрещенных полях,
коаксиальные электроды

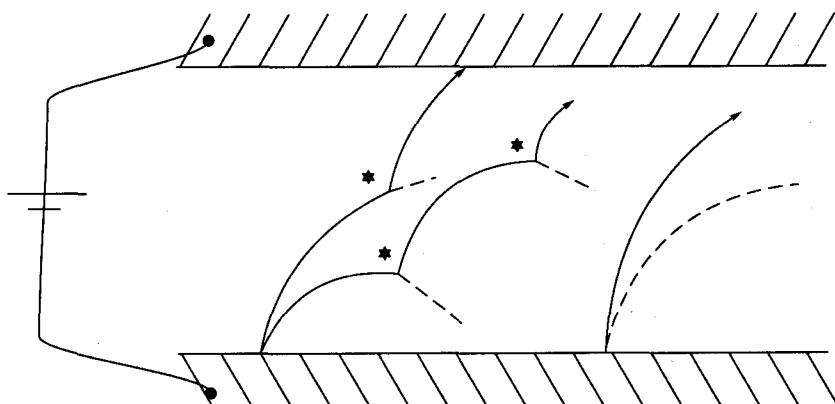


Рис. 36. Отдача энергии в точке * или вдоль всей траектории

не с движением электрона в скрещенных полях все ясно. Несколько одно — зачем это нужно и как при этом усиливаются или генерируются электромагнитные колебания. Заметим, что работают ЭВП со скрещенными полями как раз при таких магнитных полях, при которых электроны не должны долетать до анода. Но если ток не течет, то прибор не потребляет мощности от источника питания и ему нечего преобразовывать в энергию электромагнитного поля. Так что электроны должны долетать до анода и должны отдавать энергию, возбуждая колебания электромагнитного поля. Вещи эти связаны — внимание, это ключевое место параграфа — если электрон отдает энергию, например в точке * на рис. 36, то он успешно... падает на анод — ведь в точке * он как бы начинает двигаться заново, с нулевой скоростью, как только что вышедший из катода. Но в ЭВП электроны не отдают энергию в какой-то одной точке, а понемногу все время. Поэтому траектория состоит не из кусков, как на рис. 36 слева, а просто имеет меньшую кривизну, как справа.

Перед тем, как перейти к вопросу об усилении и генерации электромагнитных колебаний, заметим еще одну вещь. Движение электронов в системе электродов, показанных на рис. 34 и 35, можно с пользой применить и без генерации. Видно,

2. Электрон в скрещенных полях

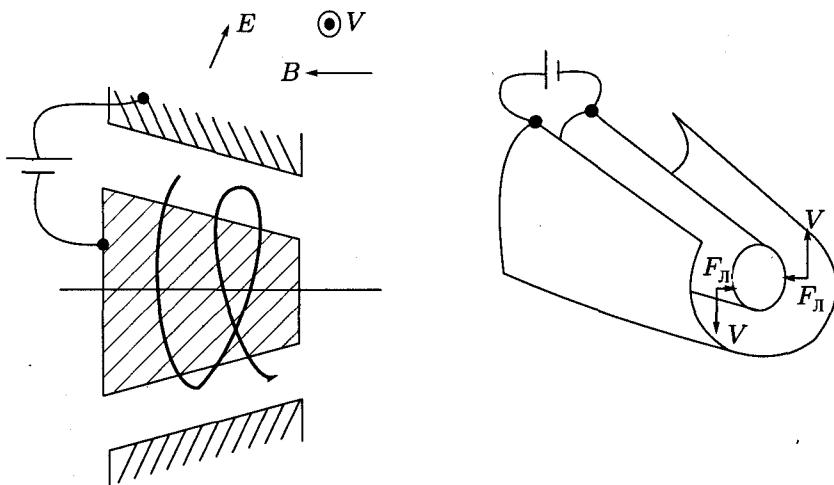


Рис. 37. Магнетронная пушка

что если катод на рис. 34 длинный, то в пространстве между ним и анодом собирается много электронов. И систему рис. 34 можно использовать в качестве электронной пушки в любом ЭВП, в котором нужен плотный электронный поток. Можно использовать в качестве электронной пушки и коаксиальную электродную систему рис. 35. Цилиндры — катодный и анодный — делаются не совсем цилиндрическими, а слегка конусными (рис. 37). Электроны закручиваются вокруг продольной оси и, из-за наличия у поля E осевой компоненты, начинают дрейфовать к выходу из магнетронной пушки.

При равенстве силы Лоренца и силы, действующей на электроны со стороны электрического поля, они и будут вращаться по окружностям, точнее — по спиралям. Поток, выходящий из магнетронной пушки, называется, естественно, винтовым, и он может быть использован в любом ЭВП СВЧ, например в клистроне. Может быть он использован и в приборе со скрещенными полями. Такой прибор будет называться «митрон».

Теперь перейдем к принципу генерации и усиления в приборах со скрещенными полями, в магнетронах, митронах и так

далее. Приборов таких существует очень много и после рассмотрения принципа их работы мы узнаем, почему так обширно и разнообразно семейство магнетронов.

3. Есть ли разница, куда падать

Да, конечно. Лучше в сутроб, чем на мостовую. Но эта аналогия может помочь понять смысл применения коллекторов с рекуперацией. Нас же сейчас будет интересовать нечто другое. Заметьте, что в ЛБВ электрон «падает» на участке от катода до начала замедляющей системы. Падает в том же смысле, в котором падает камень, оторвавшийся от вертикальной скалы — двигаясь по силе, уменьшая потенциальную и увеличивая кинетическую энергию. Электроны входят в замедляющую систему, набрав скорость и уже в ней отдают кинетическую энергию электромагнитной волне. При этом скорость электронов уменьшается и необходимое для работы ЛБВ соотношение между скоростью электронов и волны нарушается. Вы уже знаете, что методы борьбы с этой неприятностью существуют, но и неприятность существует тоже. В ЭВП со скрещенными полями ситуация иная — электрон «падает» с катода на анод, но летит вдоль них. Средняя скорость полета остается постоянной, поэтому электромагнитной волне электрон отдает не кинетическую, а потенциальную энергию. А раз так, то синхронизм не нарушается и это — преимущество таких ЭВП. Точнее было бы сказать — не преимущество, а свойство. Говорить о преимуществах одного ЭВП перед другим можно только на уровне выходных параметров (мощность, частота, вес, стоимость) и нельзя — на уровне внутренних свойств. Каждый ЭВП — сложная система, в которой все связано. Является ли преимуществом голубя перед человеком наличие крыльев? А что бы стал делать человек с голубиными крыльями?

Посмотрим чуть подробнее, как ведут себя электроны между катодом и анодом в ЭВП со скрещенными полями (рис. 38). Поведение электронов описывается двумя процессами — сортировкой и фазировкой. Сортировка устроена так —

3. Есть ли разница, куда падать

электрон 1 (рис. 38), который вышел из катода в такой момент, что потом он отдавал энергию волне, падает на анод, падает и отдает энергию, отдает и отдает... Это хороший электрон. Плохой электрон, который вышел из катода в такой момент, что волна отдавала ему энергию, тут же завершает свою биографию, врезавшись в катод. Заметьте, что теперь ток на анод будет идти даже при таких больших магнитных полях, при которых раньше (при отсутствии электромагнитного поля) ток не шел. Но процессом сортировки дело не исчерпывается. Хорошие электроны не только отделяются от плохих, но и фазируются, собираются в сгустки, как в ЛБВ. Только сгустки эти называют спицами и понятно почему — представьте себе, как движутся они в системе, показанной на рис. 35. Позже мы узнаем, что и от плохих электронов есть польза.

Заметим, что электронам не обязательно двигаться по сложным траекториям, показанным на рис. 34, 35. Если, например, на рис. 34 электрон летит вдоль катода (горизонтально) причем поля подобраны так, что сила, действующая на него со стороны электрического поля, равна силе, действующей со стороны магнитного поля, то электрон будет продолжать лететь по прямой. Легко видеть, что и круговую траекторию можно организовать таким же способом (рис. 39).

Бросаются в глаза два главных отличия магнетрона от ЛБВ: «круглость» и «смешанность». Первое, если выражаться точнее, это замкнутость замедляющей системы и электронных траекторий. Обе эти «замкнутости» не обязательны — есть приборы с одной из этих замкнутостей или даже вовсе без них (рис. 39 слева). Но именно возможность наличия или отсут-

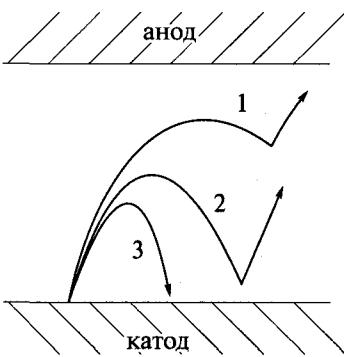


Рис. 38. Движение электронов в ЭВП со скрещенными полями при взаимодействии с электромагнитной волной

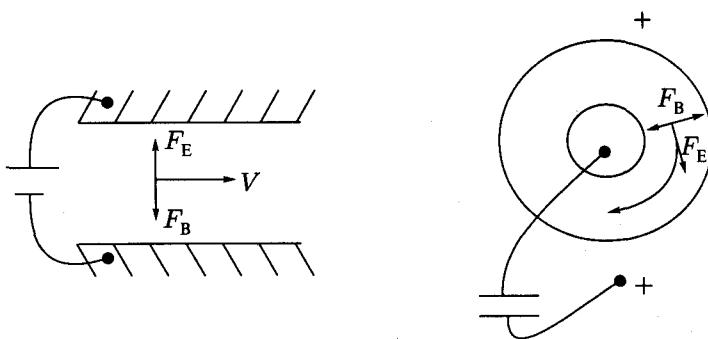


Рис. 39. Движение электрона при равенстве сил

ствия этих замкнутостей делает семейство магнетронов столь обширным.

Далее, «смешанность» — она тоже может быть выражена в разной степени. Например, в клаистроне все отдельно — катод, входной резонатор, пролетное или «дрейфовое» пространство, выходной резонатор и коллектор. Функции всех пяти узлов вам уже известны. Правда, промежуточные резонаторы делают отчасти то, что выходной, и отчасти то, что входной. Но в ЛБВ средние три элемента всегда смешаны в спирали — входная ее часть в основном модулирует пучок, выходная в основном снимает сигнал с пучка и вся она — пролетное пространство. В магнетроне смешано все вместе — все его сечения эквивалентны, все они содержат кусочек катода, кусочек пролетного пространства, кусочек анода (рис. 40), фото 13 — и, конечно, кусочек замедляющей системы. Замедляющая система в магнетроне состоит из резонаторов, а резонаторы могут быть разными (рис. 41).

В отличие от ЛБВ и ЛОВ в магнетронах замедляющие системы часто делают состоящими из резонаторов, настроенных на две резонансные частоты. На рис. 41 справа показан разнорезонаторный «анодный блок» с резонаторами щелевого типа. Такая конструкция называется весьма романтично — «восходящее солнце». Одни и те же вещи можно назвать по-разному. Можно — «разнорезонаторный щелевой анодный

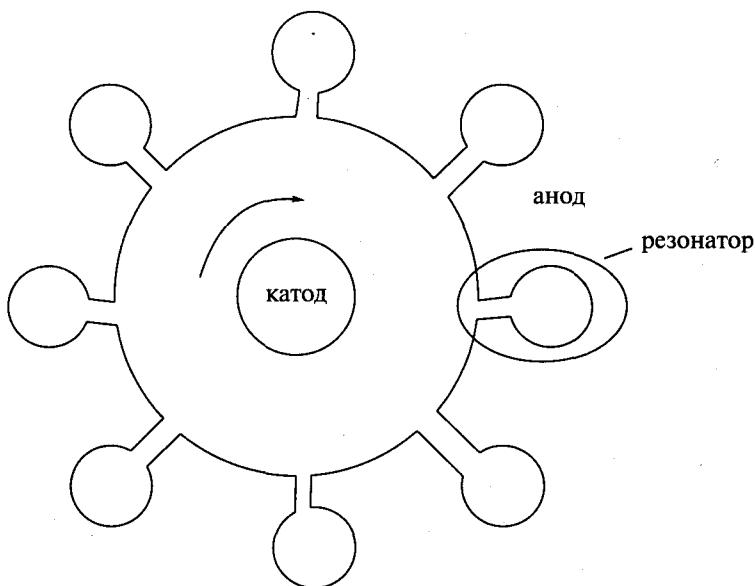


Рис. 40. Магнетрон с резонаторами типа щель-отверстие

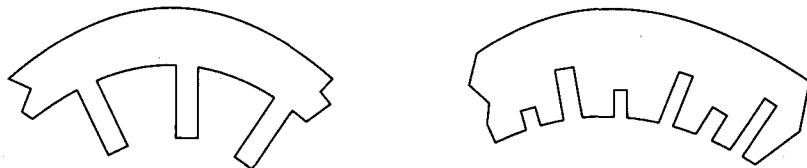


Рис. 41. Замедляющие системы магнетронов — лопаточного типа слева, щелевого — справа

блок», а можно — «восходящее солнце». Для того, чтобы назвать красиво, надо иметь возможность хотя бы на пять минут задуматься о восходе солнца, а для этого нужна трудноуловимая вещь — желание думать о том, чтобы назвать красиво.

Нужно то счастливое состояние души, которое создается трудной, но посильной работой и ощущением свободы выбора рода деятельности вообще и конкретной задачи и пути ее решения в частности.

Многое связано в нашей жизни с работой. Трудно сказать, более ли счастливы те, у кого это «многое» больше, чем у других — как сравнивать? Но те, кто много работают, не соглашаются работать меньше. Даже тогда, когда окружающая жизнь — то есть окружающие люди — активно мешают работать. О переплетении работы и жизни рассказывает единственная художественная книга, названная именем ЭВП СВЧ. Книга «Магнетрон» опубликована в 1957 году физиком Г. И. Бабатом и писательницей А. Л. Гарф. Она рассказывает о временах, когда перед физиками встал вопрос, почему на экранах американских радаров не видны, а на экранах английских радаров видны перископы нацистских подводных лодок, подкрадывающихся к берегам Англии. Многорезонаторный магнетрон еще не был изобретен. Радары использовали лампы с электростатическим управлением или «магнетроны с разрезным анодом» — предшественники многорезонаторных. А вопрос, видно или не видно — для нас не вопрос: длина волны, которую генерировали американские магнетроны, была больше диаметров перископов, а длина волны, которую генерировали английские, была меньше. И многие другие тогдашние вопросы сейчас для вас не вопросы... История техники неотделима от истории людей. И тогдашние вопросы сменились сегодняшними, не менее важными. То есть, как говорят, жизненно важными.

4. Разложим по полочкам

Главное, что отличает ЛБВ от ЛОВ — это направление распространения электромагнитной волны. Куда она распространяется в магнетроне — по или против электронного потока? Запомним вопрос и пойдем дальше.

На имеющихся в этой главе рисунках изображены две разные «геометрии» — линейная или цилиндрическая. В чем их принципиальное различие? Только ли в том, что линейная замедляющая система имеет отдельные вход и выход, а цилиндрическая замедляющая система может их или иметь (не-

4. Разложим по полочкам

замкнутая) или не иметь (замкнутая), как в магнетроне? Запомним и этот вопрос.

Откуда берется в ЭВП электронный поток? В магнетроне его создает вся поверхность катода, вдоль всей замедляющей системы, а нельзя ли вводить, «инжектировать» электронный поток извне, от отдельного катода — как в ЛБВ?

Итак, вот наши вопросы: прямая или обратная волна, линейная или цилиндрическая геометрия, замкнутая или разомкнутая замедляющая система, замкнутый, или разомкнутый электронный поток, инспектированный или собственный поток. На каждый из этих вопросов может быть два ответа и, следовательно, ответами на эти вопросы могут быть $2^5 = 32$ типа прибора. Однако не все сочетания ответов допустимы.

геометрия	линейная		цилиндрическая								
эл. поток	разомкн.		разомкн.				замкн.				
замедл. сиг.	разомкн.		разомкн.		замкн.		разомкн.				
эл. поток	ИНЖ	СОБ	ИНЖ	СОБ	ИНЖ	СОБ	ИНЖ		СОБ		ИНЖ СОБ
Волна	ПР	ОБР	ПРОБР	ПРОБР	ПРОБР	ПРОБР	СТ	СТ	ПР	ОБР	ПР ОБР СТ СТ
ЭВП	ЛБВМ биматрон	ЛОВМ биттермитрон карцинитрон	дематрон							УЛЬТРОН	магнетрон

Рис. 42. Классификация СВЧ ЭВП М-типа

Не могут быть замкнуты замедляющая система и электронный пучок в приборах с линейной геометрией.

Далее, магнетроны — приборы с замкнутой замедляющей системой работают в режиме, когда колебания в соседних резонаторах находятся в противофазе. В этом случае по середине между резонаторами напряженность электрического поля равна нулю и поэтому волна в магнетроне — не прямая или обратная, то есть бегущая, а стоячая.

Наконец, заметим, что если и электронный поток и замедляющая система не замкнуты, то нет принципиальной разницы между линейной и цилиндрической геометрией. Отсюда связи в левом нижнем углу таблицы. Итак, посмотрим на таблицу (рис. 42). В нижней ее части указаны названия некоторых наиболее употребительных типов ЭВП СВЧ со скрещенными полями. А остальные клеточки? Можно, конечно, сказать, что раз таких приборов нет или они не нашли широкого применения, то значит там нечего и искать. Но можно подойти иначе и что-то найти.

5. Маленький катод позволяет выкинуть большую схему

Фраза «катод — сердце электронного прибора» достаточно широко известна. Смысл этой фразы в том, что параметры ЭВП во многих случаях определяются параметрами катода, а что до срока службы ЭВП — так он почти всегда определяется катодом. Но в магнетроне ситуация совершенно особая. Часть электронов, эмиттированных катодом, возвращается на него, причем не подползает к нему на карачках, потратив всю энергию, а врезаются, имея вполне приличную скорость. Правда, эта энергия досталась электронам неправедным путем — она «украдена» у электромагнитной волны, но катоду от этого не легче. Возврат части электронов на катод с энергией означает нагрев катода. Иногда мощность, поступающая на катод, так велика, что его приходится не нагревать, а охлаждать. Но электронная бомбардировка не только

5. Маленький катод позволяет выкинуть большую схему

нагревает катод. Приходящие на катод электроны выбивают из него вторичные электроны. Этот вид эмиссии называется вторичной электронной эмиссией. Часто вторичная электронная эмиссия оказывается достаточна, чтобы магнетрон работал только за ее счет. Конечно, избавиться от накала довольно соблазнительно, поэтому постоянно ведутся поиски материалов с большой вторичной эмиссией. Однако — как и следовало ожидать — материалы, имеющие большую вторичную эмиссию, быстро разрушаются бомбардирующими катод электронами. Но это не самое интересное.

Вспомним, что такое ЛОВ, синхронизованная внешним генератором. Что будет, если не подать на ее вход, который находится около коллектора, синхронизующий сигнал? Она будет не очень стабильна. То есть, если мы хотим, чтобы такая лампа генерировала импульсный сигнал вполне определенной частоты, надо подавать напряжение питания только на время импульсов. Делает это достаточно большая схема, называемая модулятором. Заметим, что выходная лампа модулятора должна пропускать через себя всю мощность питания ЭВП. Так что места эта схема займет больше, чем тот ЭВП, которому она и будет модулировать питание. Но без модулятора не обойтись. Теперь представим себе усилитель — кристаллон или ЛБВ. Пусть нам надо, чтобы он работал в импульсном режиме. Опять нужен модулятор — ведь если анодное напряжение подавать на кристаллон непрерывно, на его коллекторе будет выделяться такая мощность, что он разрушится быстрее, чем вы успеете сказать «ой»!

А вот в магнетронных усилителях без модулятора иногда можно обойтись. Действительно, представим себе прибор с холодным катодом, эмиттирующим только за счет вторичной или автоэлектронной эмиссии. При наличии на лампе напряжения, но при отсутствии СВЧ-сигнала на входе ток течь через лампу не будет. Редкие электроны, выскочившие из катода, будут мирно улетать на анод и... и все. Теперь подадим на вход лампы СВЧ-сигнал. Кое-какие из этих электронов будут попадать в тормозящее поле и возвращаться на катод.

Возвращаться и выбивать из него вторичные. И если на один первичный вылетевший из катода электрон будет приходить ся в среднем больше одного вторичного, то начнется лавинный процесс умножения электронов. Через лампу пойдет ток. Прибор начнет усиливать.

Это называется безмодуляторное питание. Но для работы ЭВП в таком режиме он должен иметь катод с высокой вторичной эмиссией. Вот и опять потребовался хороший катод...

Уточним, что такое в данном случае хороший. Конечно, катод магнетрона, если для работы данного магнетрона нужна термоэмиссия, должен иметь все те хорошие свойства, которые должен иметь термоэлектронный катод. Нужную эмиссию, не слишком большую скорость испарения, достаточный срок службы, способность работать в том вакууме, который будет в приборе. Какие свойства должен иметь катод как вторично-электронный катод? Он должен сохранять все свои свойства при наличии электронной бомбардировки, иметь достаточный срок службы в этих условиях и, наконец, иметь достаточную вторичную эмиссию. Коэффициент вторичной эмиссии всех материалов зависит от энергии первичных электронов так, как показано на рис. 43. Коэффициент вторичной эмиссии — отношение количества улетающих от куска материала элек-

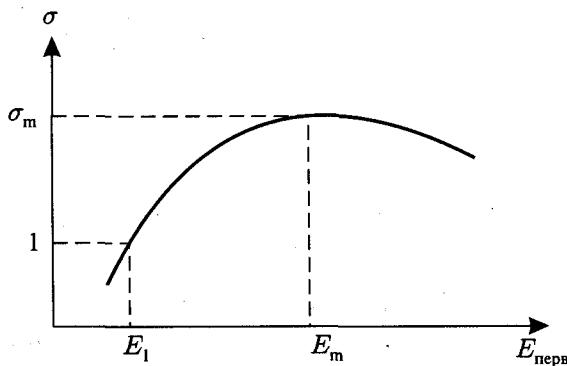


Рис. 43. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичных электронов

tronov к количеству прилетевших. Так вот, энергия, когда $\sigma = 1$, называется «первый критический потенциал» — E_1 . Энергия, когда достигается максимум σ , равный σ_m — это E_m . Эти три величины — σ_m , E_1 , E_m — и важны для работы ЭВП. Желательно, чтобы σ_m было побольше, а E_1 — поменьше; это так естественно! — желание получить побольше, потратив поменьше энергии. Но — нет в мире совершенства — как сказал лис из «Маленького принца» или мир не создан по человеческому заказу — (по крайней мере по заказу разработчиков ЭВП СВЧ) сказал бы я — у металлов σ_m мало и велико E_1 , но им не страшна электронная бомбардировка, а у диэлектриков лучше σ_m и E_1 , но низка стойкость к электронному облучению. История катодов магнетронов — это история поисков композиционных материалов, сочетающих лучшие свойства металлов и диэлектриков... Ибо чем больше σ_m и E_m , тем большую мощность можно получить на выходе магнетронного усилителя, а чем меньше E_1 , тем меньшую мощность надо подавать на его вход.

6. Когда все упирается в технологию

Довольно часто. Особенно, если попытаться сделать что-то новое. Конкретно, на краях освоенного диапазона параметров. При попытках сделать ЭВП рекордной мощности, КПД или частоты или с рекордным сочетанием нескольких параметров оказывается, что либо нельзя сделать такую конструкцию, как хочется, либо сделать можно, но нет материалов, при применении которых все это сможет работать. Выходом из положения является обычно создание или новой технологии, позволяющей сегодня сделать то, что нельзя было сделать вчера, или новых материалов, позволяющих прибору работать в условиях, в которых старые материалы «не справляются». Впрочем, новые материалы — это, как правило, новая технология.

Технологических проблем в магнетроне много. Остановимся на двух. Первая — проблема обеспечения малых размеров и малых допусков (то есть точных размеров). Эта проблема общая у всех ЭВП СВЧ, но, согласитесь, намотать спираль

диаметром 1 мм для ЛБВ проще, чем сделать анодный блок для магнетрона диаметром 1 мм. Применяют пайку (для резонаторов лопаточного типа), выдавливание, электроискровую и электрохимическую обработку, резку и «сверление» электронным лучом, наконец и все традиционные виды металлообработки. Кроме, пожалуй, молотка; но ведь и часы им обычно не собирают. Выдавливанием удается изготавливать системы с толщиной лопаток в 0,1 мм, а допуска на размеры при электроискровой обработке составляют 1 мкм. Стандартное сравнение — диаметр волоса 0,05 мкм или 50 мкм. Когда же размеры анодного блока становятся меньше 1 мм, идут на такое ухищрение — делают отдельные пластины из фольги толщиной 10—20 мкм и складывают анодный блок из таких пластин. Отверстия же сложной формы в фольге делают методами, заимствованными из полупроводниковой техники (например, фотолитографией) и позволяющими получать микронные размеры.

По мере уменьшения размеров и увеличения мощности ($Pf^2!$) увеличивается плотность мощности ($\text{Вт}/\text{см}^2$), выделяющейся на внутренней поверхности анодного блока, куда попадают приносящие ее электроны. Поэтому эту несчастную поверхность покрывают молибденом или вольфрамом, или же делают анодный блок из хитрой заготовки — молибденового прутка, залитого медью. Диаметр прутка выбирается немного большим внутреннего диаметра анодного блока.

Конечно, проблема обеспечения малых размеров и допусков встречается и в других областях техники. Но вот вам второй пример — пример проблемы, пожалуй, совсем специфической. Насколько гладкой должна быть поверхность деталей? Коэффициент трения значения не имеет, «блеск» тоже, так какая же разница, гладко или не очень? Но разница есть.

Пусть по поверхности протекает ток. В области высоких частот ток концентрируется у поверхности детали (скип-эффект). Если шероховатость меньше толщины, в которой сосредоточен ток, то шероховатость мешает работе мало (рис. 44 слева). Если шероховатость больше (рис. 44 справа), то путь

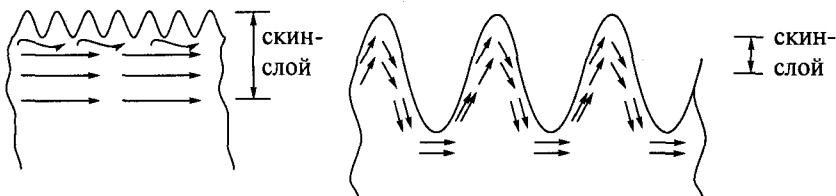


Рис. 44. Скин-эффект на шероховатой поверхности

электронов увеличивается. Следовательно увеличивается сопротивление и потери мощности.

Заметим, что важно, как именно «устроена» шероховатость. Если деталь шлифовалась в одном направлении и так, что токи протекают вдоль «оврагов», то увеличения сопротивления не будет. Если же ток «взбирается и ныряет», то потери мощности неизбежны. Отсюда мораль — подстилая соломку там, где вам предстоит упасть, думайте, класть вам ее вдоль или поперек.

Отступление 4 — о материалах

Любая вещь делается из чего-то. А именно из материалов. Вот о материалах электронных вакуумных приборов мы и поговорим. Материаловедение ЭВП — область техники, лежащая на пересечении двух областей техники — «техники ЭВП» и «общего материаловедения». Поэтому тема «материаловедение ЭВП» может быть построена так — материалы рассматриваются в соответствии с обычной схемой классификации, но все время описываются особые требования к материалам, происходящие из техники ЭВП. Возможен, впрочем и другой подход — строить схему рассмотрения материалов исходя только из проблем техники ЭВП. Поскольку нам нужна не столько детальность, сколько общий взгляд на область, мы изберем первый путь. Сначала. А потом рассмотрим проблемы именно ЭВП.

Начнем с самого простого — с магнитных материалов. В ЭВП магнитные материалы применяются в виде: а) постоянных магнитов, создающих магнитные поля в приборах

М-типа и ЛБВ, ЛОВ и так далее; б) магнитномягких материалов, из которых делаются иногда части оболочки приборов М-типа, когда эти части оболочки находятся на пути силовых линий магнитного поля. В первом случае никакой ЭВП-специфики нет: понятно, что магнит должен создавать то поле, которое нам надо, в том объеме, в котором нам надо при наименьших своих размерах и весе. Во втором случае ситуация иная — магнитномягкий материал, как и любой материал, являющийся частью оболочки прибора, должен обеспечивать малое проникновение газов из атмосферы в объем прибора путем диффузии. Проблему диффузии газов через материалы мы рассмотрим позже. Кроме того, такой материал должен сам мало выделять газов в объем прибора поменьше. Об этом тоже поговорим позже.

Следующий класс материалов — конструкционные, то есть те, из которых сделана конструкция. Собственно все, что мы видим кругом конструкций — от птицы до балльного платья, от ракеты до электронной лампы. Параллели бывают потрясающие: по одному принципу построены оболочки ракет и женские платья (изобретенный в 1922 году мадемузель Вионе «диагональный крой»). Так вот, конструкционные материалы для ЭВП должны удовлетворять тем же требованиям, что и прочие конструкционные материалы — прочность при рабочих температурах, жесткость (высокий модуль Юнга) опять же при рабочих температурах, возможность соединения с другими материалами (об этом мы поговорим особо). Специфическое ЭВП — требование: малое испарение при рабочих температурах. Часто еще требуются высокая тепло- и электропроводность, если по соответствующим частям конструкции протекает тепло и электрический ток. А если, наоборот, не должны протекать, то низкая тепло- и электропроводность. Переходим к проблеме электропроводных и изоляционных материалов.

Проводник должен иметь возможно более низкое сопротивление. Стало быть — медь. А если надо бороться за крохи и если не жалко денег — то серебро. Если «резистивный ма-

териал» (в ЭВП они применяются очень редко) — то нужно не возможно меньшее, а вполне определенное сопротивление. Как у спирали электроплитки. Для этого существуют сплавы металлов, имеющие высокое сопротивление — они и применяются, кстати в электроплитках и в некоторых из сопротивлений, которые внутри телевизора и приемника. Если это полупроводник (в ЭВП они применяются реже) — то от него требуются его специфические полупроводниковые свойства (ширина запрещенной зоны и так далее).

Если, наконец, это изолятор — то от него нужно возможно более высокое сопротивление (при рабочих температурах) и высокая электропрочность (опять же, при рабочих температурах). Как уже сказано, от всех этих материалов требуются малое газовыделение и испарение и возможность соединения с другими материалами.

Существуют и специфические ЭВП-материалы, осуществляющие свои функции только в ЭВП. Это геттерные материалы, поглощающие (путем диффузии внутрь себя) в ЭВП газы и эмиссионные материалы, имеющие определенную (для катодных материалов — низкую, для антиэмиссионных — высокую) работу выхода либо определенный (для вторично-электронных материалов — высокий, для антидинатронных материалов — низкий) коэффициент вторичной эмиссии. Об этих материалах будет рассказано в другой главе.

Настало время сказать кое-что о композиционных материалах. Это материалы, состоящие из нескольких других, являющиеся «композицией». Обычно такой материал наследует одни свойства от одного из своих родителей, другие — от другого. Естественно, находят себе применение только материалы, наследующие хорошие свойства. Например, вольфрамовая губка, пропитанная медью, будет иметь высокую прочность — почти как у вольфрама — и низкое сопротивление — почти как у меди. Композиты — быстро развивающаяся область техники. И науки — ибо всякая развивающаяся область техники живет за счет научных результатов и, в свою очередь, порождает научные задачи.

Специфически электровакуумные вопросы — вопросы о газовыделении, испарении и проникновении газов через материалы. Газовыделение — это процесс диффузии газов из объема материалов к их поверхности и десорбция (отрыв) их атомов (или молекул) с поверхности в объем ЭВП. При этом вакуум в ЭВП ухудшается, и прибор может ухудшить параметры или выйти из строя. Заметим, что диффузии из объема к поверхности без десорбции недостаточно для газовыделения. Например, кислород может продиффундировать к поверхности, образовать на поверхности тонкую пленку окисла и — и все. Оксид не разлагается и десорбция не происходит. Вот если в стекле диффундирует гелий, то он с поверхности десорбируется сразу же, гелий — газ инертный, в соединения с элементами, входящими в состав стекла, он не вступает.

Газопроницаемость — то есть проникновение газов из атмосферы в объем ЭВП состоит из двух процессов — сорбция (захват) газов из атмосферы на поверхности стенок прибора, диффузия их вглубь материала и уже рассмотренное выше газовыделение — диффузия к другой, внутренней поверхности и десорбция с нее.

К этому можно добавить следующее. В металлах лучше всего диффундирует водород, так как у него самый маленький атом. К счастью, в атмосфере водорода немногого. А кислород и азот имеют очень маленькую скорость диффузии. В диэлектриках (например, стекле) быстрее всего диффундирует гелий, так как в диэлектриках газы диффундируют не по-атомно, как в металлах, а в виде молекул. Молекула же самая маленькая у гелия (это его атом; молекула водорода больше). Впрочем, скорость диффузии гелия через стекло из атмосферы такова, что лампы работают десятки лет. Я лично знаком с работающим ламповым приемником, который уже — будь он человеком — был бы давно на пенсии. Известен однако случай выхода из строя ЭВП, помещенных в глубоководный аппарат (для изучения людьми моря), в котором атмосфера состояла из кислорода вместо азота—гелия. Поток гелия в ЭВП увеличился, и вакуум в них ухудшился недопустимо.

В заключение этого отступления рассмотрим проблему соединения материалов. Часто говорят, что те или иные материалы соединить можно или нельзя. Так говорить некорректно — ибо соединить можно любые материалы. Вопрос в том, какую прочность будет иметь такое соединения. В технике ЭВП применяются в основном два способа соединения — пайка и сварка. Их различие — при пайке соединяемые материалы не расплавляются, остаются твердыми. Зазор между ними заполняется третьим материалом, припоем. По существу, при пайке проблема прочности соединения разделяется на три — прочность самого припоя и прочность зон соединения одного материала с припоем и припоя с другим материалом. При сварке плавятся оба соединяемых материала и образуется слой сплава, поэтому проблема также делится на три — прочность этого сплава и прочность зон соединения одного материала со сплавом и сплава с другим материалом. Наконец, существует промежуточный между пайкой и сваркой способ, так называемая «пайка оплавлением», когда расплывается один из соединяемых материалов и он спаивает... себя со вторым соединяемым материалом. В этом случае не образуется трех зон, а только одна — зона соединения материалов.

До сих пор мы говорили о соединении металл—металл. При соединении металлов с диэлектриками сварка — в обычном ее виде — не применяется, так как температура плавления керамики значительно выше температур плавления большинства металлов и вдобавок при плавлении керамики разлагаются. Стекло же плавится легко, но — наоборот, слишком легко — металлы же, с которыми соединяют стекло, плавятся при более высоких температурах. Так что соединение металла со стеклом — это, по-существу, пайка оплавлением, причем плавится стекло. Но ее традиционно называют пайкой.

А зачем вообще при пайке оплавлением расплавляют один из соединяемых материалов? Чтобы сблизить соединяемые материалы. Можно и не плавить — нагреть и сильно сжать. За счет пластичности материалы сблизятся на атомные расстояния и диффузия, ускоренная нагревом, переме-

шает их. Такой способ соединения называется термокомпрессионной сваркой. Слово «сварка» упомянуто тут совершенно не к месту, но такова традиция. В итоге, как видно все проблемы сошлись на двух — на прочности слоя застывшего сплава (при сварке) и прочности переходных зон (в остальных случаях). Тем более, что кроме внешних усилий, существуют еще и внутренние, возникающие из-за различий в термических расширениях. Действительно, все эти пайки — сварки делаются при высоких температурах. Потом мы прибор охлаждаем и если соединенные при высокой температуре материалы по-разному укорачиваются при охлаждении (принято говорить — удлиняются при нагреве), то те, которые «пытаются» сократиться сильнее, оказываются в растянутом состоянии, а те, которые «пытаются» сократиться слабее, оказываются в сжатом состоянии.

Любой сплав и любая переходная зона состоят из соединений, входящих в соединяемые материалы элементы. Поэтому вопрос соединения сводится:

- 1) к согласованию термических расширений соединяемых материалов, а если они не согласованы — использованию промежуточных материалов,
- 2) определению, какие соединения образуются в сплаве (если имеет место сварка) и переходных зонах (во всех случаях), и каковы их прочности, а если их прочности недостаточны — поиск припоя, образующего «хорошие» переходные зоны.

В качестве «изюминки» укажем, что переходные зоны бывают, например, с низкой температурой плавления. И это привело когда-то автора этой книги к ситуации «остатки волос встали дыбом». Когда соединение титана (с температурой плавления 1670°C) и никеля (с температурой плавления 1455°C) молча рассыпалось при температуре намного меньшей, чем «ему полагалось» (как я по незнанию полагал). Когда это повторилось, я удосужился взять справочник и обнаружил, что в системе титан-никель есть соединение (или, как говорят металловеды, фаза), плавящееся при 955°C ...

6. Когда все упирается в технологию

О материалах написаны целые библиотеки. О соединении материалов написаны многие шкафы книг. Но неисследованного или исследованного, но непонятого осталось, наверное, столько же. Вам и материалы в руки. Точнее — в мозги и руки.

Глава 6

Гибридные электронные приборы

1. Поле боя при лунном свете, или польза и вред от конкуренции

Обычно одни и те же технические функции могут реализовываться приборами нескольких типов. При каких условиях выбор делается единственным (собственно, это уже не будет выбор)? Казалось бы, усложнение требований и сделает выбор единственным. Действительно, данное сочетание мощности и усиления, например, может быть реализовано и кристаллом и магнетронным усилителем, но если потребовать больше КПД и малый вес, то придется остановиться на магнетроне. Однако параметры приборов со временем улучшаются и потратив некоторое время на разработку, можно будет сделать кристалл с большим КПД и малым весом. Потребуем, чтобы прибор был готов за некоторое определенное время. Но и это не делает выбор единственным — ибо, потратив больше сил и ресурсов, можно тот же прибор разработать быстрее. Это и есть самое главное — потратить силы и ресурсы. Выбор реализуемого варианта определяется тем, на каком пути мы потратим меньше сил и ресурсов. В искусство альпиниста входит умение оценить сложность маршрута до его прохождения. В искусство инженера — тоже.

То, что одна и та же задача может быть решена несколькими способами, вызывает конкуренцию. Внешне это выглядит, как конкуренция приборов, по существу же — это конкуренция людей, разработчиков этих приборов. Известно, что при наличии конкуренции создаются лучшие приборы, но и сил расходуется больше. Поэтому вопрос о том, нужна конку-

ренция или кооперация, или лучше просто заняться разными проблемами, должен решаться с учетом не только качества полученного решения, но и сил, которые придется потратить.

Обычно улучшение работы при наличии конкуренции переоценивается. Наука и техника — не дорожка стадиона, и сопение соперника за спиной не заставляет работать лучше. А зачастую наоборот. Психология инженера и ученого заметно отличается от психологии спортсмена.

Но иногда конкуренция между типами электронных приборов приводит к созданию новых приборов, сочетающих в себе черты разных старых. Клистрон — тезис, ЛБВ — антитезис, твистрон синтез. Гибридный прибор, сочетающий в себе принципы действия нескольких других — это и есть синтез.

2. Тезис, антитезис, синтез

Действительно, воздействовать на электронный пучок можно электрическим полем в резонаторе (как в клистроне), а «снимать» с пучка усиленный сигнал можно замедляющей системой — как в ЛБВ. Такие приборы называются твистронами. Можно представить себе и другие гибридные СВЧ-приборы. Например, сгустки электронов формируются и в клистроне, и в магнетроне, значит, можно использовать клистронный принцип группировки электронов, и уже сгруппированные сгустки вводить в магнетрон. Можно управлять электронами и с помощью электрического поля в волноводах. Или использовать в клистроне «группирователи» из отрезков замедляющей системы (монотрон). Гибридными же являются и многие приборы М-типа, рассмотренные выше — ЛБВМ, ЛОВМ — это отражено и в их названиях, можно совместить в одном приборе высокочастотные и низкочастотные принципы управления электронами. Поставить в клистроне или ЛБВ перед катодом сетку и, изменяя напряжение на ней, осуществлять дополнительное управление электронным пучком. Такая лампа тоже является синтезом — обычной лампы с электростатическим управлением и, соответственно, клистрона (этот прибор называется «клистрод») или ЛБВ. Он

был создан в фирме Varian (это название ни о чем не напоминает?) в 1981 году. А что будет, если вместо термокатода вставить в СВЧ-прибор (ЛБВ, клистрон, прибор М-типа) фотокатод, эмиттирующий электроны только при освещении? Понятно, что — получится СВЧ-прибор, имеющий дополнительный путь управления электронным пучком, реагирующий на освещение и способный, например преобразовать высокочастотную модуляцию светового сигнала в электромагнитный сигнал этой частоты. ЛБВ с фотокатодом называется фотоЛБВ, клистрон с фотокатодом называется фототрон (изобретен Дж. В. Фосманом и М. Вильямом в 1931 году), а если фотокатод облучается лазером, прибор называется лазерtron.

Наконец, иногда просто в одном вакуумном объеме размещают две лампы. Такой прием применяется довольно давно — обычные низкочастотные лампы часто бывают двойными и тройными (двойной триод, двойной диод-триод, триод-пентод). Гибридным такой прибор назвать нельзя — это просто несколько приборов в одной оболочке. К такому решению мы еще вернемся.

В перечисленных выше приборах «гибридируются» принципы действия различных вакуумных приборов. Но гибридизироваться могут и вакуумные приборы с полупроводниками, и вакуумные с газоразрядными. Заметим, что чем-то похожим на гибрид нам уже показались «лампы без деталей», с которых шла речь в конце второй главы. Такая лампа методами изготовления напомнила нам микросхему. Как выглядит гибрид вакуумного и полупроводникового прибора?

3. Полупроводник в вакууме

Представим себе электронную лампу (рис. 45), у которой анодом служит пластина 8 из кремния, припаянная к металлической пластине — контакту 9. Второй контакт — напыленная на пластину со стороны вакуум тонкая (около 0,1 мкм) алюминиевая пленка. Электрон, эмиттированный катодом 1 и ускоренный в зазоре между катодом и анодом, попадает на анод —

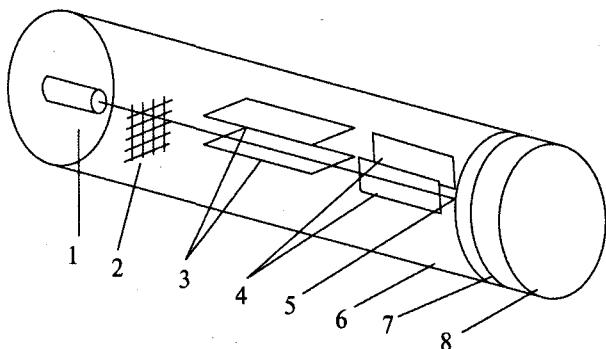


Рис. 45. «Твердотельная лампа»

пластины и начинает двигаться в ней, обрывая другие электропроводные от атомов кремния и расходуя на это свою энергию. Если исходный электрон ускорен напряжением, например, 15 кВ, то, потеряв при прохождении алюминиевой пленки 2 кэВ энергии (в других металлах или в более толстых пленках потери больше), он сохранит остальные 13 кэВ и сможет образовать в полупроводнике свыше 1000 электронно-дырочных пар.

Управлять электронным пучком 5 можно как с помощью сетки 2 — увеличивая и уменьшая ток, так и с помощью пластин вертикального 3 и горизонтального 4 отклонения, переводя, как в осциллографической трубке, электронный пучок с одной точки пластины на другую. На пластине может быть сформировано много отдельных полупроводниковых диодов, и луч будет управлять их проводимостью. Используя несколько независимо управляемых лучей, можно воздействовать на несколько полупроводниковых диодов одновременно. Вся конструкция помещена в колбу 6, в которой создан вакуум. Называют этот прибор либо прибором с электронной бомбардировкой полупроводника, либо твердотельной лампой. Впрочем, первое название такое длинное, что его приходится сокращать — ПЭБП.

Коэффициент усиления у такого прибора больше, чем у ламп и транзисторов, поскольку каждый электрон пучка об-

разует тысячи электронов в полупроводнике. Прибор способен работать на высоких частотах, более высоких, чем обычный транзистор, ибо у него нет базовой области, в которой электроны дрейфуют с малой скоростью и на преодоление которой они теряют много времени.

Первые такие приборы были выпущены в 1973 году (а изобретены аж в 1957-м!), и в 1957 году о них писали еще расплывчато — «значительно превосходят полупроводниковые приборы и вакуумные лампы». К 1981 году стало ясно, что приборы применимы до частот около 1 ГГц. Таким образом, «высокочастотность» — не самая сильная сторона твердотельной лампы. Ее сила в другом — один такой прибор заменяет усилитель, содержащий 10—20 транзисторов.

Впрочем, «универсальные», как писали поначалу, свойства этого прибора все-таки можно назвать именно так. Конечно, можно управлять включением диодов и без электронного пучка. Но столь просто и изящно, как в твердотельной лампе, это сделать нельзя. Заметьте, что диоды составляют матрицу, а подавая напряжения на отклоняющие пластины — вертикальные и горизонтальные — мы осуществляем так называемую двумерную адресацию, то есть одно напряжение влияет на «строку», а другое — на «столбец», в котором находится включаемый диод. Такой прибор — дар божий для задач, связанных с обработкой информации, на его основе можно сделать и анализатор формы сигнала и аналого-цифровой преобразователь, и многое другое...

Основа твердотельной лампы — изменение проводимости полупроводника или полупроводникового диода под действием приходящего из вакуума электронного тока. Обычная же электронная лампа управляется не током, а полем — напряжением на сетке. В твердотельной лампе поле используется для управления электронным пучком, который в свою очередь воздействует на полупроводниковую мишень. А нельзя ли воздействовать на полупроводник непосредственно полем? Представим себе прибор, изображенный на рис. 46. Основой прибора являются две пластины из диэлектрика — 1 и 2.

3. Полупроводник в вакууме

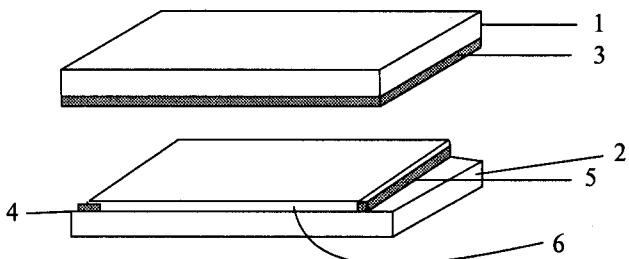


Рис. 46. Прибор с проводимостью, управляемой полем

На одну пластину нанесена металлическая пленка 3, на другую — две металлические пленки 4 и 5. Пленка полупроводника 6 расположена между контактами 4 и 5. Ток, протекающий по пленке 6 от контакта 4 к контакту 5 зависит от управляющего напряжения, приложенного между пленками 4 (или 5) и 3. От управляющего напряжения зависит поле между пластинами и в полупроводнике, а следовательно, и его проводимость. А что, собственно, расположено между пластинами? А это смотря какой прибор. Если имеется в виду обычный полевой транзистор, то между пластинами твердый диэлектрик — например, окись кремния. Если же имеется в виду гибридный, вакуумно-полупроводниковый прибор, то между пластинами — вакуум. Но от простой замены твердого диэлектрика на вакуум выигрыш был бы невелик и он явно не окупал бы сложностей изготовления. А сложности эти велики — чтобы для управления не требовались большие напряжения, пластины надо устанавливать на очень маленьком расстоянии (10–20 мкм) одну от другой, а чтобы у приборов не был слишком велик разброс параметров, это расстояние надо еще поддерживать с хорошей точностью! Стоит ли игра свеч? Зачем в 1975 году был Александром Головченко создан этот прибор (фото 10)?

Полупроводниковые приборы имеют два важных недостатка — они не выдерживают сильного нагрева и не переносят больших доз радиации. Чтобы прибор, показанный на рис. 46 и называемый «вакуумным полевым триодом», имел

преимущества перед обычными полупроводниковыми приборами, он должен, как вакуумный прибор, выдерживать высокие температуры и большие дозы радиации. А для этого полупроводник, из которого сделана пленка 6, должен быть не тем, из которого делают обычные полупроводниковые приборы, а другим, выдерживающим «суровые условия». За таким полупроводником, вакуумным прибором далеко ходить не приходится. Используемый в большинстве электронных ламп в качестве термоэлектронного катода сложный окисел $(\text{BaSrCa})\text{O}$ является именно таким полупроводником (подробно об этом рассказано в другой главе). Заметим, что до сих пор не вполне ясно, как работает этот прибор. Может быть, что все не в изменении проводимости под действием поля дело. Может быть, дело в другом — во влиянии электрического поля на облако электронов, образующееся над пленкой 6 при ее нагреве? Если к электроду 3 приложено отрицательное относительно системы электродов 4–6 напряжение, то электронное облако «прижимается» к пленке 6, становится тоньше и общая проводимость параллельно включенных пленки 6 и электронного облака над ней уменьшается.

4. «Газ или вакуум» или «газ и вакуум»?

Представить себе сочетание вакуума и полупроводника в одном приборе легко — действительно, если кусок кремния поместить в вакуум, то как полупроводник, так и вакуум останется самим собой. Разве что вакуум станет похуже, если кусок кремния не помыли. А вот представить себе гибрид вакуумного прибора и газоразрядного сложнее. Дело в том, что газ, «как все мы знаем», занимает весь предоставленный ему объем. Тем не менее такие приборы существуют.

Что может помешать газу заполнить весь объем? Например, газу может не хватить времени. Если в вакуумный прибор через отверстие в стенке поступает порция газа, то, пока она не разлетится по прибору, а произойдет это, грубо говоря, за 1 мс, в приборе будут соседствовать газ и вакуум. Можно представить себе импульсный прибор, который «делает

свое дело», например, генерирует, усиливает или коммутирует именно в течение этого времени, используя наличие газа и вакуума. После разбегания газа он откачивается, а затем цикл повторяется. Такого рода процесс имеет место при работе вакуумного выключателя, при взрывной эмиссии и вакуумном пробое. Правда, газ (или пары металла) не напускаются в прибор через отверстие в стенке, а выделяются непосредственно из «стенки», то есть из электрода. Причем в двух последних случаях такое выделение не полезно, а вредно. Но принцип есть принцип.

Может ли вакуумно-плазменный прибор работать в стационарном режиме? Конечно. Например, гравитация не дает «заполнить весь объем» земной атмосфере (и это очень хорошо!). Но делать приборы соответствующего размера сложно. Поэтому остаются три возможности. Во-первых, на заполнение объема нужно время. Если скорость удаления молекул из объема прибора (скорость откачки) сравнима со скоростью попадания в него молекул, то концентрация не будет устанавливаться одинаковой во всем объеме прибора. Представим себе вакуумный объем, в который через отверстие в стенке вводится струя газа, а противоположная стенка — отверстие в насос с большой скоростью откачки. Такая конструкция может служить основой для гибридного прибора — ибо в середине у него газ (плотная среда), а кругом вакуум (подпорченный, конечно, разбеганием газа из струи).

Во-вторых, прибор может быть разделен на две части перегородкой с отверстием. В одну часть газ вводится, из другой — откачивается. Если отверстие невелико, а скорость откачки большая, то в «вакуумной» части концентрация молекул будет намного меньше, чем в «газовой». Поскольку перегородка с отверстием может служить сеткой, появляется возможность сделать «вакуумно-плазменный триод». В зазоре катод—сетка, содержащем плазму, будет формироваться электронный пучок с большим током (что легче сделать в газоразрядном приборе), а в вакуумном зазоре сетка—анод можно создать большое поле (что легче сделать в вакуумном приборе)

и ускорить электроны до высоких энергий. Получится одновременно и сильноточный и высоковольтный прибор. Впрочем, совершенно необязательно генерировать пучок в газе и выводить его в вакуум. Можно сделать и наоборот — сформировать пучок в вакууме, а вывести его через отверстие в газ. Так можно вывести электронный пучок даже в атмосферу и резать или сваривать им материалы. Впрочем, такой «прибор» уже не является преобразователем электрических сигналов.

Наконец, имеется третья возможность — не делать отверстия для прохода электронов. Действительно, вы уже знаете, что электроны проникают в твердое тело на некоторую глубину. Глубина эта невелика, но ее как раз достаточно, чтобы электроны могли проходить сквозь «стенку» — при энергии 100 кэВ и более через титановую, бериллиевую или алюминиевую фольгу толщиной 30 мкм проходит около половины всех электронов. Конечно, стенка тонка до предела, но все же окошко диаметром несколько миллиметров из такой фольги выдерживает атмосферное давление. Итак, через такую «стенку» электронный пучок можно тоже выпускать из вакуума в атмосферу и при этом нет нужды в мощном насосе, успевающем откачивать весь газ, проникающий через отверстие в вакуум — ведь отверстия-то нет! Беда в том, что вся та энергия, которую несут с собой электроны, затормозившиеся в фольге, выделяется в ней в виде тепла, а для расплавления такой тонкой фольги много не надо. Поэтому ток большой плотности через фольгу выпустить не удается, но и то, что удается, позволяет осуществить, например, несамостоятельный газовый разряд, поддерживаемый этим пучком. Несамостоятельный — значит гаснущий при отключении пучка. Газовый разряд имеет низкое сопротивление, и полученный вакуумноплазменный прибор можно успешно использовать как коммутатор (выключатель). Когда пучок есть, два электрода, погруженные в разряд, можно считать замкнутыми (сопротивление плазмы мало), а при отключении пучка разряд гаснет и электроды оказываются «разомкнутыми».

5. Как компенсировать пространственный заряд

Однако до плазмы можно дело и не доводить. Некоторая польза от наличия небольшого количества газа в вакуумном приборе может быть, хотя позже мы узнаем, что от наличия газа чаще бывает вред. Польза же бывает потому, что атомы газа ионизируются электронным пучком, а наличие ионов в пространстве между электродами прибора увеличивает ток, протекающий через прибор. Действительно, ток ограничен тем, что отрицательный заряд эмиттированных электронов отталкивает часть электронов и возвращает их на катод; при наличии положительных ионов этот отрицательный заряд уменьшается.

Важным параметром любого электронного прибора (да и вообще любого прибора и устройства) является КПД — коэффициент полезного действия. Действительно, любой прибор преобразует входной сигнал в выходной сигнал не просто так, даром, а используя источник энергии (рис. 47). КПД — это отношение мощности выходного сигнала к мощности, «входящей» в прибор, то есть сумме мощности, потребляемой от источника энергии и мощности входного сигнала. «Выходящая» электрическая мощность меньше «входящей» потому, что часть электрической мощности превращается в тепло. Действительно, электроны прибывают на анод с некоторыми скоростями и тормозятся в нем. Кинетическая энергия электронов и превращается в тепло на аноде. Следовательно, задача в том, чтобы электроны прибывали на анод с возможностью меньшими скоростями. Сделать прибор, в котором электроны долетают до анода «без скорости» можно. Это не составляет никакой проблемы.

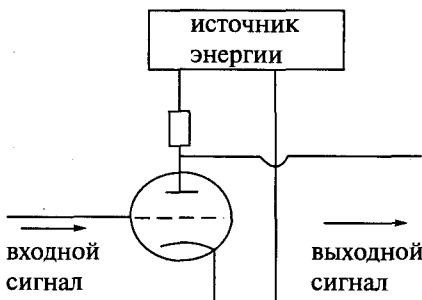


Рис. 47. Откуда берется выходной сигнал

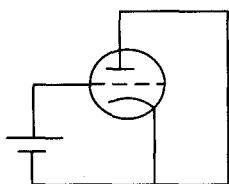


Рис. 48. Потенциал анода — ноль

Его, собственно говоря, даже и делать не придется. Достаточно обычную лампу включить как показано на рис. 48. Действительно, разность потенциалов между катодом и анодом равна нулю и электроны, долетевшие до анода будут иметь нулевую скорость. Эта лампа будет иметь лишь два недостатка — во-первых, электроны не будут долетать до анода, а во-вторых, даже если бы они и долетели, лампа не могла бы усиливать сигналы. Начнем с первого недостатка.

6. Виртуальный анод, или когда кажущееся хуже настоящего

Если электроны, подходя к аноду, будут уменьшать свою скорость до нуля, у анода их накопится много. Они начнут отталкивать вновь прибывающие электроны и те полетят обратно, к сетке и аноду. Ток перестанет идти с катода на анод, как ему положено, а лампа, соответственно, перестанет работать. Поэтому затормозить электронный пучок до остановки и, следовательно, отобрать у него всю энергию нельзя. На аноде должно быть ускоряющее (положительное) напряжение, обычно составляющее не менее нескольких процентов от сеточного напряжения. Заметьте, что обычно анодное напряжение в десять—сто раз больше сеточного, а сеточное — отрицательно. Какая это странная лампа, зачем бы она могла понадобиться? Сейчас мы это выясним, но сначала займемся вторым недостатком.

При изменении напряжения на сетке ток, текущий в лампе, будет меняться. Чтобы превратить ток в напряжение, которое можно усиливать дальше или использовать как-то по-другому, надо, как известно, включить в цепь анода сопротивление (рис. 49). Но тогда напряжение на аноде или выходное напряжение будет зависеть от тока (рис. 50) и, следовательно, электроны будут проходить на анод при разных токах с

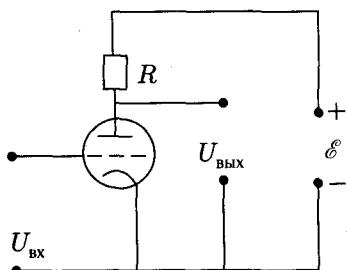


Рис. 49. Усилительный каскад



Рис. 50. Нагрузочная прямая

разными энергиями. Напряжение источника питания нельзя сделать меньше, чем произведение максимального тока на анодное сопротивление. В этом случае при максимальном токе электроны будут приходить на анод «с нулевой скоростью», но при меньших токах ни скорость их не будет нулевой, ни потери энергии. Итак, для ламп, работающих с изменяющимся током, «глубокое торможение» на аноде осуществить так просто нельзя.

Похожая ситуация имеется в приборах СВЧ. Например, в ЛБВ электроны отдают часть энергии электромагнитным волнам, и эта часть различна у разных электронов. Поэтому электроны приходят на коллектор с разными скоростями и затормозить их так, чтобы они все пришли на коллектор почти без кинетической энергии, опять нельзя.

Правда, то, что не может сделать один коллектор, могут несколько. В ЛБВ для установки на спутниках, где важен каждый процент КПД, (так как мощность источников питания ограничена) применяются многоступенчатые коллекторы — стоящие рядом с пучком одно за другим кольца с разными потенциалами. На каждое кольцо оседают электроны, затормозившиеся около него. Таким образом, они ведут себя «дисциплинированно» — летят на коллектор, именно для них и предназначенный.

7. КПД > 90 %

И все-таки наибольшие значения КПД могут быть получены в лампах с односкоростным или, как иногда говорят, монохроматическим пучком. Неужели нельзя придумать достойное применение лампе, способной иметь КПД более 90 %? Применение такой лампы в качестве коммутатора (выключателя) было предложено в 1967 году Г. И. Будкером и В. И. Переводчиковым. Работает лампа так. В «открытом» состоянии («выключатель замкнут») на сетке положительное напряжение, на аноде тоже положительное (но малое), а ток сетки мал (она стоит вне потока электронов, рядом с ним). Поэтому выделение мощности как на сетке, так и на аноде мало. В «закрытом» состоянии («выключатель разомкнут») напряжение на сетке отрицательное и тока в лампе нет. В этом режиме, даже если напряжение на аноде велико, выделения мощности на нем нет, потому что нет тока. Лампы, работающие на этом принципе, были разработаны в 1970-е годы, и изготовлены в виде отдельных образцов. Позже, на существенно более высокой технологической базе — и с более серьезным теоретическим обоснованием — они были разработаны в 1980-е годы, названы «титрон» и выпущены серийно.

Наиболее мощные лампы этого класса, существующие в настоящее время, были созданы почти одновременно в 1978—1979 годах сразу тремя фирмами (Varian, RCA, Brown Boveri). Напряжение на закрытых лампах составляло 100—200 кВ, ток открытых ламп 100—150 А, падение на открытых лампах — 5—10 кВ. Поэтому можно сказать, что лампы управляли мощностью 30 МВт, хотя на самих лампах рассеивалось при этом лишь 0,5—1,5 МВт. Иначе бы они просто испарялись.

Конечно, когда мы рассматриваем гибридный прибор, бывает трудно сказать, какой именно прибор перед нами. Но это и не нужно. Для нового прибора всегда можно придумать новое название (помните — твистрон, клистрод, АБВМ, твердотельная лампа и так далее). Но по крайней мере ясно, что мы имеем дело с электровакуумным прибором (даже если у него и есть газоразрядная и полупроводниковая часть). Если

же «электровакуумной» части нет — то это не электровакуумный прибор. Но, как это часто бывает, идя по формальному пути, мы быстро приходим к противоречию. В современной технике применяются приборы, которые, хотя и имеют вакуумную часть, вакуумными приборами назвать трудно. Так же, как гепарда отличает от кошек мелочь — невтягивающиеся когти — так и «комплексированные ЭВП» отличает от обычных ЭВП «мелочь» — наличие ЭВМ. Впрочем, не обязательно именно ЭВМ. Но давайте по порядку.

Прежде всего, вспомним о двойных триодах и прочих низкочастотных лампах, которые помещали в один баллон по несколько штук. Принцип действия таких ламп одинаков, поэтому это не гибридный прибор, а просто два (или три) в общем баллоне. Впрочем, можно поместить в один баллон и два прибора, имеющие различные принципы действия, и если каждый из них может работать отдельно от другого, то это будут все же разные приборы, а не один.

8. «Гепард» электроники

Ряд параметров ЭВП зависит от напряжения, поданного на их электроды. Разные экземпляры, например ЛБВ одного и того же типа имеют слегка различные параметры, в том числе, слегка различными могут быть оптимальные напряжения (необходимые, например, для достижения максимального усиления) на их электродах. Подбирать напряжения питания для каждого прибора индивидуально — казалось бы, это шаг назад. Но шарики для подшипников сортируют по сей день — это обходится дешевле, чем потери от сокращения срока службы подшипников, собранных «как попало». Если ЭВП СВЧ дорогой и достижение наивысших параметров важно (а часто именно так и бывает), то может оказаться полезен индивидуальный подбор напряжений питания. Если источник питания не слишком большой и дорогой и, например, он меньше и дешевле того ЭВП, который «питает» (а часто именно так

и бывает), возникает естественная мысль — выпускать их в одном кожухе и подбирать напряжения питания прямо при изготовлении лампы. Потребитель же будет получать одинаковые «коробочки». Такие ЭВП называют «комплексированными». Лиха беда начало. Если мы начали объединять ЭВП с источниками питания, то надо уж объединить ЭВП и с устройствами защиты. Это другие ЭВП или схемы, защищающие основной ЭВП либо от вредных внешних воздействий, либо от вредных внутренних процессов. Например, от подачи на вход слишком большого сигнала или от вакуумного пробоя (защитная схема в этом случае должна на короткое время отключить питание, чтобы пробой не превратился в дугу и не вывел ЭВП из строя необратимо). Так ЭВП обрастает «дополнениями». Вот еще одно полезное дополнение — схема, которая изменяет температуру катода так, чтобы ток катода (именно он важен для работы ЭВП) поддерживался постоянным. Наконец, для управления всеми этими «дополнениями» устанавливается микропроцессор, маленькая ЭВМ, которая «делает все, что нужно». Так и возникает гепард электроники — ни собака, ни кошка, ни ЭВП, ни схема, а все сразу. Впрочем, это не очень важно — как назвать. Важно, чтобы работало.

В общем и целом гибридные ЭВП пока не вытеснили «классические». Но ведь цель не в этом. Кроме того, у гибридных ЭВП достаточно проблем — например, в ВИСах это рост проводимости керамики и ускорение взаимодиффузии при высоких температурах, в твердотельных лампах — это разрушение мишени электронным лучом. Важной проблемой является инерция техники — даже если сделан лабораторный образец прибора и он успешно работает, до промышленного выпуска пройдет еще много времени... и только если найдутся потребители. А для того, чтобы нашелся потребитель, он должен «распробовать», войти во вкус, а для этого он должен получить много новых приборов, научиться их оптимально эксплуатировать, разработать соответствующие схемы... но ведь приборов-то еще нет! Есть лабораторный образец. И, как показала практика, путь от него до промышленного выпуска

и широкого применения надо еще суметь пройти. Твистрон этот путь прошел. Очередь за остальными.

Как видите, для одной и той же задачи существует много решений. Какое избрать? В разных случаях — разное. Ведь обычно важно не просто получить большую мощность, а одновременно определенные значения других параметров. Готовых решений — как впрочем и в жизни вообще — нет. Их надо находить «там, где кончается асфальт». Впрочем, только там и интересно шагать.

Отступление 5 — о пользе образования

В общем и целом инженеры всегда интересуются тем, что происходит в соседних областях техники. Существует оптимальная степень интереса к делам соседа — потому что можно представить себе инженера, столько интересующегося технологией соседей, что у него не остается времени на развитие своей области. Но чаще степень интереса бывает меньше оптимальной. Рассмотрим два примера пользы от интереса к соседней области — один пример маленький и один большой. Начнем с маленького.

В мощных электронных приборах катод имеет большую площадь. Понятно, почему — мощность есть произведение напряжения на ток. Высокое напряжение — это проблема вакуумного пробоя: разрушения электродов, их плавления, наполнения вакуумного зазораарами металла и газового разряда в этих парах. С другой стороны, большой ток — это тоже проблемы: большой катод и большой диаметр электронного луча, частотные ограничения (длина волны должна быть меньше диаметра луча), а вот большой катод — это еще и проблема сетки. Действительно, можно расположить сетку на расстоянии 30 мкм от катода, если сам катод имеет размер, скажем 1 мм. Но как сделать это при диаметре 100 мм? Попробуйте удержать лист бумаги над столом так, чтобы зазор между листом и бумагой был толщиной в волос, причем этот зазор ведь должен поддерживаться с точностью 10 %.

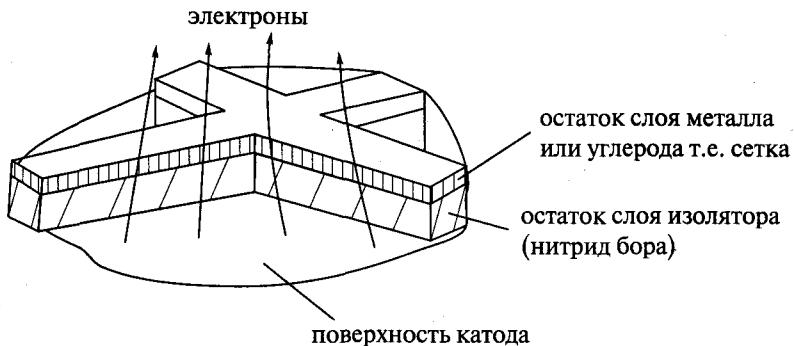


Рис. 51. Катодно-сеточная структура

Полупроводниковая технология умеет решать эту проблему. На катод наносится слой изолятора толщиной 30 мкм, затем слой металла толщиной в несколько микрон, а затем любым способом, принятым в полупроводниковой технике, там, где нужно, чтобы электроны выходили из катода (и улетали в вакуум) оба слоя удаляются. Удалить их можно и распылением ионным лучом, и жидкостным травлением, и газовым. Получается вот такая структура (рис. 51). Видно, что в такой структуре решается и проблема малого зазора, и проблема его постоянства во времени, и проблема точности. Правда, возникают новые проблемы. Проблема теплового расширения — если коэффициенты теплового расширения материалов этой конструкции сильно различаются, при нагреве она разрушится. Проблема утечек — любой изолятор чуть-чуть проводит, то есть при подаче управляющего сигнала на сетку, в ее цепи будет протекать ток, а во многих случаях это нежелательно. Наконец, проблема взаимодействия — материалы этой конструкции не должны взаимодействовать при рабочей температуре катода (в реализованных конструкциях 1100–1200° С) в течение срока службы — десятков тысяч часов. Употребление в предыдущей фразе слов «реализованные конструкции» означает, что эти проблемы так или иначе удается решать.

Второй пример пользы от интереса к соседней области — это история вакуумных интегральных схем. Что это такое, вы

уже знаете. Мотивы к их развитию были таковы. Полупроводники на основе кремния работоспособны до $200\text{--}250^\circ\text{C}$, на основе арсенида и фосфида галлия — до 400°C , но на этих материалах реализовано очень мало типов полупроводниковых приборов. Между тем, от техники требуют создания приборов, работоспособных при 400°C (на Венере), при 500°C и более (для помещения внутрь реакторов и турбин), при 1000°C и более (для опускания в сверхглубокие скважины). Электронные лампы выдерживают (по крайней мере в принципе) эти температуры, но они слишком крупные. Кроме того, приборы должны работать при большой радиации, а полупроводниковые приборы большой радиации не любят. Электронные лампы выдерживают значительно большие дозы радиации.

Вы уже знаете, какое решение нашла техника электронных ламп — она создала вакуумные интегральные схемы. Основные проблемы, которые пришлось решать — проблема взаимодействия материалов при высоких материалах, проблема утечек по диэлектрикам, проблема согласования тепловых расширений. К 1985 году достигнутый срок службы при 500°C составил 13 000 ч. Это уже очень хорошие параметры.

В описанной выше катодно-сеточной структуре в качестве катода может быть использован и не термоэлектронный, а например, автоэлектронный. В этом случае отпадает необходимость в нагреве катода, что и упрощает прибор и уменьшает его «время готовности» — то есть время от включения до начала работы. В электронных приборах это обычно время разогрева катода. Так вот, чтобы сделать катодно-сеточную структуру с автоэлектронными катодами, надо в каждую ячейку структуры (рис. 52) поместить по острию. При подаче напряжения на пленку, являющуюся сеткой, на острие возникает электрическое поле очень высокой напряженности, которое и вызывает эмиссию электронов. Именно так работает так называемый громоотвод. Вы конечно знаете, что он не отводит, а привлекает, и не гром, а заряд. Заряд стекает через острие и тучи разряжаются... Такие катоды по своим параметрам могут конкурировать с термоэлектронными. Правда,

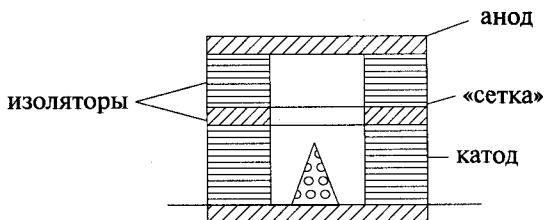


Рис. 52. Микроэлектронный триод.

они появились позже, по некоторым параметрам они хуже термокатодов (например, требуют для работы более высокого вакуума), и поэтому из имеющихся типов ламп термокатоды они скорее всего не вытеснят. Но новые типы ламп или новые разновидности известных типов с такими катодами уже существуют. В частности, АБВ, триоды, кинескопы... Между прочим, если поверх пленки — сетки (см. опять тот же рисунок) нанести еще один слой изолятора (не закрывая отверстий), а потом — еще один слой металла (на этот раз закрыв отверстия) то и получится триод с автоэлектронным катодом в микроэлектронном исполнении. Электронная лампа диаметром 2/3 микрона и такой же высоты.

Интересно, что сказал бы Эдисон или Ли де Форест, поглядев на такое?

Глава 7

Вторая эпоха

1. Вращаясь в резонаторе

В СВЧ-приборах, с которыми мы познакомились, магнитное поле если и применялось, то двумя способами — для обжатия, стабилизации электронного пучка и для обеспечения движения электронов по круговым орбитам. Собственно, действует-то магнитное поле на электроны в этих двух случаях одинаково — посредством силы Ампера. По модулю она равна произведению скорости на индукцию поля и на синус угла между векторами скорости и индукции и направлена перпендикулярно им обоим (рис. 53). Это векторное произведение

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Но использована эта сила может быть двумя различными способами. В приборах с линейным пучком (клистроны, ЛВВ) магнитное поле создается либо соленоидом (рис. 54 а), либо набором кольцевых постоянных магнитов (рис. 54 б).



Рис. 53. Сила Ампера. Слева летит положительная частица, справа — отрицательная. Пунктир — будущая траектория

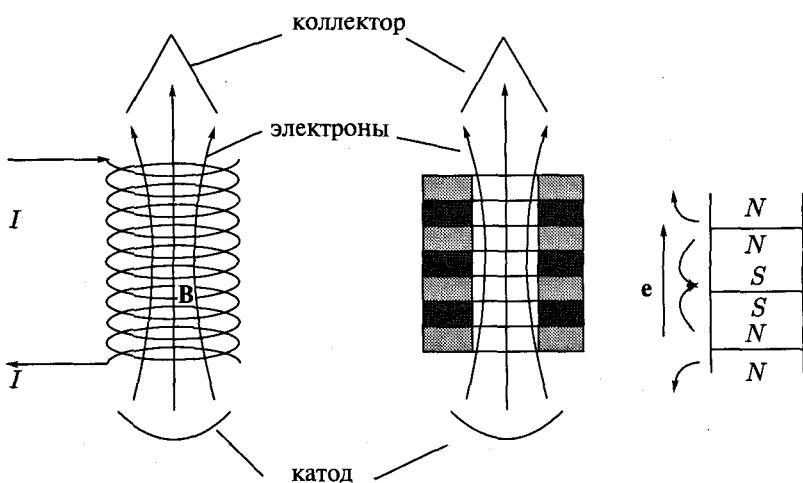


Рис. 54. Магнитное поле в ЭВП

Соленоид создает поле, направленное вдоль оси прибора одинаково по всей своей длине, а магниты установлены на встречу друг другу (иначе они замкнутся друг на друга и в объеме прибора поля не будет вообще), и поле в объеме прибора получается знакопеременное (рис. 54 в). Но действуют эти поля одинаково: если электрон вздумает двигаться вбок — а он неминуемо попробует это делать, ибо отталкивается другими электронами пучка — он не сможет уйти далеко. Магнитное поле начнет заворачивать его по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной оси прибора и пучка. Таким образом, пучок становится «винтовым», но эта «винтовость» в данных приборах не используется! В отличие от магнетрона и некоторых других приборов со скрещенными полями, в которых движение по кругу есть основное движение электрона. И в процессе этого движения электрон взаимодействует с полями отдельных резонаторов, составляющих часть анодного блока. Но частота вращения электронов по кругу и частота, на которой работали резонаторы и весь прибор, не были связаны. Первая зависела от индукции магнитного поля, а вторая — от размеров резонаторов.

При уменьшении длины волны и увеличении частоты наступает ситуация, когда размеры резонатора — а они порядка длины волны — становятся столь малыми, что изготовить надлежащий резонатор делается очень трудно. Но резонатор не обязан иметь размеры порядка длины волны — например, в лазере он может иметь длину и в метры, а длина волны составляет микромы или доли микрона. Соответственно, и у ЭВП СВЧ резонатор может быть много больше длины волны — а это при том же уровне развития технологии позволяет расширить диапазон в сторону более коротких волн.

Попробуем скрестить клистрон с магнетроном, то есть, взяв за основу линейный электронный пучок, разумно, «помагнетронному», использовать возникающее в нем круговое — а раз он линейный, то винтовое — движение электронов. Этот прибор называется «гиротрон» (рис. 55).

Поскольку мы хотим продвинуться в область более коротких длин волн, резонатор должен быть большим, длинным и — раз пучок цилиндрический, — то цилиндрическим.

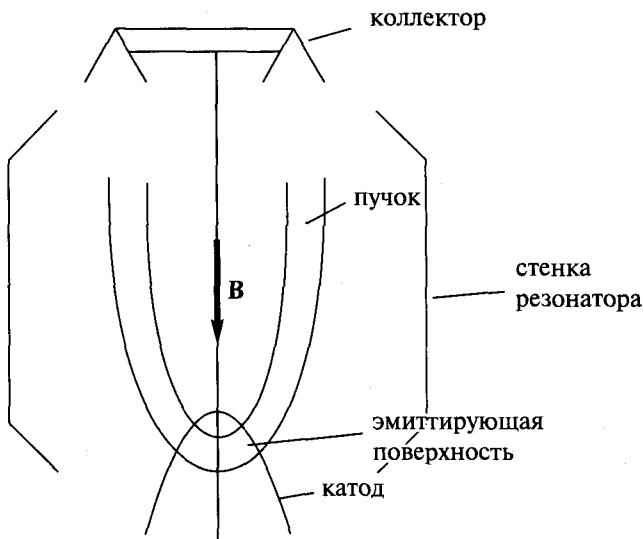


Рис. 55. Гиротрон

Но какое поле создать в нем? В кластроне электроны собирались в сгустки в результате действия двух факторов — электрического поля и времени. Сначала поле повлияло на скорости, потом время дало возможность электронам сгруппироваться, потом поле приняло в себя энергию сгустков. При этом сгустки тормозятся и та энергия, которую электроны получили от постоянного поля, ускорившего их, передается электромагнитному полю. То есть ЭВП преобразует энергию постоянного электрического поля в энергию электромагнитных волн. Для влияния на скорости электронов поле должно быть направлено вдоль траектории. Можно ли организовать такое поле в цилиндрическом резонаторе? Да, и при этом силовые линии электрического поля будут кольцевыми, и они будут лежать в плоскости, перпендикулярной оси прибора. Такое электрическое поле — с замкнутыми силовыми линиями — нельзя создать, подавая постоянные напряжения на электроды или размещая постоянные заряды в пространстве. Электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями может быть только переменным, электромагнитным. Если частота этого поля совпадает с частотой вращения электронов по орбитам, то можно найти электроны, которые находятся в такой фазе поля, что оно их не ускоряет и не тормозит. Причем электрон, летящий впереди своего «безразличного» собрата, будет подтормаживаться, а летящий сзади — ускоряться. И будут, как и в кластроне, и в магнетроне, образовываться сгустки. А дальше? Ведь для того, чтобы они начали отдавать свою энергию полю, оно должно начать эти сгустки тормозить. При соответствующем различии частот поля и вращения это и происходит, и гиротрон становится мощным генератором СВЧ.

2. Пролетая над стиральной доской

Если заряженная частица, например, электрон, приблизится к проводнику, например, к металлу, она начнет к нему притягиваться. Потому что при приближении к металлу в нем

произойдет перераспределение зарядов и поверхность зарядится положительно. Возникающие при этом силы называют «силами электрического изображения».

Теперь предположим, что электрон летит вдоль поверхности металла. В этом случае действующая на него сила будет по-прежнему притягивать его к металлу. Из-за того, что проводимость металла конечна, перераспределение заряда в металле будет несколько отставать от летящего электрона, он будет тормозиться и уменьшать свою энергию. Но энергия будет пропадать зря — то есть преобразовываться в тепло (в металле идет ток!).

Если сделать металлическую поверхность не плоской, а в виде стиральной доски и запустить электрон поперек гребней, то сила, действующая на электрон, будет меняться периодически. В этом случае электрон начинает излучать электромагнитную волну («излучение Смита—Парселла», «дифракционное излучение», «варатронное излучение»). Это излучение похоже на черенковское, но последнее имеет место, если скорость частицы больше скорости света в данной среде, а дифракционное излучение возникает при определенном соотношении между скоростью электрона и фазовой скоростью одной из гармоник волны, как правило — первой обратной гармоники, как в ЛОВ. Над стиральной доской располагается отражатель электромагнитной волны, то есть «доска» является одной из стенок резонатора (рис. 56). Этот прибор называ-

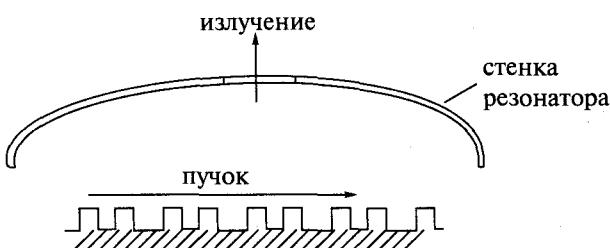


Рис. 56. Оротрон

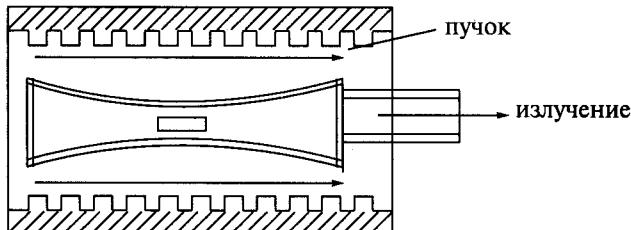


Рис. 57. Коаксиальный оротрон

ется оротрон, его изобрели Ф. С. Русиным и Г. Д. Богомолов в 1966 году.

Под действием электромагнитной волны резонатора электронный пучок разбивается на сгустки, которые эффективно отдают энергию полю. Преимущество оротрона перед АОВ состоит прежде всего в том, что его резонатор может быть больше длины волны, то есть при тех же размерах прибора (тот же уровень технологии) может быть получено излучение с меньшей длиной волны (или большей мощности).

Механизм работы оротрона может быть реализован не только в плоской геометрии, показанной на рисунке, но и в коаксиальной. В этом случае трубчатый пучок вводится в торOIDальный резонатор, внешняя поверхность которого представляет собой кольцевую стиральную доску, а внутренняя — кольцевой отражатель (рис. 57).

3. Когда не вмещается

Представим себе, что мы взяли брандспойт и направили мощную струю воды в прочную железную бочку — вдоль оси. Что произойдет? Вода, отразившись от дна, вылетит обратно. А вот электроны могут вылететь обратно, отразившись, можно сказать, от себя самих. Ничего особенно странного в этом нет — у электронов есть заряд, а одноименные заряды отталкиваются. Странно другое — при этом возникают колебания, и очень даже хитрые.

3. Когда не вмещается

Представим себе не бочку и брандспойт, а пространство между двумя электродами, причем с левого стартуют — с некоторыми начальными скоростями — электроны. Электроды находятся под одинаковыми потенциалами (например, они просто соединены, как и показано на рис. 58).

Имея начальную скорость, электроны летят себе по инерции и достигают правого электрода. Но если электронов эмиттируется много, то в зазоре появляется заметный пространственный заряд, создающий электрическое поле. Это поле тормозит летящие от левого катода электроны, но если энергия их достаточна, они преодолевают это поле и достигают правого электрода. При увеличении поля мы попадаем в ситуацию, когда электроны не могут его преодолеть, останавливаются и — начинают лететь обратно. В зазоре образуется так называемый виртуальный катод: электроны летят от него, как будто он их эмиттировал. Поскольку все больше электронов останавливаются, не долетев до «виртуального катода», максимум электронной плотности начинает смещаться влево. Как будто бульдозер ползет справа налево, сгребая снег: куча электронов делается все выше и все ближе к катоду — левому электроду. И в итоге она рушится на него — и процесс начинается сначала. А это и есть колебания. Таким образом, мы изобрели виркатор. На сегодня — это самый мощный импульсный генератор СВЧ.

Но генератор это весьма необычный. Начнем с очевидных плюсов. Первое — фантастическая простота конструкции. Второе — отсутствие магнитного поля, которое в магнетроне нужно всегда, а в кристалле и ЛБВ — довольно часто, и тем чаще, чем о более коротких волнах заходит речь (тонкий электронный пучок трудно сфокусировать и «протащить» по длинному пролетному каналу). Третье — низкие требования

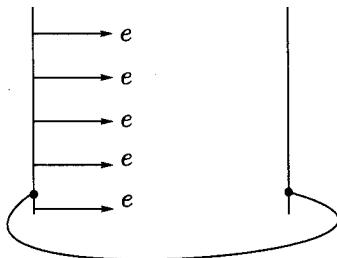


Рис. 58. Зазор и ток

к качеству пучка (его пространственной однородности и ламинарности). Что же касается минусов, то ситуация требует философского предисловия.

Предположим, что мы выпускаем некоторое изделие — не важно, СВЧ-прибор, автомобиль или шариковую ручку. К нам приходит изобретатель и говорит: вот новая модель, у нее все параметры как у старой, но вот этот — лучше. Это самая простая и понятная ситуация. И мы говорим: отлично, будем делать новую модель. Вот случай более сложный — новая модель, у которой что-то немного хуже, а что-то лучше. Тут нужен анализ рынка, чтобы понять, захочет ли потребитель брать, скажем, автомобиль, который стоит на столько-то дороже, но потребляет на столько-то меньше бензина. Это, кстати, весьма нынче распространенная ситуация — ибо на Западе внедрение «гибридных автомобилей» тормозится именно стартовой ценой. Но вот третья ситуация — нам приносят нечто очень сильно новое. Например, на дворе середина прошлого века, мы все пишем перьевыми ручками, а нам приносят шариковую. Она тоже пишет, то есть выполняет вроде бы ту же функцию, но пишет иначе, требует совершенно нового производства и вообще воспринимается как нечто странное. Даже если мы являемся гениальными психологами, то определить, что «это» из забавной игрушки (на Западе) и предмета престижного потребления (в СССР) через четверть века превратится в товар, одни виды коего столь же дешевы и повседневны, как бумажный носовой платок, а другие являются предметами престижного потребления и символами высокого положения и стоят дневную (в США) или месячную (в РФ) зарплату, — это нам не удастся. Но ситуация может быть и еще сложнее. На дворе середина века, а мне приносят широкий фломастер (маркер). Писать им невозможно. Рисовать? Художники — народ консервативный, они тысячу лет техники не меняют. Забавную вещь сделали вы, сэр, — вежливо говорим мы, — но для чего бы ее применить — не понимаем. А что через полвека эта вещь будет лежать на всех прилавках — так этого мы не знаем и догадаться не можем.

Теперь опишем эту же ситуацию на более инженерном языке, на языке параметров и сравнения их значений. Два близких изделия сравнить легко — например, две перьевые или две шариковые ручки (вес, размер, ширина линии, нажим, длина линии). Перьевую и шариковую сравнить уже сложнее: при внешне одинаковых функциях это «разные вещи» — мы это интуитивно ощущаем, хотя и не можем описать одним параметром. А вот обычную перьевую ручку и маркер сравнить по параметрам затруднительно. Разве что по «общетехническим» — размер, вес, стоимость, прочность... Слишком это разные вещи. И у них разные области применения.

Так вот, виркатор — это другая вещь. И поэтому трудно сказать, чем он лучше или хуже — кроме общетехнических параметров. Чтобы понять, насколько далек виркатор от клистронно-магнетронного народа, достаточно посмотреть на спектр генерируемого им сигнала. На рис. 59 показаны: слева — спектр генерируемого сигнала, то есть зависимость мощности от частоты, справа — зависимость напряженности электрического поля на катоде от времени. У обычного генера-

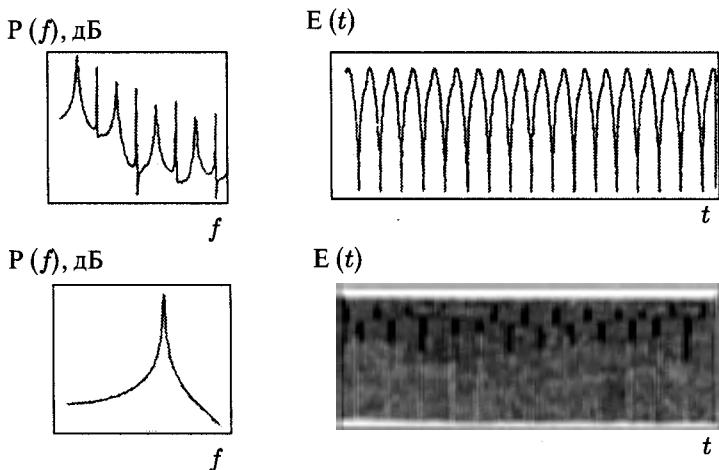


Рис. 59. Режимы работы виркатора (рис. 59–61 из книги Д. И. Трубецкова и А. Е. Храмова «Лекции по СВЧ-электронике для физиков»)

торного СВЧ-прибора (клистрона, магнетрона) левая зависимость — одиночный пик (рабочая частота) и незначительный шумовой фон. Верхние две зависимости относятся к одному значению тока, нижние — к другому, большему. Видно, что в зависимости от тока режим меняется принципиально. Система — причем очень простая система — ведет себя сложно.

Но этим дело далеко не кончается. В объеме прибора, кроме электронов, обычно есть и ионы, частично компенсирующие пространственный заряд. Казалось бы, раз влияние пространственного заряда электронов ослаблено, то вся картина просто сдвинется в область больших токов.

Отнюдь нет! Ситуация станет намного более сложной. На рис. 60 показаны примеры некоторых ситуаций, возникающих, если средний заряд ионов равен среднему заряду электронов. Как и на предыдущем рисунке, слева спектр — зависимость мощности от частоты, справа — зависимость поля на катоде от времени. Сверху вниз — рост тока. На этот раз мы видим не два, а три принципиально разных режима: шум со слегка выделяющимися пиками на определенных частотах, потом — генерация на некоторых частотах при наличии заметного фона и, наконец, — чисто шумовой сигнал.

Но и это еще не все. Ведь мы рассмотрели ситуацию, когда заряд компенсирован полностью, но ведь можно рассмотреть и вариант, когда компенсация частична. Для рассмотрения этого кошмара нам придется ввести второй параметр — кроме тока, меняться будет и степень компенсации. Картина в этом случае пришлось бы рисовать так много, что мы скономим типографскую краску и поступим иначе. По оси абсцисс отложим величину, пропорциональную току (точнее, так называемый параметр Пирса, « a », пропорциональный корню из тока), по оси ординат — « n », отношение заряда ионов к среднему электронному заряду (рис. 61). Области реализации разных режимов обозначены разными буквами. Ранее рассмотренные случаи: $n = 0$ соответствует в зависимости от a (от тока) двум режимам S и R , а $n = 1$ — трем (S_1 , C_1 и C_2).

3. Когда не вмешается

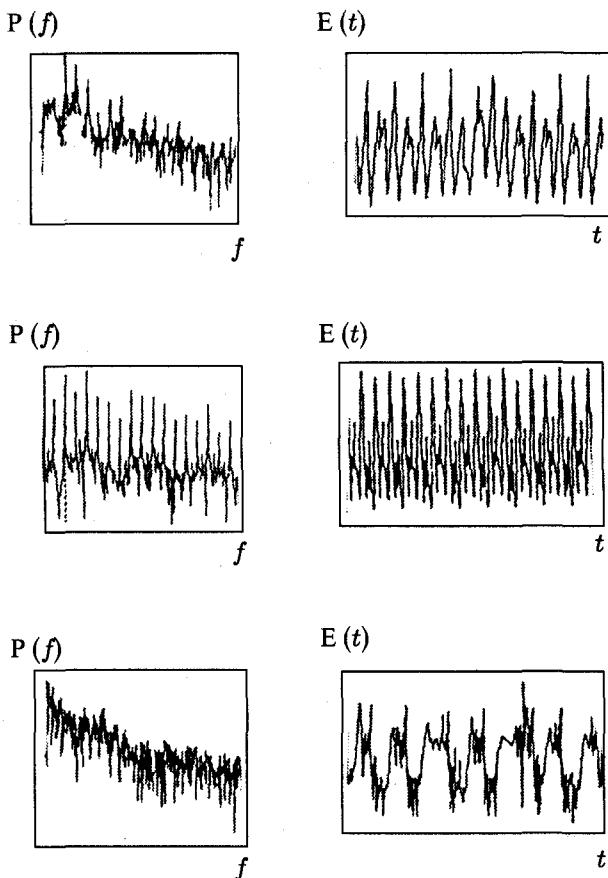


Рис. 60. Режимы работы виркатора при компенсации (в среднем) заряда

Рассмотренная нами ситуация иллюстрирует одну очень важную — существенно более важную, чем все ЭВП СВЧ — вещь. Реальная структура, причем очень простая (два плоских параллельных электрода, поток электронов и ионы, частично компенсирующие заряд электронов) может вести себя очень сложно, причем не просто сложно, а — *непредсказуемо*. Дело в том, что шум — это хаотическое поведение, и если спектр

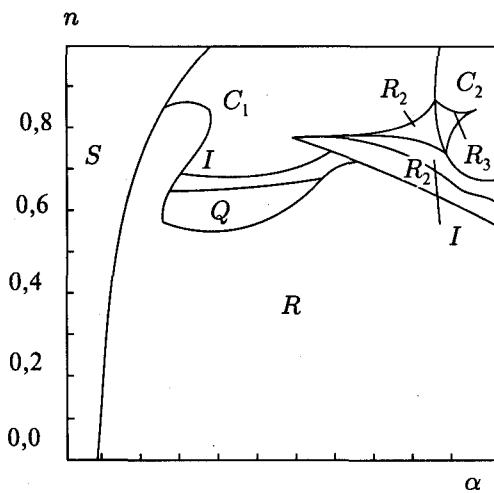


Рис. 61. Разбиение плоскости (α, n) на области с различными типами колебаний

(левые картинки) сам по себе является усреднением и он стабилен во времени, то зависимость поля от времени (правые картинки) хаотична! Даже зная спектр, нельзя предсказать, какой будет напряженность поля через секунду.

Вот простой пример. Рассмотрим одну конкретную аудиторию в моем родном вузе, МИЭМе. Будем записывать раз в минуту (или раз в секунду) количество студентов в ней. Через неделю мы получим примерно такую таблицу: 0 человек — 52 % случаев, 1 человек — 1,5 % случаев, 2 — 3,2 %, 3 — 2,4 %, 4 — 2,6 %... 20 — 7,8 %, 21 — 8,1 %, 22 — 5,6 %, 23 — 4,2 %... 38 — 3 %, 39 — 5,2 %, 40 — 4,1 %, 41 — 2,0 %... Это и называется спектром. Ноль человек — этоочные замеры. Пик в области 21 человека — это семинарские занятия, а пик в области 39 человек — это лекции для двух групп. Мы описали явление, проведя усреднение по времени, и даже смогли понять, что происходит! Но предсказать количество студентов на следующем семинаре мы не сможем — скорее всего, будет между 20 и 23, но точнее сказать трудно. Ровно так же нельзя

3. Когда не вмещается

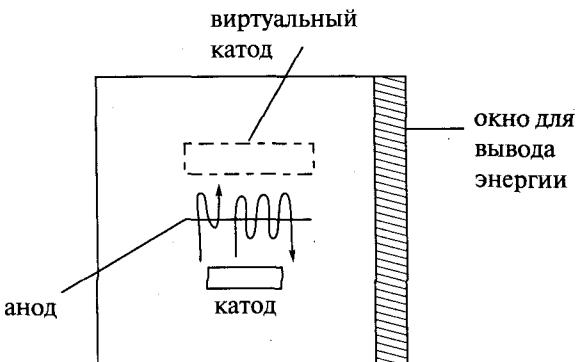


Рис. 62. Отражательный триод

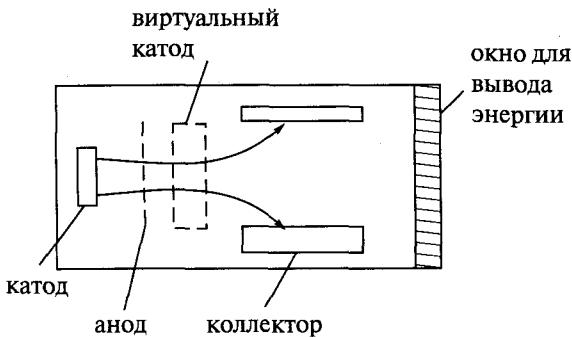


Рис. 63. Виркатор на пролетном токе

предсказать значение напряженности поля в виркаторе в какой-то определенный момент.

Как может быть устроен генератор на виртуальном катоде? Вариантов конструкций много; вот два примера: на рис. 62 показан так называемый отражательный триод, на рис. 63 — виркатор на пролетном токе. (Стрелками на рисунках показаны траектории электронов.)

До сих пор мы рассматривали виркаторы, так сказать, «в чистом виде». Однако на основе виркатора может быть

сделан и гибридный прибор, комбинация виркатора с другим СВЧ-прибором.

Например, если та часть электронного пучка, которая проходит сквозь область виртуального катода, попадает в ЛОВ, то навстречу пучку начинает распространяться электромагнитная волна, которая доходит до катода виркатора и начинает модулировать пучок еще до попадания в область виртуального катода.

В заключение этого раздела остановимся еще на одной проблеме. Собственно, с ней, в принципе, мог столкнуться любой СВЧ-прибор, но произошло это, естественно, с виркатором, поскольку он стал самым мощным импульсным СВЧ-прибором. Воздух — это смесь газов, а в газе при определенной напряженности поля происходит пробой и зажигается газовый разряд, воздух становится проводником. Получается, что большую СВЧ-мощность, даже если ее удается создать в вакууме, в объеме прибора, не удается вывести в атмосферу. Поэтому существует порог мощности, превысить который возможно только в вакууме, то есть в космосе!

Другое возможное решение — генерировать мощность несколькими приборами и направлять ее на объект, если угодно, несколькими потоками. Тогда суммируясь мощности будут на некотором расстоянии от генератора, где волна уже будет ослабленной, с меньшей мощностью.

4. Как нарисовать не-функцию

Начнем с простейшего варианта. Пусть на сопротивление подается изменяющее напряжение и определяется зависимость тока от этого напряжения. Зависимость будет прямой линией $I = U/R$ (закон Ома), если R постоянно. Эффектами нагрева сопротивления током, сжатия тока своим магнитным полем (пинч) или поверхностным («скин-эффектом») пренебрегаем. Чуть более сложный случай — нелинейное сопротивление, например, полупроводниковый диод или стабилитрон (рис. 64).

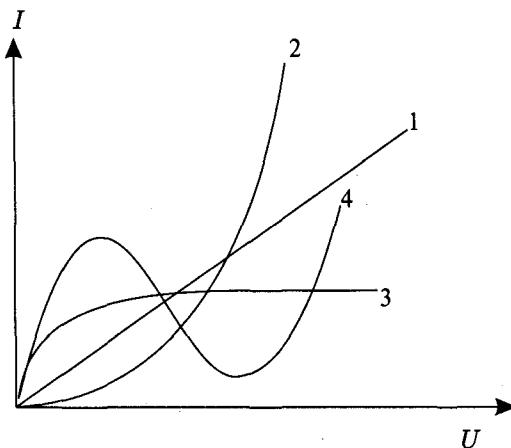


Рис. 64. Линейные (1) и нелинейные (диод — 2, стабилитрон — 3) сопротивления, а также немонотонная зависимость (туннельный диод — 4)

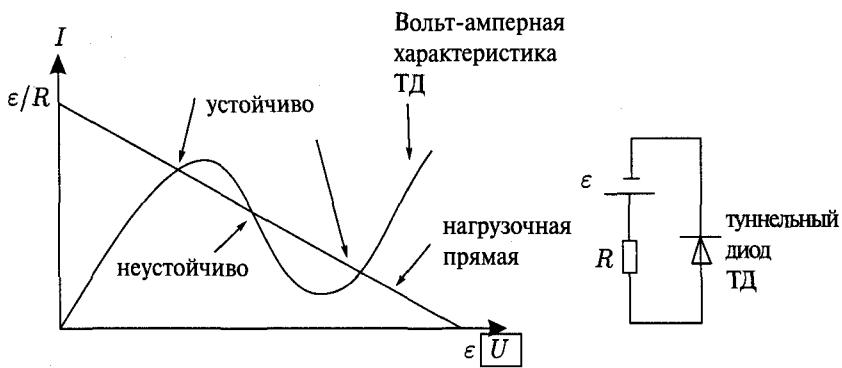


Рис. 65. Нагрузка — туннельный диод

Еще более сложный случай — немонотонная зависимость I от U (рис. 65), свойственная туннельному диоду. В этом последнем случае, в отличие от первых трех, иногда в простейших схемах из батарейки, сопротивления и диода возможны два устойчивых состояния (рис. 65).

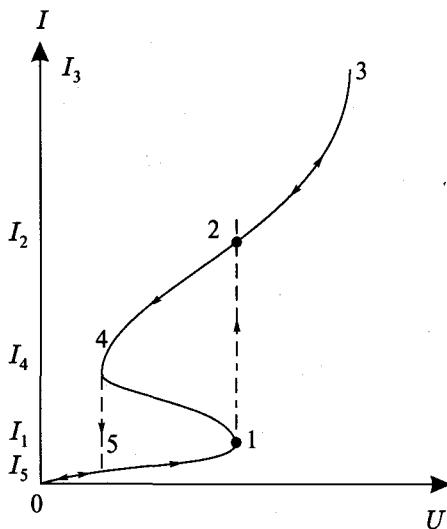


Рис. 66. Вольт-амперная характеристика тиристора

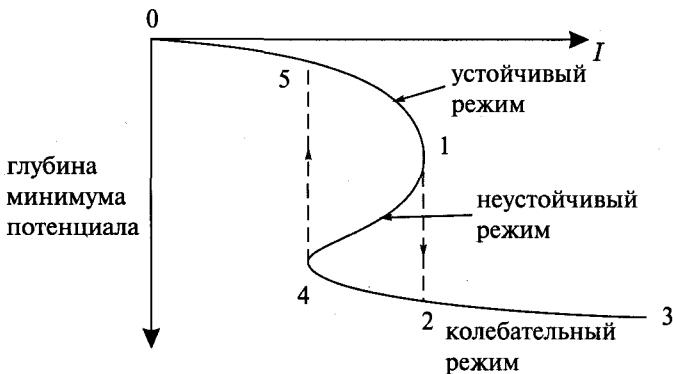


Рис. 67. Ситуация в вакуумном зазоре

Но это все же случаи, когда зависимость тока от напряжения однозначна. У тиристора это уже не так (рис. 66). При увеличении поданного на него напряжения от 0 до U_{max} , а потом уменьшении до 0, рабочая точка перемещается по траек-

4. Как нарисовать не-функцию

тории $0 - 1 - 2 - 3 - 2 - 4 - 5 - 0$, а ток, соответственно, $0 - I_1 - I_2 - I_3 - I_3 - I_4 - I_5 - 0$, причем от I_1 к I_2 и от I_4 к I_5 ток изменяется скачком.

Похожая ситуация реализуется и в вакуумном зазоре, в который вводится ток. На рис. 67 изображена связь тока пучка, минимального потенциала в зазоре и устойчивости режима. При увеличении тока от 0 до максимального значения и последующем уменьшении тока до 0, рабочая точка перемещается по траектории $0 - 5 - 1 - 2 - 3 - 2 - 4 - 5 - 0$, при этом на участках $0 - 5 - 1$ и $5 - 3 - 4$ положение точки устойчиво, на участке $1 - 4$ положение неустойчиво, а генерация происходит на участке $4 - 2 - 3$.

Отступление 6 — почему прошлое не похоже на настоящее

По многим причинам. А по многим — похоже. История — если мы не просто перечисляем даты и кто кого отравил, а хотим понять, почему все шло так или этак, — сложная наука. Но одну вещь надо иметь в виду всегда: прошлое не похоже на настоящее потому, что мы видим его не непосредственно, как настоящее, а только как след, как отражение. Отражение в вещах, документах, в мифах, в умах и словах людей, причем всегда в той или иной мере искаженное. Причин для искажений много, но даже если не вдаваться в их анализ, видно, что существуют причины, не связанные с психологией людей, а существуют и связанные. И это весьма осложняет анализ, ибо приходится ее учитывать, думать, что и почему люди не хотят вспоминать, что им вспоминать стыдно или страшно.

Что касается истории ЭВП СВЧ, то тут ситуация сравнительно проста: мы видим прошлое несколько упрощенным, ибо до сегодняшнего дня дожили только хорошие, эффективные варианты приборов. Да и то не все, поскольку некоторые уступили место полупроводниковым приборам. А на самом деле вариантов технических решений было намного больше.

Глава 7. Вторая эпоха

Правда, при большом желании можно их раскопать и изучить — существуют библиотеки патентов, и в них отражены, наверное, почти все технические решения.

Сегодняшняя ситуация с ЭВП СВЧ, которую мы условно называем «второй эпохой» (привет Нуменору), выглядит намного более разнообразной. Существуют десятки вариантов каждого прибора! И каждый год появляются новые. И все — со своими названиями... Ход развития техники сделает свое «черное дело»: от всего этого разнотравья останутся четыре–пять основных типов (так сказать, мэйнстрим), которые и будут изучаться студентами через пятнадцать лет. А остальное станет достоянием истории техники.

Внеся свой необходимый вклад в общий ход развития, в конкуренцию и кооперацию, без которых нет и не будет прогресса.

Глава 8

Сердце электронного прибора

1. Что и почему человек называет сердцем

В организме человека есть много таких органов, без которых человек не может жить — сердце, печень, легкие, почки, мозг. Но когда хотят указать на важность какого-то элемента большой системы, говорят «сердце». Н. Рерих назвал свою книгу «В сердце Азии», Н. Ефремов — "Cor Serpentis" — Сердце Змеи. И наконец, любимый штамп плохих писателей «сердце его затрепетало». Однако не скажешь — «печень его затрепетала», «легкие задрожали», «почки сжались от ужаса». По-видимому, дело в том, что реакция сердца на всякого рода эмоциональное возбуждение — изменение частоты пульса — легко наблюдаема для человека. Поэтому и катод называют «сердцем электронного прибора» — его реакция на неполадки в приборе и в самом катоде легко наблюдаема — он перестает работать.

Какое сердце вам хотелось бы иметь? Ответ очевиден — здоровое и долговечное. Если человек мог бы выбирать, какое сердце ему иметь — более здоровое, но менее долговечное или наоборот, то имел бы смысл вопрос — какое лучше. Человеку такой выбор обычно не предоставляется, разработчики же электронных приборов находятся в более сложном положении.

Общая картина, так сказать, «взгляд с высоты» на сложившуюся в результате векового развития катодов ситуацию, такова — катоды, способные при прочих равных условиях эмиттировать большой ток, имеют меньший срок службы. Отсюда часто следует — приборы, обеспечивающие лучшие

параметры, имеют меньший срок службы. Хорошее и долговечное сделать вообще очень трудно!... и в области вакуумной электроники — в частности. Достигнутые сочетания качества и долговечности в значительной мере определяются катодами.

2. Почему с годами катоды становились лучше во всех смыслах

Первые ЭВП имели срок службы около тысячи часов и менее; впоследствии его удалось довести до десятков и сотен тысяч часов с одновременным увеличением эмиссии катодов. Казалось бы, проще улучшать один параметр за счет другого и наоборот; но потребитель, как правило, требует улучшения одного параметра при сохранении (или улучшении) других. Кроме того, в катодной технике была и чисто физическая причина для одновременного увеличения и эмиссии и срока службы. Посмотрите на рис. 68. Разные кривые соответствуют разному вакууму (разному давлению остаточных газов в ЭВП). Чем вакуум хуже (давление или концентрация

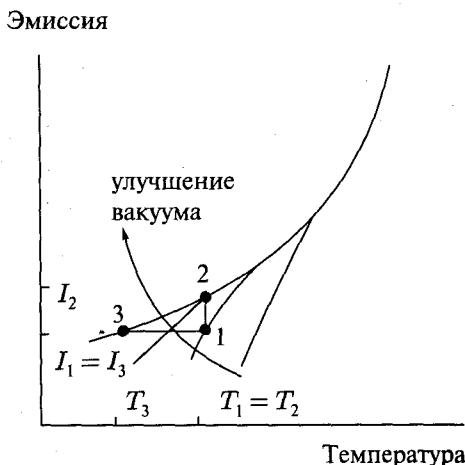


Рис. 68. Зависимость эмиссии от температуры и вакуума

3. Много плохих или один хороший?

газов больше), тем эмиссия (при той же температуре) меньше. Пусть первая лампа, которую мы сделали, работает в точке 1 (при температуре T_1 и эмиссии I_1). Улучшив вакуум, мы можем либо увеличить эмиссию до I_2 (перейти в точку 2) либо сохранив эмиссию, уменьшить температуру катода до T_3 (перейти в точку 3). А можем одновременно и увеличить эмиссию и уменьшить температуру катода. Уменьшение же температуры катода — это то же самое, что увеличение срока службы. Чем меньше температура, тем меньше скорость испарения, медленнее расход материала катода и больше срок службы. Действительная ситуация, конечно, сложнее. С некоторыми из этих сложностей мы познакомимся дальше. Но в любом случае фраза «действительная ситуация сложнее» не должна вас огорчать. Ведь не будь она сложнее, чем бы мы занимались завтра?

Конечно, срок службы ЭВП может определяться и не сроком службы катода. Может возникнуть течь в оболочке прибора, может произойти вакуумный пробой, переходящий в дугу и расплавление электродов, может «просто» разрушиться какая-либо деталь. Все электроды, на которые попадает электронный поток, нагреваются; при нагреве возникают механические напряжения и материал разрушается. Но в большинстве случаев срок службы ЭВП определяется сроком службы катода. Обычно самый горячий элемент ЭВП, наиболее чувствительный к напылению на его поверхность и к наличию остаточных газов в объеме прибора, элемент, который бомбардируется и распыляется потоком отрицательных ионов из объема прибора... Нелегко быть сердцем.

3. Много плохих или один хороший?

Что лучше — иметь много плохих (и дешевых) катодов или один хороший (и дорогой)? Это зависит от того, лучше иметь много плохих (и дешевых) ЭВП или один хороший (и дорогой)? Плохие приборы придется менять по мере выхода из строя, прибавятся расходы на обслуживание и убытки

от простой системы при смене прибора (если не применено «горячее резервирование» — мгновенное подключение готового к работе запасного комплекта аппаратуры). Итак, что лучше — зависит от того, в каких условиях работает катод. Сравнительно несложно сменить катод в плавильной печи — ее все равно регулярно вскрывают и, сами понимаете, неудобно менять лампу, летающую на спутнике. Итак, принимая техническое решение, надо принимать во внимание широкий круг факторов. Это простая истина, но как непросто ей следовать... Так непросто, что проповеди этой истины посвящают целые книги (даже двухтомники!), например Дж. ван Гиг «Прикладная общая теория систем» (М.: Прогресс, 1981). Интересно вот что — сама идея о том, что надо принимать во внимание широкий круг факторов, в странах с тоталитарным режимом считается «вредной». Именно, в советское время эта книга была выпущена с грифом «для научных библиотек» и не продавалась в магазинах. Впрочем, таких книг было немало.

Но это далеко не все проблемы. Есть и другие. Например, проблема «разброса параметров». Если взять два вроде бы одинаковых катода и поместить в два вроде бы одинаковых прибора, то может так оказаться, что один проработает 1000 часов, а другой — в 10 раз больше. Понятно ли, почему это плохо? Если изготовитель может гарантировать лишь 1000 часов срока службы, то потребитель или вообще откажется от таких плохих приборов или будет вынужден покупать много запасных. Далее, раз бывают хорошие катоды, то, спрашивает заказчик, наверное, можно и все делать хорошими? Решение этой проблемы — проблемы разброса параметров имеет два аспекта — общетехнический и частный. Общетехнический аспект состоит в том, что ниоткуда ничто не появляется, и если у одинаковых катодов разный срок службы, то они, следовательно, не одинаковые. А вот разница в чем могла изменить срок службы в 10 раз — это уже частный аспект. Скажем, вакуум в приборе или некоторые примеси в материале катода могут изменить срок службы и в 10 и в 1000 раз, а возраст и цвет глаз экспериментатора —

нет. А, скажем, при некоторых тестах с человеком ситуация прямо противоположная. Что именно и как может столь сильно влиять на катод, мы узнаем чуть позже.

4. Как заглянуть в будущее

Другая проблема — проблема испытаний, которая состоит из проблемы прогнозирования и проблемы ускоренных испытаний. Проблема прогнозирования: я сделал 100 катодов и хочу отобрать, скажем, 30 лучших. Ясно, что если их испытать в течение почти полного срока службы, то о них можно будет кое-что сказать, но после таких испытаний они уже не будут никому нужны. Желательно уметь по поведению катода в течение 10 часов уметь (пусть даже не со 100 % надежностью) предсказать его поведение в течение, скажем, 1000 часов. Какое-то (не слишком хорошее) решение этой задачи возможно, даже если мы не понимаем причин разброса параметров. Например, мы испытываем 1000 катодов в течение всего срока службы и обнаруживаем следующее. Среди катодов, имевших срок службы менее 1000 часов, у 90 % катодов эмиссия увеличивалась первые 5 часов, а потом стабилизировалась, а у 10 % увеличивалась вплоть до 10-го часа, у катодов же, имевших срок службы более 1000 часов, соотношение «быстрых» и «медленных» обратное. Прекрасно! Мы испытываем впредь все катоды в течение 10 часов и в приборы, где нужен больший срок службы, ставим те, у которых эмиссия стабилизируется медленно. Заметим, что мы это делаем, не понимая причин явления и тем не менее поступаем правильно. И все-таки, непонимание вредно — в ситуации, когда длительные испытания не проведены и неизвестно, что катоды, быстро увеличивающие эмиссию, имеют малый срок службы, может произойти следующее. Контроль катодов по эмиссии проводится, скажем, через 5 часов после начала работы и привести к тому, что катоды, имеющие больший срок службы (но требующие более длительного активирования), будут забракованы (как имеющие меньшую эмиссию).

Если мы понимаем, что такое может быть, то к контролю в течение малого времени при отсутствии данных по длительной работе мы отнесемся с недоверием. И будем совершенно правы. Еще полезнее понимать, как говорят, «физику работы» катода (правильнее — физику и химию), ибо в этом случае, например, ситуацию, описанную выше, можно предугадать.

Проблема ускоренных испытаний состоит в следующем: пусть мы разрабатываем катод, который должен иметь срок службы 80 000 часов. Это 10 лет. Не так-то много — именно столько должны работать лампы на спутнике связи (до морального износа спутника). В процессе разработки нам надо испытывать катоды, которые мы делаем. Итак, их надо испытывать 10 лет. И что же, убедившись, что катоды хорошо проработали 10 лет, мы возьмем и поставим в приборы такие катоды, изготовленные 10 лет назад и бережно сохранявшиеся все это время? Да за это время мы придумаем что-нибудь новое! Стало быть, хочется придумать способ испытаний, при котором мы узнаем, как работает катод, быстрее чем за 10 лет — хотя бы в 10 раз. Заметьте, что речь идет не о прогнозе работоспособности в течение 10 лет по работе в течение 1 года — мы согласны, чтобы ресурс (работоспособности) катода был израсходован полностью. Действительно, делая сотню ламп для серии спутников связи мы согласны испытать до полного расходования ресурса — то есть испытать и выкинуть хоть тысячу катодов. Стоимость спутника это увеличит не сильно. Конечно, после того, как конструкция и технология катодов разработаны (с помощью ускоренных испытаний) и партия катодов изготовлена, мы можем испытать их в течение некоторого времени и отобрать из изготовленных (пользуясь тем или иным правилом) лучшие. Но пока мы технологию лишь разрабатываем, и внося в нее те или иные изменения, хотим знать, как скажутся они на сроке службы. Для этого мы берем несколько катодов и испытываем их при большей температуре, чем та, при которой им предстоит работать. При этом срок службы сокращается и можно испытать катод в течение 8000 часов и увидеть конец его срока службы. Если мы

твёрдо знаем, как увеличение температуры уменьшает срок службы, наша задача решена. Беда, как и следовало ожидать, в том, что мы не всегда знаем, как увеличение температуры сокращает срок службы. Более того, определив это на партии катодов, изготовленных по одной технологии, мы не можем быть уверены, что эта зависимость сохранится при изменении технологии катодов. Единственное, что здесь может помочь — это опять же понимание физики и химии работы катодов. Переходим же к физике и химии работы основных типов катодов.

5. Вольфрам: он был первым

При тех температурах, при которых эмиссия с вольфрама имеет вполне заметную величину, он еще не плавится, да и испаряется при этих температурах он медленно — вольфрамовый катод может иметь срок службы в сотни часов. Большое достоинство вольфрамового катода — работоспособность в вакууме 10^{-4} торр. По современным понятиям для электронной лампы такой вакуум безнадежно плох, но отсюда начиналась история ЭВП. Первый человек разумный, то есть по мнению А. Н. и Б. Н. Стругацких «провергший первую дыру в камне» («Понедельник начинается в субботу») тоже выглядел не очень элегантно. Хотя современная мода, успешно играющая на желании быть «в общем» не хуже всех и хоть чем-то выделяться «в частности», может завести далеко...

Итак, вольфрам успешно эмиттировал, и плохо было только то, что для этого его приходилось нагревать до слишком высоких температур. При этом он излучал большую мощность, поэтому вольфрамовые катоды грели для ЭВП и окружающие детали, а приборы с такими ЭВП имели маленький КПД. Надо было искать материал, имеющий большую эмиссию, то есть эмиттирующий больший ток при такой же температуре или, естественно, такой же ток — при меньшей. Казалось бы, нет ничего проще — большую чем у вольфрама эмиссию имеют многие металлы. Увы — при этом они имеют и большую скорость испарения, а зачастую успевают расплавиться раньше чем достигнут температуры, при которой дают заметную

эмиссию. Из таких металлов катод для ЭВП сделать нельзя. Разумеется, одними металлами окружающий человека мир не исчерпывается. Но из чего еще можно сделать тонкую нить (таковы были вольфрамовые катоды)? Возникает естественная мысль... минуточку. Сейчас она уже не очень естественна. Люди научились делать нити из стекла, кварца, углерода, карбида кремния, окиси алюминия и, если надо — наверное из чего угодно! Но — представьте себе — на дворе 1908 год. Возникает естественная мысль — взять нить из вольфрама, но покрыть ее каким-то веществом, которое не отлетит от нее при нагреве и будет иметь большую, чем вольфрам, эмиссию.

Вернемся однако на минуту к вольфраму. Вакуум в ЭВП не сказывался на его эмиссии (рис. 68) для вольфрама не горится. Происходит другое — в плохом вакууме (хуже 10^{-4} торр) уменьшается срок службы катода. Часть компонентов остаточной атмосферы (O_2 , CO_2 , H_2O и другие) окисляет вольфрам, а эта окись испаряется значительно быстрее вольфрама. Конечно, такой процесс не может не влиять и на эмиссию — ведь какое-то время на поверхности вольфрама находится его окись, а она имеет другую эмиссию, нежели вольфрам. Но скорость испарения окиси так велика, а время ее пребывания на поверхности так мало, что это влияние неощутимо.

В наше время вольфрам в качестве катода используется крайне редко — только тогда, когда нужна работоспособность в очень плохом вакууме. Материалы, которые могут служить в таком же плохом вакууме, как вольфрам, сейчас существуют, но они дороже. С этим свойством — влиянием вакуума не на эмиссию, а на срок службы, мы еще встретимся.

6. Польза от зубного порошка

Основная польза от зубного порошка — уменьшение работы для стоматологов. Существует легенда, что среди прочих веществ, которыми А. Венелт в 1903 году попробовал покрывать вольфрамовую нить, был зубной порошок, $CaCO_3$. Так зубной порошок еще раз послужил людям.

Идея покрытия вольфрама CaCO_3 на первый взгляд выглядела довольно глупо. CaCO_3 при нагреве разлагается на CaO и CO_2 , CO_2 откачивается насосами, CaO остается на катоде, но CaO , как и вообще окислы элементов II и III групп периодической системы — прекрасный диэлектрик. А через диэлектрик ток не идет. Так-то это так, но только эмиссия увеличилась более чем в миллион раз. Природа очередной раз оказалась устроенной нетривиально.

Оксидный катод оказался твердым орешком. Традиционная физика твердого тела работала с объектами, выполненными так и помещенными в такие условия, чтобы выделить исследуемый эффект в чистом виде. Оксидный же катод пришел в физику из техники, в науку из практики. И такой, какой он пришел из практики, он был сложен для исследования, так как в нем одновременно работало много эффектов, а когда исследовались те или иные модельные объекты с уменьшенным количеством действующих эффектов, всегда оставалось ощущение, что исследуется «не то».

Существует легенда, что в 70-е годы, на защите диссертации по оксидному катоду в Ленинграде встал какой-то древний дед, которого не помнил уже никто из присутствующих, пожевал губами и проскрипел: «Как же, как же, помню... помню... в 30-е годы (прошлого века) много, много занимались оксидным катодом... очень, оч-чень сложный объект». И сел.

Об истории оксидного катода можно рассказывать долго и интересно, тем более, что эта история так же интересна и поучительна, как история любого технического объекта, успешно просуществовавшего более 3/4 века. Подумайте, какую увлекательную историю можно написать о гвозде, шурупе, винте и болте, об их сестричке заклепке, братце пистоне, о дальних родственниках шпонке, шпильке, штифте, шплинте и так далее!

История человека запечатлена не только в картинах и книгах. Не в меньшей степени она запечатлена в мостах и тоннелях, столах и стульях, болтах и гайках. Надо только научиться ее читать. Но ведь и картины надо научиться смотреть.

Оксид, из которого состоит оксидный катод, взаимодействует с металлом, на который он нанесен, и с примесями к нему. Причем десятые и сотые доли процента некоторых примесей оказываются способными изменить свойства катода. Оксид взаимодействует с остаточными газами, причем содержание 10^{-7} торр H_2 или O_2 способно изменить свойства катода. А в те далекие времена, «у века на самой заре» ни измерять, ни получать такой вакуум не умели, не говоря уж об определении состава остаточной атмосферы. Катод распыляется ионами, летящими к нему из объема прибора. Катод нагревается собственным излучением, отраженным от окружающих катод деталей. Свойства катода зависят от того, быстро или медленно нагревали его первый раз, когда превращали карбонаты в оксиды, от того, какой ток через него пропускали и долго ли это делали... и даже от того, как и чем мыл руки экспериментатор, который его делал. «Может, руки надо помыть тому заскорузлому пацану, что колбу держит?» — М. Жванецкий. Диэлектрические окислы превращаются в полупроводники, если в них оказывается небольшой дефицит кислорода (сотые доли процента). Этот дефицит образуется за счет реакции окисла с металлом, на который он нанесен или примесями к этому металлу, за счет реакции с восстановляющими окислы остаточными газами (H_2 , CO) и, наконец, за счет медленного разложения самого окисла с преимущественным испарением кислорода. Теперь становится понятной «нежность» оксидного катода — стоит этот дефицит кислорода уничтожить (а он исчезнет при наличии в остаточной атмосфере окисляющих газов — O_2 , CO_2 , H_2O), как он станет изолятором и катоду конец. Понятна и чувствительность катода к примесям, восстановляющим оксид. Да и вообще, после того, как сказано «полупроводник», многое становится понятным. Например, становится понятным, почему через такой катод нельзя пропускать большие токи — у полупроводника относительно высокое сопротивление, он разогревается (тепло Джоуля—Ленца), покрытие испаряется, а срок службы сокращается. Становится понят-

ным, почему у быстро «активирующихся» катодов при прочих равных условиях оказывается меньший срок службы — большее количество примеси, например, углерода вызывает быстрое разложение окисла и, стало быть, быстрое увеличение эмиссии в начале срока службы, но и быстрое израсходование окисла и короткую катодную жизнь. ...Разумеется, здесь не рассказано и тысячной доли того, что сейчас известно об оксидном катоде. Самые хорошие катоды, как было обнаружено, получаются не из CaO , а из смеси BaO , SrO и CaO в определенном соотношении, причем даже не из смеси, а из так называемого «твёрдого раствора» — вещества с единой ионной решёткой и составом $(\text{Ba}_{0,5} - \text{Sr}_{0,4} - \text{Ca}_{0,1})\text{O}$, причем наибольшая эмиссия получается, если в таком твердом растворе, а точнее на его поверхности имеется избыток Ba , и так далее и так далее... Заметьте, что даже в этой простой фразе скрыто по крайней мере две загадки — во-первых, регулярный или нерегулярный это твердый раствор и, во-вторых, избыток Ba по отношению к чему — к $\text{Sr} + \text{Ca}$ или к O ? Ответ на второй вопрос известен лишь предположительно — избыток по отношению к $\text{Sr} + \text{Ca}$ (а очень долго считалось наоборот), первый же вопрос даже, если угодно, не поставлен.

...Оксидный катод похож на горную страну, скрытую туманом. Когда ветер случайно разгоняет туман то здесь, то там, становятся видны вопросы и иногда даже ответы. Иногда...

Но эта книга все-таки о лампах, а не о катодах и уж точно — не об оксидном катоде. Об этом объекте своей безутешной любви автор надеется написать позже, доказав экспериментально, что и о нем можно написать интересно. Ведь даже такие простые вещь, как механизм прохождения через него тока и механизм пробоя, и то стали известны лишь в 80-е годы и лишь в результате наших исследований.

7. Эра композитов

Слово «композиты» вы, конечно, слышали и не раз. Крылья у самолетов, корпуса у подводных лодок и вообще все са-

мое современное. Но так же, как древним Рим жил да был гораздо раньше слов «древний Рим» так и композиты применялись в технике много раньше, чем возникло это звучное слово.

Из рассказанного выше видны два недостатка оксидного катода — высокое сопротивление, не позволяющее пропускать через покрытие большие токи (из-за перегрева) и испарение покрытия, кладущее предел сроку службы (второй недостаток свойствен всем катодам, но нам от этого не легче).

Эти два недостатка связаны — со вторым можно было бы бороться, увеличивая толщину покрытия (запас вещества), но при этом, естественно, увеличивается сопротивление. Как уменьшить сопротивление оксида? Довольно естественным решением является введение в катодное покрытие металла. Металл имеет низкое сопротивление и ток в основном пойдет по нему, а не по оксиду, и не будет нагревать катод. Правда, для того, чтобы быть эмиттированными в вакуум, электронам придется все-таки перейти в оксид, но только перед самой поверхностью (рис. 69). Такие катоды существуют и успешно работают; металл, находящийся в покрытии, имеет чаще всего вид металлической губки, в порах которой находится оксид. Заодно металлический каркас выполняет еще одну важную функцию.

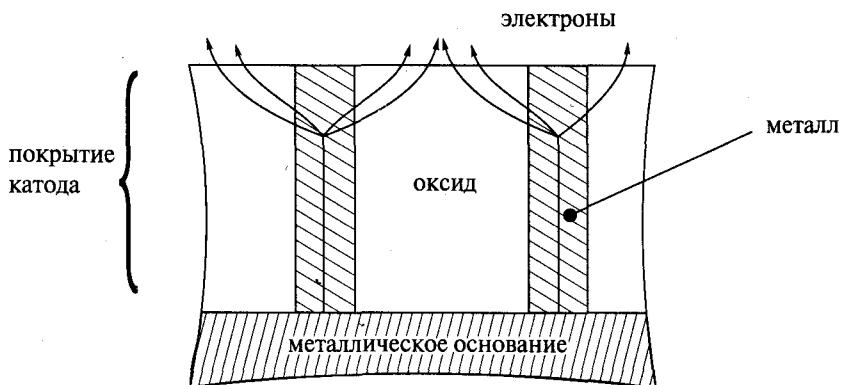


Рис. 69. Катод с металлом в покрытии, принцип действия.
Металлическое основание обычно называют керн (англ. kern — ядро)

цию — увеличивает прочность самого покрытия и прочность его соединения с керном. Однако в точности в том виде, в котором рассказано (металл и оксид) эти катоды применяются относительно редко. Почему — это слишком сложный вопрос для этой книги, да и ответ на него есть пока лишь частичный.

Зато другой катод, тоже состоящий из металлической губки и вещества в ее порах, получил очень широкое распространение, хотя вещество в ее порах имеет очень малую эмиссию. Что же эмиттирует в таком катоде? Пусть металл — вольфрам, вещество в порах — алюминат бария—кальция (соединение типа $m\text{BaO}—n\text{CaO}—k\text{Al}_2\text{O}_3$, m, n, k — числа) — такой катод был предложен Р. Леви в 1960 году, а прообразом для него послужил катод, предложенный Г. Дж. Лемменсом в 1953 году, в котором соединения бария отгораживались от вакуума пористой вольфрамовой перегородкой. В новом катоде вольфрам взаимодействовал с алюминатом, выделяющийся барий диффундировал на поверхность катода и образовывал на ней... здесь начинаются загадки.

Существуют две точки зрения — что на поверхности катода барий образует монослой на окисленном вольфраме и что барий образует очень маленькие кристаллики BaO . Существование таких кристалликов установлено А. В. Дружининым в 1974 году. Но и в существовании монослоя тоже нет сомнений — чтобы кристаллики образовывались и росли к ним должен поверхностной диффузией (миграцией) подходить барий — значит, на поверхности он есть. Да, а кислород откуда? Это кислород из алюмината или те крохи, которые были в остаточной атмосфере прибора или те, которые были примесью к вольфраму? Вопрос темный. И что же все-таки эмиттирует — кристаллики или монослои? После многодети летних дискуссий К. Е. Мэлони и Н. Ричардсоном в 1981 году было высказано мнение, что ситуация зависит от вакуума в ЭВП, в области $P > 10^{-7}$ торр эмиттируют в основном кристаллиты, а в области $P < 10^{-8}$ торр — в основном монослои. Позже Л. А. Ашкнази и М. Л. Гайнер было показано, что в катоде существуют кристаллиты CaO (с монослоем BaO

на них) и монослой Ва на окисленном вольфраме, причем в начале срока службы эмиссию обеспечивает первая структура, а позже — вторая.

Для практики важно, что кристаллики ВаО на этом катоде растут очень маленькие. Следовательно, их сопротивление мало, выделение тепла при протекании тока мало и с катода можно отбирать большие токи. Кстати, 1001-й вопрос — почему кристаллики маленькие? Если взять вместо вольфрама никель, а вместо алюмината — оксид Ва—Sr—Са, то есть наш старый знакомый оксидный катод, но с никелем в покрытии, то на никеле будут тоже расти кристаллики. Но большие, размером в единицы микрон, и будут эти кристаллики образовывать на никеле сплошную шкурку, имеющую уже не такое маленькое сопротивление, как меньшие кристаллики на катоде из вольфрама и алюмината. Может быть, это и является причиной менее широкого применения такого катода.

8. Диффузионная проблема и катоды без этой проблемы

Такие катоды могли бы иметь огромный срок службы... если бы их удалось создать. Собственно, один такой катод мы знаем. Это — вольфрам. Но уж очень высоких температур он требует для своей работы. Однако давайте по порядку.

У рассмотренных нами катодов — оксидного и на основе вольфрама и алюмината бария — кальция была важная общая черта — состав их поверхности отличался от объема. Это само по себе уже означает, что в катоде имеют место диффузионные процессы — иначе как то, чего на поверхности больше, чем в объеме, попадет на эту поверхность. Однако ситуация еще несколько сложнее. Состав продуктов испарения катода обычно отличается от состава катода — в обоих рассмотренных катодах барий испаряется больше других металлов. Это значит, что барий на поверхность подается из объема — соответственно, диффузией. Сначала он поступает из слоев, более близких к поверхности, потом, по мере расходования

бария из этих слоев — из более глубоких. Поскольку толщина слоя, через который приходится пребираться барию, возрастает, поток его падает. Когда поток становится недостаточен, чтобы поддержать высокую концентрацию бария на поверхности, эта концентрация — а вместе с ней и эмиссия катода — начинают уменьшаться. Срок службы катода заканчивается. Катодная «осень», в отличие от болдинской, совсем не золотая. Соотношение между коэффициентом диффузии и скоростью испарения с поверхности в основных типах катодов таково, что катод выходит из строя задолго до полного исчерпания запаса вещества. И это обидно — казалось бы, еще есть, можно работать и работать, но поток мал и наступает финиш. Не победный.

Как можно бороться с этим явлением? Во-первых, чисто «количественные» методы — увеличение запаса вещества одновременно с увеличением потока и уменьшение необходимой скорости подачи вещества на поверхность. Во-вторых, стабилизацией диффузационного барьера. Действительно, если бы диффузионный барьер не увеличивался по мере расходования испаряющегося с поверхности компонента (бария), то и поток этого компонента был бы постоянным. Технически этот диффузионный барьер может выполняться в виде какой-либо пленки, нанесенной на поверхность катода. Толщина ее подбирается так, чтобы потока как раз хватало для работы катода — поддержания «эмиссионно-активного» состояния поверхности. В-третьих, можно сделать так, чтобы скорость выделения испаряющегося с поверхности вещества стабилизировалась какой-либо химической реакцией, текущей с постоянной скоростью, например, разложением соединения.

Возможна в принципе ситуация, когда все эти проблемы в катоде не возникают. Это имеет место либо в катоде, где состав поверхности таков же, как состав объема (чистый вольфрам), или в катодах, состав продуктов испарения которых таков же, как состав объема (состав поверхности может быть другим). Пусть например, катод — это соединение АВ (А и В — сорта атомов). На поверхности 99 % мест заня-

то атомами А и 1 % атомами В. Скорость испарения атомов А в 99 раз меньше скорости испарения атомов В. Понятно, что отношение А/В будет = 1 и в объеме и в продуктах испарения, и диффузия на работу катода влиять не будет (кроме начального момента, когда формировался избыток А на поверхности). Этот пример соответствует испарению окислов BaO , SrO , CaO (А = Ва или Sr или Ca, В = O). Другой пример — то же вещество АВ, то же избыток А на поверхности, но атомы А и В предпочитают испаряться не отдельно, а в виде молекул АВ. Возможно, что так испаряются катоды на основе сплавов Ir + La, Ir + Ce. К сожалению, как указывалось выше, эмиссия тройного оксида (BaSrCaO) выше, чем индивидуальных окислов, а в нем уже возникает диффузионное ограничение со всеми вытекающими последствиями.

И наконец, упомянем еще об одном катоде, который, хотя в электронных лампах и пока не применяется, а в основном используется в технологических установках (например, в печах или установках для электронной литографии) или ускорителях, где первостепенное значение имеет способность катода работать в плохом вакууме. Это катод из гексаборида лантана, LaB_6 (открыт Дж. М. Лафферти в 1951 году). Он также испаряется без изменения состава (это называют «конгруэнтно»). Разные грани монокристалла LaB_6 имеют разную эмиссию, но примерно одинаковые скорости испарения. И можно найти грань, имеющую отношение эмиссия/испарение больше, чем у катода на основе вольфрама и алюмината. В 1986 году П. Р. Дэвисом и Г. А. Швингом было показано, что таковы свойства грани (310) LaB_6 . Хотя, конечно, для работы LaB_6 все равно требует большей температуры.

LaB_6 -катод интересен тем, что это первый катод, у которого была группой японских исследователей в 1980 году надежно установлена структура поверхности разных граней. Существует много методов исследования поверхности, для нас же важно, что они определяют состав поверхности в слое некоторой толщины — от одного монослоя и более. Так вот, одни методы отвечали, что на поверхности LaB_6 -катода есть избыточ-

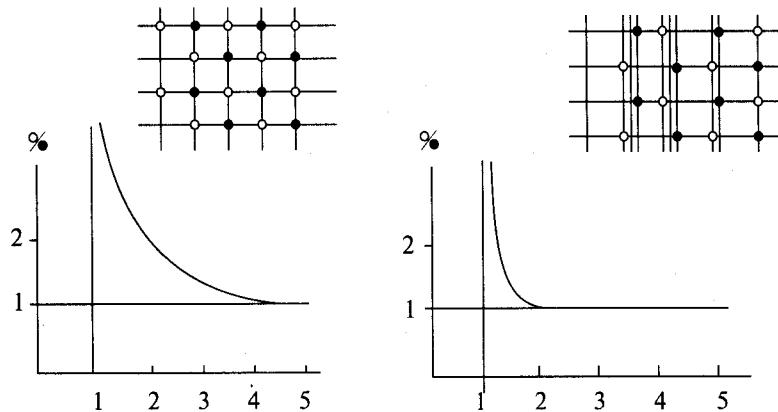


Рис. 70. Структура поверхности. Слева — сверхстехиометрический избыток А, справа — релаксация решетки, сверху — расположение атомов, внизу — отношение % для n верхних слоев

ный La, другие — что его нет. Истина оказалась посередине — есть, но не избыточный. На рис. 70 показана структура двух кристаллов AB — с избыточным А на поверхности и без избытка А, но с «релаксацией решетки», то есть смещением атомов (одного из сортов наружу).

Под структурами изображена зависимость ответа отвeta на вопрос о составе кристалла, даваемого методом, анализирующим n верхних слоев. Видно, что только применением двух методов с разными n можно отличить одну структуру от другой и от кристалла без избытка и релаксации.

9. Эмиттирует, а не катод (динод)

Пусть надо сделать электронную лампу, способную усиливать сигналы высоких частот и имеющую сравнительно большой анодный ток (то есть высокую выходную мощность). Для увеличения тока надо либо увеличивать площадь катода, либо увеличивать плотность отбираемого с него тока. Второе сокращает срок службы, что само по себе плохо, а первое

увеличивает емкость между электродами лампы. Лампа с высокой межэлектродной емкостью не может усиливать сигналы высоких частот — они пройдут «сквозь» лампу, через емкость, сопротивление которой для высоких частот мало.

Представим себе, что электронный поток, прошедший через лампу с малой площадью катода (то есть малой емкостью) и малой плотностью тока на катоде (то есть большим сроком службы) попадает не на простой анод, а на «динод», который покрыт слоем вещества с высокой вторичной эмиссией. При попадании на такое вещество электрона из него вылетает несколько электронов и они уж летят на «настоящий» анод. Так происходит дополнительное усиление анодного тока, уже подвергнувшегося управлению сеточным напряжением. Однако электронная бомбардировка разрушает понемногу вещество с высокой вторичной эмиссией и срок службы таких ламп оказывается сравнительно невысоким. Можно ли увеличить срок службы вторичных эмиттеров? Эта проблема оказывается гораздо более важна, а вторичные эмиттеры — гораздо более нужны, чем лампы с динодами. Не пожалеем и потратим на эту проблему и эти эмиттеры отдельный параграф.

10. Катоды, эмиттирующие под дождем

Разумеется, под электронным дождем — это катоды со вторичной эмиссией. Действительно, чтобы такой катод эмиттировал, надо, чтобы на него попадали электроны. Откуда они берутся? Это зависит от того, для чего применен катод со вторичной эмиссией. Первая область применения — вторично-электронные умножители (рис. 71), предназначенные для регистрации очень слабых электронных токов в вакууме, вплоть до счета отдельных электронов («заверните мне, пожалуйста, две штучки... и тот, крайний слева!»). Если на вход ВЭУ установить фотокатод, испускающий электрон при попадании на него фотона, мы получим ФЭУ — фотоэлектронный умножитель — прибор, предназначенный для регистрации очень слабых потоков фотонов, вплоть до регистрации отдельных

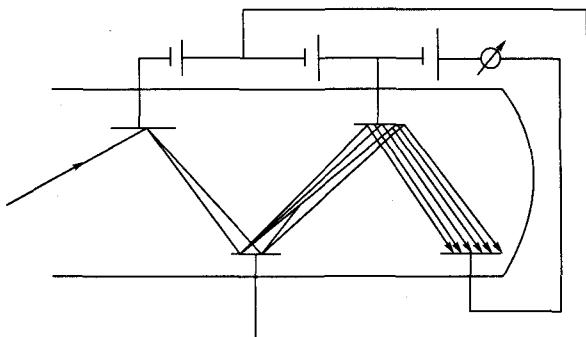


Рис. 71. Вторично-электронный умножитель

фотонов. Фотокатоды мы рассматривать не будем — они вместе с фотоприборами не входят в материал этой книги (рис. 3).

В некоторых случаях один и тот же материал (что, конечно, довольно удобно технологически) удается применить и в качестве фотокатода и в качестве вторично-электронного катода. Например, сплавы SbCs и SbCsK, окисленные с поверхности (SbCsO, SbCsKO).

Перечисленные пока что их применения можно условно объединить термином «слаботочные» (не от слабой точности, а от слабого тока). Такое объединение условно, потому что плотность тока ВЭУ нарастает (рис. 71) от динода к диноду. Вторая группа применений может быть объединена термином сильноточные — это в основном применение в приборах М-типа.

Основная драма вторичных эмиттеров — это драма вторичной эмиссии и проводимости/стойкости. Чтобы эмиттировать больше, чем падает, надо, чтобы электроны подходили из глубины материала, чтобы эмиттировать долго — нужна стойкость — отсутствие разложения при электронной бомбардировке. Так вот, вторичная эмиссия высокая у окислов элементов II и III групп, а высокая проводимость и стойкость — у металлов. Это, конечно, несколько упрощенная картина, применяются в качестве вторичных эмиттеров и полимеры с некоторыми добавками, делающими их проводя-

щими и некоторые полупроводники... но основная проблема звучит именно так — окисел или металл. Точнее — что сделать из окисла и металла, чтобы соединить те их качества, которые нам нужны? Заметим, что это классическая проблема техники композитов. Как она решается в данном случае?

Один крайний случай — это когда вторичный эмиттер должен работать при малых плотностях тока. В этом случае можно применить чистый окисел и иметь высокий коэффициент вторичной эмиссии (КВЭ). Случай этот встречается редко. Другой крайний случай, встречающийся чаще, когда плотность потока электронов настолько высока, что единственное, что можно применить — это чистый металл. В этом случае рассчитывать на получение $\text{КВЭ} > 2$, не приходится и то для этого надо применять платину. У золота и серебра $\text{КВЭ} \approx 1,8$, а у прочих металлов еще меньше.

Теперь подумаем, как смешивать окисел и металл. Большие куски окисла брать нельзя — у них слишком высокое сопротивление. Надо как-то исхитриться и сделать смесь из маленьких кусочек... или использовать тонкую пленку окисла. Металлы, покрытые тонкой пленкой окисла применяются, хотя чаще окисляют сплав, содержащий один металл с хорошей проводимостью, а второй — с прочным окислом. Пример — сплав $\text{Ca} + \text{Be}$, применяющийся для динодов ВЭУ. BeO играет роль вторичного эмиттера, а подводит к эмиттеру ток CaO .

Для эмиттеров, работающих в области больших токов, используют смеси разных металлов и разных окислов, подбирая металлы, окислы, размеры их частиц и концентрации, чтобы угодить всем требованиям — и по КВЭ и по стойкости к bombardировке. А требования растут и растут. Техника создана человеком, а человек не приучен останавливаться на достигнутом. Это Природа создала на Земле гору в 8848 м высотой и успокоилась — человек устроен иначе. Заметим, что человек создан тоже природой и это единственное ее создание, имеющее ненасытный аппетит, проявляющийся только тогда, когда человек оказывается в обществе себе подобных.

Вернемся к вторично-электронным эмиттерам. Если можно окислять металлы, то почему нельзя восстанавливать окислы? Восстанавливать не до чистого металла, у которого коэффициент вторичной эмиссии мал, а до некоторого промежуточного состояния, которое называется «частично восстановленные окисные стекла». А почему стекла? Вспомним, что стекло — это окислы нескольких элементов, в зависимости от сорта стекла это могут быть Si, Al, Pb, Ca, K, Na, P и другие. В частности, если взять стекло с большим содержанием Pb и нагреть его в водороде, PbO частично восстанавливается до Pb, у стекла появится проводимость и сохранится сравнительно высокий КВЭ. Эмиттеры, изготовленные таким способом, имеют одно особое технологическое преимущество — из них — ведь они стеклянные — могут быть вытянуты тонкие трубки. Такие трубки складываются в пакет, нагреваются до температур, при которых они спаиваются и прогреваются в водороде. Получается микронакальная пластина (МКП) (рис. 72). Если на торцы пластины нанести металлические пленки и приложить к ним напряжение, то микронакальная пластина станет микронакальным умножителем. Внутренняя поверхность каналов покрыта слабопроводящим слоем из PbO и Pb. Этот слой — вторичный эмиттер

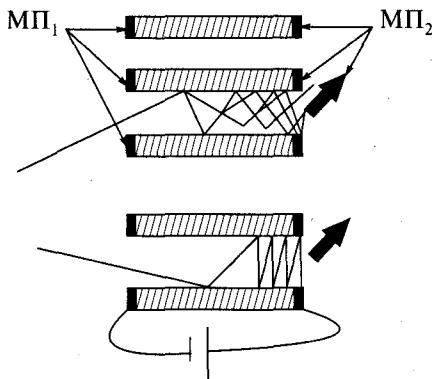


Рис. 72. МКП

и в каналах происходит умножение электронов. Главное свойство микроканальной пластины состоит в том, что усиленный электронный поток выходит из нее напротив тех мест, где в пластину попадают первичные электроны. Этот усиленный ток можно измерить и узнать не только, сколько первичных электронов попало в пластину, но и в какие именно места они попали. Для многих применений такое свойство является весьма ценным.

Выше было сказано, что хорошими вторичными эмиттерами являются окислы, но — вот беда — у них плохая проводимость. Между тем мы знаем, что окислы Ba, Sr, Ca — и индивидуальные, и смешанные (BaSrCa)O в оксидном катоде имеют довольно большую проводимость. Правда, они не очень хорошо выдерживают электронную бомбардировку, как, кстати и окислы элементов III группы La_2O_3 , Y_2O_3 , ThO_2 , и смешанные, например $(\text{LaY})_2\text{O}_3$. Может быть, их все-таки можно применить в качестве вторичных эмиттеров? Уж очень соблазнительно использовать высокий КВЭ окислов.

Использовать в качестве вторичных эмиттеров окислы элементов II и III группы можно. И их так используют, и вполне успешно, но — увы — полупроводниками эти окислы становятся только после нагрева в вакууме. Вы помните, что избыток металла (и вместе с тем проводимость) появляются у этих окислов только после взаимодействия при нагреве с металлом керна или восстановляющим остаточным газом или просто после частичного термического разложения. Итак, без нагрева не обойтись. Но делать специальный нагреватель только для активирования не хочется. Поэтому окислы элементов II и III группы применяются практически только в тех случаях, когда нагреватель «все равно есть», то есть в приборах, где используется и их термоэмиссия, то есть в приборах М-типа.

При электронной бомбардировке окислы разлагаются и КВЭ падает. Понятно, что у металла КВЭ ниже. А куда девается кислород? Увы, он сорбируется другими деталями прибора, которым он, вроде бы и ни к чему. Нельзя ли сделать

так, чтобы кислород сорбировался на катоде, окислял металл и восстанавливал КВЭ катода. Можно. Для этого в объем прибора понемножку можно в процессе работы вводить кислород. Обратите внимание — вводить кислород в ЭВП, чтобы восстанавливать эмиссионные свойства катода. Хочется сказать — приснится же такое! Но это вовсе не сон. Просто явь ЭВП бывает несколько неожиданной.

11. Должно ли сердце ЭВП быть горячим?

Да собственно говоря, не обязательно. От этого горячего сердца одни неприятности. Во-первых, при включении ЭВП катод разогревается не сразу. Время разогрева термоэлектронных катодов составляет в зависимости от их размеров от 10 до 100 секунд. Но телезритель не желает сидеть перед полированным ящиком и десяти секунд без дела. Он желает, чтобы сразу или клюшкой по голове или медам заламывает руки в экстазе. Но это еще полбеды, для кинескопов разработаны катоды с временем разогрева около секунды, а вот для других ЭВП сделать такие катоды трудно. Во-вторых, на нагрев катода расходуется энергия — это уменьшает КПД приборов. В-третьих, нагретый катод испаряется, в результате и загрязняет прибор и сокращает свой срок службы. Как видите, недостатков, проистекающих от того, что катод горячий, много — да мы еще перечислили не все. Так что старая мечта — сделать катод холодным — это хорошая мечта.

Посмотрим, как ее удается воплотить. Почему вообще с увеличением температуры увеличивается эмиссия? Потому, что с увеличением температуры тела увеличивается средняя энергия его электронов проводимости; увеличивается и доля этих электронов, имеющая энергию, достаточную для того, чтобы покинуть тело. А нельзя ли «нагреть» электроны, не нагревая тела, то есть передать им энергию не от решетки? Конечно, можно. Например, если в теле создать высокую напряженность поля, то электроны на длине свободного (то есть без соударений с решеткой) пробега будут набирать

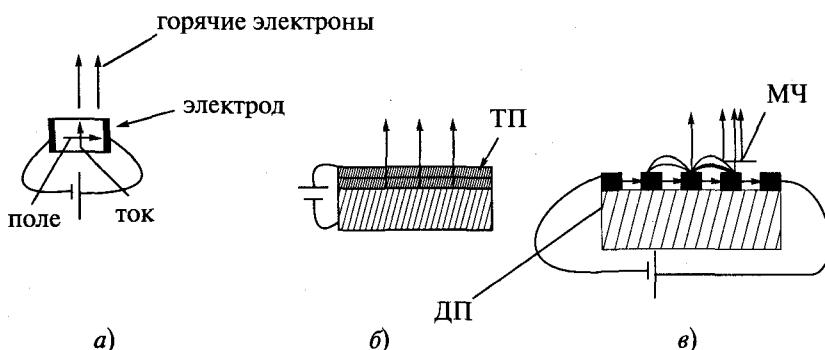


Рис. 73. Холодные катоды: а) с эмиссией из полупроводника, б) металл—диэлектрик—металл, в) островковый катод

большую энергию. Если такой электрон окажется близко к поверхности, он может быть эмиттирован. Такие катоды созданы и успешно работают, хотя по плотности тока эмиссии им пока «померяться силами» с термокатодами не удается. Кроме того, где создавать то самое поле, которое будет увеличивать энергию электронов? В диэлектрике нет электронов проводимости, а в полупроводнике (не говоря уж о металле) потечет ток и начнет опять затрачиваться мощность. Отношение эмиттированного тока к затраченной мощности для катодов этого типа тоже пока меньше, чем для термоэлектронных катодов.

Можно, правда, поступить хитрее. С помощью автоэлектронной эмиссии выдергивать электроны из металла в диэлектрик или вакуум, там их разогревать большим полем и выпускать в вакуум. На этом принципе основана работа холодных катодов, показанных на рис. 73. В катоде 73 б поле создается между двумя металлическими электродами, разделенными диэлектриком. Электроны из нижнего электрода посредством автоэмиссии переходят в диэлектрик, там разогреваются и сквозь тонкую пленку ТП эмиттируются в вакуум. В катоде 73 в между металлическими частицами (МЧ) размером в сотни и тысячи ангстрем, находящимися на диэлектрической подложке (ДП) происходит автоэмиссия, электроны летают от частицы к частице, увеличивают свою энергию и, отра-

зившись от очередного островка, улетают в вакуум. Перечисленные типы холодных катодов пока не применяются в ЭВП широко. Но они еще не сказали своего последнего слова.

А почему надо собирать энергию электрону, уже вышедшему в результате автоэлектронной эмиссии в вакуум? Нельзя ли непосредственно «запустить его в ЭВП», конечно, если сделать так, чтобы он эмиттировался и летел не от одного островка к другому (рис. 73 в), а в объем прибора? Для автоэлектронной эмиссии нужны большие напряженности поля, следовательно — или высокие напряжения или малые зазоры. Холодный катод, требующий для работы высоких напряжений, не может конкурировать с термоэлектронными — у них этого недостатка нет. Островковый катод (рис. 73 в) высоких напряжений не требует — островки (МЧ) образуются при напылении металла на диэлектрик (Δ) и расстояния между ними малы. Для создания хорошо работающего при напряжении порядка 100 В автоэлектронного катода надо изготовить конструкцию с размерами элементов порядка 1 мкм. Стандартное сравнение — в 50 раз тоньше человеческого волоса. Задача была решена в 1970-х годах группой исследователей под руководством К. А. Спиннта. Изготовленная ими структура показана на рис. 74. На подложке (Π) из кремния находится слой изолятора (I) из окиси кремния покрытый пленкой молибдена — управляющим электродом ($УЭ$). В цилиндрических колодцах (K) диаметром 1 мкм, расположенных

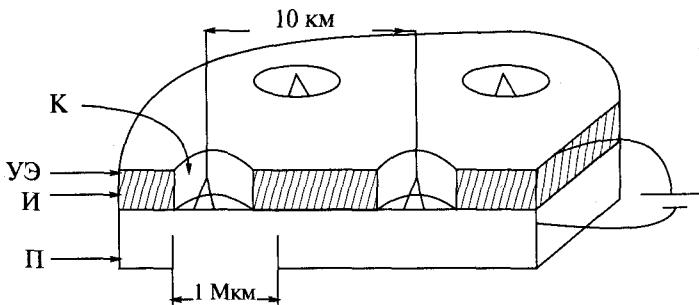


Рис. 74. Автоэлектронный катод для ЭВП

с шагом 10 мкм, находятся молибденовые конуса — эмиттеры (Э). При приложении между управляющим электродом и подложкой напряжения в 100—200 В начинается автоэлектронная эмиссия из эмиттеров. Начинается и продолжается, продолжается, продолжается... Для таких катодов уже получены значения плотности тока и срока службы, сравнимые с получаемыми для термоэлектронных катодов. Впереди — конкурентная борьба.

12. Что не поделили антиэмиттеры с эмиттерами?

Разумеется, эмиссию. Рассмотрим следующую ситуацию. Имеется самая обычная новая электронная лампа. На сетку подается большое отрицательное напряжение, вполне достаточное для «запирания» лампы — прекращения прохождения тока. И ток, естественно, прекращается. Но проходит какое-то время, лампа работает себе да работает, только она прекращает запираться — при подаче отрицательного напряжения на сетку ток анода уменьшается, но не до тех ничтожных значений, а до гораздо больших. И совершенно недопустимых. При этом электроны летят не с катода на анод, не подчиняясь запирающему действию сетки, а с сетки на анод и катод. Сетка становится катодом. Собственно говоря, она находится сейчас под отрицательным относительно катода и анода потенциалом. Но для того, чтобы быть катодом, электроду надо еще иметь надлежащую эмиссию — то есть быть покрытым веществом с большой эмиссией и находиться при достаточно высокой температуре. Теперь понятно, что для существования наблюдаемого эффекта необходимо, чтобы на сетке образовалось покрытие (в начале работы лампы его, естественно не было) с высокой эмиссией и чтобы сетка была горячей. Покрытие образуется при напылении на сетку того, что испаряется с других частей лампы, в основном — с катода и при взаимодействии напыленного материала с остаточной атмосферой прибора. Классическая ситуация — с катода испаряется Ва, на сетке он окисляется до ВаО — вот и покрытие

12. Что не поделили антиэмиттеры с эмиттерами?

с хорошей эмиссией. Что же до нагрева сетки, то за источником тепла далеко ходить не надо — он тут же, в большинстве ЭВП не далее, чем в одном миллиметре, и зовут его катод. Катод и напыляет на сетку и нагревает ее и делает из сетки катод.

Что же такое антиэмиттер или, как обычно говорят, антиэмиссионное покрытие? Это покрытие, нанесенное на сетку, чтобы снизить ее эмиссию. Снижать эмиссию такое покрытие может двумя путями — либо растворяя в себе напыляющееся вещество (так работает золотое покрытие, растворяющее в себе барий) или увеличивая скорость испарения с сетки напыляющегося на нее с катода вещества. Отсюда, кстати, видно, что зависимость паразитной эмиссии с сетки от ее температуры немонотонна. При малой температуре эмиссия мала потому, что она уменьшается с уменьшением температуры. При больших температурах она тоже мала, но потому, что увеличивается скорость испарения с сетки вещества, напыляющегося на нее с катода и, следовательно, уменьшается его концентрация на сетке.

Возможна ситуация, когда надо на катоде создать неэмиттирующие участки («эмиссионный рисунок» или «эмиссионный рельеф»). В этом случае то вещество, которое увеличивает эмиссию, попадает на участок, который не должен

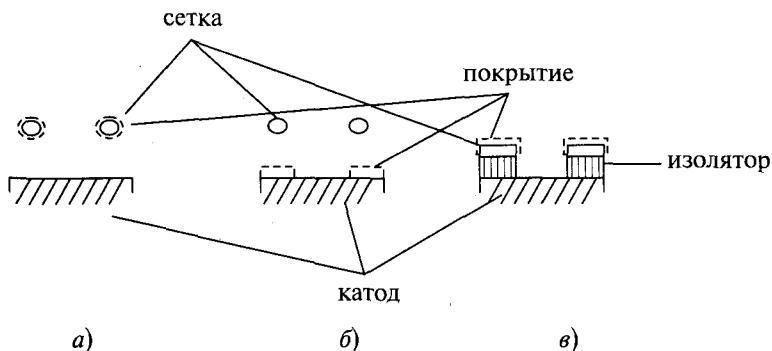


Рис. 75. Применение антиэмиссионных покрытий: а) на сетке, б) на катоде, в) на сетке монолитного катодно-сеточного узла

иметь эмиссии, не испарением и конденсацией (рис. 75 а), а миграцией (рис. 75 б). Возможна и комбинированная ситуация — в так называемых «монолитных катодно-сеточных узлах» (рис. 51). В этих узлах катод и сетка разделены не вакуумным зазором, а диэлектриком, так что вещество с катода может попадать на сетку и испарением — конденсацией, и миграцией. Видно, что управлять этим процессом в данном случае можно и изменяя свойства диэлектрика.

В целом о борьбе с эмиссией того, что эмиттировать не должно можно сказать (как впрочем и о многом другом), что в целом задача это еще далеко не решенная. Что значит — «в целом»? Это значит, что для любого катода (зная, что он испаряет) и зная температуру сетки, мы можем указать такое покрытие сетки, что оно гарантирует нам малую эмиссию сетки (причем любую, какую мы потребуем) в течение любого времени, которое мы назовем. В такой постановке, которую можно назвать глобальной, этой задаче не видать ни конца ни краю. И ее хватит и нам, и вам и еще останется. Но полвека истории ЭВП не прошли, конечно, даром — для многих классов ЭВП эта задача в значительной степени решена. Но и общую, «глобальную» постановку задачи перед глазами иметь надо.

Чтобы знать куда идти.

13. Шумим, братцы, шумим...

Если вы сильно увеличите громкость любого проигрывателя, магнитофона или приемника, то может произойти одно из двух. Первое — о вас подумают плохо соседи — произойдет, если при этом на входе был сигнал. Второе — вы услышите шум аппаратуры — произойдет, если сигнала на входе при этом не было. Иначе можно сказать, что шум — это сигнал, генерируемый самим усилителем, когда нет сигнала на его входе, того «полезного сигнала», ради усиления которого и создавался этот усилитель. Как правило, шум — это вредный сигнал; он мешает слушать музыку, мешает принимать слабые радиосигналы. Откуда же берется шум?

Его источников в радиоаппаратуре два, и один из них как раз и связан с катодами. Но мы начнем с другого. Этот шум называется «дробовый шум», от слова дробь. Не от той дроби, что в арифметике, а от той, что в охотничьем деле. Которой тешат свои психологические комплексы так и не повзрослевшие взрослые дяди.

В самом деле, электроны — это тоже маленькие шарики. Помните, как была открыта дискретность заряда? Так вот, из-за дискретности заряда количество электронов, пересекающих одно и то же сечение провода в единицу времени все время колеблется. Толпа электронов то реже, то гуще..., то есть колеблется ток в проводе, то есть появился паразитный сигнал или шум. В электронных лампах он имеет определенные особенности. Например, в многосеточных лампах появляется шум токораспределения, связанный с тем, что вылетевший с катода электрон может попасть на разные электроды.

Другой источник шума — это так называемые фликкер-шумы или «мерцание». Связаны фликкер-шумы ламп с медленным изменением свойств катодов. Например, в результате диффузии или попадания на катоды атомов и ионов остаточных газов. В лампах с динодами возникают, естественно, и фликкер-шумы вторичной эмиссии.

Есть в лампах и третий источник шума — вибрации электродов при воздействии на лампы ускорений; но с этим видом шумов понятно как бороться. Что же до основных видов шумов, то с фликкер-шумами бороться весьма сложно, а с дробовыми — сами понимаете — никак.

14. Печка для катода

Все тепловые задачи, которые решает техника, делятся на две группы. Либо человеку надо что-то нагреть, либо человеку надо что-то охладить. Вот и катоды человеку надо либо охлаждать, либо нагревать, причем нагревать почти всегда, а охлаждать — очень редко. Поэтому и начнем с охлаждения.

Но почему, собственно, их вообще надо охлаждать или нагревать? Причина проста — параметры, свойства любого

материала зависят от температуры и те параметры, значения которых нам надо иметь какими то определенными достигают этих значений не когда попало, а при определенных температурах. Простейшая ситуация — катод должен быть на том месте, где он есть, а не капать каплями куда-то вниз! Поэтому он не должен плавиться, поэтому он должен охлаждаться, если условия его работы в приборе таковы, что он нагревается так, что без охлаждения может нагреться до плавления. Далее, все материалы испаряются, расходуясь и загрязняя прибор. Это еще одна причина, по которой может потребоваться охлаждать, если... Катоды нагреваются в приборах двух классов. Первый — это приборы М-типа с бомбардировкой катода электронами. Кстати, охлаждать катод приходится не всегда, чаще в приборах М-типа мощность, приносимая на катод электронами оказывается недостаточна для нагрева катода до той температуры, при которой он имеет то параметры, которые нужны для работы прибора. И катод приходится все-таки догревать. Бывают и случаи, когда тепловой баланс устанавливается как раз при нужной температуре — то есть фактически это означает, что катод охлаждается не принудительно (газом или жидкостью), а свободной конвекцией воздуха вокруг радиатора, к которому поступает тепло от катода. Второй класс приборов, в которых катод надо охлаждать — это приборы, в которых катод бомбардируется существенным ионным потоком. Электроны в таком приборе эмиттируются катодом за счет так называемой ион-электронной эмиссии (выбивание электронов из катода ионами), а часть приносимой на катод ионами энергии выделяется в виде тепла, которое надо отводить. Впрочем, мощный ионный поток может приходить на катод не в вакуумных, а только в газоразрядных приборах, а наша книжка не о них. Так что перейдем к более распространенным ситуациям, когда катод надо нагревать.

Нагревать катоды, как вы уже знаете, надо для того, чтобы он эмиттировал электроны. Чем температура выше, тем электронов больше. Но чем температура выше, тем быстрее испаряются все материалы — сокращая, естественно, срок

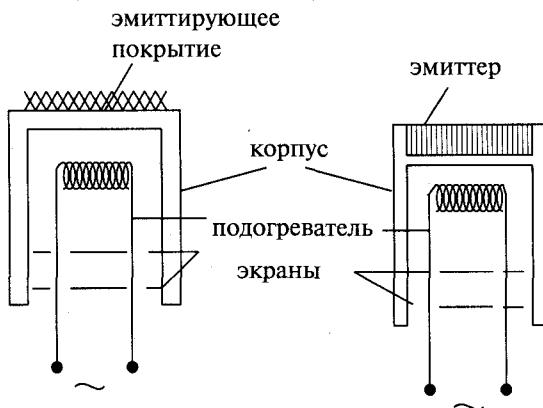


Рис. 76. Нагрев катода

службы (все испарится и катод кончится) и загрязняя прибор. И эмиссия и испарение зависят от температуры очень сильно, изменяясь в 2 раза — а это уже не всегда допустимо — иногда при изменении температуры всего лишь на 2 %. Поддерживать температуру катода с такой и большей точностью — непростая задача. Еще более сложная задача — обеспечить «равномерность температурного поля» по катоду, то есть одинаковость его температуры во всех точках эмиттирующей поверхности. Способов нагрева существует примерно один — внутри объема, называемого корпусом катода, находится нечто, по чему пропускается ток и это нечто нагревается, нагревая — кондуктивно или излучением ту часть корпуса, которая или сама (или покрытие на ней) эмиттирует (рис. 76, слева) или к которой прикреплен эмиттер (справа).

Снизу корпус закрыт экранами, не дающими тепловому излучению уходить зря в прибор и направляющими его в сторону эмиттера.

Как всегда, возникают проблемы. Вообще проблемы в технике похожи на Гидру — как только решаем одну, тут же появляется другая. Так вот, проблема самая первая — чтобы подогреватель грел эмиттер, он должен быть горячее эмиттера, ибо и при кондуктивном теплообмене, так и при теплообмене

излучением тепло передается от горящего к холодному. А раз так, то подогреватель сделать еще труднее, чем катод — ибо при нагреве он и теряет прочность, и увеличивает испарение. Правда, от подогревателя нам не нужна эмиссия и его можно делать из материалов с плохой эмиссией, но высокой термостойкостью — углерода, вольфрама. Подогреватель надо как-то изолировать от катода, чтобы он не мог его коснуться, например, при вибрациях. Однако — и это вторая главная проблема — при этих температурах и металллы и углерод взаимодействуют с изоляторами, например, с керамиками. Если это керамика из Al_2O_3 , то выделяется кислород, который отравляет катод. Можно, конечно, сделать подогреватель из коротких и толстых стержней, он будет жесткий и не будет при вибрациях касаться катода, но тогда он будет иметь маленько сопротивление и для выделения необходимой мощности к нему придется подводить большой ток. Значит — толстые провода, большие потери, могучие контакты, вес, габариты... Так одна проблема немедленно тянет за собой вторую, та — третью и так далее.

Понятно, что один из путей решения этой проблемы — создание материалов с высоким удельным сопротивлением, об этом мы писали выше. Другой путь — отказаться от нагрева за счет джоулева тепла и греть катод электронной бомбардировкой, обрушившись на его тыльную сторону поток ускоренных электронов от маленького вспомогательного катода (рис. 77).

Такой способ называется «электронным накалом» и он всем хорош кроме одного — он сложен. Кроме того, напряжение U обычно составляет 1—3 кВ и сделать изолятор, выдерживающий это напряжение довольно трудно. Тем более, что этот изолятор находится внутри катода и работает при высокой температуре, а при нагреве изоляционные свойства всех изоляторов ухудшаются.

Вы, наверное обратили внимание, что вспомогательный катод изображен на рисунке не так, как основной. Действительно, в качестве вспомогательного катода используется так называемый «прямонакальный катод» — вещь, которая одно-

14. Печка для катода

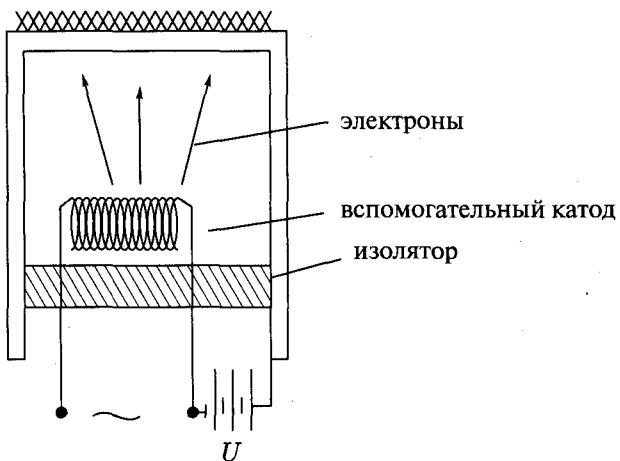


Рис. 77. Электронный накал

время является и подогревателем и катодом. Если взять вольфрамовую проволоку и нагреть ее пропусканием через нее тока до температур, при которых начинается заметная термоэлектронная эмиссия из вольфрама, то мы и получим прямонакальный катод. Такие катоды применяются не только в качестве вспомогательных, они вообще гораздо более древние, чем остальные, которые называют катодами косвенного накала. Первые электронные лампы имели катоды прямого накала и до сих пор выпускаются лампы с такими катодами.

Почему же вообще потребовалось придумывать катоды косвенного накала? Причина проста — материалы, из которых можно сделать прямонакальный катод, имеют большую работу выхода, то есть для того, чтобы получить от них технически интересную эмиссию, их надо сильно нагреть, затратив для этого большую мощность. А из материалов с высокой эмиссией, применяющихся не при 2500°C , как вольфрам, а при 700°C , проволочку не изготовишь... Реальная ситуация конечно, сложнее и интереснее, например, можно попытаться сделать композиционный материал, сочетающий свойства разных материалов. Это — область поиска.

Впрочем, в теории, конструировании и технологии электронных ламп почти все — это область поиска. И если вам интересно, то и вы можете поискать там что-то интересное для вас.

Мы довольно подробно рассказали о термоэмиссии и весьма кратко остановились на других «эмиссиях». Это — дань традиции, и это неправильно, ибо именно «другие» применяются в ЭВП все шире и шире. Поэтому расскажем об автоэлектронной, взрывной и фотоэлектронной эмиссии немного подробнее.

15. Автоэлектронная эмиссия

Автоэлектронная эмиссия (также — полевая эмиссия, электростатическая эмиссия, тунNELьная эмиссия) — испускание электронов проводящими твердыми и жидкими телами под действием внешнего электрического поля высокой напряженности. Автоэлектронная эмиссия объясняется туннельным эффектом и происходит без затрат энергии на возбуждение электронов, необходимых для электронной эмиссии иных видов. При автоэлектронной эмиссии электроны преодолевают потенциальный барьер на границе эмиттера, не путем прохода над ним за счет кинетической энергии теплового движения, как при термоэлектронной эмиссии, а путем туннельного просачивания сквозь барьер, суженный и сниженный электрическим полем:

Зависимость автоэмиссии от поля и работы выхода весьма сильна, что иллюстрируется табл. 2, в которой приведены некоторые значения плотности автоэлектронного тока в $\text{A}/\text{см}^2$ в зависимости от поля в $\text{B}/\text{см}$ и работы выхода в эВ.

Величины, которые реально не могут быть получены или не могут быть измерены, опущены.

Автоэмиссия зависит также, хотя и слабо, от температуры. Так, в области «технически интересных» плотностей тока (более $10^6 \text{ A}/\text{см}^2$ на поверхности эмиттера) при работах выхода в области 5–6 эВ автоэлектронный ток увеличивается

Таблица 2

Поле, В/см	Работа выхода, эВ		
	2,0	4,5	6,3
10^7	10^3	2×10^{-17}	—
2×10^7	$2,5 \times 10^7$	5×10^{-4}	10^{-13}
5×10^7	—	4×10^6	2×10^2
10^8	—	6×10^8	5×10^6
2×10^8	—	—	2×10^9

Величины, которые реально не могут быть получены или не могут быть измерены, опущены.

на 10 % при увеличении температуры от 0 К до 700–900 К. Разумеется, при увеличении температуры до значений, при которых становится существенной термоэмиссия, мы получаем смесь двух видов эмиссии, которую, естественно, называют термоавтоэмиссией. Катоды могут работать в этой области параметров, но основные преимущества автоэмиссии (отсутствие накала) и термоэмиссии (малые напряжения) в этом случае отсутствуют.

Энергетический спектр автоэлектронов из металла узок, полуширина распределения по полным энергиям при температуре 0 К составляет величину порядка 0,1–0,2 эВ, при 300 К 0,2–0,3 эВ. Отбор тока при низких температурах приводит к нагреванию эмиттера, так как уходящие электроны уносят энергию в среднем меньшую, чем энергия Ферми, с возрастанием температуры нагрев сменяется охлаждением — эффект меняет знак, проходя через «температуру инверсии», соответствующую симметричному относительно уровня Ферми распределению вышедших электронов по полным энергиям (в эксперименте на этот эффект накладывается джоулев разогрев). Особенности автоэлектронной эмиссии из полупроводников связаны с проникновением электрического по-

ля в эмиттер, меньшей концентрацией электронов и наличием поверхностных состояний. Все это влияет на положение энергетических зон, концентрацию носителей заряда и их энергетический спектр.

Максимальные плотности тока, которые могут быть получены в режиме автоэмиссии, ограничены разогревом эмиттера протекающим через него током и разрушением эмиттера электрическим полем. Заметим, что таким же разогревом ограничена плотность тока, отбираемого с полупроводниковых термокатодов, но величины сопротивления — и, следовательно, предельные токи — различаются на много порядков. В режиме автоэмиссии получают токи порядка 10^7 A/cm^2 (на поверхности эмиттера) в стационарном и 10^9 A/cm^2 в импульсном режимах. При попытке в стационарном режиме получить больший ток эмиттер разрушается. В импульсном режиме при попытке увеличить ток эмиттер начинает работать в ином режиме, так называемом «режиме взрывной эмиссии» (см. ниже).

В качестве материалов автокатодов применяются чаще всего металлы или соединения с металлическим типом проводимости — как ввиду низкого сопротивления, так и ввиду высокой прочности. Однако в некоторых случаях возможно использование и полупроводников. Для них предельная эмиссия меньше, ток в некоторых случаях зависит от температуры и освещенности, а энергетическое распределение эмитированных электронов шире из-за проникновения поля в материал эмиттера.

Сильная зависимость автоэмиссии от работы выхода влечет за собой нестабильность работы автокатода. Ситуация аналогична той, которая возникает при эксплуатации термокатода в режиме насыщения, когда с катода отбирается ток насыщения, зависящий от работы выхода. Разница, однако, состоит в том, что у термокатода в режиме насыщения есть еще одна «ручка управления» — температура. И можно компенсировать влияние изменений работы выхода на токоотбор посредством управления температурой (через мощность

накала). Такие схемы реализованы, и они обеспечивают необходимую стабильность токоотбора, заодно позволяя получить минимальную температуру катода и наивысшую экономическость. У автокатода нет удобной дополнительной «ручки управления» — управлять высоким напряжением сложно. В частности поэтому проблема стабильности работы для автокатодов становится еще более важной.

Работа выхода поверхности зависит как от процессов, происходящих на поверхности в высоком вакууме, так и от влияния недостаточно высокого вакуума. «Собственные» процессы — это диффузия, миграция, перестройка поверхности. Что касается диффузии, то она влияет не сильно, так как в качестве автоэмиттеров применяются чаще всего элементы — W (вольфрам) и C (углерод), а не соединения. Но даже если применяются соединения (LaB_6), то испаряющиеся конгруэнтно и поэтому имеющие стабильный состав поверхности. Техника термокатодов в борьбе за уменьшение работы выхода пошла по пути сложных соединений, поэтому роль диффузии в термоэмиссии значительно больше. Когда в качестве автоэмиттеров применяются соединения, диффузия тоже может сказываться на работе выходы и эмиссии.

Миграция может изменять локальный состав — если на поверхности есть атомы более чем одного сорта. Миграция может быть одним из процессов в ходе перестройки поверхности с изменением набора граней, выходящих на поверхность, и, следовательно, работы выхода. Высокие поля, в которых работает автокатод, способствуют перестройке поверхности, а нагрев протекающим током ускоряет миграцию (как и диффузию). Перестройка поверхности в поле применяется и для управления формой автоэмиттера.

Влияние недостаточно высокого вакуума состоит в том, что остаточные газы сорбируются автоэмиттером, изменяя его работу выхода. Причем наиболее часто применяемый материал — вольфрам — хорошо сорбирует газы. Это повлекло за собой многочисленные попытки применения металлов, не так хорошо сорбирующих газы, например, рения или еще

более пассивного углерода, имеющего, к сожалению, большое сопротивление. Предлагалось, естественно, и покрывать металл пленкой углерода.

Уменьшать сорбцию газа на поверхности можно постоянным небольшим нагревом автоэмиттера или периодическим сильным импульсным нагревом для очистки поверхности. В целом современные автокатоды обычно требуют для стабильной работы вакуума на один—три порядка более высокого, чем термокатоды.

Второй после работы выхода параметр, от которого сильно зависит автоэмиссия — напряженность электрического поля на эмиттере. Она, в свою очередь, зависит от среднего поля в приборе (отношение внешнего напряжения к величине зазора) и геометрии эмиттера, ибо для увеличения поля на эмиттере применяются, как правило, «острые» формы — выступы, нити, острия, лезвия, торцы трубок или их системы — пучки нитей, пакеты лезвий, углеродные нанотрубки и т. п. Для отбора относительно больших токов используют многоострийные системы, многоэмиттерные системы на краях пленок и фольги и т. п. В зависимости от размеров эмиттеров и расстояния до анода напряжение, обеспечивающее величину электрического поля, достаточную для возникновения автоэлектронной эмиссии, может составлять от сотен вольт до нескольких десятков киловольт.

Ключевым вопросом техники автоэмиттеров является создание и стабилизация «острого» рельефа поверхности. Технологически острый рельеф создается чаще всего электрохимическим травлением, так как чисто механически получить острие или лезвие с радиусом в десятые доли мкм затруднительно. Второй возможный способ — изготовление не «острого» объекта, а тонкого с последующим его изломом. Например, тянутся нити или пучки нитей, их срез или слом становится группой острий. Или берется тонкая фольга, а ее торец, образующийся при разрезании или разрывании, становится острым. Использование торцов тонких нитей в качестве автоэмиттеров сопровождается интересным эффектом: нити не-

которых материалов (в частности, углерода) при работе в высоких полях расщепляются, превращаясь в пучок еще более тонких суб-нитей. Третий способ получения «острого» рельефа — это непосредственное выращивание острый из пара по механизму пар—жидкость—кристалл, когда на подложке из конденсирующегося пара растут тонкие перпендикулярные подложке острия. Четвертый способ — напыление через маску, при котором можно получить на подложке острые конусы. Поддержание «остроты» рельефа во время работы является важной проблемой автокатодов. На рельеф влияет перестройка поверхности в поле, ускоряющаяся при нагреве. Причем нагрев без поля вызывает сглаживание, а в больших полях может происходить, напротив, «обострение». Формой острый можно управлять, и такой метод действительно применяется практически.

То, что в качестве эмиттеров используются не плоскости (как в термокатодах), а острия, имеет важное следствие — непараллельность траекторий электронов. Область высокого поля, в котором электроны приобретают основную энергию, лежит вблизи острия, и поэтому компонента скорости, лежащая параллельно плоскости эмиттирующего электрода и, стало быть, перпендикулярно среднему полю, оказывается велика и может быть даже сравнима с продольной компонентой. Пучок получается расширяющимся, веерным, а если катод многоостранный или многолезвийный, то пучок получается неламинарный, с пересекающимися траекториями электронов. Поэтому автокатод нельзя, как правило, просто поставить в прибор, предназначенный для использования с термокатодом. Это верно даже для классических низкочастотных электронных ламп (диодов, триодов, пентодов и т. д.), а тем более для СВЧ-приборов, которые почти все работают со сфокусированными, определенным образом сформированными, чаще всего протяженными и часто — ламинарными электронными пучками. Для использования автокатода надо, как правило, специально разрабатывать прибор, и он будет отличаться от прибора, рассчитанного на работу с термокатодом. Только

в лампе с параллельными и близкими анодом и катодом (и сетками) термокатод и многоострийный автокатод будут работать примерно одинаково.

Для сужения пучка можно попробовать организовать на поверхности одноострийного автокатода «эмиссионный рельеф» — то есть неоднородность работы выхода (аналогичное решение применяется и в термокатодах). Эмиссионный рельеф в автокатодах может образовываться за счет двух процессов. Во-первых, за счет огранки поверхности. Острие оказывается состоящим из разных кристаллографических граней, и разные грани по разному эмитируют. Во-вторых, за счет избирательной сорбции. Например, цирконий сорбируется по разному на разных участках (гранях) вольфрамового острия, избирательно понижая работу выхода. В целом удается уменьшить угол расхождения пучка, для обычных автокатодов составляющий от 60° до 100° , до примерно 10° .

По величине плотности тока при малых размерах источника (электронная яркость, точечность источника) автоэлектронные катоды не имеют равных, и в областях, где именно эти параметры имеют значение, применение автокатодов позволило получить качественно новые параметры приборов. Особенно важным оказалось применение автокатодов в электронной микроскопии предельного разрешения и в электронно-лучевой технологии. Перспективно, по-видимому, применение таких катодов в некоторых видах дисплеев и других электронных приборов — электронно-лучевых анализаторов, ионизаторов, ускорителей.

Свойства автокатодов имеют интересные следствия для приборов СВЧ. Например, малогабаритность позволяет применять их в СВЧ-приборах самых высоких частот, а высокая крутизна зависимости тока от напряжения — получить при синусоидальном напряжении короткие монохроматические струи электронов, эмитируемые в области максимума напряжения. Однако пока имеются лишь отдельные попытки применения в них автокатодов, точнее — разработки СВЧ-приборов с автокатодами.

Во многих случаях применений автокатодов важны не только (или не столько) значения плотности токов и электронной яркости, сколько полный ток. Для одноострийного катода он довольно скромен, несмотря на большую плотность тока — ведь все эти 10^7 — 10^9 А/см² отбираются с субмикронной площади. Для напряжений порядка 1—10—100 кВ, если мы хотим работать в стационарном режиме и отбирать даже ток предельной плотности 10⁷ А/см², ток одиночного острия составит 10⁻³—10⁻¹—10 А, в то время как и для низкочастотной лампы, и для СВЧ-прибора обычные значения тока при этих напряжениях будут в десятки и сотни раз больше. Поэтому для конкуренции с термокатодами в приборах этих классов автокатоды должны быть многоострийными. Число острий должно быть десятки тысяч с учетом того, что в области предельных плотностей тока работа всегда нестабильна. В импульсном режиме ситуация аналогична, хотя отношение традиционных токов приборов к предельным токам автокатодов несколько меньше.

При этом идти по пути увеличения напряжений нельзя; техника, «привыкшая» работать с электронными лампами при напряжении порядка 1 кВ (обычные) — 10 кВ (мощные) и СВЧ-приборами при 10 кВ (обычные) — 100 кВ (мощные) — 300 кВ (сверхмощные) не согласится на приборы — даже очень хорошие — с рабочим напряжением в мегавольты, ибо это будет означать переделку всех устройств, где стоят эти приборы. Иное дело — ситуации с неклассическими приборами, когда все делается заново и нужен «ток любой ценой». Такой прибор (сверхмощный импульсный генератор электронов) может иметь рабочее напряжение и в мегавольты, ибо прибор этого класса создается заново, конкурентов у него нет, и сравнивать его не с чем.

Многоострийные автокатоды позволяют увеличить ток и довести его до значений, обычных для электровакуумной техники. При этом преимущество — отсутствие цепи накала и мгновенная готовность к работе — сохраняются. Требование более высокого вакуума можно считать непринципи-

альным, ибо технология получения вакуума все время усовершенствуется. Термокатоды допускают низковольтное или сеточное управление — размещенная над катодом сетка позволяет управлять эмиссией посредством приложения относительно малого — десятки вольт — напряжения. Этот способ управления применяется в низкочастотных электронных лампах и в некоторых СВЧ-приборах. Над многоострийным автокатодом можно расположить сетку, согласовав отверстия в ней с остриями, но напряжение на ней, необходимое для управления эмиссией, будет слишком велико. Для получения приемлемого напряжения (хотя бы в сотни вольт) зазор между вершинами острий и сеткой должен составлять единицы микрон.

Такой катод был изготовлен методами микроэлектроники, хотя и предназначался для вакуумной техники. На проводящей подложке с помощью последовательных напылений, травлений через слой фоторезиста и окислений формировалась следующая структура: слой изолятора толщиной порядка микрона с отверстиями диаметром порядка микрона, расположеннымными с шагом в несколько микрон и доходящими до проводящей подложки, тонкий слой проводника, покрывающий этот изолятор (и не закрывающий отверстия в нем), а на дне каждого отверстия — то есть на подложке — проводящий конус, доходящий по высоте до уровня металлического слоя на изоляторе. То есть образовывалась решетка колодцев с автоэмиттером (конусом) на дне, доходящим до его края и с проводящим покрытием на краю каждого колодца, то есть управляющей сеткой. С таких структур были получены средние по площади токи до 100 A/cm^2 , а при средних токах в единицы A/cm^2 были получены значения срока службы в десятки тысяч часов. Управляющее напряжение на «сетке» составляло при этом около 200 V . Такой катод вполне сопоставим по своим параметрам с термокатодами, при этом он не нуждается в накале, но имеет большие поперечные скорости электронов. Катоды этого типа разрабатываются весьма активно, варьируется геометрия и материалы, в частности, са-

ми конусы-эмиттеры делаются из разных металлов, из кремния, из алмаза.

Что произойдет при попытке получить очень большой ток с автоэлектронного катода, поднимая все выше и выше напряжение? При этом такие катоды переходят в режим взрывной эмиссии. Внешне этот переход не очень заметен, поэтому различать эти два вида эмиссии стали позже, чем использовать. При взрывной эмиссии автоэлектронный ток нагревает эмиттер, с него за несколько единиц или десятков наносекунд испаряется часть материала, пары частично ионизируются, а токоотбор происходит с поверхности стремительно расширяющегося (со скоростью $\approx 10^4$ м/с) облака плазмы (атомов, ионов и электронов). Когда это облако долетает до противоположного электрода, оно замыкает зазор — это и называется вакуумным пробоем. Но если к этому моменту с прибора снято напряжение, то ничего страшного не случится. Срок службы катода со взрывной эмиссией ограничен изменением формы эмиттера в результате испарения — при этом поле на поверхности может уменьшиться так, что эмиссия не будет возникать. Попыткам уменьшить лишнее испарение и подобрать форму самого эмиттера посвящено много работ, и вот пример хороших параметров: при токоотборе 10 kA/cm^2 и полном токе 5 kA катод не менял своих параметров в течение по крайней мере в течение 10^8 импульсов. Правда импульсы были короткие — по 20 нс.

16. Фотоэлектронная эмиссия

Фотоэлектронная эмиссия или внешний фотоэффект — это испускание электронов твердыми телами и жидкостями под действием электромагнитного излучения (фотонов). Практическое значение имеют эмиссия из твердых тел (металлов, полупроводников, диэлектриков) в вакуум и газы. Основные закономерности фотоэлектронной эмиссии таковы:

- 1) количество испускаемых электронов пропорционально интенсивности излучения;

- 2) для каждого вещества существует порог — минимальная частота (или максимальная длина волны) излучения, за которой эмиссия не возникает;
- 3) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой излучения и не зависит от его интенсивности.

Фотоэлектронная эмиссия возникает в результате поглощения фотона электроном (с передачей импульса иону), перемещения электрона с высокой энергией к поверхности (при этом электрон может потерять часть энергии) и выхода электрона из тела. Фотоэмиссия может иметь место, если энергия фотона больше работы выхода, которая для чистых поверхностей металлов > 2 эВ, а для большинства металлов > 3 эВ, поэтому фотоэмиссия наблюдается в видимой и ультрафиолетовой (для щелочных металлов и бария) или только в ультрафиолетовой (для прочих металлов) частях спектра. Вблизи граничной частоты («красная граница фотоэффекта») квантовый выход составляет порядка 10^{-4} электрон/фотон. Это — следствие сильного отражения металлами излучения и потерь энергии электронами при движении к поверхности (на возбуждение колебаний в электронном газе). Энергию сохраняют только те фотоэлектроны, которые образовались вблизи поверхности на глубине, не превышающей несколько нанометров. С увеличением энергии фотонов квантовый выход возрастает, при энергии 12 эВ он составляет для металлов величину порядка 10^{-3} , при 15 эВ — 10^{-2} .

Фотоэмиссия чувствительно к состоянию поверхности, если загрязнения снижают работу выхода, то квантовый выход возрастает. Сильного увеличения квантового выхода и сдвига порога фотоэмиссии в видимую область спектра достигают покрытием поверхности металла моноатомным слоем электроположительных атомов Cs (цезия) или Rb (рубидия), образующих дипольный слой. Например, Cs снижает работу выхода для большинства металлов до 1,4–1,7 эВ.

Фотоэмиссия из полупроводников и диэлектриков определяется сильным поглощением электромагнитного излуче-

ния, начиная с энергий фотонов, равных ширине запрещенной зоны. В этом случае поглощения показатель составляет 10^4 – 10^5 см $^{-1}$. Если проводимость не слишком велика, то потери энергии электронами происходят не на электронах проводимости, а на электронах валентной зоны (ударная ионизация) или тепловых колебаниях решетки. Если работа выхода более чем вдвое превосходит ширину запрещенной зоны, как в Si (кремний), Ge (германий), GaAs, то квант с энергией, большей работы выхода, порождает электронно-дырочную пару, потери энергии возрастают, а квантовый выход падает. В этих материалах вблизи порога квантовый выход составляет 10^{-6} электрон/фотон и даже на относительно большом расстоянии от порога (1 эВ) не превышает 10^{-4} электрон/фотон. Если работа выхода меньше ширины запрещенной зоны, то фотоэлектроны теряют энергию при рождении оптических фононов и фотоэлектроны теряют энергию на длине пробега всего 10–30 нм. В кристаллах щелочно-галоидных соединений длина пробега больше 50–100 нм, поэтому квантовый выход таких кристаллов резко возрастает от самого порога фотоэмиссии и достигает больших значений. Так, в CsJ при энергии кванта 7 эВ (на расстоянии 0,6 эВ от порога), квантовый выход — 0,1 электрон/фотон. Для большинства технических применений важны материалы, обладающие высоким квантовым выходом для видимого и ближнего инфракрасного излучений, они рассмотрены ниже.

Фотоэмиссия широко используется для исследования энергетической структуры веществ, для химического анализа (фотоэлектронная спектроскопия), в измерительной аппаратуре, в звуковоспроизводящей киноаппаратуре и в приборах автоматики (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители), в передающих телевизионных трубках (супериконоскоп, суперортикон), в инфракрасной технике (электронно оптический преобразователь) и других приборах, предназначенных для регистрации излучений рентгеновского, ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн. Роль этих применений и приборов велика потому, что

существенную часть информации об окружающем мире человек получает посредством зрения.

Основной параметр фотокатодов — это спектральная чувствительность, то есть отношение количества падающего на катод излучения с определенной длиной волны к эмитирующему им току. Чувствительность фотокатодов принято характеризовать тремя различными способами. Первый — это отношение тока эмиссии к мощности падающего на катод светового излучения на той или иной длине волны, единица — А/Вт (практически мкА/Вт). Второй, менее распространенный способ — это то же отношение, но мощность оптического излучения измеряется не в Вт, а в оптических единицах светового потока, люменах, то есть единицей чувствительности будет мкА/лм. Однако единица люмен основана на спектральной характеристике чувствительности человеческого глаза («кривой видности»), и поэтому так можно характеризовать чувствительность фотокатодов только для видимой части спектра. Кроме того, раз такая чувствительность не является спектральной, то она определима однозначно только в том случае, если оговорено, какой именно источник света (то есть с какой спектральной характеристикой излучения) используется. Условились, что при измерениях должна использоваться лампа накаливания с вольфрамовой нитью при цветовой температуре 2600° С . Наконец, третий метод определения чувствительности — это квантовый выход, отношение числа эмитированных электронов к числу упавших на катод квантов. Эта характеристика, как и первая, спектральная.

Чувствительность в А/Вт и квантовый выход пропорциональны, но коэффициент пропорциональности зависит от длины волны, так как энергия кванта зависит от длины волны. Квантовый выход 100 % соответствует для 200, 400, 600, 800 и 1000 мкм соответственно чувствительностям 160, 320, 470, 620, 800 мА/Вт.

Каждый фотокатод имеет свою спектральную характеристику. Чувствительность не равна нулю в рабочем диапазоне длин волн и убывает по его краям. Граница со стороны боль-

ших длин волн носит принципиальный характер и называется красной границей фотоэффекта. Как фотоэмиссия, так и термоэмиссия есть у любого вещества. При работе с малыми освещенностями имеет значение фоновый сигнал — то есть ток, который протекает через прибор при полном отсутствии освещения. Один из компонентов этого фонового сигнала — ток термоэмиссии фотокатода. Поэтому у материалов, используемых как фотокатоды, термоэмиссия должна быть как можно меньше.

По существу фотокатод является катодом с эмиссией горячих электронов (хотя его обычно так не называют), ибо энергия, необходимая для эмиссии, сообщается электрону фотоном, и этот электрон не находится в тепловом равновесии с решеткой. Поэтому фотоэмиссия фотокатодов и их термоэмиссия определяются разными элементами зонной диаграммы их материала; в первом приближении можно считать, что термоэмиссия определяется работой выхода, а фотоэмиссия — электронным средством, то есть расстоянием от дна зоны проводимости до уровня вакуума. В некоторых случаях, когда надо добиться возможно меньшего фонового сигнала от уже имеющегося фотоприбора, то есть возможно меньшего термотока от определенного типа фотокатода, его охлаждают. Понижение температуры от, например, $+20^{\circ}\text{C}$ до -20°C уменьшает термоток на 1–2 порядка. Характерные величины термотоков фотокатодов при комнатной температуре — от $3 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2$ (2 электрона в секунду) до 10^{-12} A/cm^2 .

Следующий из основных параметров фотокатодов — это сопротивление. Дело в том, что фотокатод может работать «на отражение» и «на пристрел». Если фотокатод работает на отражение, то он может быть выполнен на массивной металлической подложке, и в этом случае его сопротивление большой роли не играет — выбитый из него электрон замещается другим, пришедшим из хорошо проводящей подложки. Если же фотокатод работает на пристрел, то он представляет собой тонкую пленку, нанесенную на прозрачную подложку со стороны вакуума. Свет проходит сквозь подложку, а вы-

битый из фотокатода электрон улетает в вакуум. Этот электрон должен заместиться другим, иначе фотокатод зарядится положительно и протекание тока прекратится. Замещающий электрон приходит из источника питания через электрод, который располагается по периферии катода. Через подложку он пройти не может, так как прозрачные вещества — диэлектрики. При протекании тока по тонкой пленке (фотокатоду) на нем образуется падение напряжения, неэквипотенциальность, зависящая от освещенности. Режим работы прибора нарушается. Поэтому желательно, чтобы сопротивление фотокатода было меньше.

Для работы с неэквипотенциальностью применяется наложение на прозрачную подложку тонких проводящих пленок, достаточно низкоомных для выравнивания потенциала, но достаточно тонких, чтобы они слабо поглощали излучение. Чаще всего в качестве таких пленок используются пленки Cr (хрома), W (вольфрама), SnO_2 , MnO_2 . Сопротивление квадратного участка большинства пленочных фотокатодов при комнатной температуре составляет от $3 \cdot 10^6$ до 10^{10} Ом (или, как говорят, Ом на квадрат), причем оно увеличивается при охлаждении от $+20^\circ\text{C}$ до -20°C в 3–10 раз.

Поскольку фотокатод осуществляет поглощение света и генерацию электронов, то для применений должны иметь значение его оптические параметры. Например, металлы отражают значительную часть светового излучения, что ухудшает их параметры как фотокатодов. Далее, если пленка фотокатода сравнима по толщине с длиной волны, то в результате интерференции в ее толще возникнет то или иное распределение мощности излучения, что повлияет на его параметры. Например, для фотокатода, работающего на отражение, применение хорошо отражающей подложки при условии, что пучность стоячей волны располагается на границе фотокатода и вакуума, увеличивает чувствительность более чем вдвое. Для увеличения чувствительности применяются различные оптические устройства, возвращающие на фотокатод отраженный от него свет.

Для работы катода имеют значение оптические свойства его прозрачных подложек, в частности — полоса пропускания. Так, со стороны малых длин волн обычные стекла пропускают излучение примерно до 300 нм, увиолевое стекло — до 200 нм, кварц и сапфир — до 170 нм, фторид магния — до 130 нм и фторид лития — до 100 нм (для более коротких длин волн прозрачных материалов нет). Со стороны больших длин волн обычные стекла пропускают излучение примерно до 3 мкм.

Применимость фотокатодов определяется не только этими основными параметрами, но и рядом других. Имеет значение пространственная однородность и временное постоянство всех параметров. В зависимости от масштаба времени говорят о шуме — если речь идет о колебаниях тока за малые времена, о нестабильности параметров, если речь идет о больших временах, и если речь идет о еще больших временах — об ограниченном сроке службы. Граница между этими областями не определена формально, но практически ее располагают где-то в области десятков секунд (между шумом и нестабильностью) и сотен часов (между нестабильностью и сроком службы). Шум, как и у прочих катодов, состоит из двух компонент — собственно шума катода, фликкер-шума (связанного с процессами миграции и диффузии веществ) и шума, связанного с дискретностью потока электронов — дробового шума. Далее, имеет значение спектр скоростей эмитированных электронов — как спектр модулей, так и пространственное распределение. Второе обычно описывается законом Ламберта — эмиссия под углом к нормали пропорциональна косинусу угла. Наконец, для эксплуатации важны вибро- и ударопрочность, термостойкость и так далее.

Отступление 7 — о композитах

О материалах мы уже писали. И даже упоминали о композитах. Но этот вопрос столь важен для техники вообще, что ему стоит посвятить специальное отступление. Композиционный материал — это материал, составленный из разных

материалов. Заниматься же композиционными материалами имеет смысл только, если они могут иметь сочетания свойств, недоступные для прочих материалов, причем преимущество по абсолютной величине параметра и не обязательно, и недостаточно. Например, материал на 10 % более легкий, чем алюминий, не нужен, если он в 2 раза менее прочен, чем алюминий, прочен. А материал, на 10 % менее прочный, чем сталь и одновременно на 10 % более тяжелый, чем алюминий, завоюет мир. Если, конечно, этот материал окажется дешевле золота...

Развитие композиционных материалов повлекло развитие языка, на котором говорит материаловедение. Возможность управления свойствами материалов сделана особо актуальной проблему сравнения свойств материалов и, как следствие, развитие системы комплексных параметров, характеризующих сразу несколько «простых» свойств. Если углубляться в философию, то на эффективность применения материала влияют все его свойства. Что мы будем делать с материалом, который легок, как алюминий, прочен, как сталь, дешев как бетон... но рассыпается от воздействия воздуха? Даже если мы покрасим самолет с ног до головы, то как его уберечь от царапин? Так что в комплексный параметр должны входить, казалось бы, все элементарные параметры сразу.

Но для пользования параметром человек должен его «осознавать». А осознать комплексный параметр, характеризующий более двух элементарных, человеку трудно. И поэтому наибольшее распространение получили следующие комплексные параметры: удельная прочность — отношение предельных напряжений к удельному весу и удельная жесткость — отношение модуля Юнга к удельному весу. Смысл: какую максимальную прочность и, соответственно, жесткость данной детали можно обеспечить данным материалом, не выходя за пределы выделенного на эту деталь веса. Если мы дошли до необходимости улучшения удельных параметров, то можно задать вопрос — чем нам помогут в этом благородном деле композиционные материалы? Представим себе, что мы сложили несколько стержней из одного материала, несколько из друг-

гого и объявили все это композитом. Вес пакета стержней — «куска композита» — равен сумме веса всех стержней, а прочность пакета не превосходит суммы прочностей всех стержней (она равна ей, если при плавном растяжении все стержни порвутся одновременно). Легко видеть, что удельная прочность такого пакета не больше удельной прочности стержней из каждого материала. Но тогда зачем делать композиты?

Основных причин две. Во-первых, многие материалы (углерод, металлы, стекло) могут иметь существенно большую прочность, когда они изготовлены в виде нитей. Однако из нитей — как бы они не были прочны — нельзя сделать крыло самолета, так же как из одной арматуры нельзя сделать дом. И дело даже не в том, что в таком доме сквозняки будут сильнее обычных и не в том, что такое крыло не будет летать, а в том, что нить, как известно, хорошо работает не продольное растяжение и никак не работает на продольное сжатие или изгиб. А крыло, которое можно тянуть за конец, но которое не выдержит севшего на него сдуру голубя, никому не нужно.

Вторая причина может быть названа исторической. Техника привыкла к определенным материалам — принципы конструирования, навыки конструкторов их, наконец, мировоззрение связаны с определенными материалами. Создай завтра материаловеды материал в 100 раз тяжелее стали и в 200 раз более прочный — перед конструкторами окажется нелегкая задача — радикального изменения своего мышления. А вот если «развести» нити из этого материала «в 200 раз», получим материал, имеющий прочность стали и в 2 раза более легкий. Это конструкторам привычнее.

До сих пор мы говорили только о механических параметрах, и это не случайно. Техника вообще занималась механическими параметрами всегда больше, чем остальными. Как-никак, электричество возникло позже мостов и домов, не говоря уж о каменном топоре. Так что и композиты решали всегда и по сей день решают чаще всего механические задачи. Однако тепло- и электрические параметры тоже важны; поговорим о них.

Если бы теплопроводность была нужна сама во себе, потребности в композитах бы не возникло — как два материала не смешивай, получить теплопроводность больше чем у того, у которого она больше и меньше, чем... не удастся. Но вот если нужна высокая теплопроводность и, скажем, высокая прочность, то для композитов эта задача в самый раз.

С электропроводностью, как уже отмечалось, ситуация несколько иная — в технике бывают нужны материалы с вполне определенной — не нулевой и не бесконечной электропроводностью. Понятно, что из двух материалов с разными электропроводностями можно скомбинировать композит с промежуточным ее значением. Как с теплопроводностью, так и с электропроводностью существуют комбинированные параметры. Например, отношение удельного веса к электропроводности говорит нам о том, какой вес придется нести опорам ЛЭП.

Мы подошли к основному вопросу науки и техники композитов — вопросу о том, как из материалов с известными свойствами сделать композит с теми свойствами, которые нужны. Главный способ управление — варьирование пространственным расположением.

Кубики — старая как мир игра. Но если речь зашла о композитах — от нее зависят полет самолетов и ракет, счет в мировом первенстве по горным лыжам и теннису и, наконец, жизнь людей — ибо из композитов делают суставы для рук и ног и клапаны для сердец. Любви это, как показали эксперименты, не мешает.

Понятно, что расположить одно в другом можно таким количеством способов, что никакой книги не хватит. Даже построение всеобъемлющей классификации — сложная задача. Но сейчас и здесь мы хотим лишь показать основные варианты «устройств» композитов и в общих картах показав, каковы их свойства, научить вас «мыслить композитно».

Начнем мы со случаев, когда явно одно всунуто в другое, то есть когда есть включения (или арматура) и матрица. Формальное определение звучит так — матрица — это то,

из любой точки чего можно попасть в любую, не переходя в другую среду. Начнем с самого простого примера (рис. 78).

Что можно сказать о свойствах такого материала? Термо- и электропроводность в основном определяются матрицей. Вы сами можете получить приближенную формулу, предположив, что включения расположены регулярно. Существует несколько формул, выведенных в разных предположениях и дающих не сильно различающиеся результаты. Механические свойства также определяются в основном матрицей, кроме случаев, когда включения являются концентраторами напряжения (но кто же будет такой композит делать) либо когда включения упрочняют «слабые места» матрицы, например межзеренные границы). Наконец — но это уже не «кубики» — также включения, образуясь, изменяют химический состав... но об этом потом. Вот следующий пример (рис. 79).

Если большинство включений касается друг друга, и если тепло- и электропроводность включений много больше, чем у матрицы, то возникает «сквозная проводимость», то есть проводимость композита становится большой. Есть формулы, гласящие, какова должна быть концентрация для возникновения проводимости, но конкретная ситуация зависит от технологии, например, могло быть так, что включения, когда они «образовывались» или «располагались», слипались или, наоборот, отталкивались. Далее, понятно, что результирующая проводимость зависит от площади контактов. Наконец, при прохождении тока (тепла) в контактах возникают большие

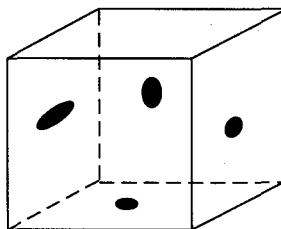


Рис. 78. Композит № 1. Сферические или во всяком случае не сильно вытянутые включения в матрице, концентрация мала

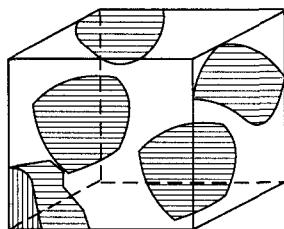


Рис. 79. Композит № 2. Сферические включения, большая концентрация

электрические поля (градиенты температур) и, как следствие, разогрев (механические напряжения). В конечном итоге материал может разрушиться. Далее, регулируя площадь контактов, можно получить, например, значения проводимости от значений, свойственных материалу матрицы до материала включений. Если матрица — диэлектрик, а включения — металл, мы получаем способ создать любую (в этих пределах) проводимость. Казалось бы, как хорошо — чуть сжал материал при изготовлении посильнее или послабее — и получил нужную проводимость. Но беда в том, что основное изменение приходится на момент, когда контакты только возникают. Но они тогда малы с натекающими последствиями в виде перегрева при протекании тока, а кроме того технология получается нестабильная — чуть посильнее сжал, а проводимость стала совсем другой. Ситуация с механическими свойствами примерно такова — прочность композита определяется прочностью того компонента, у которого она меньше. Тонкие перемычки даже более прочного компонента не выдерживают больших нагрузок.

Можно ли применить включения в виде дисков (рис. 80)? Да, но теперь возникает новый вопрос — ориентированы ли они? Понятно, что с шариками такой вопрос не возникал. Возникает и новый ответ — анизотропия свойств. Например, если включения проводящие, а матрица проводит ток плохо, то проводимость правого образца по вертикали мала, а по горизонтали — велика. Величина эффекта определяется концентрацией. Прочность при растяжении по горизонтали

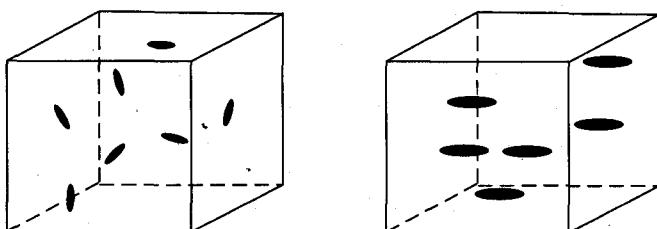


Рис. 80. Композит № 3. Дисковые включения

определяется матрицей, по вертикали — более «слабым» компонентом, если концентрация дисков велика. Дополнительные сложности вносит концентрация напряжений — увеличение напряжений в матрице на границах «острых» включения — то есть при вертикальном растяжении в правом случае. Ситуация при хаотическом расположении является промежуточной между вертикальной и горизонтальной ситуацией.

Включения могут иметь форму нитей, коротких (рис. 81) или длинных (рис. 82). Ситуация стала еще немного сложнее. Горизонтальные тепло- и электропроводности на правом рисунке определяются матрицей. Вертикальные проводимости определяются концентрацией включений и, естественно, их формой — то есть отношением длины к диаметру. Прочность при растяжении определяется прочностью матрицы и концентрацией напряжений на остриях, если общий объем острий невелик. С увеличением общего содержания острий ситуация усложняется и приобретает черты одного

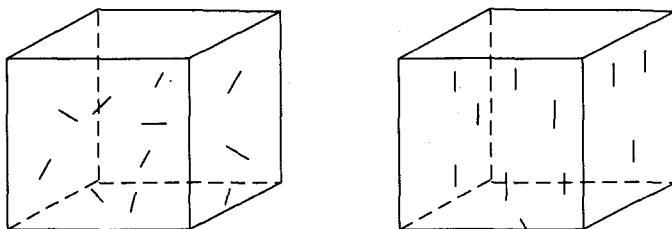


Рис. 81. Композит № 4. Короткие нити

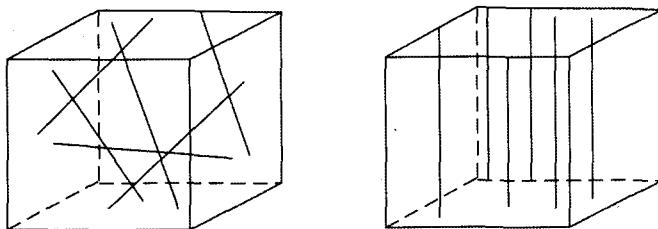


Рис. 82. Еще один композит — с длинными нитями

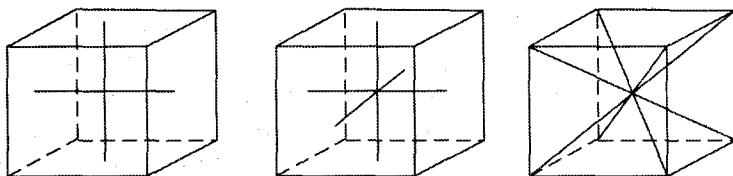


Рис. 83. Длинные ориентированные в нескольких направлениях нити

из предыдущих случаев. Добавим, что нити и диски, занимающие слабые места матрицы (межзеренные границы) могут упрочнить материал.

Довольно очевидны формулы для тепло- и электропроводности — они вполне тривиальны в правом случае, но и в левом можно получить соответствующие оценки. Ситуация с прочностью осложнена новым фактором (он действовал и раньше, но был менее заметен). Это — сцепление между нитями и матрицей или прочность переходной зоны. Она определяется — и тут начинается химия — взаимодействия материала нитей и матрицы. Если переходная зона не является слабым местом, то соответствующие формулы получить несложно — матрица и нити деформируются вместе и материал порвется тогда, когда в чем-то одном из них напряжения превзойдут предельные.

Если нужен изотропный или «частично-изотропный» материал, то организуют систему нитей в двух, трех и более направлениях (рис. 83), причем нити могут быть сотканы, то есть собраны в ткань с любым, принятым в ткачестве, типом расположения. А типов таких — не меряно...

Мы упомянули в начале раздела, что будем говорить о ситуациях, когда есть матрица и включения. Значит, есть и другие случаи. Действительно, губка, пропитанная водой, является примером двухматричной структуры, а если у нас имеется четыре вещества, мы запросто сделаем безматричную структуру. Представите себе чередующиеся в пространстве черные и белые кубики. Кубы одинакового цвета касаются друг друга только в ребрах. Теперь проложим все ребра синими цилиндрами, а в вершинах расположим красные шарики. А мож-

но ли создать безматричную структуру, используя два или три вещества? Если куски вещества могут быть бесконечно большими, ответ очевиден — стопка листов с чередованием двух цветов. А если размеры кусков ограничены?

Посмотрим, из чего и как делают композиты. Композиты с длинными нитями обычно имеют прочные и, желательно, легкие нити, а матрица обеспечивает их соединение в единый материал, защищает их от агрессивных сред, в том числе от окисления на воздухе. Обычно желательно, чтобы матрица была легкой, поэтому в качестве нитей используются сталь, Be, W, Ti, Mo, а в качестве матрицы Al, Mg, никром, полимеры. Применяются в качестве нитей и вещества, предъявление коих в виде нитей повергает по сей день некоторых в изумление — стекло, Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , BN, B_4C , SiC, B, C. Используются в композитах и композиционные нити — W, покрытый SiC и W, покрытый SiC и сверху — B (материал называется борсик).

Как делают композиты с длинными нитями? А по-разному. Применяются все «общие способы» — литье, прессование, спекание, прокатка, экструзия, ковка. Специфическими для композитов являются: пропитка, осаждение материала матрицы на нити с последующим прессованием, спеканием и так далее, и наконец, намотка с проклейкой. Так автомобилисты заделывают стеклотканью, промазанной эпоксидкой, коррозионные дыры.

Композиты с примерно шарообразными включениями обычно имеют металл в качестве матрицы и различные соединения — окислы, карбиды, нитриды, бориды или интерметаллические соединения в качестве включений. Ввести эти включения в композит можно всеми перечисленными выше методами кроме, конечно, намотки. Применяются и методы, в которых включения вводятся в виде исходного продукта для реакции. Так, введенные в Al частицы C при нагреве переходят в Al_4C_3 , частицы активного металла (например Ti), содержащиеся в пассивном, окисляются, частицы солей восстанавливаются до окислов.

Однако взаимодействие между матрицей и нитями бывает и вредно — оно зачастую влечет разрушение композитов. Так, частицы и волокна Al_2O_3 надо изолировать от Ni матрицы слоем Y_2O_3 или W, частицы Mo от Ni матрицы — слоем TiN. В противном случае нарушается связь между матрицей и включениями.

Особо следует сказать о включениях воздуха. Материал, насыщенный пузырьками легок и имеет низкую теплопроводность. Все знают, что такое пенопласт. Правда, композиционными материалами их обычно не называют, но упомянуть о них надо хотя бы потому, что в качестве частиц, введенных в матрицу, применяют полые внутри микросферы из Al_2O_3 и ZrO_2 , хотя уже не для увеличения прочности, а для уменьшения веса (стеклянные нити, кстати, тоже бывают полыми). Впрочем, мы уже знаем, что смысл один — увеличение удельной прочности. А из полых сфер делают керамику, спекая их.

Взаимодействие между собой матрицы и включений — с выходом на поверхность продуктов взаимодействия — процесс, радикально изменяющий свойства, существенные для применения композитов в электронных приборах. Эти свойства — термоэлектронная и вторично-электронная эмиссия и скорость испарения определяются «мономолекулярным» слоем вещества на поверхности. Так что если в кубике с ребром 1 см, «собранном» из частиц размером 1 мкм провзаимодействуют лишь 0,002 % контактирующих атомов, состав поверхности смежится полностью.

Взаимодействие матрицы и включений — не единственный «химический» аспект композитов. На поверхности композита, сложенной пятнами двух типов могут идти замысловатые каталитические процессы. Например, на пятнах типа «а» сорбируется продукт A, на пятнах «в» — продукт B, оба они мигрируют по своим пятнам и взаимодействуют на границах пятен.

Не всегда композит надо делать. Иногда он получается сам — при охлаждении некоторых сплавов они распадаются (из-за уменьшения растворимости с температурой) из матри-

цу и включения. Такие материалы называют эвтектическими композиционными материалами. Включения получаются в зависимости от состава, концентрации и скорости охлаждения сферическими, игольчатыми, ленточными. Например, в Al матрице включения Be, Al_9Co_2 , CuAl_2 , Al_3Fe , Al_3Ni , Si, в Co-матрице HfC, NbC, TaC, TiC, VC, в Ni — матрице HfC и TaC. А нельзя ли, охлаждая в неоднородном температурном поле, получить ориентированные включения? А нельзя ли, охлаждая в поле ультразвуковых колебаний, управлять расположением кристаллов? А нельзя ли, охлаждая полиморфное вещество, получить кристаллы... алмаза в графите?... Но мы, кажется, зарвались. Так что перейдем к тому, что было обещано в начале, а сейчас упомянуто всуе — к углероду и композитам из одного него.

А теперь попробуем сделать вещь совсем странную — композит из одного элемента. Если взять вискозную или полиакрилнитрильную нить и слегка натянув ее, чтобы она стала ровненькой, нагреть на воздухе до $200\text{--}300^\circ\text{C}$, она почернеет. При этом в полиакрилнитрильной нити замыкаются бицептные кольца с азотом в одном из узлов. Затем нить нагревают в инертной атмосфере (чаще всего в азоте) до $1000\text{--}2800^\circ\text{C}$. При этом образуются нити из чистого углерода, черные, блестящие и шелковистые наощупь. Свойства этих нитей зависят от температуры процесса — нити, полученные при $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$, имеют максимальную прочность, при $2500\text{--}2800^\circ\text{C}$ — максимальную жесткость. Можно вытягивать углеродные нити и из каменноугольных пеков — обычных или жидкокристаллических.

Начнем с недостатков. Углеродные нити не любят резких и, главное, многократных перегибов, они не любят трения об их поверхность (возникает ворс), имеют плохую адгезию к другим веществам. Работать с ними приходится аккуратно и бережно, и специально обрабатывать поверхность, чтобы получше слепить с матрицей.

Но все это не зря — углеродные нити имеют рекордную удельную прочность и рекордную удельную жесткость.

И это — главные их преимущества. Особенно если вспомнить, что по термостойкости углерод конкурентов не имеет. На такой объект имеет смысл посмотреть повнимательнее.

Объект это сложный. Сама нить состоит из более тонких нитей, называемых вследствие бедности словаря «филаментами». В нити может быть сотни филаментов. Диаметр каждого — 7–8 мкм. Филамент состоит из «фибрилл» — тоже нитей, но диаметром уже 0,05 мкм. Нити, вытянутые из пеков, фибриллы не имеют. Длина нити и филамента в принципе неограничена, если нить получена из волокон и десятки см, если из пеков. Фибриллы можно считать гибридом аморфного и кристаллического — в их структуре есть правильные плоскости углерода, но сами эти плоскости не лежат упорядочение одна над другой. Такая структура называется турбостратной. Некий аналог — блины в миске. Структура углеродных нитей изучена плохо. Это можно сказать, впрочем, об углеродных материалах вообще. Четыре (или пять?) трехмерных кристаллических структур, двумерные, линейные и аморфные структуры, разные размеры и ориентации кристаллов и пор... Разнообразие поразительно велико.

Если ткань, сотканную из углеродных нитей (ключевая сцена детектива должна начинаться непринужденно, тревожная музыка не в стиле современного научно-популярного кино) поместить в проток метана и нагреть до 1000° С, на поверхности углерода начнет осаждаться углерод. Молча, час за часом, осаждается он... и когда мы вынимаем деталь из пиролизной печи, мы видим нечто новое. Это прочная и твердая вещь, которую можно ронять без риска расколоть. Она сохранила исходную термостойкость графитового волокна в вакууме и увеличила термостойкость на воздухе. И не мудрено — в ней нет ничего, кроме углерода. Осевший на нитях углерод скептил их воедино, в монолит. Получился композит из углерода с углеродом. Вопрос о взаимодействии нитей с матрицей отпал сам собой.

Что еще вырастет на дереве, или вместо заключения

В заключении принято извиняться за то, за что извиняться не стоит — за то, что не все вошло в книгу. Не все, что могло бы войти... Существует легенда, что один немецкий профессор делал на заседании ученого общества доклад о строении некоторого, скажем 10-го сегмента червей некоторого вида. Это был 10-й ежегодный доклад уважаемого профессора. Из зала спросили, долго ли он будет изучать червей этого вида. Профессор ответил с достоинством — «червь длинен, а жизнь коротка». Конечно, это шутка. О любой вещи, о которой рассказано в этой — и любой другой — книге, можно рассказать больше. Так уж устроена изученная часть Природы. И, конечно, рядом с любой рассказанной вещью существуют другие (рис. 3), о которых не рассказано. Окончив извинения, перейдем к заключению или тому, что будет «вместо него».

Человек всегда интересуется будущим. Может быть, именно это и есть отличительный признак человека? «Человек отличается от известного животного тем, что иногда поднимает глаза к небу».

Конечно, можно строить какие-то прогнозы о том, какие новые электронные приборы возникнут через год, десять или сто лет, что еще вырастет на дереве электроники (рис. 3). Но эти прогнозы — как и все прогнозы о возникновении нового (а не о развитии старого) сами по себе являются открытием. Действительно, угадать новый принцип действия ЭВП — это и есть его изобрести и войти в историю, по крайней мере — историю электроники. Попрощаемся, не претендуя на изобретения. Что же до будущего — надеюсь, что у вас и у меня впереди по крайней мере хорошая работа и хорошие книги. До свидания!



URSS

Представляем Вам наши лучшие книги:

Популярные книги по естественным наукам

Босс В. Интуиция и математика.

Жуков А. В. Вездесущее число «пи».

Жуков А. В. и др. Элегантная математика. Задачи и решения.

Оре О. Приглашение в теорию чисел.

Шикин Е. В. От игр к играм. Математическое введение.

Гильберт Д., Кон-Фоссен С. Наглядная геометрия.

Гнеденко Б. В., Хинчин А. Я. Элементарное введение в теорию вероятностей.

Яглом И. М. Необыкновенная алгебра.

Яглом И. М. О комбинаторной геометрии.

Яглом И. М. Комплексные числа и их применение в геометрии.

Амелькин В. В. Дифференциальные уравнения в приложениях.

Попов Г. Н. Сборник исторических задач по элементарной математике.

Мостеллер Ф. Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями.

Гамов Г., Стерн М. Занимательные задачи.

Гамов Г. Мистер Томпkins в Стране Чудес, или история о с, G и h.

Гамов Г. Мистер Томпkins исследует атом.

Михайлов О. В. Антология полуза забытых тайн.

Ворожцов А. В. Путь в современную информатику.

Сурдин В. Г. Астрономические задачи с решениями.

Николаев О. С. Физика и астрономия: Курс практических работ для средней школы.

Попова А. П. Занимательная астрономия.

Гарднер М. Этот правый, левый мир.

Вейль Г. Симметрия.

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике.

Эддингтон А. Пространство, время и тяготение.

Эддингтон А. Относительность и кванты.

Эддингтон А. Теория относительности.

Тарасов Л. В. Вселенная: В просторы космоса.

Тарасов Л. В. В глубинах вещества: Живые клетки, молекулы, атомы.

Тарасов Л. В. Земля — беспокойная планета: Атмосфера, гидросфера, литосфера.

Серия «Науки об искусственном»

Шамис А. Л. Поведение, восприятие, мышление. Проблемы создания искусственного интеллекта.

Саймон Г. Науки об искусственном.

Арбид М. Метафорический мозг.

Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям.

Гаазе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А. От амёбы до робота: модели поведения.

Варшавский В. И., Поспелов Д. А. Оркестр играет без дирижера: Размышление об эволюции некоторых технических систем и управление ими.

Попов Э. В. Общение с ЭВМ на естественном языке.

Финн В. К. (ред.) Интеллектуальные системы и общество.

Редко В. Г. (ред.) От моделей поведения к профессиональному интеллекту.

Представляем Вам наши лучшие книги:



Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»

Пенроуз Р. НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ. О компьютерах, мышлении и законах физики. Пер. с англ.

Хакен Г. Информация и самоорганизация. Пер. с англ.

Арнольд В. И. Теория катастроф.

Климонтович Ю. Л. Тurbulentное движение и структура хаоса.

Безручко Б. П. и др. Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях.

Данилов Ю. А. Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение.

Трубецков Д. И. Введение в синергетику. В 2 кн.: Колебания и волны; Хаос и структуры.

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. Кн. 1, 2.

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергетика: нелинейность времени и ландшафты кэволюции.

Малинецкий Г. Г. Математические основы синергетики.

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Нелинейная динамика и хаос: основные понятия.

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Подлазов А. В. Нелинейная динамика.

Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего.

Малинецкий Г. Г. (ред.) Будущее России в зеркале синергетики.

Малинецкий Г. Г. (ред.) Синергетика: Исследования и технологии.

Быков В. И. Моделирование критических явлений в химической кинетике.

Чумаченко Е. Н. и др. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии.

Редько В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект.

Чернавский Д. С. Синергетика и информация (динамическая теория информации).

Баранцев Р. Г. Синергетика в современном естествознании.

Баранцев Р. Г. и др. Асимптотическая математика и синергетика.

Тюкин И. Ю., Терехов В. А. Адаптация в нелинейных динамических системах.

Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой.

Гуц А. К., Фролова Ю. В. Математические методы в социологии.

Турчин П. В. Историческая динамика. На пути к теоретической истории.

Пригожин И. Неравновесная статистическая механика.

Пригожин И. От существующего к возникающему.

Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени.

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой.

Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров,nanoструктур и наноматериалов.

Наши книги можно приобрести в магазинах:

«Библио-Глобус» (м. Пушкинская, ул. Мицкевича, 6. Тел. (495) 625-2457)

«Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)

«Молодая гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (495) 238-5001, 780-3370)

«Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 137-6019)

«Дом книги на Ладожской» (м. Бауманская, ул. Ладожская, 8, стр. 1. Тел. 267-0302)

«Гнозис» (м. Университет, 1 гум. корпус МГУ, комн. 141. Тел. (495) 939-4713)

«У Кентавра» (РГГУ) (м. Новослободская, ул. Чайкова, 15. Тел. (499) 973-4301)

«СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 448-2355)

Тел./факс:
(499) 135-42-46,
(499) 135-42-16,

 E-mail:
URSS@URSS.ru
http://URSS.ru

Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.



Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

Вайсбурд Ф. И., Панаев Г. А., Савельев Б. Н. Электронные приборы и усилители.

Баскаков С. И. Лекции по теории цепей.

Конопелько В. К., Липницкий В. А. Теория норм синдромов и перестановочное декодирование помехоустойчивых кодов.

Калошин А. М. и др. Наземная отработка космических аппаратов.

Филин В. М. и др. Оптимизация диагностики космического разгонного блока.

Зверев Г. Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации.

Моисеев Ю. А., Челышев С. В. Технологическая надежность сложного изделия и ее отработка.

Садыхов Г. С., Кузнецов В. И. Методы и модели оценок безопасности сверхназначенных сроков эксплуатации технических объектов.

Зайцев Р. О. Диаграммные методы в теории сверхпроводимости и ферромагнетизма.

Ревухин Л. Н. Радиационно-стимулированные изменения диэлектрической дисперсии.

Поклонский Н. А., Вырко С. А., Поденок С. Л. Статистическая физика полупроводников.

Фролов К. В. (ред.) Современная трибология: Итоги и перспективы.

Тимошенко С. П. Колебание в инженерном деле.

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов.

Каплун А. Б. и др. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство.

Морозов Е. М. и др. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения.

Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами. Кн. 1–3.

Гуревич Д. Ф. Трубопроводная арматура: Справочное пособие.

Серия «Классика инженерной мысли»

Гуревич Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. В 2 кн.

Цытович Н. А. Механика грунтов: Краткий курс.

Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва.

Серия «НАУКА — ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы»

Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны.

Каганов М. И., Цукерник В. М. Природа магнетизма.

Перельман Я. И. Занимательная астрономия.

Тарасов Л. В., Тарасова А. Н. Беседы о преломлении света.

Сазанов А. А. Четырехмерная модель мира по Минковскому.

Стинрод Н., Чинн У. Первые понятия топологии.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
тел./факс (499) 135–42–16, 135–42–46
или электронной почтой URSS@URSS.ru
Полный каталог изданий представлен
в интернет-магазине: <http://URSS.ru>

Научная и учебная
литература

Об авторе

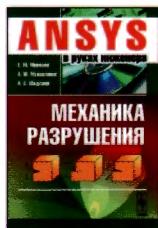


Леонид Александрович АШКИНАЗИ

Кандидат физико-математических наук, член Российского физического общества и Российского общества социологов. Окончил Московский институт электроники и математики. Работал до 1995 г. во Всесоюзном электротехническом институте, с указанного года — в журнале «Химия и жизнь», и все время (начиная со второго курса) — в Московском институте электроники и математики.

Области работы, они же основные области постоянных интересов: физика, электронные приборы, социология; все перечисленное в прикладном виде, а также преподавание указанных дисциплин. Временные либо не основные: альпинизм, спелеология, национальная культура, некоторые субкультуры, литература. Автор статей, посвященных перечисленным областям и опубликованных в разных журналах (научных, научно-популярных, популярных, бульварных), газетах, Интернете.

Наше издательство предлагает следующие книги:



Электронные лампы: Из прошлого в будущее
Изд-з Ашкинази П.А.



9 785382 014326

ID: 166980

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

E-mail: URSS@URSS

Каталог изданий в Интернете

<http://URSS>.

Тел./факс (многоканальный)
+ 7 (499) 724 25



Интернет-магазин

OZON.ru



82268792

Любые отзывы о настоящем издании, а также обнаруженные

по адресу URSS@URSS.ru. Ваши замечания и предложения будут учтены