

А.С. Бернштейн

Термоэлектричество

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
А11

А11 **А.С. Бернштейн**
Термоэлектричество / А.С. Бернштейн – М.: Книга по Требованию, 2013. – 56 с.

ISBN 978-5-458-32164-8

Знаете ли вы, как работает обычная тепловая электростанция? Уголь, сгорая в топках, нагревает котлы паровых машин. Машины приводят в действие электрогенераторы, вырабатывающие электрический ток. Как видите, тепловая энергия переходит в электроэнергию не сразу. Промежуточным звеном служит здесь механическая энергия паровой машины. Но именно это звено — самое слабое. Паровая машина мало экономична. Значительная часть тепловой энергии, теряясь напрасно, так и не переходит в электричество. А нельзя ли превращать тепло непосредственно в электроэнергию? Оказывается, в некоторых случаях можно.

ISBN 978-5-458-32164-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

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.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

чеством, а электрическую энергию, получающуюся в пьезокристаллах при надавливании на них, — пьезоэлектричеством (по-гречески слово «пиезо» — давлению).

Термоэлектричеством называют электрическую энергию, получаемую непосредственно из теплоты. Название «термоэлектричество» происходит от греческого слова «терме», что значит — тепло.

Непосредственный переход тепловой энергии в электрическую происходит в термопарах. Термопара — это две проволоочки, пластинки или два бруска обязательно из разных материалов, спаянные, как это показано на рис. 1. Когда один из спаев термопары нагрет больше, чем другой, начинает течь электрический ток. Это как раз и есть термоэлектрический эффект. Впервые он был исследован немецким ученым Зеебеком в 1821 году. Тогда об электричестве знали еще очень мало. Сам Зеебек считал, что в термопаре происходит превращение теплоты не в электрическую энергию, а непосредственно в магнитную. Произошло это потому, что он, нагревая один из спаев термопары, наблюдал, как отклоняется расположенная поблизости магнитная стрелка. Между тем стрелка отклонялась под воздействием электрического тока, текущего по термопаре, который не был замечен Зеебеком.

Вскоре французский ученый Пельтье доказал, что в термопаре при нагревании одного из ее спаев появляется постоянный электрический ток.

За последнее столетие человечество нашло множество способов использовать электрическую энергию. Не был забыт и термоэлектрический эффект. В настоящее время термопары применяются в лабораториях и предприятиях в качестве очень удобных электрических термометров, которыми измеряют энергию различных лучей. Термопары применяют также в радиотехнике для измерения токов. Наконец, из термопар собирают небольшие термогенераторы для питания, например, радиоприемников в сельских местностях.



Рис. 1. Термопара.

Со времени открытия термоэлектрического эффекта его исследованием занималось немало ученых, и теперь свойства термопар хорошо изучены.

ЧТО ПРОИСХОДИТ В ТЕРМОПАРЕ?

Чтобы разобраться в теории, объясняющей, как в термопаре тепло превращается в электрический ток, познакомимся со строением твердых тел.

Все вещества, как твердые, так и жидкие или газообразные, состоят из мельчайших частиц — атомов, каж-

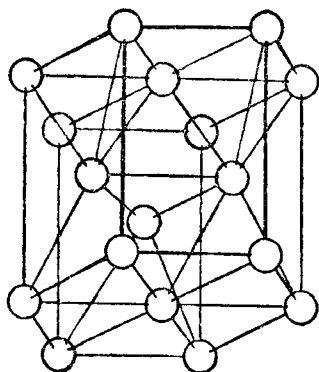


Рис. 2. Атомы в металле расположены в виде решетки.

дый из которых не превосходит нескольких стомиллионных долей сантиметра. Атом любого вещества состоит из ядра, имеющего положительный электрический заряд, и движущихся вокруг него электронов, заряженных отрицательно. Число электронов таково, что их общий отрицательный заряд равен положительному заряду ядра атома и уравнивает его. Поэтому в целом атом электрически не заряжен. Атомы различных веществ отличаются между собою величиной положительного заряда

ядра и числом вращающихся вокруг него электронов. Атом кислорода имеет 8 электронов, атом железа 26, а атом урана 92 электрона. В твердых телах, например в металлах, атомы, располагаясь на определенных расстояниях друг от друга, образуют в пространстве правильную решетку, которую принято называть кристаллической (рис. 2). Атомы кристаллической решетки колеблются около занимаемых ими мест тем сильнее, чем выше температура тела. Однако порядок их расположения не нарушается до тех пор, пока тело не начинает расплавляться. При плавлении кристаллическая решетка разрушается.

Атомы в металле закреплены определенным образом, образуя так называемую «кристаллическую решетку». Однако некоторые электроны, входящие в состав атомов, могут свободно переходить от одного атома к другому.

Такие электроны принято называть «свободными». Они отличаются от всех прочих электронов только тем, что могут легко покидать атомы.

Свободные электроны, двигаясь совершенно беспорядочно, равномерно распределяются внутри кристаллической решетки. Поэтому их движение не нарушает равновесия между положительными зарядами ядер атомов и отрицательными зарядами электронов. Металл остается электрически не заряженным.

Так ведут себя электроны в куске металла, температура которого во всех частях одинакова. Теперь посмотрим, что получится, если его подогреть с одного конца. Скорость движения свободных электронов в металле зависит от температуры. Чем выше температура металла, тем быстрее в среднем их движение. Поэтому при неравномерном нагреве куска металла свободные электроны в его более нагретой части будут двигаться быстрее, чем в менее нагретой.

Электроны, движущиеся быстрее, часто переходят из более нагретой части металла в менее нагретую. Скорость такого быстрого электрона, оказавшегося среди электронов, движущихся медленнее, уменьшается, так как он, сталкиваясь с ними, отдает им часть своей энергии. В конце концов этот электрон начинает двигаться примерно с той же скоростью, что и другие окружающие его свободные электроны. Таким образом, свободные электроны, попадая из более нагретой части металла в менее нагретую, как бы «застревают» в ней. Электроны же из менее нагретой части проникают в более нагретую часть значительно реже, так как вообще движутся медленнее. Все это приводит к тому, что свободные электроны скапливаются в менее нагретом конце металлического стержня или проволоки, как это изображено на рис. 3.

Что же получается? В нагретом конце металла остается слишком мало электронов, чтобы уравновесить положительный заряд атомных ядер. А в холодном конце создается избыток электронов, так что их отрицательный заряд превосходит положительный заряд ядер. Поэтому горячий конец металлической проволоки, бруска или пластинки оказывается заряженным положительно, а холодный — отрицательно.

Итак, часть электронов перешла в холодный конец. Почему же все электроны из горячего конца не уйдут

туда же? Дело в том, что разноименные, то есть положительные и отрицательные, электрические заряды притягивают друг друга, а одноименные — отталкивают. Поэтому отрицательно заряженные электроны испытывают притяжение к горячему концу, который в целом заряжен положительно, и отталкивание от холодного. Между этими концами, как говорят, возникло «электрическое напряжение». Оно-то и мешает дальнейшему переходу свободных электронов из горячего конца в холодный. Теперь электрон, движущийся к холодному концу,

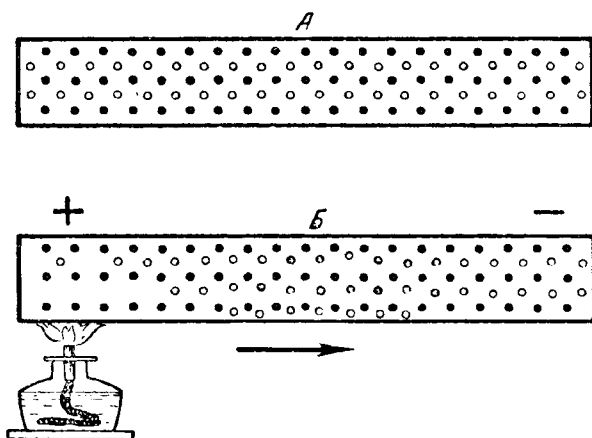


Рис. 3. Свободные электроны, равномерно расположенные в металлическом бруске (А), при его нагревании с одного конца переходят в другой, менее нагретый конец (Б).

должен преодолевать силу, которая стремится двигать его как раз в противоположном направлении. По мере накопления электронов в холодном конце эта сила все возрастает.

Ясно, что чем больше разность температур горячего и холодного концов, тем больше электронов уйдет в холодный конец и тем сильнее будет напряжение между горячим и холодным концами.

Далеко не все твердые вещества, подобно металлам, содержат большое количество свободных электронов. В настоящее время все большее значение в технике приобретают так называемые полупроводники. Физики усиленно занимаются изучением полупроводников в тече-

ние последних 20—30 лет. В Советском Союзе много было сделано в этой области академиком А. Ф. Иоффе и его сотрудниками.

Отличительная особенность полупроводников состоит в том, что они почти не проводят электрического тока при сравнительно низкой температуре, например комнатной, но, будучи нагреты до нескольких сотен градусов, становятся хорошими проводниками. В полупроводниках особенно сильно проявляется термоэлектрический эффект, что составляет одно из их ценных свойств.

В полупроводниках электроны ведут себя иначе, чем в металлах. При низкой температуре все электроны полупроводника прочно связаны с атомами и, следовательно, не могут двигаться внутри кристаллической решетки. Для того чтобы электрон оторвался от своего атома, здесь необходим как бы сильный толчок. Такие толчки электроны могут получать, например, при нагревании, когда усиливается тепловое движение атомов.

При нагревании полупроводников некоторые электроны отрываются от атомов и становятся свободными, подобно свободным электронам в металлах. В том случае, если вещество полупроводника содержит примеси некоторых других веществ, например индия, то атомы примесей притягивают к себе освободившиеся электроны, которые при этом снова теряют возможность свободно передвигаться. В то же время в атомах полупроводника, из которых эти электроны вырвались, остаются свободные места (как говорят физики, образуются «дырки»). Таких «дырок» образуется больше в горячей части полупроводника, где электроны в результате нагревания чаще испытывают сильные толчки.

Что же происходит с «дырками»?

На освободившееся в каком-нибудь атоме место легко переходит электрон из другого атома, в котором он занимал такое же место. «Дырка» в первом атоме оказывается заполненной, но зато она появляется во втором атоме. Такие переходы происходят очень легко и беспорядочно. В результате «дырки», возникающие в горячем конце, как бы передвигаются к холодному концу полупроводника, равномерно распределяясь по его длине. В то же время электроны, вырвавшиеся при образовании «дырок» захватываются атомами примеси и потому

не могут передвигаться к холодному концу. Поэтому в горячем конце такого полупроводника возникает избыток электронов. Этот конец оказывается заряженным отрицательно. Холодный конец, куда переместилась часть «дырок», но не переместилось соответствующее количество электронов, оказывается заряженным положительно, так как в нем электронов недостает для того, чтобы уравновесить положительные заряды ядер атомов.

Не все примеси, встречающиеся в полупроводниках, захватывают электроны. Некоторые из примесей, наоборот, при нагревании сами теряют электроны, становящиеся свободными. В этом случае горячий конец полупроводника заряжается, как и у металлов, положительно, а холодный отрицательно. Таким образом, в металлах и некоторых полупроводниках, где много свободных электронов, горячие участки заряжаются положительно по отношению к холодным. В других полупроводниках, где недостает свободных электронов, горячие участки заряжаются относительно холодных отрицательно. Всякий продолговатый кусок или проволочка из этих материалов, подогреваемый с одного конца, действует подобно батарейке карманного фонарика. Если между его концами включить проводник, то по этому проводнику потечет ток.

В замкнутой цепи, составленной из двух проволочек одного и того же материала, тока при нагревании не будет. Это объясняется тем, что электрические напряжения между горячими и холодными концами обеих проволочек одинаковы и действуют навстречу друг другу так, что взаимно уравниваются.

Если проволочки, из которых составлена термопара, различны, то различны и электрические напряжения, возникающие между их горячими и холодными концами. Поэтому в термопаре возникает электрический ток. Направление тока зависит от материалов, из которых составлена термопара, и от того, какой из ее спаев имеет более высокую температуру. Если остудить горячий спай термопары и, наоборот, нагреть холодный, то ток потечет в обратном направлении. На рис. 4, где изображена термопара, стрелками показаны направления протекающего в ней постоянного тока при нагревании нижнего и верхнего спаев.

Как видно из этого рисунка, ток в горячем спае термопары всегда направлен от одного и того же из составляющих ее материалов к другому. В данном случае, например, от материала *А* к материалу *Б*.

В холодном спае он протекает в обратном направлении, т. е. от материала *Б* к материалу *А*.

В том случае, если у обоих материалов горячие концы приобретают относительно холодных заряд одинакового

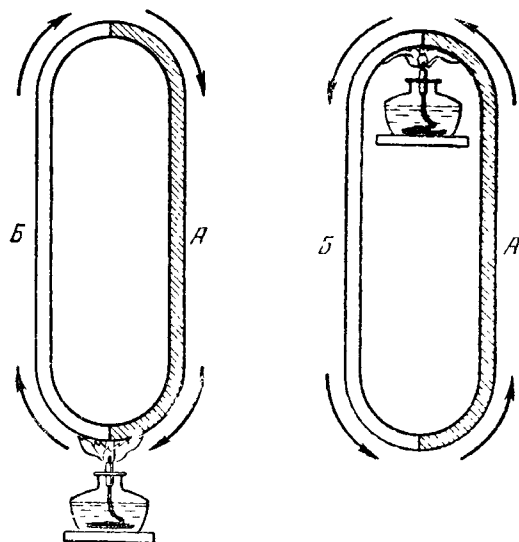


Рис. 4. Направление тока в термопаре зависит от того, который из ее спаев нагрет.

знака (положительный или отрицательный), напряжения действуют навстречу друг другу. Результирующее напряжение или, как говорят, термоэлектродвижущая сила термопары будет равна их разности. Например, если горячий конец проволоочки из материала *А* (рис. 4) заряжается относительно холодного конца до напряжения $+0,05$ вольта *), а горячий конец проволоочки из материала *Б* относительно холодного — до напряжения

*) Вольт — единица электрического напряжения. Напряжение батарейки от карманного фонарика равно примерно 4 вольтам, напряжение осветительной сети — 127 или 220 вольтам и т. д.

$+0,03$ вольта, то термоэлектродвижущая сила термопары равна $0,05 - 0,03 = 0,02$ вольта, причем ток в горячем спае течет от материала *А* к материалу *Б*, как это показано на рис. 4.

В том случае, если знаки напряжения горячих концов относительно холодных концов у проволок, составляющих термопару, неодинаковы, термоэлектродвижущая сила термопары равна сумме этих напряжений, и ток в горячем спае течет от той проволоки, у которой горячий конец заряжается положительно относительно холодного. Например, если горячий конец проволоки из материала *А* заряжен по отношению к холодному до $+0,02$ вольта, а горячий конец проволоки из материала *Б* заряжен до напряжения $-0,04$ вольта, то термоэлектродвижущая сила такой термопары равна $0,02 + 0,04 = 0,06$ вольта и направление тока остается таким же, как показано на рис. 4.

СВОЙСТВА ТЕРМОПАР

Термоэлектродвижущие силы термопар измеряются десятками, сотыми, а иногда всего сотыми долями вольта. Как ни малы эти напряжения, они вполне достаточны для того, чтобы применять термопары в точных измерительных приборах. Соединяя вместе несколько десятков или сотен термопар, получают такое количество электрической энергии, что ее хватает для работы радиоприемника или даже небольшого радиопередатчика.

Чтобы пользоваться термопарами, нужно выяснить два вопроса. Как зависит термоэлектродвижущая сила термопары от температуры ее спаев? Какие материалы позволяют получать наибольшую термоэлектродвижущую силу?

Изучение этих вопросов представляет не только практический, но и научный интерес. Свойства ряда термопар хорошо известны. Некоторые термопары уже давно применяются в науке и технике. Однако работы по их дальнейшему изучению продолжаются. Современная техника требует все более и более точных приборов, для создания которых необходимо все лучше знать свойства применяемых в них деталей. Кроме того, постоянно ведутся поиски новых, лучших, видов термопар.

В настоящее время известно, что величина термоэлектродвижущей силы, возникающей в термопаре, зависит от материалов, из которых составлена термопара, и от температур ее нагретого и холодного спаев.

У многих термопар термоэлектродвижущая сила растет весьма равномерно с ростом разности температур их спаев. Например, у термопары, составленной из железной и константановой проволочек, она возрастает на 0,000055 вольта при увеличении разности температур на один градус. Но в то же время у целого ряда термопар этот рост происходит значительно менее равномерно. Например, при повышении температуры горячего спая термопары железо — платина со 100°C до 200°C (при температуре холодного спая 0°C) ее термоэлектродвижущая сила изменится на 0,00165 вольта. Если у той же термопары повысить температуру горячего спая с 400°C до 500°C , то есть, как и в предыдущем случае, на 100°C , то ее термоэлектродвижущая сила увеличится всего лишь на 0,00091 вольта.

Наконец, существуют термопары, у которых термоэлектродвижущая сила при постепенном нагревании горячего спая сначала растет быстро, затем все медленнее, пока, наконец, вовсе не перестает расти. При дальнейшем повышении температуры горячего спая термоэлектродвижущая сила термопары начинает уменьшаться. Она падает до нуля, а затем меняет свой знак.

Проследим подробнее, как изменяется термоэлектродвижущая сила в одной из таких термопар. В термопаре медь — железо при температуре холодного спая 0°C , а горячего 100°C термоэлектродвижущая сила равна 0,00113 вольта, и ток в горячем спае течет от меди к железу. При температуре горячего спая 200°C она повышается до 0,00171 вольта. При температуре 400°C термоэлектродвижущая сила падает до 0,00120 вольта, а при температуре горячего спая 500°C — до 0,00038 вольта. Наконец, при температуре 541°C она совершенно исчезает, но при дальнейшем росте температуры снова возникает и начинает повышаться. Однако ток в горячем спае течет уже от железа к меди. Такое явление называют инверсией тока в термопарах.

Почему же термоэлектродвижущая сила термопар может изменяться с ростом разности температур их спаев таким неожиданным образом? Вспомним, что термоэлек-

термодвижущая сила термопары в тех случаях, когда напряжения ее проводников имеют одинаковый знак, равна их разности. При этом, очевидно, возможны три случая. Если напряжение в одном из проводников при нагреве растет быстрее, чем в другом, то термоэлектродвижущая сила термопары также все время увеличивается.

Если напряжения обеих половинок растут одинаково, термоэлектродвижущая сила термопары не меняется.

Наконец, возможен и такой случай, что напряжение, которое вначале было больше, при нагреве растет медленнее, в результате чего термоэлектродвижущая сила термопары падает. Когда напряжения обеих проводников сравняются между собой, она станет равна нулю. Когда же разность температур спаев увеличится еще более, знак термоэлектродвижущей силы термопары изменится, ток в ней потечет в обратном направлении. Это происходит потому, что проводники термопары как бы поменялись ролями. В том из них, где в первый момент напряжение было больше, теперь оно меньше, и наоборот.

Рост напряжений в отдельных проводниках термопары по мере увеличения разницы температур их концов может ускоряться или замедляться. Таким образом, в одной и той же термопаре при разных температурах спаев могут наблюдаться все три рассмотренных случая.

Инверсия тока наблюдается в термопарах, составленных из таких материалов, что при увеличении разницы температур сначала быстрее растет напряжение в одном из проводников, а затем, при больших разницах температур, начинает быстрее расти напряжение в другом проводнике.

Термопары обладают еще одним практически важным свойством. Если соединить проволоочки, образующие термопару, не прямо между собой, а с помощью третьего проводника из любого материала, то это не изменит термоэлектродвижущей силы термопары, если только места присоединения этого третьего проводника к проволочкам термопары имеют одинаковую температуру. Объясняется это тем, что в третьем проводнике не возникает электродвижущей силы, если температура его концов одинакова.

Таким образом, в цепь термопары можно включить, например, измерительный прибор, как это показано на