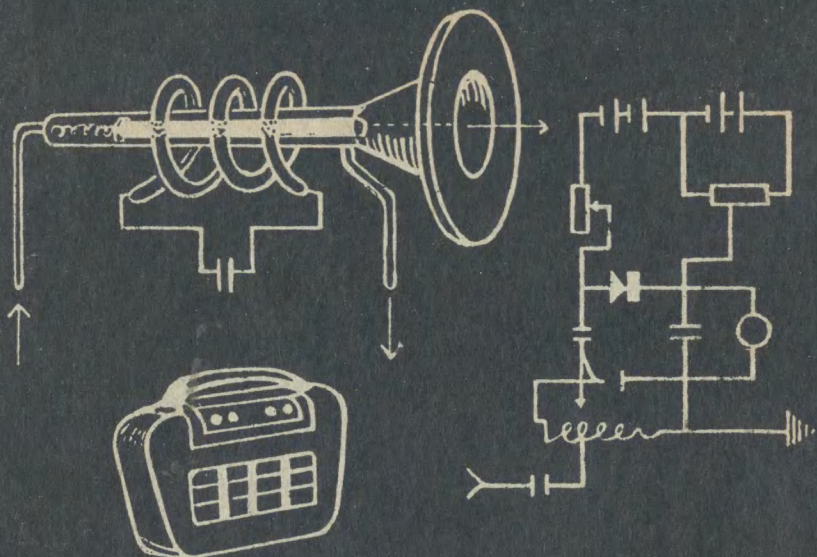


• 1964

ТЕХНИКА

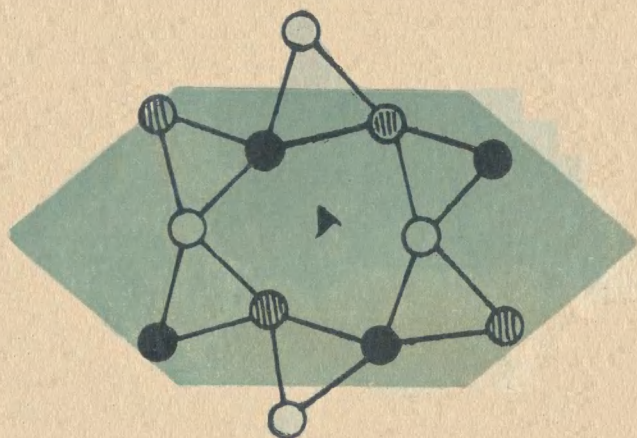
• IV СЕРИЯ

1



А. Ф. ПЛОНСКИЙ

# КРИСТАЛЛ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



Кандидат технических наук, доцент  
**А. Ф. ПЛОНСКИЙ**

# **КРИСТАЛЛ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1964**



Scan AAW

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Что такое кристалл . . . . .	3
Дырка — носитель заряда . . . . .	7
Кристаллический диод и транзистор . . . . .	9
Лилипут в стране Гулливеров . . . . .	11
Чудеса молектроники . . . . .	13
Полупроводниковый «градусник» . . . . .	15
Кристаллический глаз . . . . .	16
Электростанция в кристалле . . . . .	18
Кварц — преобразователь энергии . . . . .	20
Кристаллы без центра . . . . .	23
Обманчивое безмолвие . . . . .	25
Поющие кристаллы . . . . .	27
Кристаллы вместо манометра . . . . .	27
Сверхточные часы . . . . .	29
Тысяча переговоров по одному проводу . . . . .	32
Гиперболоид уже не фантазия . . . . .	33
Человек — творец кристаллов . . . . .	36

**Автор**  
**Александр Филиппович**  
**Плонский**

**Редактор Ж. М. Мельникова**  
**Техн. редактор И. Т. Ракитин**  
**Корректор А. А. Пузакова**  
**Обложка А. Сафохина**

---

Сдано в набор 21/XI 1963 г. Подписано к печати 11/I 1964 г. Изд. № 3.  
Формат бум. 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. л. 1.25. Печ. л. 2.5. Уч.-изд. л. 2.44.  
А 02630. Цена 7 коп. Тираж 45 600 экз. Заказ 3320.

Опубликовано в тем. плане 1964 года, № 184.

Издательство «Знание» Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

---

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

## Что такое кристалл

Эпитеты «волшебный», «чудесный», «магический» столь избиты, что невольно вызывают настороженность. Их даже берут в кавычки, чтобы кто-нибудь не подумал, будто и вправду бывают чудеса.

А они все-таки бывают! В этой книжке рассказывается о чудесах без кавычек. О настоящих, стопроцентных чудесах, каждое из которых сплав поэзии и науки, труда и вдохновения, мудрого опыта поколений и гениальной дерзости первооткрывателей.

Радиоприемник размером с горошину. Тысячи радиоламп в микроскопической решетке кристалла. Световой луч острее и тверже, чем клинок дамаской стали. Разве это не чудеса? В них трудно поверить. Но... мы смотрим на экран телевизора, не испытывая ни малейшего волнения, а как был бы потрясен современник Пушкина, очутись он на нашем месте!

Нет, не перевелись чудеса и никогда не переведутся. Каждое крупное открытие воспринимается, словно чудо. Потом к нему привыкают, оно становится повседневным, утрачивает ореол чудесного. Но прогресс науки беспрерывен; как из рога изобилия, сыплет она все новыми и новыми чудесами...

Особенно богата ими радиоэлектроника, самая, пожалуй, перспективная, универсальная и популярная техническая наука. Возможности ее безграничны. Она всюду — в ядерной физике, космонавтике, медицине, металлургии, математике, биологии... Сколько наук начинается со слова «радио»: радиоастрономия, радиометеорология, радиофизика, радиоспектроскопия...

Но никто еще не произнес слова радиокристаллография. А именно здесь, на стыке двух наук — радиоэлектроники и кристаллографии, — происходят интереснейшие открытия.

Радио и кристаллы — что между ними общего?

Совершим небольшой экскурс в прошлое. 7 мая 1895 года Александр Степанович Попов впервые демонстрирует изобре-

тенный им радиоприемник. Еще не поднялись над землей антенны передающих станций. В эфире слышны только отголоски молний. Но уже произнесены ученым пророческие слова: «В заключение могу выразить надежду, что мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний...».

И вот выходят в эфир первые радиопередатчики. Однако их радиус действия ничтожно мал — десятки километров. Одна из причин тому низкая чувствительность приемников. Какими они были, первые радиоприемники? Стеклянная трубка, наполненная металлическими опилками. Опилки рыхлые, площадь соприкосновения между отдельными частицами мала, сопротивление электрическому току велико. Стоит, однако, появиться электромагнитной волне, и под ее воздействием опилки слипаются, их сопротивление току резко падает. Ток в цепи приемника соответственно возрастает — сигнал принят! Трубку с опилками А. С. Попов назвал чувствительной. Но чувствительность-то ее как раз и была слишком мала. Трубка откликалась только на очень сильные электромагнитные колебания.

И тогда на первый план выступил кристалл. Так называемые кристаллические диоды, или детекторы (об их устройстве и работе пойдет речь дальше), оказались чувствительней. Но кристаллические детекторы вскоре были вытеснены радиолампами. Правда, кристалл попытался дать бой радиолампе. Однако этот первый бой закончился для него поражением.

Двадцатые годы нашего столетия. Английские, американские, французские, испанские, голландские радиожурналы пестрят сообщениями о «делающем эпоху изобретении О. В. Лосева из Государственной радиоэлектрической лаборатории в России». Редакционная статья в американском журнале «Радио ньюс» называется «Сенсационное радиоизобретение», авторы этой статьи утверждают, что «теперь кристалл заметит лампу».

Олег Владимирович Лосев, сотрудник Нижегородской радиолaborатории и страстный радиолюбитель, изобрел кристаллин — устройство для усиления электрических колебаний. Роль радиоламп в нем играл крошечный кристаллик цинкита.

Кристалл вместо лампы! Крупинка вещества заменяет стеклянную колбу с хрупкой металлической начинкой.

Но изобретение Лосева опередило науку того времени. Электронная лампа вступала в пору своего расцвета, и кристаллин не мог с ней конкурировать. О нем незаслуженно забыли. И только во время второй мировой войны кристаллы решительно вторглись в радиоприемники, ознаменовав рождение новой, полупроводниковой, эры в радиотехнике.

О триумфальном реванше кристадина, о кристаллах-радиоприборах, о чудодейственной молектронике рассказывается в нашей книжке. И еще мы поговорим о поющих и слушающих кристаллах, о часах с маятником из горного хрусталя и о том, как построили «гиперболоид инженера Гарина», который совсем недавно был всего лишь плодом фантазии Алексея Толстого.

Нас окружают различные тела. Любое из них — микроскопическая пылинка и гигантский утес, вода и воздух, металл и стекло — состоит из вещества. Вещество — это множество чрезвычайно мелких частичек, атомов различных химических элементов. Размеры атомов не превышают стомиллионных долей сантиметра. В большинстве веществ атомы объединяются в более крупные частицы — молекулы.

Атомы имеют сложное строение. Они состоят из мельчайших электрически заряженных частиц. В центре атома — положительно заряженное ядро. Вокруг него, словно спутники, носятся по орбитам отрицательно заряженные электроны. Радиус орбиты приблизительно в 100 тыс. раз больше радиуса ядра.

Положительный заряд ядра равен сумме отрицательных зарядов электронов, значит заряды взаимно уравновешены, атом электрически нейтрален. Но мы можем отнять у атома электрон. Тогда положительный заряд перевесит, атом в целом окажется заряженным положительно. Такой атом называют положительным ионом. Если, напротив, запустить на орбиту лишний спутник-электрон, то образуется избыток отрицательного заряда. Получится отрицательный ион.

Чтобы ионизировать атом, придать ему заряд, нужно затратить работу, преодолеть противодействие электрических сил. Это может быть достигнуто многими способами, например нагреванием.

Все твердые тела, то есть тела, способные сохранять форму, можно, в зависимости от их строения, разбить на две группы. Представьте себе огромную площадь, заполненную людьми. Четкие строевые шеренги, безукоризненный воинский порядок. Или толпа, давка, хаос. Так и здесь. В одних телах частицы размещены геометрически правильно. Такие тела называют кристаллическими. Название произошло от греческого слова *кристаллос*, что означает лед, а также и прозрачный бесцветный кварц, горный хрусталь, считавшийся окаменелым льдом. Большинство тел, металлы, соли, минералы, имеют кристаллическое строение.

Если нагревать какое-нибудь кристаллическое тело, например кусочек олова, то оно при определенной температуре расплавится. В момент плавления строй атомов рассыпается.

Телам другой группы, таким, как стекло, смола или столярный клей, всегда свойственно беспорядочное размещение ча-

стиц. Подобные тела называют а м о р ф н ы м и: В отличие от кристаллических, они не имеют определенной температуры плавления и затвердевания, при нагреве размягчаются постепенно, утрачивают форму и понемногу переходят в жидкое состояние. Характер же расположения частиц в веществе остается прежним, хаотическим. Аморфные тела только кажутся твердыми; это скорее застывшие, сильно загустевшие жидкости.

Кристаллические вещества, в свою очередь, бывают двух видов. Те, что имеют от природы форму многогранников — кубов, призм, пирамид, — получили название монокристаллов, или просто кристаллов. Другие кристаллические тела не имеют многогранной формы, но под микроскопом видно, что они состоят из множества мелких, сросшихся между собой монокристалликов. Такие тела называют поликристаллическими. К ним относится большинство горных пород, а также все металлы.

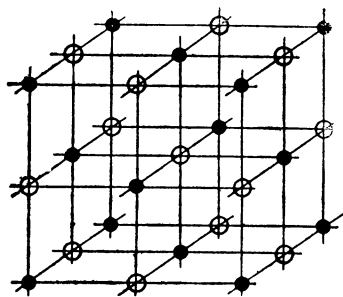


Рис. 1. Кристаллическая решетка поваренной соли.

Кристаллы разных веществ различны по форме. Кристалл обыкновенной поваренной соли имеет форму куба, а кварц кристаллизуется в виде заостренных на концах шестигранных призм. Внешняя форма кристалла зависит главным образом от его внутреннего строения. Она как бы повторяет форму кристаллической решетки.

Решетка кристалла представляет собой тот самый воинский строй атомов, о котором мы говорили выше. Вот как выглядит, например, кристаллическая решетка поваренной соли (рис. 1). Ионы натрия (белые кружки на рисунке) и хлора (черные кружки) размещены в углах воображаемых кубов, соприкасающихся своими гранями. Восемь таких кубиков образуют элементарную ячейку поваренной соли. Множество элементарных ячеек и составляет в совокупности кристаллическую решетку.

Кристаллы могут образовываться из жидких, твердых и газообразных веществ. Снежинки — это кристаллики льда, образовавшиеся из водяного пара. Кристаллики из твердого состояния появляются на стекле, и оно становится мутным. Но чаще всего кристаллы получаются из раствора. Как это происходит?

Возьмем ту же поваренную соль. Из рисунка видно, что ионы натрия и хлора в кристаллической решетке расположены по углам кубов не произвольно, а чередуясь, в шахматном порядке. Такая закономерность не случайна.

В водном растворе частицы натрия и хлора существуют в виде разрозненных ионов и в составе молекул поваренной соли. Каждая такая молекула состоит из положительного иона натрия и отрицательного иона хлора.

Под действием электрических сил разноименно заряженные тела притягиваются, а одноименно заряженные отталкиваются. Не удивительно, что молекулы поваренной соли и разрозненные ионы при кристаллизации группируются, располагаясь таким образом, чтобы расстояния между одноименными ионами были как можно большими, а между разноименными — как можно меньшими, то есть в шахматном порядке.

Так возникает зародыш кристалла. Постепенно его кристаллическая решетка, образованная чередующимися ионами натрия и хлора, пополняется все новыми и новыми частицами вещества. Кристалл растет. Новые соли откладываются на гранях зародыша, грани раздвигаются, оставаясь параллельными самим себе и граням элементарных ячеек. Если зародыш имел форму куба, то такую же форму будет иметь и выросший кристалл, при условии, что грани развивались равномерно.

Большинство природных кристаллов (алмазы, рубины, кварцы и др.) образовалось миллиарды лет назад под действием высоких температур и колоссальных давлений. Многие из них выращивают теперь искусственно в специальных герметических резервуарах — автоклавах.

### **Дырка — носитель заряда**

Кристаллические тела обладают разной электропроводностью. Одни хорошо проводят электрический ток, поэтому их называют проводниками. Другие, диэлектрики или изоляторы, практически не проводят электричества.

К проводникам относятся металлы: серебро, медь, алюминий и др. Их кристаллическая решетка состоит из положительных ионов, а избыточные, свободные, электроны блуждают от одного атома к другому. Если же к концам проводника подключить, например, батарейку от карманного фонарика, то свободные электроны дружно ринутся к положительному полюсу батарейки. По проводнику потечет ток.

В изоляторах (кварц, алмаз, фарфор) свободных электронов нет. Все электроны прочно связаны с атомами. Вот почему изоляторы оказывают электрическому току такое сопротивление.

Есть и еще одна, промежуточная, группа веществ. Кристаллические вещества, принадлежащие к ней, нельзя с полным правом отнести ни к проводникам, ни к изоляторам. Обычно они проводят электрический ток очень плохо, но ино-



гда с ними происходит загадочное превращение: их электропроводность резко возрастает. Таких веществ много, они названы полупроводниками. К ним относятся некоторые химические элементы: германий, кремний, селен, теллур, фосфор, бор, а также различные окислы, руды и минералы.

Полупроводники издавна применялись в металлургии, химической промышленности, в строительстве. Только электрики и радисты не обращали на них внимания. Думали: какая может быть польза от полупроводника, если из него не сделаешь ни провода, ни ролика?

В наши дни полупроводники нужны и электротехнике и радиоэлектронике. Изучены загадочные свойства полупроводниковых кристаллов. На них основаны тысячи остроумных приборов, совершивших настоящий переворот в науке и технике.

Что же представляет собой полупроводник, этот гадкий утенок, превратившийся в красавца лебедя?

В полупроводниках, как и в диэлектриках, электроны связаны с атомами. Только связь эта очень непрочна. При нагревании, под действием света и в некоторых других случаях она разрывается, и электроны оказываются на свободе. А стоит появиться свободным электронам, как электропроводность резко возрастет.

В отличие от проводников носителями тока в полупроводниковых веществах могут быть не только электроны, но и... дырки. До недавних пор слово дырка считалось в технике неприличным: «дырок нет, есть отверстие». Полупроводники реабилитировали крамольное слово. Что же оно означает?

Представьте себе, что один из атомов полупроводника по какой-либо причине потерял электрон и стал положительным ионом. На орбите, где раньше был электрон, осталось пустое место — дырка. Положительный заряд осиротевшего атома стремится отторгнуть недостающий электрон от какого-либо соседнего атома. И вот один из них не выдерживает и лишается электрона, который заполняет дырку в первом атоме. Но теперь уже появилась дырка во втором атоме. Этот атом заряжается положительно и отнимает электрон у третьего атома. Третий — у четвертого, четвертый — у пятого и т. д. Дырка начинает путешествовать по полупроводнику, переходя от одного атома к другому. Вместе с ней путешествует и положительный заряд, равный по величине отрицательному заряду электрона. Такая проводимость называется дырочной.

Конечно, сама дырка никакого заряда не имеет. Она пустое место. Но атом, в котором дырка образуется, всегда заряжен положительно, поскольку в нем недостает электрона. А раз так, то не проще ли условно считать дырку частицей, несущей положительный заряд? Тем более, что она во всем подражает настоящей частице.

Один и тот же полупроводник может обладать либо электронной, либо дырочной проводимостью. Все дело в химическом составе примесей, введенных в его кристаллическую решетку. Ничтожная добавка постороннего вещества, один атом на многие тысячи, способна коренным образом изменить электропроводность. Значит, искусственно загрязняя кристалл в процессе его роста, можно придавать ему нужные электрические свойства.

## Кристаллический диод и транзистор

В радиоэлектронике часто применяется кристаллическое вещество германий, химический элемент, предсказанный Д. И. Менделеевым и добытый впоследствии немецким ученым Винклером. Возьмем крошечную пластинку химически чистого германия. С одной стороны вплавим в нее капельку индия, с другой — каплю оловянного сплава. Атомы индия и олова проникают с двух сторон в кристаллическую решетку германия. Индий придает ему дырочную проводимость, а олово — электронную. В толще кристалла образуется своеобразный барьер, электронно-дырочный переход. По сторонам барьера располагаются два лагеря: с одной — скапливаются отрицательные заряды, с другой — положительные. Незначительная часть электронов, перейдя границы, проникнет на территорию дырочного полупроводника. Часть дырок, в свою очередь, переключается по ту сторону барьера. А вот для основной массы электронов и дырок барьер окажется непреодолимым. Дело в том, что первые электроны, скопившись в пограничной зоне, мешают перейти границу остальным, отталкивают их. То же происходит и с дырками.

Оказывается, электронно-дырочный переход способен выпрямлять переменный ток. Вот как это происходит. Предположим, что дырочный участок кристалла подключен к положительному полюсу батареи, а электронный — к отрицательному (рис. 2). Тогда под воздействием электрических сил электроны и дырки устремятся навстречу друг другу. Через кристалл потечет ток.

А теперь поменяем местами полюсы батареи. На этот раз дырки и электроны шарахнутся друг от друга. Пограничная зона моментально лишится и дырок, и свободных электронов, превратится в своего рода зону пустыни. Никакого тока при этом не будет.

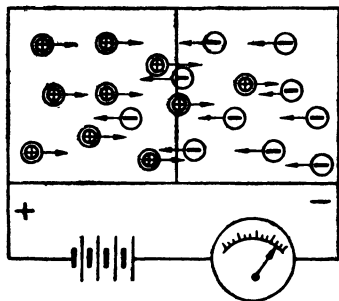


Рис. 2. Электронно-дырочный переход.

Выходит, что электронно-дырочный переход пропускает ток только в одном направлении, подобно выпрямительной лампе — диоду. Поэтому такой полупроводниковый приборчик и называют кристаллическим диодом.

Современные полупроводниковые выпрямители отличаются исключительно высоким коэффициентом полезного действия, достигающим 99 процентов. Только один процент энергии электрического тока теряется при выпрямлении.

В случае, если кристаллик германия по краям имеет дырочную проводимость, а посередине — электронную, в нем уже не один барьер, а два.

Участок с электронной проводимостью условно назовем базой, а дырочные участки — эмиттером и коллектором. Включим между базой и коллектором батарейку: плюсом к базе, минусом к коллектору. Между эмиттером и базой включим другую батарейку, только с гораздо меньшим напряжением и минусом к базе.

Первый электронно-дырочный переход (между базой и коллектором) закрыт. Здесь образовалась зона пустыни. Ведь отрицательный полюс батареи подключен к дырочному участку полупроводника, а положительный — к электронному.

Второй электронно-дырочный переход (между эмиттером и базой) открыт. К электронному участку присоединен минус, а к дырочному — плюс. Через переход течет ток. Из эмиттера в базу поступают дырки. Очутившись там, они оказываются во власти отрицательно заряженного коллектора. Часть дырок ответвляется и проникает в коллектор. Но как только в зоне пустыни появятся дырки-пришельцы, коллекторный переход откроется: в носителях тока теперь уже нет недостатка.

А что если изменять напряжение на эмиттере: то уменьшать, то увеличивать? Поступление дырок в базу и, следовательно, ток в цепи коллектора будут тоже меняться. Значит, колебания напряжения между базой и эмиттером управляют током в коллекторе.

Включим в цепь эмиттера микрофон, а в цепь коллектора — телефонные наушники или громкоговоритель. Вот и готов кристаллический усилитель, потомок лосевского кристаллина. Мы говорим в микрофон, слабые колебания электрического напряжения на эмиттере управляют вылетом дырок, те изменяют электропроводность коллектора и ток в его цепи. Напряжение на громкоговорителе также колеблется, но эти колебания намного мощнее, чем в цепи эмиттера: ведь коллекторная батарея дает гораздо большее напряжение. И мы слышим усиленный, громкий звук.

Кристаллик полупроводника с двумя электронно-дырочными переходами ведет себя подобно усилительной лампе — триоду. Его называют полупроводниковым триодом, или **т р а н з и с т о р о м**.

Транзисторы отличаются малыми размерами, не имеют нити накала, работают при сравнительно низких напряжениях, служат в десятки раз больше, чем радиолампа, не боятся ударов.

Насколько прочны транзисторы, можно судить по такому опыту. Полупроводниковый радиопередатчик залили особой смолой, придав ему форму небольшого цилиндра. Цилиндр поместили внутрь снаряда, который при выстреле развил скорость 1800 м/сек. В момент удара передатчик подвергся перегрузке более чем в 500 тыс. раз, но... продолжал работать.

Все чаще и чаще мы встречаем людей, прогуливающих с радиоприемниками в руках. Приемники величиной с книжку, а то и с портсигар.

Вместо ламп в них полупроводниковые триоды с горошину. Паутины проводников, опутывающей внутренность больших приемников, нет и в помине. Соединительные провода нанесены на пластмассовой пластине токопроводящей краской. Просто, удобно и, главное, надежно: такой провод не оборвется и не замкнется.

Полупроводники и их спутники, крошечные низковольтные детали, позволяют во много раз уменьшить размеры радиоаппаратуры. Этого требует сама жизнь. Без карманных приемников можно еще обойтись. Но для ракет, космических кораблей, искусственных спутников Земли прочные и компактные радиоприборы просто необходимы. Из тысяч радиоламп состоят электронные вычислительные машины. Они занимают иногда много места, расходуют сотни киловатт электроэнергии. Замена ламп полупроводниками во много раз уменьшает габариты, снижает потребление энергии, увеличивает долговечность приборов.

Достоинства полупроводниковых устройств бесспорны и многообразны. Но было бы неверно считать, что с электронными лампами уже покончено. Кристаллические триоды имеют недостатки. На их работу сильно влияют колебания температуры, а при 90 и больше градусах Цельсия многие транзисторы вообще отказываются работать. И, главное, даже однотипные кристаллические триоды не совсем похожи друг на друга. Велик так называемый разброс параметров.

Вспомним, однако, сколь несовершенны были первые радиолампы, и станет ясно, что недостатки современных транзисторов — всего лишь детские болезни.

### **Лилипут в стране Гулливеров**

Будущее транзисторной электроники связано еще с одной новинкой — микромодулями.

Микромодуль похож на слоеный пирог. Он состоит из ряда фарфоровых пластинок. Толщина каждой пластинки изме-

ряется десятиными долями миллиметра, а стороны обычно не превышают 7—10 мм. На каждой пластинке размещается до десятка миниатюрнейших радиодеталей: кристаллических диодов и триодов, конденсаторов, сопротивлений. Детали эти необычны. Роль сопротивлений, например, играют тончайшие пленки нихрома, сплава, из которого делают спирали электроплиток. Соединительные проводники и обкладки конденсаторов образуются пленкой алюминия, а диэлектриком, разделяющим обкладки, служит пленка окиси кремния.

Отдельные фарфоровые пластинки с нанесенными на них пленками, микрорезультаты, кладут друг на друга стопкой, соединяют между собой проводниками, проходящими в специальных пазах, и после настройки заливают смолой. Так получается монолитный кубик — микромодуль.

Словно лилипут в страну Гулливеров, вошел микромодуль в современную радиоаппаратуру. Вошел — и поразил всех своими незаурядными талантами.

Малютка оказался не только поразительно емким (десятки радиодеталей в кубическом сантиметре!), но и на редкость прочным, долговечным, надежным. Полагают, что даже на ракетах и космических кораблях микромодули будут служить 8 тыс. часов. Этот срок надеются продлить до 100 тыс. часов. Обычная же радиолампа работает в среднем всего лишь около тысячи часов.

Прочность, долговечность и миниатюрность — сочетание этих трех качеств особенно ценно для создателей космических кораблей. Только представьте на миг кабину звездолета, битком набитую допотопными радиолампами, конденсаторами, со спичечную коробку каждый, гудящими трансформаторами. Для одного лишь питания нитей накала в радиолампах необходима уйма энергии. Добавьте сюда густое переплетение проводов, громоздкие монтажные платы. Все свободное пространство в кабине занято радиоаппаратурой. А космонавты? Для них места не осталось.

Сдадим же в музей всю эту громоздкую «мебель», явно не подходящую для «малометражных квартир» космоса. Дорогу микромодулям! Они разместятся на пяточке и будут исправно нести службу. Вмонтированные в шлемы космонавтов, они обеспечат надежную радиосвязь, обработку и хранение информации.

Таланты микромодуля имеют немалую ценность и для творцов быстродействующих электронных машин. Уже разработаны микромодульные счетно-решающие устройства. Арифметический блок в них напоминает пчелиные соты. Пластина с листок тетради покрыта ячейками — микромодулями. Их больше ста. Две пластины образуют арифметический блок. А все счетно-решающее устройство занимает около полутора кубических дециметров и весит меньше 2 кг.

Чем еще хороша такая конструкция? Неисправный микро-модуль легко заменить в течение нескольких минут.

Микромодули моложе транзисторов. И болезнь у них совсем младенческая — трудность производства. Посудите сами: толщина пленок, образующих сопротивления и конденсаторы, измеряется иногда миллионными долями миллиметра. Чуть изменилась толщина, и емкость конденсатора или сопротивление уже другие.

Недостаток серьезный, но преодолимый. В этом убеждает вся история радиоэлектроники. Лет десять назад высказывались предположения, что полупроводниковые триоды не уйдут дальше слуховых аппаратов. И одним из доводов был все тот же разброс параметров. А сейчас? Еще не покончено с разбросом, а полупроводник захватил области, где еще недавно господствовала лампа. И микромодули, бесспорно, пробьют себе дорогу.

Не отклонились ли мы от темы? Конечно, микромодуль построен в основном из кристаллических веществ, и уже поэтому он имеет право на место в книге. Но с равным правом могут претендовать на наше внимание тысячи других предметов. Почему же мы отдаем предпочтение микромодулю? Потому, что он представляет собой переходную ступень к тем самым кристаллам-радиоприборам, к которым мы держим путь.

### **Чудеса молектроники**

Вводя в кристалл примеси, мы превратили его как бы в электронную лампу. Одну-единственную. Но можно так распределить примеси по кристаллической решетке, что кристалл уподобится сложному радиоэлектронному прибору, например радиоприемнику или генератору. Такие устройства получили название твердых схем. Ими и занимается молекулярная электроника, или м о л е к т р о н и к а.

Используя принципы обычных транзисторов, молектроника прилагает их к несравненно более сложным приборам, в которых не одна «лампа», а десятки, да еще сопротивления, конденсаторы... И все это построено из атомов и молекул, органически входит в структуру кристалла.

Так, кристалл кремния размером со спичечную головку, выращенный в специальном автоклаве и содержащий множество различных примесей, введенных в кристаллическую решетку при выращивании, действует как радиопередатчик, конечно, очень малой мощности. Все детали этого передатчика — полупроводниковые триоды, конденсаторы, сопротивления — образованы микроскопическими ячейками кристалла.

Есть такие звезды — белые карлики. Они состоят из веще-

ства огромной плотности. Пожалуй, с ними можно сравнить молектронные устройства: плотность монтажа достигает здесь 1200 деталей на кубический сантиметр.

Молектроника — это еще не сегодняшняя радиотехника, но уж завтрашняя наверняка.

Сфера ее деятельности охватывает авиацию, космонавтику, вычислительную технику.

Интеллект электронной машины, ее способность мыслить, определяется, в первую очередь, числом триггерных ячеек. Триггерная ячейка — аналог нервной клетки головного мозга. Она выполняется на лампах или транзисторах. Тысяча ячеек — две тысячи транзисторов. И хотя каждый полупроводник размером с горошину, все вместе они требуют немало места. Если сосчитать клетки человеческого мозга, хранящие и обрабатывающие информацию, то получится число с двенадцатью нулями. Столько ламп или даже полупроводниковых приборов разместить в электронном мозгу трудно. Значит ли это, что машина никогда не угонится за человеком?

Вот здесь-то слово за молектроникой. Ученые заглянули далеко вперед: что если приспособить для хранения информации отдельные атомы и молекулы? Тогда в компактном устройстве смогут с комфортом расположиться 100 млрд. клеток. А если роль триггеров, или мозговых клеток, поручить внутриатомным частицам, то число клеток удесятится. Электронный мозг в сотни раз более емкий, чем человеческий, да еще при колоссальном быстродействии, уже сейчас присущем электронным машинам!

Пока мы не знаем, осуществимо ли это. Но допустим, все, что задумали ученые, сбудется. Тогда человечество получит могучего помощника, и многие наши нынешние проблемы окажутся легко разрешимыми. Ученые настроены оптимистично. Один из разделов радиофизики, квантовая радиоэлектроника, уже занимается этими проблемами.

А вот еще одна страница из фантастического романа, готовая, того и гляди, стать важным завоеванием науки и техники. Представьте такое: крошечная песчинка блуждает по лабиринту человеческого организма, проникая в самые заповедные его уголки. Но это не просто песчинка, а научная лаборатория, снабженная всевозможными датчиками. Их показания — надежное средство профилактики и раннего распознавания болезней.

А батареи? Ведь для питания лаборатории и передачи ее показаний по радио нужна электроэнергия. Самая же крошечная батарейка великан по сравнению с песчинкой. Правильно. Только можно обойтись и без батарей — использовать свободную энергию, которой в эфире довольно много. Безбатарейный транзисторный передатчик или приемник работает на

радиоволнах, излучаемых мощной радиостанцией; высокочастотный ток выпрямляется, а полученный в результате выпрямления постоянный ток идет на питание полупроводниковых триодов.

Много чудес таит в себе молектроника. И сбудутся эти чудеса на наших глазах.

### **Полупроводниковый «градусник»**

Электропроводность полупроводников сильно зависит от температуры. Ведь по мере нагрева растет число свободных электронов, а при низких температурах электроны связаны с атомами. Это явление используют в термисторах.

Термистором называют полупроводниковый термометр. Если присоединить кристаллик полупроводника к электрической батарее, то в такой цепи появится слабый ток. При нагреве ток возрастает, так как электропроводность кристаллика повышается. Если включить в цепь чувствительный электроизмерительный прибор, то его стрелка отклонится тем сильнее, чем выше температура. По отклонению стрелки и можно судить о степени нагрева.

Внешне термисторы выглядят по-разному. Одни сделаны из крошечных стеклянных трубочек, из которых торчат проволоочки. Другие похожи на бусинки. Третьи напоминают миниатюрные пластинки. Для агрономов сделали термистор, похожий на кинжал. Чтобы узнать температуру почвы, в нее вонзают кинжал-термистор и смотрят на стрелку прибора. Специальный медицинский термистор напоминает заточенный карандаш. На его остром кончике полупроводниковый шарик, покрытый тончайшей стеклянной оболочкой. Прислонишь такой карандаш к телу, и подключенный к шарiku электроизмерительный прибор мгновенно покажет температуру.

С помощью термисторов можно измерять температуру на расстоянии. Как измерить, например, температуру Солнца? Туда ведь не протянешь проводов. Да и термистор, очутившись на Солнце, тотчас превратился бы в пар. И все же измерить температуру Солнца можно. Сделать это помогает солнечный свет.

Мы знаем, что солнечные лучи состоят из цветных электромагнитных волн различной длины. Пропустив солнечный луч через призму, получают радужную полосу — спектр. Характер лучей, составляющих спектр, зависит от температуры светящегося тела. Если источник света имеет температуру, скажем,  $1000^{\circ}$ , то больше всего энергии несут красные лучи. Тело, нагретое до  $2000^{\circ}$ , сильнее испускает лучи желтого цвета, а когда температура повышается до  $3000^{\circ}$ , в спектре преобладают голубые лучи.



А как узнать, какие именно лучи несут в себе наибольшее количество энергии? Вот здесь-то и оказал неоценимую услугу миниатюрный термистор. Его перемещали по спектру, и прибор отмечал разную температуру. Опыты показали закономерность изменения энергии лучей в спектре. И теперь спектром пользуются как своеобразной термометрической шкалой.

Вернемся к определению температуры Солнца. Сравнивая солнечный свет со спектрами тел, нагретых до различных температур, установили температуру поверхности Солнца. Она оказалась равной  $6000^{\circ}$ .

Известно, что больше всего лучистой энергии поглощают предметы, окрашенные в черный цвет. Вот почему летом мы предпочитаем белую одежду: в ней прохладнее. Ученые одели термистор в черное и поместили в стеклянный баллон с откачанным воздухом. Колебания температуры окружающего воздуха передавались термистору очень медленно: пустота плохо проводит тепло. Зато к лучистой энергии прибор оказался необычайно чувствителен. Черная краска жадно впитывает лучи, их энергия превращается в тепло, и термистор нагревается.

Чувствительность прибора баснословно велика. Если поместить его в фокус металлического рефлектора, напоминающего автомобильную фару, то он будет реагировать на ничтожные излучения, на расстоянии в несколько километров замечать зажженную спичку. Реагирует термистор и на невидимые инфракрасные лучи, испускаемые нагретыми телами. Летит, скажем, самолет. И глазом-то его не различишь, такая высота, но стоит нащупать самолет термистором, как чуткий прибор уловит крупницу энергии, испускаемой его двигателем. На этом принципе основаны приборы, которые обнаруживают самолет, летящий на высоте 8 км, и даже устанавливают, сколько у него двигателей.

Термисторы применяют также для сигнализации инфракрасными лучами, для видения в темноте и т. п. У этих замечательных по своей простоте полупроводниковых приборчиков огромные перспективы.

### **Кристаллический глаз**

В конце прошлого века профессор Московского университета А. Г. Столетов изобрел фотоэлемент. Это стеклянный баллончик с двумя металлическими электродами, один из которых в простейшем случае представляет собой пластинку, а другой — сетку. Если замкнуть снаружи электроды проводником, в цепь которого включены батарея и чувствительный электроизмерительный прибор, гальванометр, то при освещении фотоэлемента стрелка гальванометра отклонится. Значит,

через безвоздушное пространство внутри баллончика течет ток. Как же он перепрыгивает через пустоту?

Причина этого явления — энергия световых лучей. Свет, падая на металлическую пластинку (ее соединяют с «минусом» батареи), выбивает из поверхности металла электроны. Они-то и образуют ток, заставляющий отклониться стрелку прибора. Положительно заряженная сетка притягивает их, вот электроны и летят ей навстречу.

Ясно, что в темноте тока не будет, поскольку электроны заключены в металлическую пластинку и без помощи света не могут вырваться за ее пределы. А если менять освещенность пластинки, то будет изменяться и сила тока.

Фотоэлемент мгновенно отзывается на самые быстрые колебания освещенности, однако его чувствительность невелика. К нему приходится добавлять многоламповые усилители, но это мало что дает.

А между тем у фотоэлемента есть двойник, правда несколько уступающий ему в скорости реакции, но зато несравненно более чуткий. Это полупроводниковое фотосопротивление, которое было открыто пятнадцатью годами раньше фотоэлемента.

В 1872 году английский физик Смит, исследуя материалы с большим сопротивлением электрическому току, обнаружил, что электропроводность полупроводникового вещества селена при освещении резко возрастает.

Но первые фотосопротивления работали очень неустойчиво, на них сильно влияли колебания температуры, и они долго не имели сколько-нибудь широкого практического применения, тогда как обычные фотоэлементы завоевали большую популярность. И только в прошлом десятилетии фотосопротивлениям удалось взять реванш. Появились новые полупроводниковые материалы. Современные фотосопротивления хорошо противостоят колебаниям температуры. Они небольшие по размеру (одно из таких сопротивлений поместили прямо на стрелку электроизмерительного прибора), просты и надежны. Легкие небьющиеся пластины нельзя и сравнить с хрупким стеклянным панцирем фотоэлемента.

Если добавить, что электропроводность фотосопротивлений при освещении возрастает в десятки и сотни тысяч раз, то станет ясно, какой это опасный конкурент для обычного, довольно-таки подслеповатого электрического глаза.

Область применения полупроводниковых фотосопротивлений необычайно широка. Они могут улавливать и ультрафиолетовые лучи, и лучи Рентгена, и радиоактивное излучение, не говоря уже об инфракрасных лучах. Недаром кристаллический глаз сродни термистору.

У фотосопротивления есть и младшие братья — фотодиод и фототранзистор. Что такое обычные полупроводниковый ди-

од и транзистор, мы знаем. Здесь разница лишь в одной характерной черте. Выпрямленный фотодиодом ток и усиление фототранзистора зависят от освещенности. В этих приборах имеются прозрачные окошечки, через которые на полупроводник падает свет.

Фотодиоды и фототранзисторы отличаются очень высокой чувствительностью. Они находят применение в автоматических и телемеханических устройствах, фототелеграфии, кинематографии и др. Их роль особенно возросла с развитием квантовой радиоэлектроники, о которой мы будем говорить в дальнейшем. Можно перечислить еще десятки профессий фотосопротивления и его младших братьев. Но заглянем в будущее. Недавно в газетах писали о феноменальном явлении: девушка читала обычный типографский текст кончиками пальцев. Выяснилось, что кожа на кончиках ее пальцев — своеобразный орган зрения.

Случай, бесспорно, уникальный. Но он наталкивает на мысль о возможности создать искусственное зрение. И здесь прежде всего приходит на ум фотосопротивление, вернее, микроскопическая мозаика из многих тысяч светочувствительных кристаллов. Конечно, сразу же возникают сложнейшие проблемы. Каким образом, например, сделать такую мозаику? В принципе эта задача выполнима: именно так устроена передающая телевизионная трубка, иконоскоп. Но нам нужен миниатюрнейший приборчик-протез, удобный в повседневном пользовании. И мы снова вспоминаем о молектронике. Может быть, и здесь ей будет принадлежать главная роль?

## **Электростанция в кристалле**

Долгие годы искали ученые простой и экономичный способ превращать тепловую энергию в электрическую без промежуточных процессов, паровых котлов, турбин, подшипников. Вообще без движущихся частей и сопутствующей им неизбежной растраты энергии.

Еще в начале прошлого века были известны термоэлементы, с помощью которых тепловая энергия непосредственно превращалась в электрическую. Но всерьез их не принимали. Тогдашние термоэлементы делались из металлов, а металлические термопары имеют низкий коэффициент полезного действия. Вырабатывая 1 *вт* электрической энергии, они требуют взамен 200 *вт* тепловой.

Когда в 1929 году академик А. Ф. Иоффе выступил с утверждением, что с помощью полупроводников можно будет получать электроэнергию с коэффициентом полезного действия до 4%, многие в это не поверили. Но прошло четверть века, и с полупроводниковыми батареями, состоящими из ряда

отдельных термопар, удалось достичь к. п. д. 8%. И это еще далеко не предел. Опыты дают основание полагать, что в будущем термобатареи окажутся экономичнее генераторов с паровыми машинами.

Как же устроена полупроводниковая термопара?

Возьмем два крошечных полупроводниковых брусочка — один с электронной проводимостью, другой с дырочной. Торцы брусочков замкнем металлической пластинкой-перекладиной в виде буквы «П». Свободные торцы с помощью проводов подключим к электроизмерительному прибору. Теперь поднесем к металлической перекладине горящую спичку. От перекладины тепло будет передаваться брусочкам. В полупроводнике с электронной проводимостью появятся свободные электроны. По мере нагрева они будут двигаться все быстрее, сталкиваться все чаще, мешать друг другу все больше. Стремясь уйти от тесноты, они начнут перекоачивать в более холодный конец брусочка, где гораздо просторнее. Но электроны несут отрицательный заряд. А раз в холодном конце брусочка их становится больше, то этот конец заряжается отрицательно по отношению к горячему. Подобное явление происходит и в брусочке с дырочной проводимостью. Только там в холодном конце скапливаются положительные заряды.

Электронный и дырочный брусочки становятся как бы полюсами электрической батареи, и по проводу, который их соединяет, начинает течь ток. Мы получили термопару. Несколько таких элементов, соединенных последовательно, образуют термогенератор. Это и есть электростанция в кристалле, непосредственно преобразующая тепловую энергию в электрическую.

Пока еще термогенераторы не имеют промышленного значения, но уже приносят немалую пользу. Вот, например, один из них — миниатюрный генератор ТК-3. Он надевается на обыкновенную керосиновую лампу-молнию. Теплый воздух, выходящий из лампового стекла, нагревает элементы термобатареи. С другого конца они охлаждаются окружающим воздухом. Благодаря разности температур термогенератор начинает вырабатывать электроэнергию, и ее вполне хватает на питание батарейного радиоприемника типа «Родина». Более мощные термогенераторы ТГУ-1 нагреваются на специальных керогазах и питают радиостанции «Урожай».

Ближние родственники термогенераторов солнечные батареи. Они стоят на искусственных спутниках Земли и превращают в электричество лучистую энергию. Солнечная батарея состоит не из термопар, а из вентильных полупроводниковых фотоэлементов. В отличие от фотосопротивления вентильному фотоэлементу не нужно никакой питающей батарейки. Под действием света он сам становится источником электрического тока.

Полупроводниковый фотоэлемент это все тот же кристаллик, разделенный на две зоны электронно-дырочным переходом. При освещении число электронов и дырок резко возрастает. Если соединить извне проводником электронный и дырочный участки кристалла, то по проводнику потечет ток.

Термогенераторы и солнечные батареи обещают многое нашей энергетике. Сколько энергии теряется сейчас попусту! Восемь десятых тепла, выделяемого при топке печей, бесполезно уходит в воздух вместе с дымом. А бросовые отходы тепла доменных печей, мартенов, теплоцентралей? А даровое тепло, щедро раздаваемое самой природой? Все это можно использовать с помощью кристаллических электрогенераторов.

Полупроводниковые кристаллы будут преобразовывать и энергию радиоактивного излучения. Гигантские атомные реакторы, закованные в сплошную броню из полупроводниковых фотоэлементов, дадут изобилие электроэнергии. А любителям карманных фонариков можно пообещать батарейку, состоящую из радиоактивной пластинки и полупроводникового кристаллика. Крошечная батарейка сможет питать фонарик 20—30 лет.

О полупроводниках можно рассказать еще много. Мы обошли молчанием и полупроводниковые холодильники, и кристаллические усилители света. Впрочем, в небольшой книжке обо всем не расскажешь, приходится отбирать самое важное, самое интересное. Вот и сейчас мы переходим к новой, тоже чрезвычайно перспективной области, где господствуют магические кристаллы из семейства пьезоэлектриков.

### **Кварц — преобразователь энергии**

Из множества различных кристаллов люди уже давно выделили и поставили в один ряд с драгоценными камнями кварц. Происхождение слова «кварц» связывают со старинными немецкими легендами. В переводе на русский оно звучит ласково — гномик, лилипутик. Свойства кварца оправдывают его название.

Кварц встречается повсюду в разных обликах: в виде обыкновенного песка, круглой гальки, красивых многогранных кристаллов. Одна из разновидностей кристаллического кварца — прозрачный, как родниковая вода, горный хрусталь. Прозрачные кварцевые кристаллы фиолетового цвета известны под названием аметистов, а желтого — цитринов. Встречаются также полупрозрачные, дымчатые и даже совершенно черные кварцевые кристаллы. Окраска кварца зависит не от его кристаллической структуры, а от примеси красящих веществ.

Кварц очень тверд. По твердости он уступает лишь алма-

зу, корунду и топазу. Прочность и упругость кварца также весьма высоки. Чтобы разорвать кварцевый кристалл с поперечным сечением в квадратный сантиметр, необходимо приложить силу около тонны. В момент разрыва кристалл становится длиннее всего лишь на одну тысячную долю первоначальной длины. Чтобы раздавить кварцевый кубик объемом в один кубический сантиметр, нужен груз в несколько тонн.

Кварц очень плохо проводит электрический ток и, следовательно, ведет себя как изолятор. В родстве с полупроводниками его не заподозришь.

Кварцевые кристаллы от нагревания расширяются незначительно. При температуре около  $2000^{\circ}$  они плавятся. Из плавленного кварца, как из обычного стекла, можно сделать трубки, посуду для опытов и т. п. Раскалите докрасна сосуд из кварцевого стекла и затем бросьте в ледяную воду: это не причинит ему вреда. А обычный стакан нередко лопается, если в него налить кипятка.

Кварц — одно из самых химически устойчивых веществ. Он не растворяется ни в одной из кислот, за исключением плавиковой.

Лилипутик свободно пропускает невидимые ультрафиолетовые лучи, для которых непроницаемо обычное стекло (вспомните кварцевую лампу — горное солнце, широко применяемое в медицине).

Такой послужной список сделал бы честь любому кристаллу. Но самое удивительное свойство кварцевых кристаллов обнаружено в конце прошлого века французскими физиками братьями Пьером и Жаком Кюри.

Братья Кюри вырезали из кварцевого кристалла пластинку и поместили ее между двумя металлическими пластинами-электродами. К электродам присоединили электрометр — прибор для обнаружения электрического заряда. Кварцевую пластинку сдавили, и стрелка электрометра отклонилась (рис. 3, а). Значит, на гранях пластинки при сдавливании возникли электрические заряды.

Если пластинку не сдавливать, а растягивать, то знаки зарядов на электродах изменятся. Там, где раньше был «плюс», появится «минус». Стрелка электрометра отклонится в обратную сторону (рис. 3, б). И еще: чем сильнее сжата или растянута пластинка, тем больше электрический заряд, тем шире шаг стрелки.

Явление, открытое Пьером и Жаком Кюри, было названо пьезоэлектрическим эффектом. Приставка *пьезо* происходит от греческого слова «давлию»; термин *пьезоэлектричество* означает, таким образом, электричество, возникающее в результате давления.

Подключим электроды кварцевой пластинки к электрической батарее и будем наблюдать за поведением магического

кристалла через микроскоп. Под действием электрического заряда пластинка стала чуть-чуть тоньше, сжалась. А если поменять местами полюсы батареи, кристалл растянется. И опять-таки деформация, хотя и микроскопическая (вспомните, как неподатлив кварц), будет тем больше, чем выше напряжение батареи, чем плотнее заряд на электродах.

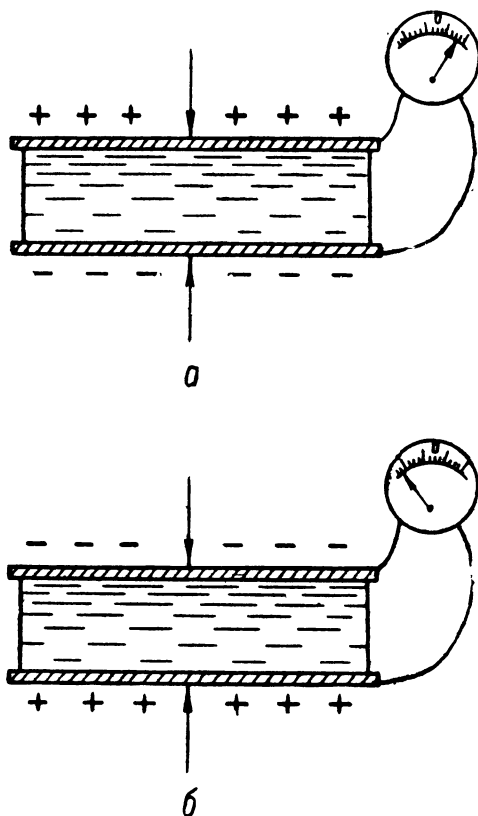


Рис. 3. Возникновение электрических зарядов при сжатии (а) и растяжении (б) кварцевой пластинки.

Выходит, кроме прямого, существует и **обратный** пьезоэффект.

Сдавим пластинку сильнее. Она поддается с трудом. Сдавливая или растягивая пластинку, мы производим определенную работу, расходует механическую энергию. Энергия, как известно, не пропадает даром и не исчезает бесследно, она только превращается из одного вида в другой. При прямом пьезоэффекте значительная часть энергии из механической переходит в электрическую. А при обратном наоборот.

Значит, кварцевый кристалл может служить преобразователем механической энергии в электрическую или электрической в механическую. В первом случае он сродни электростанции, генератору электрического тока, во втором — электродвигателю. На этом и основано применение пьезокристаллов.

В нашей книге не хватило бы страниц для перечисления кристаллических веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, не говоря уже о самом кратком описании главнейших черт его характера.

Турмалин, сегнетова соль, этилендиаминтартрат, фосфат аммония, поликристаллическая керамика — титанат бария, виннокислый калий... Даже обыкновенный сахар относится к пьезоэлектрикам. Если колоть сахар в темноте, видны голубые искры, электрические разряды, — результат пьезоэффекта.

Итак, сахар — пьезоэлектрик. А соль? Обыкновенная, поваренная? Увы, в ее кристаллах, как и в кристаллах многих других веществ, пьезоэлектрических явлений обнаружить не удалось.

Попробуем же разгадать природу пьезоэлектрического эффекта, выяснить, почему он наблюдается в одних кристаллах и отсутствует в других.

### **Кристаллы без центра**

Хорошо знакомая нам кристаллическая решетка поваренной соли образована чередующимися положительными и отрицательными ионами. Частица вещества, содержащая в себе два разноименных иона (или две группы разноименных ионов), находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, называется электрическим диполем. О диполе судят по величине его момента. Дипольный момент равен произведению заряда на расстояние между зарядами. Если дипольный момент равен нулю, то нет и диполя: положительный и отрицательный заряды либо вовсе отсутствуют, либо совмещены в одной точке и друг друга уравнивают.

В аморфных телах, вроде смолы или стекла, электрические диполи обычно находятся в беспорядке. Поэтому на поверхности такого вещества в любом месте практически одинаковое число положительных и отрицательных ионов. В любой точке заряды взаимно уравниваются, так что суммарный заряд равен нулю (рис. 4,а). Но стоит потереть кусок смолы или стекла сукном, как диполи тотчас повернутся вокруг своей оси и займут одинаковые положения. Одноименные полюсы диполей окажутся направленными в одну сторону. Смола наэлектризуется: одна поверхность покроется положительными зарядами, другая, противолежащая, — отрицательными



(рис. 4,б). Это явление называется электрической поляризацией.

В кристаллах, обладающих пьезоэффектом, поляризация возникает при сжатии или растяжении. Ясно, что кристаллы должны иметь дипольную структуру, иначе поляризации не получится.

А как обстоит дело с поваренной солью? Взглянем снова на рис. 1. Элементарная ячейка образована здесь четырьмя диполями, состоящими из ионов хлора и натрия. Казалось бы,

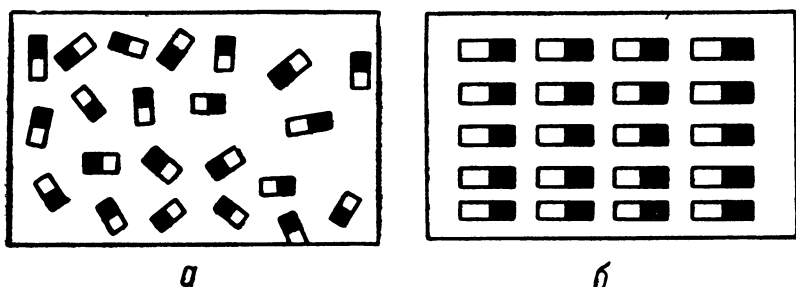


Рис. 4. Дипольная структура аморфного тела в обычном (а) и наэлектризованном (б) состояниях.

дипольная структура налицо: в одном лишь кубике четыре диполя. И все же этого мало. Нужно, чтобы сам кубик да и элементарная ячейка в целом вели себя, как диполь.

Мы часто пользуемся понятием центра тяжести. Любое тело состоит из огромного числа частиц, причем каждая что-то весит. Значит, вес тела складывается из множества одинаково направленных сил. Для простоты их заменяют одной суммарной силой и прикладывают эту силу к такой точке, где бы ее действие было равно совместному действию всех отдельных сил, т. е. к центру тяжести. Центр тяжести шара находится в его геометрическом центре, цилиндра — на середине оси и т. п.

Система из нескольких тел также имеет центр тяжести. Например, центр тяжести двух одинаковых материальных точек (тел, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними) расположен посередине прямой, соединяющей эти точки.

И вот оказывается, что центры тяжести положительных и отрицательных ионов в кристаллической решетке поваренной соли совпадают. Они находятся на пересечении диагоналей каждого кубика элементарной ячейки, или, иными словами, в его центре симметрии. А это означает, что положительные и отрицательные заряды как бы сосредоточены в одной точке. Следовательно, кубик и ячейка в целом не имеют дипольного момента.

Но, возможно, кристалл поваренной соли приобретает свойства диполя при сжатии или растяжении? Нет. Деформируя решетку, мы превращаем кубики в параллелепипеды. И только. Центры тяжести разноименных ионов по-прежнему в одной точке.

Отсюда вывод: в кристаллах, обладающих центром симметрии, никакие механические воздействия не возбуждают электрическую поляризацию. Значит, такие кристаллы лишены пьезоэлектрических свойств.

Совсем иная картина наблюдается в кристаллах, не имеющих центра симметрии \*. Здесь элементарные ячейки подобны электрическим диполям, поскольку центры тяжести разноименных ионов, образующих ячейку, не совпадают. В таких кристаллах под воздействием механической силы диполи могут ориентироваться, принимать более или менее одинаковые положения. Положительные и отрицательные заряды скапливаются на противоположных гранях кристалла, возникает пьезоэлектрическая поляризация.

Вот и выходит, что пьезоэлектрический эффект проявляется только в кристаллах, не имеющих центра симметрии.

Нетрудно догадаться, что поляризация возможна лишь в диэлектриках. В проводниках отсутствуют разноименные ионы, следовательно, там не может быть диполей.

Такова природа пьезоэлектрического эффекта. Познакомимся теперь с его применением. Долгое время пьезоэффект считали своего рода научным курьезом, абстрактным открытием, не способным принести пользу. Так было до первой мировой войны...

### **Обманчивое безмолвие**

...Немецкие подводные лодки атакуют побережье Франции. Французское правительство просит физика Ланжевена найти эффективный способ защиты. Ланжевен решил использовать неслышимые ультразвуковые волны.

Ультразвуковая волна, встречая на пути препятствие — горы, скалы, лес, — отражается от него и возвращается обратно. Зная скорость распространения волны в воде, а также время между посылкой короткого ультразвукового сигнала — импульса — и его возвращением, можно подсчитать расстояние

---

\* Если через центр симметрии провести произвольную прямую, то она пересечет поверхность кристалла в двух одинаково удаленных от центра точках. Более того, в любых равноудаленных от центра симметрии точках, лежащих на одной прямой, свойства кристалла будут одинаковы. Центры симметрии имеют круг, эллипс, параллелограмм, равносторонний шестиугольник. У треугольника, или, скажем, пятиконечной звезды центра симметрии нет.

до подводной лодки или другого препятствия, отразившего звук.

На этом же принципе основана радиолокация; только там используются не звуковые, а электромагнитные волны.

Источником ультразвуковых волн Ланжевен сделал пластинку из кристаллического кварца. Ее подключали к мощному генератору электрических колебаний, и вследствие пьезоэффекта она начинала интенсивно колебаться. Пластинка «подкачивала» воду, и в ней появлялся узкий, направленный под прямым углом к пластинке, пучок ультразвуковых волн.

Кварцевая пластинка служила и приемником ультразвука. Звуковая волна, встречая такую пластинку на пути, заставляла ее колебаться. В результате пьезоэффекта пластинка преобразовывала энергию ультразвуковых волн в энергию электрических колебаний, которые затем воспринимались специальным устройством, напоминающим радиоприемник. И все это в полном безмолвии: ультразвуковые колебания столь быстры, что человеческое ухо их не улавливает.

Сейчас ультразвук и его пьезоэлектрические излучатели широко применяются в мореплавании. Ультразвуковые волны обнаруживают корабли, удаленные на десятки километров, измеряют морские глубины, находят рифы и отмели.

В 1928 году профессор С. Я. Соколов изобрел прибор, который обнаруживает трещины и раковины в металлических изделиях и твердых пластмассах. Принцип действия все тот же: узкий пучок ультразвука, излучаемый пьезоэлектрической пластинкой, направляется на исследуемое изделие и пронизывает его насквозь. Если в толще изделия имеется трещина или раковина, препятствующая распространению волны, то ультразвук отражается от него, возвращается назад и улавливается приемником. В приемнике он преобразуется в электрические колебания, которые поступают в электронный прибор, осциллограф, на экране которого появляется характерная светящаяся кривая — осциллограмма. По этой кривой судят о характере дефекта.

Ученые установили, что ультразвуковые колебания ускоряют некоторые химические реакции и технологические процессы, влияют на процесс кристаллизации и т. д. В большинстве случаев наиболее удобным и совершенным излучателем ультразвуковых волн оказывается пьезоэлектрическая пластинка.

В ультразвуковых устройствах, помимо кристаллов кварца, используются искусственные кристаллы сегнетовой соли, сульфата лития, фосфата аммония. Применяется и поликристаллическая керамика, позволяющая без особых трудностей изготавливать излучатели и приемники больших размеров и любой формы.

## Поющие кристаллы

Вначале пьезоэлектрическая пластинка умела излучать лишь неслышимые ультразвуковые волны. Однако скоро она научилась говорить, петь и даже играть одновременно на многих музыкальных инструментах. Речь идет о пьезоэлектрическом звукоснимателе. Поющий кристалл — не редкость. Он есть в радиоле и проигрывателе.

Действует звукосниматель очень просто. Игла, двигаясь по бороздке грампластинки, откликается на все извилинки, колеблется в такт записанному звуку. Колебания иглы передаются пьезокристаллу, который преобразует их в электрический ток. А дальше — усилитель, громкоговоритель и... в комнате звучит музыка.

В электроакустике применяются также пьезоэлектрические микрофоны, телефоны и громкоговорители.

Микрофон превращает звук в электрические колебания звуковой частоты. Пьезомикрофон сродни приемнику ультразвука: звуковая волна, встречая пьезоэлектрическую пластинку, заставляет ее колебаться, и на электродах пластинки возникают заряды, знаки которых меняются с частотой улавливаемого звука.

Телефон или наушники выполняют обратную функцию — преобразуют электрические колебания в звуковые, то есть служат для воспроизведения звука. Пьезотелефон по своему устройству напоминает излучатель ультразвуковых волн. Это опять же пьезоэлектрическая пластинка, колебания которой передаются тонкой металлической мембране, а от нее — окружающему воздуху.

Если к мембране телефона или непосредственно к пьезокристаллу прикрепить конический бумажный рупор, то звук будет сильнее. Благодаря рупору, диффузору, увеличивается колеблющаяся поверхность, и колебания передаются большей массе воздуха. Кроме того, излучение звуковых волн в этом случае более направленно, и их энергия концентрируется в нужном направлении. Такое устройство и называют пьезоэлектрическим громкоговорителем.

Пьезоэлектрическая пластинка, поющий кристалл, вбирает в себя звучание огромного симфонического оркестра и передает по проводам или по радио на любое расстояние.

## Кристаллы вместо манометра

Давление, как известно, измеряют специальными приборами — манометрами. Очень распространены жидкостные манометры в виде изогнутой стеклянной трубки, наполненной чаще всего ртутью или обыкновенной водой. Одно из колен труб-

ки соединено с сосудом, где нужно измерить давление, другое остается свободным. На этот, свободный, конец трубки давит столб атмосферного воздуха. Если давление внутри сосуда равно атмосферному, то жидкость в обоих коленах находится на одном уровне. Если же давление в сосуде становится больше атмосферного, то жидкость в свободном колене начинает подниматься, а в колене, присоединенном к сосуду, опускаться. Это происходит до тех пор, пока вес избытка жидкости в свободном колене не уравнивает разность давлений.

Есть механические манометры. Они состоят из изогнутой металлической трубки и рычажного механизма со стрелкой. Один конец трубки запаян, другой соединен с сосудом, в котором измеряют давление. При повышении давления трубка распрямляется и приводит в движение стрелку. Чем больше давление, тем сильнее отклоняется стрелка.

Но такие манометры не всегда пригодны. Ими нельзя, скажем, измерять давление, возникающее в орудийном стволе в момент выстрела. Обычные манометры годятся для измерения лишь сравнительно небольших давлений. Кроме того, они не успевают прореагировать на очень быстрые и резкие перепады давлений.

Поэтому ученые стали искать совершенный способ измерять чрезвычайно слабые и гигантски мощные давления, улавливать процессы, происходящие в очень короткие промежутки времени.

И снова в главной роли выступает все тот же кристалл кварца. Мы уже говорили, что раздавить кварцевый кубик объемом в один кубический сантиметр может только груз в несколько тонн. Значит, кварц способен выдерживать колоссальное давление. На него кристалл кварца отвечает электрическим зарядом. Во сколько раз увеличивается давление, во столько раз возрастает и количество электричества на гранях пластинки. А эту величину нетрудно измерить специальными электрическими приборами.

Пьезоэлектрические манометры пригодны для измерения не только больших, но и весьма слабых давлений: самый ничтожный заряд можно многократно увеличить, применив усилитель.

Кристалл позволяет измерить давление на расстоянии: ведь электричество можно передать по проводам куда угодно, а если не годятся провода, к нашим услугам радио. В механических манометрах для этой цели понадобилось бы сложное передаточное устройство с рычажным механизмом или особым трубопроводом.

Не только давления, но и разного рода вибрации, ускорения можно исследовать с помощью пьезоэлектрической пластинки. Вибрируют движущиеся части и станины машины, вращающиеся роторы электрических моторов, паровых тур-

бин и гидрогенераторов, кабины космических кораблей и корпуса ракет.

Вибрации возникают от воздействия знакопеременных нагрузок, то есть сил, периодически изменяющих направление. Известны случаи, когда такие нагрузки разрушали мосты, здания, различные оси, валы и т. п. Резонанс увеличивает размах колебаний, вызванных вибрацией: вспомним классический пример со взводом солдат, шедшим строевым шагом по мосту.

Частота вибраций, или число колебаний в секунду, может изменяться в больших пределах. Но какое-то определенное значение частоты, допустим 500 колебаний в секунду, иногда оказывается предельным для моста или ротора турбины. Ведь мост, подобно струне или камертону, настроен на собственную частоту. Совпадет случайно частота вибраций с этой собственной частотой, вот вам и резонанс. А заранее рассчитать конструкцию, чтобы исключить возможность резонанса, не всегда можно. Не зря подолгу испытывают самолет: вдруг притаились до поры до времени коварные вибрации?

Подобно тому как врач выслушивает больного, можно с помощью пьезокристалла проверить станок или турбину, железнодорожную платформу или фюзеляж воздушного лайнера. И не только выслушать, но и точно зафиксировать почерк вибрации.

Для этой цели применяют пьезоэлектрический акселерограф: камера, внутри груз, подвешенный на жестких пружинах, одна из пружин соединена с манометром.

Поместим акселерограф на вибрирующий предмет. Камера вибрирует вместе с ним. А груз? Он довольно массивен, инерционен. И поэтому сопротивляется всякому изменению в скорости и направлении своего вынужденного движения. А сопротивляясь, давит на манометр то в одну, то в другую сторону.

Теперь подключим к электродам пьезопластинки-манометра уже известный нам электронный прибор, осциллограф, и на экране появится светящийся отпечаток вибрации — кривая колебаний, совершаемых вибрирующим предметом.

## Сверхточные часы

Открыв крышки наручных часов, мы видим драгоценные камни — рубины. Прочные и стойкие кристаллики делают часовой механизм если не вечным, то по крайней мере долговечным. Металлические подшипники давно бы истерлись, не выдержали непрерывной гонки, а рубиновые служат десятки лет.

Но речь у нас пойдет не о простых часах, а о так называемых кварцевых. На первый взгляд они совсем не похожи

на часы. В них нет ни пружины, ни гирь, а вместо маятника кварцевая пластинка. Колебания ее поддерживаются генератором на радиолампах или транзисторах. Генератор, своеобразная пружина кварцевых часов, черпает энергию от электрических батарей и возбуждает колебания кварцевой пластинки.

Но нужен еще зубчатый механизм, связывающий маятник со стрелками. В кварцевых часах его заменяет особый электромотор, у которого скорость вращения зависит от частоты переменного тока. Такие электродвигатели называют синхронными. Частота тока, вырабатываемого генератором, равна частоте, с которой колеблется кварцевая пластинка — маятник этих необычных часов. Значит, кристаллический маятник управляет их ходом. Начнет колебаться быстрее, и часы побегут, медленнее — отстанут.

Есть еще одно замечательное свойство у кварцевой пластинки. Как всякое упругое тело — струна, пружина, камертон, — она обладает определенной собственной частотой, зависящей от ее размеров. А так как размеры кварца при изменении температуры изменяются ничтожно мало, то и частота колебаний пластинки остается почти постоянной. Генератор как бы подталкивает пластинку, а она очень точно сохраняет частоту колебаний. Радистам хорошо известен термин: «кварцевая стабилизация». Кварцевая пластинка, резонатор, и впрямь оказывает стабилизирующее влияние на частоту колебаний, и не только в часах. Его можно встретить почти в любом радиопередатчике. Ведь частота радиостанции не должна отходить от определенного заданного значения, иначе разные передачи будут как бы наползать друг на друга, создавая взаимные помехи.

Но вернемся к кварцевым часам. Самые лучшие механические часы уступают им в точности. Достаточно сказать, что эталонные кварцевые часы, если их не регулировать, за тридцать лет уйдут или отстанут меньше чем на одну секунду.

Когда кварцевые часы были построены и выверены, ученые пришли к очень интересному выводу: оказалось, что земной шар не так уж равномерно вращается вокруг своей оси. На протяжении года длительность суток меняется на несколько десятитысячных долей секунды. Так, с помощью часов, созданных человеческим разумом, был проверен ход часов, рожденных самой природой.

Кварцевые часы по праву могут называться сверхточными. Но точность понятие относительное. Уже сейчас ученые нуждаются в еще более точных часах, с помощью которых можно было бы, например, заранее предсказывать землетрясения по ничтожным колебаниям скорости вращения Земли. Но возможны ли такие часы?

Ученые отвечают на этот вопрос утвердительно. Созданы атомные и молекулярные часы. Маятником в них служат колеблющиеся атомы и молекулы. Точность этих часов баснословна. За 300 лет они могут уйти вперед или отстать лишь на секунду.

Но это вовсе не значит, что кварц должен скромно отойти на второй план. Просто кварцевым часам нужно немного переквалифицироваться. По точности они уступают атомным, и здесь, видимо, ничего не поделаешь. Но есть у них и преимущество... Впрочем, сначала поговорим о недостатках, одинаково присущих как атомным, так и кварцевым часам: они громоздки, сложны и капризны.

Часы-эталон работают в искусственно создаваемых условиях. Они находятся в глубоком подземелье, куда не доходят звуки, где царит постоянство температуры, где ходят на цыпочках и стараются не дышать. Показания этих часов передают по проводам и радио.

Но как быть, если нарушится радиосвязь? Ведь часы-эталон не возьмешь с собой в морское или космическое плавание, их не разместишь в тесной кабине, они не выдержат вибраций, толчков, колебаний температуры, потребуют много электроэнергии.

И снова преимущество на стороне кварцевых часов: они легче атомных, поддаются миниатюризации. (Этим словом называют господствующую сейчас в радиоэлектронике тенденцию к предельному уменьшению габаритов и веса и повышению экономичности аппаратуры).

На помощь кристаллу кварца пришли кристаллы кремния. Кварцевый резонатор подружился с кремниевыми транзисторами. Кварцевые часы на полупроводниках по размеру сродни хронометру, а по точности и неприхотливости оставляют его далеко позади. Они выдерживают жестокую тряску, потребляют энергии меньше, чем лампочка от карманного фонарика.

Миниатюрные кварцевые часы могут быть выполнены на микромодулях. А в будущем они безусловно столкнутся с микроэлектроникой. Словом, когда-нибудь мы станем обладателями карманных, а возможно, и наручных кварцевых часов. Одна зарубежная фирма уже сейчас выпускает необычные часы: в крошечном корпусе размещается транзисторный генератор с аккумуляторной батареей и особый электромоторчик, приводящий в движение стрелки. Правда, вместо кварцевой пластинки здесь другой маятник — колебательный контур. Но точность таких электронных часов все же выше обыкновенных наручных.



## Тысяча переговоров по одному проводу

Сколько времени тратим мы иногда, чтобы поговорить по телефону с другим городом. Два человека, между ними многие километры телефонного провода. Еще двое, и снова линия. Сто человек разговаривают одновременно: полсотни проводов, сплетаясь в многожильные кабели, вгрызаются в землю, ныряют в океанские глубины, струнами звенят между столбов.

Оказывается, арифметику можно упростить: тысячи переговоров направить в одно общее русло, в один-единственный провод; вторым, обратным, проводом служит земля. Но для этого необходима целая армия кристаллов.

Если взять тысячу шариков разного диаметра, и столько же сит, тоже с различными диаметрами ячеек, и поместить сита друг над другом, чем ниже, тем мельче, и высыпать в верхнее сито все шарики, то произойдет сортировка: в каждом сите застрянет по шарiku. Именно таков принцип многоканальной телефонной связи, причем кварцевые, или, в более широком понимании, кристаллические фильтры служат здесь ситами.

Кварцевые фильтры изобретены советским ученым Я. И. Эфруси в 1931 году. Спустя три года аналогичную схему предложил американец Мэзон.

Действие кварцевого фильтра основано на резонансных свойствах пьезоэлектрической пластинки. Подобно струне, пластинка резонирует на определенной частоте.

Заменим тысячу сит таким же количеством кварцевых пластинок с различными собственными частотами, а вместо шариков воспользуемся электрическими колебаниями, или переменными токами. Тысячу токов, каждый своей определенной частоты, передадим по одному общему проводу на большое расстояние. И позаботимся, чтобы на финише их встречали пластинки-фильтры. Тогда каждый из тысячи шариков-токов застрянет в соответствующем фильтре-сите. Задача решена: токи разделены.

Так, один-единственный провод вмещает в себя множество каналов. Мы можем заполнить их телефонными переговорами, промодулировав колебания звуковыми сигналами, как при радиопередаче, и даже заодно втиснуть в провод телевизионную программу. А можно вообще избавиться от провода: ведь радиосвязь изобретена еще в конце прошлого века.

По всей стране протянулись сейчас цепочки радиорелейных линий. В пределах прямой видимости одна от другой выстроились мачты-антенны. Через приемо-передающие радиостанции, работающие на ультракоротких волнах, проходит астрономическое число переговоров. И во всем этом участвуют магические кристаллы.

## Гиперболоид уже не фантазия

«Зоя позвонила. Вошел лакей. Она приказала, и он принес небольшой сосновый ящик, в нем лежал отрезок стальной полосы толщиной в полдюйма. Зоя вынула кусок стали и поднесла к свету камина. В толще стали были прорезаны насквозь каким-то тонким орудием полоски, завитки и наискосок, словно пером-скоростью, было написано: «Проба силы... проба... Гарин». Кусочки металла внутри некоторых букв вывалились. Роллинг долго рассматривал полосу.

— Это похоже на пробу пера, — сказал он негромко, — как будто писали иглой в мягком тесте.

— Это сделано во время испытания модели аппарата Гарина на расстоянии тридцати шагов, — сказала Зоя...».

Мы привели отрывок из фантастического романа А. Н. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина». Интуиция писателя предвосхитила одно из величайших открытий. Тогда это была чистая фантастика, не имевшая под собой научной основы, предельно наивная в описании технических принципов.

Теперь реально существуют и острый, словно тончайшая игла, световой луч, и прорезанные насквозь металлические полосы, и другие чудеса возрожденного гиперболоида. Интересно распознать природу этого удивительного устройства и познаться с его действием.

Несколько слов о том, что такое свет. Атомы светящихся тел пребывают в возбужденном состоянии. Нагревая до белого каления нить электрической лампочки, как бы нагнетают в нее энергию. С повышением температуры атомы начинают носиться все быстрее, сталкиваются все чаще. И, сталкиваясь, отдают электромагнитную энергию в виде короткой вспышки — кванта света (фотона).

Одновременно вспыхивает множество атомов. Но в обычных источниках света вспышки происходят вразнобой, словно несметное полчище ведет беспорядочную стрельбу. Энергия рассеяна. А если вспышки согласовать, сделать так, чтобы электромагнитные колебания множества атомов происходили синхронно, в такт друг другу, то мощность светового излучения неизмеримо возрастет.

Лавина фотонов, несущихся в тесном строю, и есть кинжальный луч гиперболоида. Получают его, конечно, не от свечи или особой угольной пирамидки, сделанной инженером Гариным. Современный гиперболоид, квантовый генератор, или лазер, гораздо сложнее.

Вернемся к возбужденному атому светящегося тела. Его буквально распирает от запасенной энергии. А навстречу как раз несется фотон, возникший при вспышке какого-то другого атома. Удар! В результате столкновения наш атом, наконец, избавился от избытка энергии. Родился новый фотон. Даль-

ше они летят вместе, причем новорожденный во всем подражает своему старшему брату. Электромагнитные колебания обоих квантов света в точности совпадают.

Когда каждый из этих двух фотонов встречает на пути еще по одному возбужденному атому, число фотонов удвоится, появятся четыре близнеца. Затем восемь, шестнадцать... Настоящая цепная реакция: фотоны несутся сплошной лавиной, но эта лавина, в отличие от обыкновенного светового луча, не растекается, не рассеивается в пространстве. Фотоны все как один движутся по математической (то есть бесконечно тонкой) прямой линии, след в след, почти не уклоняясь в стороны. И оттого тончайшая световая нить несет в себе исполинскую энергию.

Но при чем здесь кристаллы?

Дело в том, что лучи необычайной силы дает кристалл рубина. Именно в нем рождается лавина фотонов.

Рубиновый стерженек, похожий на незаточенный карандаш, отполировали и посеребрили, но неодинаково: с одной стороны на его торец нанесли толстый, непрозрачный слой серебра, а с противоположной — тончайший, почти прозрачный.

Так получилась важная часть излучателя. Затем позаимствовали у фотографов лампу-вспышку — конденсатор большой емкости, заряжающийся до очень высокого напряжения от батареи и затем мгновенно разряжающийся через стеклянную трубку, наполненную газом ксеноном.

Воспользуемся услугами стеклодува и намотаем эту трубку спиралью вокруг рубинового стерженька. Нажали кнопку. Трубка дает вспышку, из полупрозрачного окошка на конце рубинового стержня вырывается ослепительно красный световой луч необычайной силы, — и прибор действует.

Конечно, это лишь упрощенная схема квантового генератора. В действительности возникает необходимость в электрических импульсах напряжением до 10 тыс. в. В лампе-вспышке напряжение хотя и велико, но не настолько. Требуется и специальное устройство для интенсивного охлаждения кристалла. Впрочем, это уже детали. Важнее понять, как и почему работает квантовый генератор, какие процессы происходят в кристаллической решетке рубина. И зачем нужен именно рубин, а не обыкновенное стекло?

Предпочтение, отдаваемое рубину, объясняется просто. Его кристаллическая решетка содержит атомы хрома. Мы уже знаем, что иногда именно примесь наделяет кристалл удивительными свойствами. Так было в полупроводниках. На этом основана молектроника. И здесь все дело в примеси.

Атомы хрома отличаются неуравновешенностью. Они легко возбуждаются светом лампы-вспышки. Один из атомов, не выдержав, испускает фотон. Но он может оказаться пустоцве-

том, если летит не вдоль оси рубинового стержня, а поперек или под углом. Такой фотон и все его младшие братья, прихваченные по дороге, попросту вылетят наружу через боковую поверхность стерженька. А поскольку компания не слишком многочисленна, ее уход останется незамеченным.

Но вот один из самопроизвольно возникших фотонов-первенцев случайно направится вдоль оси стерженька, а это должно обязательно случиться, поскольку атомы хрома спешат избавиться от избытка энергии, приведшего их в возбуждение, вернуться к спокойному существованию. Обрастая в пути новыми и новыми «соратниками», такой фотон в конце концов наткнется на одно из серебряных зеркалец, прикрывающих торцы рубинового стержня, и отразится обратно. Натолкнется на второе зеркальце, снова повернет вспять. А фотонов все больше, луч все мощнее. Вот она и родилась, лавина квантов света, и носится, словно зверь в клетке, пока, наконец, не вырвется в пространство, пробив одно из зеркалец. Недаром слой серебра на рубиновом стержне очень тонок. Через это полупрозрачное оконце и стреляет лучом-молнией квантовый «гиперболоид».

Фотоны движутся со скоростью около 300 тыс. км/сек, поэтому процесс, о котором мы только что говорили, почти мгновенен. Он длится десятитысячные доли секунды.

И еще оговоримся: рубин — далеко не единственный кристалл, в котором возможно возникновение фотонной лавины. Например, с атомами хрома могут конкурировать атомы урана. Кристаллы, содержащие примесь урана или многих других редкоземельных элементов, также подходят для квантовых генераторов. Ученые могут выбирать. На первых порах посчастливилось рубину, а в будущем ему, безусловно, придется потесниться.

Любопытно, что кристаллам не удастся сохранить монополию в этой области: вместо рубинового стержня можно использовать сосуд, наполненный смесью газов. Такие квантовые генераторы также существуют.

Как многие крупные достижения науки, гиперболоид может быть применен для войны и разрушения. Но ведь и обыкновенной спичкой можно поджечь дом. Мы поговорим о мирном использовании этого открытия.

Человек тяжело болен. В глубине его глаза опухоль. Обычное хирургическое вмешательство приведет к потере зрения. Как быть?

Выручил квантовый генератор. Луч сфокусировали на опухоль, и она была выжжена.

Наш гиперболоид нужен людям. Придет время, и чудесный луч заменит резец в станках, пилу на лесоразработках, провод электропередачи.

В одной из записных книжек А. Н. Толстого есть пометки, сделанные в начале 20-х годов, когда писатель придумывал свой гиперболоид:

«Концентрация света... Луч — волос. Ультрафиолетовый луч — вместо электрического провода».

Эта техническая идея близка к осуществлению. Мощный ультрафиолетовый луч, посланный квантовым излучателем, ионизирует воздух, придает ему электропроводность. На десятки километров невидимая, но самая настоящая линия электропередачи. Тысячи киловатт электроэнергии прямо по воздуху. Не это ли ключ к решению заманчивой проблемы: беспроводной передачи энергии на большие расстояния?

Нельзя умолчать и еще об одном исключительно перспективном применении квантовых генераторов. Вспомним, что природа света и радиоволн абсолютно одинакова. Разница лишь в длине электромагнитной волны. Если постепенно укорачивать радиоволну, то в конце концов получится волна световая. Значит, радиосигналы можно передавать и с помощью света. В некоторых случаях это даст огромные преимущества: благодаря заостренности фотонного луча энергия не будет без пользы рассеиваться в пространстве, луч можно направить очень точно в заданную точку, размеры излучателя световых волн сравнительно малы. Все это чрезвычайно важно для связи между космическими кораблями, для межпланетной сигнализации. Сами посудите: для надежной радиотелефонной связи между Землей и Марсом, по расчетам ученых, требуется передатчик мощностью в миллион ватт. А квантовый генератор обеспечит бесперебойную связь при мощности всего в несколько ватт.

И еще одно колоссальное преимущество световых волн. Не зря развитие радиотехники идет в сторону укорочения волн. Сначала были освоены длинные и средние волны, затем короткие, ультракороткие... Оказывается, с ростом частоты колебаний (уменьшением длины волны), «емкость» эфира резко повышается. На длинных волнах тесно, на ультракоротких просторнее, а на световых... Здесь с помощью одного луча, применяя принципы многоканальной связи, о которых мы говорили, можно передавать одновременно миллионы телефонных переговоров, тысячи телевизионных программ \*.

### **Человек — творец кристаллов**

Кристаллы уверенно входят в промышленность, и возникает проблема: как добывать их в нужном количестве?

Запасы кристаллов, на первый взгляд, щедро дарит природа.

---

\* Подробнее о применении лазеров рассказано в брошюре Ю. Борисова и В. Гаврилова «Квантовые генераторы». Изд-во «Знание», 1963 (серия «Техника»).

Мы не случайно сказали: на первый взгляд. Дело не только в том, что добыча кристаллического сырья очень трудоемка, а потому дорога. Взять хотя бы природный кристалл кварца. В его толще легко обнаружить множество дефектов. Пузырьки, трещины, включения других минералов. А нередко кристалл состоит из нескольких сростков, двойников. И лишь незначительная часть объема кварцевого кристалла пригодна для производства пьезоэлектрических пластинок. Даже в кристаллах высшего сорта (их почтительно именуют уникальными) для изготовления пластинок может быть использовано лишь 20% объема, в кристаллах третьего сорта всего 1—2%.

Как видите, на щедрость природы рассчитывать не приходится. Кварц один из самых распространенных минералов. А вот рубин не так давно относили к драгоценным камням и довольствовались крохами, вырванными у природы. Потом научились выращивать превосходные кристаллы рубина в искусственных условиях.

С кварцем было сложнее. Синтетические кристаллы кварца получались настолько мелкими, что об их практическом применении не могло быть и речи. Много понадобилось труда и изобретательности, чтобы научиться выращивать искусственный кварц, пригодный для промышленных целей. Зато теперь искусственные кристаллы кварца по чистоте и однородности значительно лучше природных. Несмотря на сложность технологического процесса, стоимость пластинок понизилась: отходов стало меньше.

Искусственный кварц — не совсем правильное название. Кристаллы-то самые натуральные. Только получают их искусственно в специальных герметических резервуарах, автоклавах, при высокой температуре и под большим давлением.

Выращивают и другие пьезоэлектрики. Среди них интересны кристаллы сложного химического состава: виннокислый калий и этилендиаминтартрат. Эти кристаллы растворимы в воде и легко обрабатываются. Их применяют в многоканальной телефонной связи.

Еще один синтетический пьезоэлектрик — фосфат аммония. Он необходим в ультразвуковой технике. Фосфат аммония обладает довольно сильным пьезоэлектрическим эффектом, он прочен, плавится при температуре около 190°. Этот кристалл растворим в воде, но влагостоек и может подолгу находиться во влажном воздухе.

Большой интерес представляют поликристаллические пьезоэлектрики, или текстуры. Они состоят из множества одинаково ориентированных кристалликов-зерен. Если отдельные кристаллики обладают пьезоэлектрическими свойствами, то и текстура в целом ведет себя как пьезоэлектрик.

Пьезотекстуру легко сделать самим из сегнетовой соли, отходов виноделия. Это очень сильный пьезоэлектрик, одно

время широко применявшийся в звукозаписывающих аппаратах. Кристаллы сегнетовой соли впитывают влагу, их свойства существенно зависят от температуры. Именно поэтому в современных радиоприемниках и проигрывателях звукозаписывающих аппаратов используются другие, более стойкие, кристаллы, например, из фосфата аммония.

Насыплем горсть сегнетовой соли в закрывающийся стеклянный сосуд и поместим его в кипящую воду. После того как сегнетова соль расплавится и примет температуру кипящей воды, откроем сосуд и опустим в него жесткую волосяную кисть. Подождем, пока кисть прогреется, а сами тем временем подготовим основание для текстуры. Лучше всего подойдет кусочек листового металла с тщательно очищенной поверхностью.

Слегка отожмем кисть и начнем наносить расплав на поверхность металла. Штрихи надо накладывать в определенном направлении, проводя кистью по одним и тем же местам несколько раз, пока блеск расплава не изменится, что служит признаком начала кристаллизации.

Быстро, чтобы слой сегнетовой соли не затвердел, опустим кисть в сосуд и с помощью проволоочки или лезвия ножа очистим ее от кристаллического осадка. Затем нанесем на пластинку новый слой расплава, только штрихи будем класть в обратную сторону.

Несколько дней потребуется на созревание текстуры, после чего в ней можно наблюдать пьезоэлектрический эффект. Слегка увлажним поверхность текстуры и наложим на нее электрод, кусочек алюминиевой фольги. Чтобы фольга держалась, ее нужно притереть к увлажненной поверхности ваткой. Вторым электродом будет металлическая пластинка, на которую нанесена текстура. Присоединив к электродам проводники, получим простейший пьезоэлектрический телефон, наушник. Включаем концы проводников в радиотрансляционную сеть, и наш самодельный кристалл обретает голос.

Пьезотекстура из сегнетовой соли сегодня уже не имеет практического значения для ультразвуковой техники, а вот пьезоэлектрическая керамика (она тоже относится к текстурам) необходима.

Тщетно искать пьезоэлектрические свойства в осколке фарфоровой чашки. Фарфор — белая глина, прошедшая обжиг, не текстура. Зерна обычной керамики ориентированы по-разному, да и пьезоэлектрических свойств они не имеют.

Иное дело специальная керамика на основе титаната бария, состоящая из пьезоэлектрических кристалликов. Ее можно поляризовать. Под воздействием высокого электрического напряжения зерна такой керамики выстраиваются правильными, одинаково направленными шеренгами. Образуется

пьезоэлектрическая текстура. В отличие от текстуры из сегнетовой соли она механически прочна и не растворяется в воде.

Замешивая пьезоэлектрические кристаллики в резину или пластмассу, можно после поляризации получить новый пьезоэлектрический материал: упругий, гибкий, прочный.

Перспективы здесь открываются самые неожиданные. Изготовили, например, пьезоэлектрическую текстуру: свинцово-титано-циркониевую керамику. Она оказалась исключительно сильным пьезоэлектриком, позволившим изобрести искровой насос.

Пластинку из керамики поместили между двумя электродами и спрятали в пластмассовую коробочку. Наружу выглядывают лишь стальные усики, присоединенные к электродам. Концы этих двух усиков находятся на близком расстоянии, но не соприкасаются. Сожмите искровой насос пальцами, и между концами усиков проскочит искра. Напряжение достигает 30 тыс. в.

Об энергетическом значении насоса говорить еще преждевременно. Однако уже сейчас он претендует на место в технике. И не где-нибудь, а в автомобилестроении. Системы зажигания горючей смеси в моторах сложны, неудобны и капризны. Индукционные катушки с тысячами витков проволоки, прерыватели с вечно обгорающими контактами... А сколько мучений причиняет шоферам севший аккумулятор, когда искра из жирной и голубой превращается в тощую и желтоватую? Искровой насос, вот что нужно.

О необычайно широких возможностях пьезотекстур свидетельствует и такой пример. Из пьезокерамики изготовили хирургический зонд для обнаружения осколков металла или костей в глубоких ранах.

Обычно хирурги работают на ощупь. Они исследуют глубокие раны с помощью длинных, слегка изогнутых металлических стержней, зондов. Вводя зонд в рану, хирург медленно ощупывает ее стенки и дно, ищет инородные предметы, которые необходимо извлечь при операции. Когда такой предмет, например осколок снаряда или кусочек кости, ударяется о зонд, в зонде возникает упругая волна, и рука хирурга улавливает легкое сотрясение.

Чтобы научиться в совершенстве владеть зондом и безошибочно угадывать характер инородного предмета, нужен большой опыт. Дело значительно упростится, если упругую волну, возникающую в зонде при его столкновении с осколком, улавливать не рукой, а чувствительным пьезоэлектрическим прибором, напоминающим по принципу действия звуко-сниматель. Такой пьезоэлектрический зонд удобен и прост. Применение керамики, не растворимой в воде, позволяет кипятить его перед употреблением.



Вот какие возможности открывают перед нами синтетические кристаллы, кристаллы, в полном смысле слова созданные человеком!

Наш рассказ подходит к концу. Мы познакомились с кристаллами-радиоприборами, различными по физическим свойствам, по принципам использования, но одинаково важными, нужными, перспективными для науки и техники.

Радиокристаллография (да простится автору это, еще не приобретшее прав гражданства, слово!) уже не раз высказала веское суждение по самым злободневным научным вопросам, внесла достойный вклад в сокровищницу знаний. Но это лишь первые шаги.

Когда-то люди не подозревали о магической силе кристаллов и, даже столкнувшись с ее проявлениями, не поняли, не оценили. Так, пьезоэлектрический эффект десятки лет не находил применения.

А сейчас? Сегодня мы ждем от магических кристаллов новых чудес и не дадим этим чудесам залежаться, сумеем их использовать. Перед наукой стоит задача — создать и исследовать новые кристаллические материалы. И еще до конца нужно решить проблему чистоты. Ведь свойства кристаллов иной раз зависят от ничтожной примеси. Научиться управлять микроскопическими добавками примесей, пропалывать кристаллическую решетку от сорняков и прививать к ней атомы того или иного химического элемента в нужном количестве и по желанию — одна из целей радиокристаллографии.

**7 коп.**

**Индекс  
72924**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1964**