

А.Ф. Иоффе

**Электронные
полупроводники**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
А11

А11 **А.Ф. Иоффе**
Электронные полупроводники / А.Ф. Иоффе – М.: Книга по Требованию, 2021. – 92 с.

ISBN 978-5-458-57812-7

Абрам Фёдорович Иоффе (17 (29) октября 1880, Ромны, Полтавская губерния — 14 октября 1960, Ленинград) — российский и советский физик, организатор науки, обыкновенно именуемый «отцом советской физики», академик (1920), вице-президент АН СССР (1942—1945), создатель научной школы, давшей многих выдающихся советских физиков, таких как А. Александров, М. Бронштейн, Я. Дорфман, П. Капица, И. Кикоин, Б. Константинов, И. Курчатов, Н. Семёнов, Я. Френкель, Г. Б. Абдуллаев и другие.

ISBN 978-5-458-57812-7

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Настоящей книжкой Технико-теоретическое Издательство начинает выпуск серии монографий по вопросам новейшей физики. Первые выпуски серии посвящены работам советских ученых, а именно работам Комбината физико-технических институтов в связи с исполняющимся пятнадцатилетним юбилеем его деятельности. В дальнейшем в серию будут включены научно-исследовательские работы не только других крупных научно-исследовательских учреждений СССР (Оптического института, Харьковского физико-технического института и др.), но и работы иностранных ученых. В связи с этим первоначальный состав редакции серии будет расширен, и серия охватит всю совокупность проблем, разрабатываемых современной физикой.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящий выпуск серии „проблемы новейшей физики“ выходит в связи с исполняющимся осенью 1933 года пятнадцатилетием деятельности институтов Физико-Технического Комбината (Ленинградского Физико-Технического института, Электро-Физического института, Ленинградского института Химической Физики, Уральского Физико-Технического института и института Телемеханики и связанного с Комбинатом АгроЦ-Физического института. Наиболее рациональной формой, в которой следует отметить этот юбилей, мы сочли выпуск серии монографий по важнейшим проблемам, составлявшим предмет работ институтов. Монографии эти стремятся не столько отобразить деятельность институтов, сколько дать общую картину положения того или иного вопроса на сегодняшний день. Обзор современного состояния важнейших проблем, волнующих физику, и выяснение роли советских ученых в их разрешении представляют общий интерес, и поэтому должны встретить сочувственное внимание советской научной общественности. Подобные монографии помогут также нашим подрастающим научным кадрам быстрее включиться в творческую исследовательскую работу и продвинуть ее вперед.

Редакция.

В В Е Д Е Н И Е

Изучение полупроводников представляет в настоящее время исключительный интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. Теоретически на полупроводниках можно изучить энергетические уровни электронов и их поведение в кристаллической решетке под влиянием теплового движения, света, электрического и магнитного поля. В свете новой квантовой механики эти данные позволяют глубоко проникнуть в электрические свойства материи. Металлы и изоляторы с этой точки зрения являются предельными, вырожденными случаями. Типичным для нашей картины приходится считать полупроводник.

Практическое значение полупроводников определяется их выпрямительными свойствами (в радиотехнике, для переменных токов, в высоковольтной и измерительной технике) и фотоэлектрическими явлениями (изменением сопротивления при освещении и появлением электродвигущей силы на границе с металлом или электролитом). В оксидной изоляции мы также имеем дело с электронными полупроводниками.

Помимо этих внешних вошедших уже в практику применений полупроводники открывают широкие возможности благодаря чрезвычайному разнообразию своих свойств. Небольшими примесями, меньше процента, можно в миллионы раз изменять сопротивление. Так же сильно влияют температура и свет. Поэтому, например, технические задачи использования термоэлектричества и фотоэлектричества, явно безнадежные при пользовании металлами, получают новые выходы благодаря полупроводни-

кам. Изучение их на протяжении нескольких последних лет уже открыло, на ряду с давно известным изменением сопротивления, появление фотоэлектродвижущей силы на границе с металлом (тысячные и сотые вольта), диффузионные фотоэлектродвижущие силы (сотые и десятые вольта) и, наконец, фотомагнитные, достигающие нескольких вольт. Технические перспективы этих новых свойств можно будет оценить лишь после выяснения их природы и управляющих ими законов. Во всяком случае, они усиливают интерес к этой до последних лет совершенно забытой области физики. Многие из описанных здесь опытов и соображений еще не были опубликованы и появятся здесь ранее, чем подробное их изложение будет напечатано в физических журналах. Они являются результатом работы, произведенной за последние месяцы рядом сотрудников Физико-технического института.

За последние годы появилось несколько статей, дающих сводку опытного и теоретического изучения полупроводников. На русском языке: М. П. Бронштейн и А. Н. Арсеньева в Журнале Техн. физики, т. II, 1932 г., и ряд обзорных статей в I т. за 1931 г. На английском языке книга A. L. Hughes и L. A. Du-Bridge „Photoelectric phenomēa“ и реферат Nix в „Rev. of Mod. Physics“ 1932 г. и Grondahl „Rev. of Mod. Phys.“, 1933 г. На немецком имеется вышедшая в 1926 г. книга B. Gudden'a „Lichtelektrische Erscheinungen“ и напечатанные в № 1 Phys. Z. der Sowjetunion 1932 г. доклады 1-й конференции и в 1933 г. 3-й конференции по полупроводникам. Поэтому в настоящем обзоре преимущественно учитываются новейшие работы Физико-технического института.

I. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУПРОВОДНИКА.

В достаточно разреженном газе каждую молекулу можно рассматривать как самостоятельную электрическую систему, обладающую серией квантовых уровней. Электроны занимают обычно все низшие энергетические уровни, причем на каждом из них может находиться не больше двух электронов с противоположно направленными осями их механических и магнитных моментов. Этим требованием определяется число занятых уровней; переход на один из свободных уровней большей энергии называется возбуждением атома или молекулы.

Когда большое число таких молекул конденсируется в жидкое или твердое тело, то под влиянием взаимных электрических полей энергия внешних валентных уровней значительно изменяется. Взаимодействия молекул настолько сильны, что все тело приходится рассматривать как одну систему. Идентичные прежде уровни отдельных молекул теперь получают несколько различные значения, и теперь уже во всей системе не должно быть больше двух электронов, занимающих один и тот же квантовый уровень. Это условие получает особенно резкую форму, когда молекулы объединяются в правильно построенный кристалл, где все они поставлены в одинаковые условия взаимодействия. N одинаковых уровней расщепляется на N очень близких друг к другу, но различных уровней. Вместо каждого уровня молекулы появляется полоса из N уровней кристалла, на которых может разместиться $2N$ электронов. Самый кристалл можно рассматривать с электрической точки зрения как

периодическое по трем направлениям поле зарядов. По квантовым уровням этого периодического поля размещены электроны. Если внутренние электроны K и L уровней, находящиеся под преобладающим действием своего атомного ядра и можно связывать с данным атомом, то валентные электроны не локализованы, а являются коллективом электронов всей кристаллической решетки и связаны с системой уровней всего кристалла.

Все внешние электроны решетки приходится, таким образом, считать свободными в том смысле, что они не связаны с данным атомом. Но их свобода связана запрещением переходить на занятые уже (двумя другими электронами) уровни. Если число „свободных“ электронов ровно вдвое больше числа уровней той энергетической полосы, в которой они находятся, то электроны не могут изменить своего энергетического состояния, оставаясь в этой полосе. В такой системе никаких процессов, связанных с изменением квантовых состояний, ожидать нельзя. Следовательно электроны не могут участвовать ни в диффузии, ни в электрическом токе, связанных с изменением количества движения и кинетической энергии. Электроны хотя и „свободны“, но не могут перемещаться внутри кристалла ни под действием электрического поля, ни под влиянием разности температур или концентраций и не являются электронами проводимости. Наоборот, если число валентных электронов меньше половины числа уровней данной полосы, только часть уровней заполнена, остальные же свободны, и электроны могут перераспределяться по этим уровням, изменяя свою энергию или количество движения. Они могут участвовать в прохождении электрического тока. Такой случай мы имеем, например, при образовании натрия. Каждый атом обладает одним валентным электроном. Кристалл натрия, состоящий из N атомов, обладает полосой из N уровней с N электронами, — в то время как имеется $2N$ мест.

Мы получаем металл, в котором электроны свободны, и участвуют в проводимости, диффузии, теплопроводности.

В противоположность этому, первый случай (где все уровни были заняты соответственным числом пар электронов) отвечал бы модели изолятора без электронной проводимости. Но здесь надо учесть еще одно обстоятельство. Кроме того наименее энергетического уровня, который занимал электрон в атоме и расщеплением которого в N уровней создана была полоса уровней кристалла, в атомах имелись и более высокие свободные уровни. В кристаллической решетке каждый из них дает расщепленную полосу из N уровней. Положение полос „возбуждения“ по отношению к нормальной полосе различно.

Если полоса возбуждения перекрывается нормальной полосой без промежутка между ними, то в кристалле появляется сплошная полоса из $2N$ уровней, на которой размещено всего $2N$ электронов: остается еще $2N$ свободных мест. Такой кристалл окажется проводником — металлом, в котором все $2N$ электронов могут участвовать в проводимости при любой температуре.

Если же между полосой нормальных уровней и уровнями возбуждения остается промежуток, не заполненный возможными для данного кристалла квантовыми уровнями, то электроны в нормальном состоянии не участвуют в проводимости. Однако, тепловое движение, свет, ионизирующие лучи могут сообщить тому или другому электрону энергию, достаточную, чтобы перевести его через запрещенную зону в полосу свободных уровней возбуждения; электронов окажется гораздо меньше, чем свободных мест, попавшие же в полосу возбуждения будут переносить ток и тепло. В отличие от металла, число электронов проводимости не равно общему числу валентных электронов, а составляет только небольшую часть его, зависящую от того агента, который перевел электроны в полосу возбуждения, — от температуры, силы

света. Этот случай соответствует модели электронного полупроводника.

Чем меньше разность энергий нормальной и возбужденной полосы, тем больше электронов получат при данной температуре достаточную для перехода в полосу проводимости энергию, тем меньше частота света, способного перевести электроны в полосу уровней проводимости и вызвать фотопроводимость полупроводника. В переносе тока могут участвовать не только электроны, но и ионы, когда разность энергий двух электронных полос больше, чем работа диссоциации целых ионов из кристаллической решетки. Так, работа диссоциации иона натрия в решетке каменной соли составляет всего около 1 вольта, иона хлора—3 вольта, работа же перевода электрона в следующую энергетическую полосу превышает 5 вольт; средняя энергия теплового движения при 0° С—0,025 вольта. В таких кристаллах основными носителями тока являются электролитические ионы, а не электроны. При тех соотношениях, которые имеют место в каменной соли, проводят только ионы натрия. Иногда же мы имеем одновременно и электронную и ионную проводимость. Это смешанные проводники.

Однако свет соответственной частоты или ионизирующие лучи могут и в чисто электролитически проводящих кристаллах создавать электрическую фотопроводимость, переводя электроны в полосу свободных уровней кристалла.

Часто сорванные светом или рентгеновыми лучами электроны связываются не с исходными, а с иными ионами решетки. В решетке каменной соли, например, электроны, принадлежавшие коллективу ионов хлора, обладают наибольшей энергией и образуют в нормальном случае полосу с наибольшей энергией. Ультрафиолетовый свет или рентгеновы лучи переводят некоторые из этих „хлорных“ электронов в полосу уровней проводимости кри-

сталла. Часть из них затем связывается с определенными ионами натрия, образуя отдельные нейтральные атомы натрия, расположенные среди периодического поля ионной решетки. Электроны этих атомов отличаются по своей энергии от остальных и создают новую полосу в оптическом спектре поглощения кристалла, придавая видимую окраску кристаллу. Энергия электронов, связанных с атомами натрия, выше, чем у коллектива хлорных электронов; для перевода их в полосу возбужденных уровней кристалла достаточно 1,5—2 вольт, так что видимый свет способен уже вызывать фотопроводимость. В отличие от только что рассмотренного случая фотопроводимости, в таких окрашенных предварительной ионизацией кристаллах число электронов проводимости определяется числом отдельных атомов натрия в ионной решетке. Только связанные с ними электроны создают фотопроводимость в видимом свете. Иногда атомы коагулируют в коллоидные частички, вкрапленные в кристалл. Такие же коллоидные включения получаются при прогреве соли в парах натрия, проникающих сквозь несовершенства кристаллической решетки внутрь кристалла.

Роль отдельных атомов, созданных предварительной ионизацией и вкрапленных в решетку кристалла, могут играть и молекулы химической примеси, введенной в кристалл при кристаллизации или путем диффузии. Энергия электронов примеси обычно больше энергии нормальных уровней; для перевода их из примеси в полосу уровней проводимости нужно меньше работы. Поэтому при температурах, при которых основные уровни дают еще ничтожное число электронов проводимости, диссоциация с примесей получает преобладающее значение. Так, при комнатной температуре достаточно 1% избыточных атомов кислорода в кристаллах Cu_2O , чтобы повысить число электронов проводимости в миллион раз. Впрочем имеющийся опытный материал не позволяет го-

ворить о роли примесей вообще, а только о роли добавочных электроотрицательных атомов кислорода, серы, иода в ненасыщенных соединениях Cu_2O , CuCl , Cu_2S , AgJ и т. п. Другие примеси иногда, как и в металлах, понижают электропроводность полупроводника.

Когда часть электронов из нормальной сплошь заполненной полосы переходит в полосу проводимости или связывается с другими ионами, то в нормальной полосе освобождается ряд уровней, а следовательно и электроны нормальных уровней получают возможность участвовать в электропроводности. Если свободна лишь небольшая часть уровней данной полосы, электроны, меняя свою энергию или количество движения, могут переходить только на эти уровни, освобождая занятые ими прежде квантовые состояния. Число электронов, скорость которых направлена по направлению поля, возрастает за счет уменьшения числа электронов противоположного направления. Вся масса электронов перемещается с некоторой скоростью вдоль поля и дает ток. Такое перемещение незамещенных электронами уровней, движение пустых мест в сплошь заполненной электронами полосе квантовых состояний соответствует движению положительных зарядов. По отношению к полупроводникам эти представления были впервые введены М. П. Бронштейном.

Вместо того, чтобы рассматривать освобождающиеся уровни всей решетки, мы можем представить себе, что удаление электрона оставляет в данном участке кристалла положительный заряд, который компенсируется другим электроном из соседнего участка. В электрическом поле это замещение происходит преимущественно в направлении потока электронов, а положительный заряд перемещается туда, откуда пришел электрон. Это место будет занято новым электроном и т. д. Участок с недостающим электроном, обладающий избыточным положительным зарядом, перемещается таким образом