

**М.И. Кузнецов**

# **Основы электротехники**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39  
ББК 32  
М11

М11 **М.И. Кузнецов**  
Основы электротехники / М.И. Кузнецов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 560 с.

**ISBN 978-5-458-44225-1**

Книга содержит основные сведения по электростатике, о постоянном токе, химических действиях постоянного тока, тепловых действиях электрического поля, электромагнетизме и электромагнитной индукции, однофазном и трехфазном переменном токе, трансформаторах, асинхронных и синхронных двигателях, машинах постоянного тока, выпрямителях, электроизмерительных приборах, аккумуляторах и электроприводе. Даны также сведения по технике безопасности в электрических установках. Книга может быть использована в качестве учебного пособия для учащихся профессионально-технических училищ и средних школ, а также для повышения квалификации и самообразования рабочих-электриков.

**ISBN 978-5-458-44225-1**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2024

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, клякс, 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.



крупнейшие в мире гидроагрегаты для Куйбышевской ГЭС им. XXII съезда партии единичной мощностью 105 тыс. *квт.* Ныне созданы турбины по 150, 200 и 300 тыс. *квт.* В 1960 г. мощность всех электростанций составила 66 700 тыс. *квт.*

Совершенствование энергетического оборудования дает возможность снижать удельные расходы топлива, капитальные затраты на сооружение электростанций и себестоимость электроэнергии. Электрическая энергия, вырабатываемая электростанциями, широко используется в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и для бытовых нужд.

Для привода в движение станков, машин и различных механизмов на заводах, фабриках, в МТС и на других производствах в настоящее время преимущественно пользуются удобными и экономичными электрическими двигателями.

В электрических печах плавят металл, получают сталь и различные сплавы.

Электричество широко применяется при получении алюминия, различных химических продуктов и многих других веществ. Электрическая сварка и резка металлов имеют чрезвычайно большое распространение.

Только с развитием электротехники появилась возможность применять в промышленности новые технологические процессы, осуществлять широкую автоматизацию производства, создавать новые высокопроизводительные машины.

Электричество приводит в движение электропоезда, трамваи и троллейбусы, поднимает тяжести, помогает находить руды, уголь и нефть в недрах земли.

Внедрение электрической энергии в сельское хозяйство позволяет максимально механизировать большинство самых трудоемких работ, резко сократить сроки их выполнения и значительно увеличить выпуск сельскохозяйственной продукции.

Электрическая энергия широко применяется и в домашнем быту.

Благодаря электричеству стали возможны многие замечательные открытия нашего времени. Радиосвязь и радиолокация, проникновение в недра атома и разрушение его — все это производится при помощи электричества. Электричество позволяет нам слышать за многие тысячи километров, дает возможность видеть в полной темноте и на значительном расстоянии, открывает глазу работу внутренних органов человеческого тела и лечит болезни. Чтобы только перечислить все то, что делается при посредстве и с помощью электричества, понадобилось бы немало страниц.

С электрическими явлениями люди были знакомы очень давно, но практическое использование этих явлений началось в начале XIX в. Большое количество открытий и изобретений в области электротехники было сделано учеными и изобретателями нашей страны. Первым из них нужно назвать основополож-

ника русской науки М. В. Ломоносова. В середине XVIII в. им была создана теория атмосферного электричества. Ломоносов полагал, что существует связь между электрическими и световыми явлениями, что было более чем через 100 лет подтверждено Максвеллом.

В 1802 г. профессор физики Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петров получил электрическую дугу и указал на возможность ее практического применения для освещения и плавки металлов. В 1832 г. русский изобретатель П. Л. Шиллинг осуществил первую в мире телеграфную связь при помощи стрелочного телеграфа, который в 1839 г. был заменен пишущим телеграфом, изобретенным русским академиком Б. С. Якоби (американец Морзе изобрел свой телеграфный аппарат в 1840 г. и применил его в 1844 г.).

Русский академик Э. Х. Ленц установил в области электромагнитной индукции закон, носящий его имя (правило Ленца). Он же тщательно исследовал вопрос о выделении энергии электрическим током и пришел к закону теплового действия тока (закон Джоуля—Ленца).

В 1834 г. Б. С. Якоби изобрел и в 1838 г. построил первый электрический двигатель. В 1836 г. Б. С. Якоби разработал процесс гальванопластики. В 1872 г. профессор Московского университета А. Г. Столетов исследовал намагничивание железа, что дало возможность производить расчеты магнитных цепей электрических машин. В 1873 г. русский изобретатель А. Н. Лодыгин создал первую лампу накаливания сначала с угольной, а потом с металлической (вольфрамовой) нитью.

В 1876 г. П. Н. Яблочков изобрел электрическую «свечу». Это изобретение получило широкое распространение в ряде стран Европы и стало известно там под названием «русского света». Яблочковым разработаны конструкции генераторов переменного тока и изобретен трансформатор. Независимо от Яблочкова трансформатор был сконструирован механиком Московского университета И. Ф. Усагиным. В 1875 г. русский инженер Ф. А. Пирцкий впервые осуществил передачу электрической энергии (6 л. с.) на расстояние (1 км), а в 1880 г. он построил и испытал первый в России трамвайный вагон с подвесным электродвигателем, питавшимся через рельсы и колеса.

Д. А. Лачинов (1842—1902), русский физик и электротехник, один из первых теоретически доказал возможность и целесообразность передачи электрической энергии на большие расстояния. В 1882 г. русский инженер Н. Н. Бенардос изобрел электрическую сварку с применением угольных электродов. В 1888 г. инженер М. О. Доливо-Добровольский изобрел систему трехфазного тока, в 1889 г. построил трехфазный трансформатор, а в 1891 г. — асинхронный электродвигатель.

В 1893 г. на Всемирной выставке в Париже Н. Г. Славянов

получил золотую медаль за способ электросварки металлическим электродом. В 1895 г. А. С. Попов изобрел радиотелеграф.

Больших достижений в области электротехники добились иностранные ученые. Среди них необходимо отметить прежде всего Фарадея и Максвелла. Майкл Фарадей (1791—1867), английский ученый, установил законы электролиза, обнаружил вращение проводника с током вокруг полюса постоянного магнита, открыл явление электромагнитной индукции.

Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879), английский физик, основоположник теории электромагнитного поля, дал уравнения электромагнитного поля, теоретически доказал существование электромагнитных волн, электромагнитную природу и давление света и работал в области кинетической теории газов.

В деле развития электротехники и ее практического применения большая роль принадлежит советским ученым: Г. М. Кржижановскому, М. А. Бонч-Бруевичу, С. И. Вавилову, А. Ф. Иоффе, М. А. Шателену, К. И. Шенферу, Е. О. Патону, А. В. Винтеру и многим другим.

В СССР за шесть пятилеток проведена огромная работа по электрификации всех отраслей народного хозяйства.

Профессия электрика очень увлекательна и интересна. Но чтобы стать передовым работником нашего социалистического хозяйства, электрик должен много и упорно учиться и непрерывно повышать уровень своих теоретических и практических знаний.

Настоящая книга рассчитана на учащихся профессионально-технических училищ, в которых электротехника является самостоятельным и специальным предметом. Кроме того, эта книга может быть учебным пособием для учащихся средней школы с производственным обучением. Знания по математике в объеме 8 классов средней школы дают возможность учащимся при пользовании книгой свободно оперировать с встречающимся в ней математическим материалом.

Несколько своеобразное расположение отдельных вопросов в данной книге объясняется тем, что преподавание физики в программе обучения учащихся электротехнических профессий не предусмотрено.

---

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### § 1. Молекулы и атомы

Изучая в течение ряда столетий различные вещества, из которых состоит окружающий нас мир, наука пришла к выводу, что, несмотря на разнообразие встречающихся веществ, все они состоят из простых элементов. Было установлено, что в природе существует 102 химических элемента. Каждый элемент состоит из мельчайших частиц — атомов. Атомы различных элементов не похожи друг на друга и обладают определенными, только им присущими свойствами. Наоборот, атомы одного элемента одинаковы и сохраняют все признаки данного элемента. Атомы одного и того же химического элемента, обладающие одинаковой величиной заряда атомного ядра, но различающиеся своей массой, несколько отличающиеся друг от друга своими физическими и химическими свойствами и занимающие в таблице периодической системы элементов одно и то же место, называются изотопами. Сочетание однотипных атомов образует простое вещество, сочетание разнотипных атомов образует сложное вещество. Группа химически соединившихся атомов называется молекулой. Так, например, молекула воды состоит из трех атомов: двух атомов водорода и одного атома кислорода. Молекула серной кислоты состоит из двух атомов водорода, одного атома серы и четырех атомов кислорода. В молекулах некоторых кислот содержатся сотни атомов. В молекулу белка входят тысячи атомов водорода, углерода, кислорода, азота, фосфора и серы.

Изучая свойства отдельных элементов, знаменитый русский химик Д. И. Менделеев в 1869 г. расположил все известные в то время элементы в порядке возрастания их атомного веса, начиная с легкого водорода и кончая тяжелыми атомами свинца и висмута. При этом Д. И. Менделеев заметил, что физические и химические свойства элементов периодически повторяются. Учитывая величину атомного веса и свойства элементов, Менделеев разделил свою таблицу на 92 клетки. В момент составления таблицы в нее было внесено 64 известных элемента. Не огранич-



ваясь размещением в своей таблице известных элементов, Д. И. Менделеев, глубоко убежденный, что им открыт один из важнейших законов природы, предположил существование в природе не открытых еще элементов и дал характеристику их основных свойств. Позднейшее открытие элементов галлия, скандия, германия и других блестяще подтвердило научное предвидение Д. И. Менделеева.

## § 2. Общие понятия об электричестве и электронной теории

Долгое время существовало мнение о том, что атомы являются первичными, неразложимыми и неизменными частями всех тел природы, откуда и произошло название «атом», что по-гречески значит «неделимый».

В конце прошлого столетия, пропуская электрический ток высокого напряжения через трубку с сильно разреженным газом, физики заметили зеленоватое свечение стекла трубки, вызванное действием невидимых лучей. Светящееся пятно располагалось против электрода, соединенного с отрицательным полюсом источника тока (катода). Поэтому лучи получили название катодных. Под действием магнитного поля светящееся пятно смещалось в сторону. Катодные лучи вели себя так же, как проводник с током в магнитном поле. Смещение зеленоватого пятна происходило также под влиянием электрического поля, причем положительно заряженное тело притягивало катодные лучи, отрицательно заряженное тело отталкивало их. Это навело на мысль, что сами катодные лучи представляют собой поток отрицательных частиц — электронов.

В 1895 г. физик Рентген открыл особый вид лучей, не видимых простым глазом, но способных проникать сквозь многие непрозрачные тела. В настоящее время рентгеновские лучи широко используются в медицине и промышленности. В 1896 г. было обнаружено, что вещество, содержащее уран, способно в темноте действовать на фотографическую пластинку. Вскоре после этого Мария Склодовская-Кюри и ее муж Пьер Кюри обнаружили, что, подобно урану, способностью испускать невидимые лучи, проникающие через непрозрачные тела, обладает элемент торий. В 1898 г. супруги Кюри открыли два новых элемента — радий и полоний, обладающие тем же свойством, какое было обнаружено у урана и тория. Способность некоторых элементов испускать невидимые лучи была названа Кюри радиоактивностью. Исследуя радий, Кюри обнаружили, что этот серебристый мягкий металл светится в темноте, разлагает воду на кислород и водород, действует на фотографическую пластинку, непрерывно выделяет тепло. Распадаясь, радий испускает лучи трех видов: альфа-, бета- и гамма-лучи. В результате непрерывного распада радий превращается в устойчивый элемент — свинец.

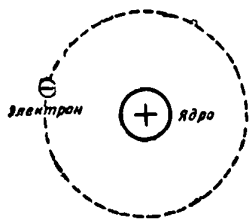
Катодные лучи, лучи Рентгена, радиоактивность и другие физические, химические и магнитные явления позволяют сделать вывод, что атом не является неделимой частицей вещества, а имеет сложное строение. Научные исследования показали, что атомы состоят как из электрически заряженных, так и из нейтральных частиц.

Согласно современной теории строения вещества каждый атом состоит из ядра, вокруг которого вращаются электроны.

Ядро заряжено положительным электричеством, а электроны — отрицательным.

Атом обычно не проявляет никаких электрических свойств (нейтрален). Однако это указывает не на отсутствие в нем электричества, а только на то, что положительного и отрицательного электричества имеется в нем поровну.

Атомы различных химических элементов отличаются друг от друга своим весом (атомный вес), величиной положительного заряда ядра и числом электронов, вращающихся



Фиг. 1. Схема строения атома водорода

ся вокруг ядра. Так, например, в атоме водорода — самого легкого и простого по строению элемента — вокруг ядра вращается только один электрон (фиг. 1), в атоме меди — 29 электронов, в атоме золота — 79 электронов и т. д. Числу электронов, вращающихся вокруг ядра, всегда соответствует порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Например, атом 92-го элемента таблицы — урана — имеет ядро, заряженное 92 единицами положительного электричества, и 92 электрона, вращающихся вокруг ядра по многочисленным орбитам.

Те из вращающихся в атоме электронов, которые расположены на крайних орбитах, связаны с ядром слабее, чем электроны, находящиеся на ближних к ядру орбитах. Под действием соседних атомов или вследствие других причин можно заставить крайние электроны покинуть свои орбиты.

Атомы всех металлов имеют эти неустойчивые внешние электроны, которые легко покидают свои орбиты, чем и объясняется хорошая электропроводность металлов.

Атомы ряда других веществ прочно удерживают электроны около ядра и не дают им свободно уходить из атомов. Такие вещества плохо проводят электричество.

Русские ученые Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси еще в 1912 г. поставили интересный опыт. Было взято металлическое кольцо (фиг. 2), вблизи которого против середины помещена маленькая магнитная стрелка. Стрелка устанавливалась в направ-

лении север—юг. Кольцо под действием посторонней силы приводилось в быстрое вращение и затем резко останавливалось. В момент остановки кольца магнитная стрелка поворачивалась и располагалась вдоль оси кольца, но через некоторое время вновь принимала свое прежнее направление. Объяснить этот опыт можно так. При вращении кольца свободные электроны вместе с атомами металла приходят в движение. Резкое торможение приводит к остановке атомов металла, но свободные электроны некоторое время по инерции будут продолжать двигаться. В кольце на короткое время возникает электрический ток, который создает магнитное поле, действующее на магнитную стрелку.

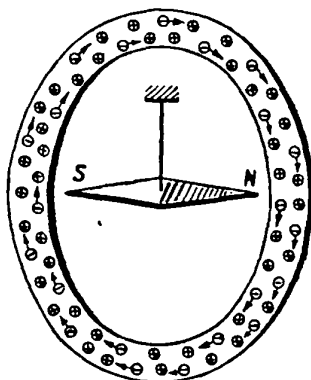
Этот опыт показывает, что в металлах имеются свободные электроны.

В обычном состоянии атомы металла, ионы (атомы, потерявшие или приобретшие электроны), а также свободные электроны находятся в беспорядочном тепловом движении. Если под действием тех или иных причин заставить свободные электроны смещаться в одном направлении, такое упорядоченное движение свободных электронов в металлических проводниках будет представлять собой электрический ток.

Как уже упоминалось, положительный и отрицательный заряды в атоме обычно равны между собой. Но если атомы тела начинают терять электроны (например, при электризации тела трением), то положительный заряд тела становится больше, и мы говорим, что тело заряжается положительно.

Если же тело получает электроны, то в нем наступает их избыток, и тело заряжается отрицательно. При этом нужно учитывать, что если стекло, например, при натирании его кожей теряет электроны и заряжается положительно, то кожа, получая электроны со стекла, заряжается отрицательно.

Теряя или приобретая электроны, нейтральный в электрическом отношении атом становится заряженным. Такой атом называется ионом. Процесс превращения нейтрального атома в ион называется ионизацией. В качестве примера ионизации можно указать на некоторые металлы (натрий, калий), которые при освещении их поверхности способны выделять электроны. Честь открытия этого явления принадлежит известному русскому физiku А. Г. Столетову. Это явление получило название фотоэлектрического эффекта и используется в фотоэлементах.

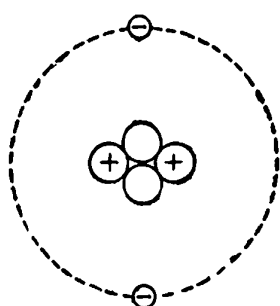


Фиг. 2. Опыт Папалекси и Мандельштама

Нагревая металл до высокой температуры, мы заставляем хаотическидвигающиеся атомы металла двигаться еще быстрее. Электроны, которые ранее удерживались на орбитах атомов, теперь испускаются нагретым металлом в окружающее пространство. Это явление называется термоэлектронным эффектом и используется в радиолампах, выпрямителях и других устройствах.

Нейтральная молекула газа может быть ионизирована под действием высокой температуры, лучей Рентгена, ультрафиолетовых лучей, радиоактивных излучений, высокого напряжения, а также при ударе нейтральной молекулы о быстролетающий электрон (ионизация толчком). Молекулы веществ, попадая в растворитель, ослабляют внутреннюю связь и распадаются на положительные и отрицательные ионы.

Масса (вес) электрона очень мала: она в 1838 раз меньше массы ядра атома самого легкого газа — водорода. Поэтому при решении некоторых вопросов можно считать, что вес атома водорода целиком определяется весом ядра, заряженного положительным электричеством и называемого протоном.



Два электрона	Два нейтрона
Масса $\approx 0$	Масса = 2
Заряд = -2	Заряд = 0
Два протона	Атомный вес = 4
Масса = 2	Порядковый номер = 2
Заряд = +2	Заряд атома = 0

Фиг. 3. Строение атома гелия

Вторым по счету после водорода в таблице Менделеева стоит элемент гелий. Согласно электронной теории атом гелия имеет два протона в ядре и два электрона, вращающихся вокруг ядра. Заряд ядра гелия в два раза больше заряда ядра водорода. Однако атомный вес гелия не 2, а 4. Если предположить, что в ядре гелия 4 протона, то количество положительного электричества будет больше количества отрицательного электричества, чего не может быть. Советский ученый профессор Д. Д. Иваненко предположил, что в состав ядра каждого атома, кроме частиц, заряженных положительно, — протонов, входят также частицы, не имеющие заряда, но масса которых равна массе протона. Эти частицы были названы нейтронами. Таким образом, в ядре атома гелия, кроме двух протонов, находятся два нейтрона. Строение атома гелия схематически дано на фиг. 3.

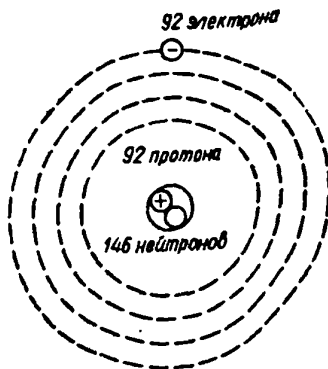
Атом железа в таблице Менделеева имеет порядковый номер 26 и атомный вес 56, следовательно, ядро атома железа состоит из 26 протонов и  $56 - 26 = 30$  нейтронов. Вокруг ядра

атома железа вращаются 26 электронов. На фиг. 4 схематически показано строение атома урана (порядковый номер 92, атомный вес 238).

Мы попытались упрощенно представить себе строение атома. На самом деле атом устроен несравненно сложнее.

Намн была рассмотрена разница между проводниками и изоляторами с точки зрения классической физики, которая изучает законы макроскопических тел, т. е. таких тел, в состав которых входит большое количество атомов и электронов. Различие между диэлектриками и проводниками классическая физика видит в том, что в диэлектрике все электроны прочно удерживаются около ядра атома. В проводниках же, наоборот, связь между электронами и ядром атома сильна и имеется большое количество свободных электронов, упорядоченное движение которых вызывает электрический ток. Классическая физика допускает любые значения энергии атома (в пределах некоторого интервала энергии), а изменение энергии атома считает происходящим непрерывно сколь угодно малыми порциями. Однако изучение оптических спектров элементов и явлений, связанных со взаимодействием атомов с электронами, указывает на непрерывный характер внутренней энергии атомов. Атомная и молекулярная физика доказывает, что энергия атома не может быть любой и принимает только вполне определенные значения, характерные для каждого атома. Возможные значения внутренней энергии атома называются энергетическими или квантовыми уровнями. Уровни энергии, которыми не может обладать атом, называются запретными уровнями.

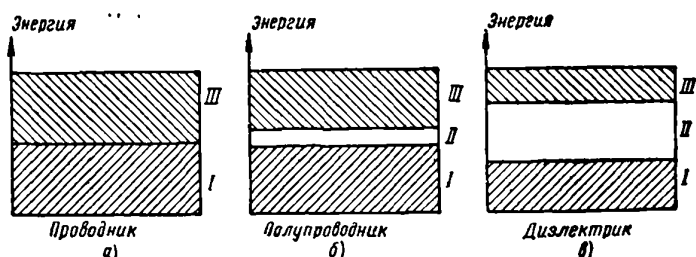
Квантовая физика, изучающая микроскопические тела и законы их движения, дает иное объяснение различию между диэлектриками и проводниками. Согласно квантовой теории как в диэлектрике, так и в проводнике существуют свободные электроны. Диэлектрики и проводники различаются между собой лишь заполненностью и относительным расположением энергетических уровней электронов. Это и составляет основу зонной теории электропроводности. Полная энергия электронов, вращающихся вокруг ядра, тем больше, чем больше радиус орбиты. Электрон может находиться в строго определенном квантовом состоянии, причем другие электроны в этом состоянии находиться не



Фиг. 4. Строение атома урана. Порядковый номер — 92. Атомный вес — 238. Заряд атома равен 0

могут. Если сообщить электрону извне определенное количество энергии, то он может перейти в новое, более высокое квантовое состояние. Сам электрон при этом и атом, в состав которого он входит, называются возбужденными. Переход электрона с высокого уровня на более низкий уровень вызовет перескок электрона на орбиту меньшего радиуса. При этом энергия, которая была затрачена на перевод электрона в возбужденное состояние, теперь будет отдана им в виде светового кванта определенной частоты или передана другому электрону. Переход электрона в иное квантовое состояние невозможен, если это квантовое состояние занято другим электроном. В твердом теле, состоящем из множества атомов, энергетические уровни отдельных атомов смещаются и, объединяясь, образуют энергетические зоны.

Различают заполненную или нормальную зону, в которой находятся электрические заряды невозбужденного атома. Другой зоной является свободная зона, или зона возбуждения, в которую могут попадать электроны возбужденного атома. Между заполненной и свободной зонами помещается запретная зона,



Фиг. 5. Расположение энергетических зон твердого тела:

*I* — заполненная (нормальная) зона, *II* — запретная зона (зона незво-  
ленных уровней), *III* — свободная зона (зона возбуждения)

или зона незволенных уровней. Ширина запретной зоны определяет электропроводность вещества. Слово «зона» не нужно понимать как площадь или полосу определенных геометрических размеров. Когда мы говорим о какой-либо зоне, то имеем в виду количество энергии, которой обладают электроны, находящиеся в этой зоне. Энергетическую структуру тела можно изобразить графически. На фиг. 5 показано расположение энергетических зон твердого тела. У проводников (металлов) заполненная и свободная зоны перекрываются, между ними нет запретной зоны (фиг. 5, *а*), поэтому электроны легко переходят из заполненной в свободную зону и обеспечивают высокую электропроводность металлов.

У полупроводников ширина запретной зоны мала (фиг. 5, *б*). Под действием внешних причин (тепло, свет, электрическое поле