

## ПРИРОДА ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС И ЕЁ ПРОЯВЛЕНИЯ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрен эффект существования положительной и отрицательной термоЭДС различных металлических и полупроводниковых материалов. Этот факт давно установлен экспериментально. Сегодня этот эффект объясняется контактной разностью потенциалов, имеющей различные знаки у разных контактирующих материалов. По мнению авторов это объяснение неубедительно и не объясняет многих наблюдаемых фактов. В статье высказывается иная возможная природа данного эффекта и его проявление в других термоэлектрических эффектах.

**Ключевые слова:** термоэлектрические эффекты, термоЭДС, потоки тепла, электрон-фононное взаимодействие, инверсия, термопара.

Со времени открытия Зеебеком первого термоэлектрического эффекта, названного в последствии его именем, прошло почти 200-ти лет. Физика, в том числе физика твёрдого тела, сделали за это время колоссальное развитие. Тем не менее термоэлектричество таит в себе ещё не мало загадок. В тоже время понятно, что эти загадки лежат в рамках уже достигнутых физикой знаний. К числу наиболее загадочных явлений термоэлектричества можно отнести существование положительной и отрицательной термоЭДС у различных термопар, установленных на самых ранних стадиях изучения термоэлектричества. Объяснение этого эффекта разностью работ выхода электронов у различных веществ при контакте и возникновение при этом контактной разности потенциалов по мнению авторов не выглядит убедительным. На этом остановимся ниже.

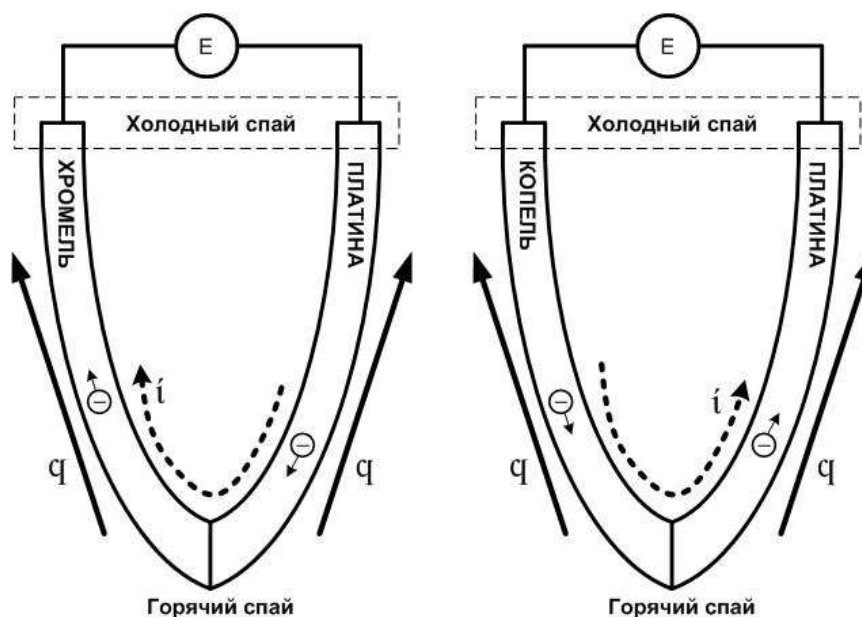


Рис. 1

В настоящее время в электротехнике за положительное направление электрического тока принято движение положительно заряженных зарядов. Это было принято ещё до открытия электрона. Электрический ток в форме потока электронов является основной формой в технике. Положительно заряженные ионы наблюдаются только в электролитах. В некоторых типах полупроводников говорят о дырочной проводимости, при этом дыркам приписывают положительный заряд. Причём дырки это условные (квази) частицы, реально перемещаются всё-таки электроны. Мы здесь будем рассматривать электрический ток в форме движения электронов.

Далее в термоэлектричестве есть ещё одна условная договорённость. Принято, что знак «+» у ЭДС указывает, что ток течёт от свинца (или платины) к данному металлу через более нагретый спай, а знак «-» - через холодный спай.

Что бы не путаться со всеми этими условностями примем для наших задач с термопарами простое и наглядное условие для знака ЭДС. Если в ветви термопары тепловой поток совпадает по направлению с током электронов, то это положительное направление ЭДС. В противном случае ЭДС отрицательна. Это ни как не отразится на физике процессов, но избавит от лишней путаницы. Тепловой поток всегда направлен от горячего источника тепла к холодному.

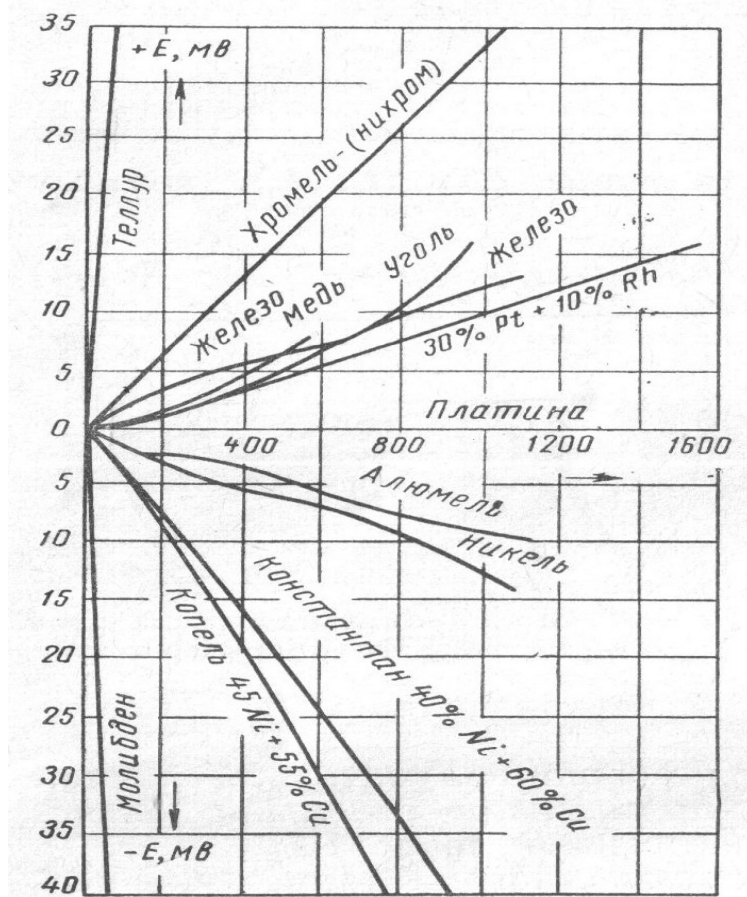


Рис. 2

На Рис. 1 в хромелевой ветви направление тока электронов совпадает с направлением теплового потока, что даёт знак «+» для ЭДС, а в копелевой ветви направление тока противоположно с направлением теплового потока, что даёт знак «-» для ЭДС и это соответствует рисунку - 2. Рисунок взят из [4, стр. 168]. Хотелось бы особо отметить, что факт совпадения направления теплового потока и потока электронов проводимости для одних материалов и их противоположное движение для других материалов, является экспериментальным фактом. Для термоэлектричества это положение вещей имеет решающее значение.

Знания о термоэлектрических явлениях - это эмпирические знания, результат экспериментальных исследований. Квантовая теория твёрдого тела ещё очень далека от сколько-нибудь полного понимания этих явлений. Имеются некоторые качественные представления, а об количественной теории, приложимой к практике, говорить пока не приходится. Это связано с исключительной сложностью явлений и объектов, изучаемых квантовой теорией твёрдого тела. Вся инженерная и конструкторская работа базируется на накопленных экспериментальных данных, с последующей опробацией на практике. В этом отношении методология исследований в теории твёрдого тела сегодня совпадает с методологией теории подобия в гидродинамике и тепломассообмене. Мы в данной статье так же опираемся на совокупность экспериментальных данных, высказывая качественные представления о их природе.

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Отметим основные экспериментально установленные сведения.

### 1. Контактная разность потенциалов.

Строго говоря контактная разность потенциалов не является термоэлектрическим эффектом, а определяется электрохимическими свойствами материалов. Здесь всё определяется соотношением величин работ выхода для свободных электронов контактирующих материалов. Тот материал у которого работа выхода меньше, свободные электроны покидают интенсивнее и он заряжается положительно. В другом контактирующем материале электроны накапливаются и в результате возникает контактная разность потенциалов. Величина контактной разности потенциалов для данной пары материалов соответствует установлению равновесия, при котором происходит обмен равными числами электронов. С увеличением температуры увеличивается число свободных электронов, обладающих энергией достаточной для преодоления работы выхода. По этой причине контактная разность потенциалов зависит от температуры.

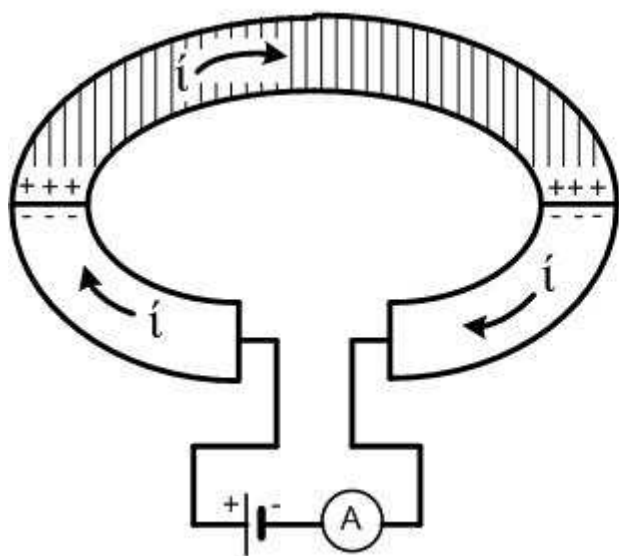


Рис. 3

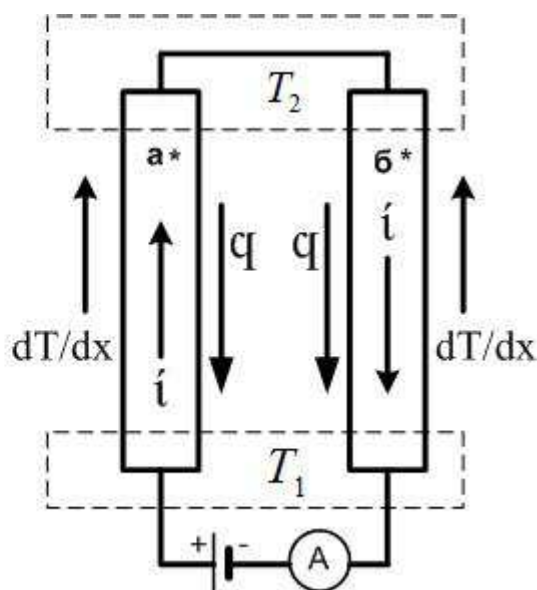


Рис. 4

### 2. Эффект Зеебека.

Зеебек обнаружил, что если спаи разнородных металлов, образующих замкнутую цепь поддерживать при разной температуре, то в цепи течёт электрический ток. Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока. Величина термоэлектродвижущей силы зависит не только от разности температур, но и от абсолютного значения температур. Дифференциальная или удельная термоЭДС данной термопары изменяется с изменением температуры. По этой причине зависимость термоЭДС от температуры носит в общем случае нелинейный характер, что усложняет численные оценки. У некоторых термопар наблюдается инверсия термоЭДС. В определённых областях температур термоэдс начинает с увеличением перепада температур падать и может даже переменить знак.

### 3. Эффект Пельтье.

Эффект Пельтье заключается в том, что при протекании тока через цепь, составленную из разнородных металлов или полупроводников, в одном спае происходит выделение, а в другом - поглощение теплоты. Экспериментально найдено, что количество выделившейся или поглощённой в спае теплоты пропорционально заряду, прошедшему через спай. При перемене направления тока изменяется знак теплоты. Вместо выделения (поглощения) теплоты наблюдается поглощение (выделение) такого же количества теплоты при том же по величине токе.

### 4. Эффект Томсона.

“У. Томсон установил, что дополнительное количество теплоты может выделяться или поглощаться не только на контакте двух металлов, но и в одном куске металла, если только создать в этом металле градиент температур”. [9]. Это явление получило название эффект Томсона. Рассмотрим схему, изображённую на рисунке - 4, в которой наблюдается эффект Томсона. Схема взята из [9], стр. 370. “Два одинаковых металлических стержня включены последовательно в цепь, содержащую батарею и амперметр. Ближайшие к батарее концы стержней поддерживаются при температуре, например  $0^{\circ}\text{C}$ , удалённые от батареи концы стержней поддерживаются при другой температуре, например  $100^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, в стержнях существуют потоки тепла, в стержне **а** направление электрического тока и потока тепла противоположны, в стержне **б** они совпадают. До включения тока на стержнях подбирают две точки **а** и **б**, температуры которых одинаковы. После включения тока равенство температур нарушается: в одном стержне температура несколько повышается, в другом - она понижается. В некоторых металлах тепло выделяется в том стержне, в котором направление теплового потока и электрического тока совпадают, в других металлах тепло поглощается при этих же условиях”. [9].

### ПРИРОДА ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС

Явление термоЭДС проявляется в эффекте Зеебека. Принято считать, что термоЭДС термопары обусловлена тремя причинами: 1) зависимостью уровня Ферми от температуры, 2) диффузией электронов (или дырок) и 3) увлечением электронов фононами. [7]. “Уровень Ферми зависит от температуры. Поэтому скачок потенциала при переходе из одного металла в другой (т.е. внутренняя контактная разность потенциалов) для спаев, находящихся при разных температурах, неодинаков, и сумма скачков потенциала отлична от нуля”. [7]. Это первая составляющая термо ЭДС. Необходимо добавить, что в зависимости от электрохимических свойств материалов контактная разность потенциалов будет иметь тот или иной знак. Вторую причину возникновения термоЭДС связывают с наличием градиента температуры вдоль проводников термопары. “У нагретого конца концентрация свободных электронов с энергией, превышающей уровень Ферми, выше чем у холодного спаев. Вдоль проводника возникает градиент концентрации электронов с данным значением энергии, что повлечёт за собой диффузию более быстрых электронов к холодному концу, а более медленных - к тёплому. Диффузионный поток быстрых электронов будет больше, чем поток медленных электронов. Поэтому вблизи холодного конца образуется избыток электронов, а вблизи горячего - их недостаток. Это приводит к возникновению диффузионного слагаемого термоЭДС”. [7]. Видимо здесь в дополнение предполагается, что мощность диффузионного потока в разных материалах ветвей различна. И их разность создаёт термоЭДС того или иного знака. Отметим ещё и такие два момента. ТермоЭДС от первой и второй причин не обязательно суммируются. У них могут оказаться различные знаки и они в таком случае ослабят суммарную термоЭДС. Второй момент состоит в том, что первые две составляющие не могут, по изложенным выше механизмам возникновения, изменить свой знак при увеличении перепада температур на концах термопары. Знак этих составляющих термоЭДС однозначно связан с градиентом температуры. Поэтому первые две причины не объясняют инверсию термо ЭДС, наблюдаемую у некоторых термопар. Инверсия термо ЭДС проявляется в том, что величина термо ЭДС зависит не только от разности температур, но и от абсолютного значения температур. При достаточно больших температурах величина термо ЭДС начинает падать и может даже переменить знак. К таким парам относятся пары Fe-Mo, Fe-Ag, Fe-Cu, для последней температура инверсии равна  $300^{\circ}\text{C}$  по Цельсию. [9].

Третья причина, т.е. увлечение электронов проводимости направленным (кооперативным) потоком фононов кристаллической решетки, позволяет объяснить инверсию термо ЭДС. Дадим качественное объяснение этому явлению.

Передача тепла, тепловой поток в твердом теле осуществляется фононами, т.е. за счет согласованных колебаний кристаллической решетки твердого тела.

Кристалл можно разбить на две более или менее автономные подсистемы. Первая подсистема - это кристаллическая решетка ионных остовов, причем ионные остовы совершают малые колебания около узлов решетки. Вторая подсистема – коллективизированные электроны,

характер коллективизации которых может быть совершенно различным - от образования квазимолекулярных орбит до "газа" или "жидкости" электронов проводимости в металлах, омывающих решетку ионных остовов. [3]. Обе подсистемы кристалла являются упругими колебательными системами. Эти колебательные подсистемы будучи системами с множеством степеней свободы (практически бесконечным) имеют спектр (практически бесконечный) мод колебаний подсистем, возбуждающихся при определенных условиях. Причем в случае эффекта Зеебека колебательная подсистема ионных остовов кристалла играет роль вынуждающей колебательной силы для подсистемы электронов проводимости. Частота мод вынуждающих колебаний ионных остовов (частота фононов) зависит от структуры кристаллической решетки, амплитуда от температуры. И когда частота вынуждающих колебаний тех или иных мод фононных колебаний кристаллической решетки близка или совпадает с частотой собственных колебаний электронной подсистемы и происходит максимальная передача направленной кооперативной энергии фононов электронам проводимости в данном спектре частот. Из-за того, что для различных кристаллов (материала различных ветвей термопары) ионные остовы по разному откликаются на температуру (имеют разные частоты и амплитуды), а электронные подсистемы различных кристаллов имеют различные собственные частоты то, и передаваемая направленная энергия от фононов к электронам проводимости в разных ветвях термопары различна в данной температурной зоне. Разность между этими энергиями и дает термо ЭДС термопары. С изменением температуры у различных ветвей термопары могут поменяться местами (по величине передаваемой энергии) и периоды резонансов, а следовательно и передаваемая в каждой ветви направленная кооперативная энергия от фононов к электронам проводимости и здесь будет наблюдаться инверсия термо ЭДС.

Мы пришли к выводу, что ЭДС термопары обязана своим происхождением эффекту увлечения электронов фононами, а другие рассматриваемые причины могут лишь уменьшать или увеличивать термоЭДС в зависимости от согласованности со знаком фононной термоЭДС.

Теперь, если мы принимаем в качестве основной причины возникновения термоЭДС эффект увлечения электронов проводимости фононным потоком, то возникает необходимость объяснить причину существования положительной и отрицательной термоЭДС. Поток фононов всегда направлен от горячего спая к холодному. А как мы условились выше, отталкиваясь от экспериментальных данных, что при положительной термоЭДС электрический ток (поток электронов) совпадает по направлению с потоком фононов, а при отрицательной термоЭДС движение этих потоков противоположно. Получается, что в одной ветви термопары электроны движутся вслед за потоком фононов, увлекаются фононным потоком, а в другой ветви электроны движутся против фононов. В принципе это можно объяснить следующим образом. Электроны увлекаются фононным потоком в обеих ветвях, но в одной из ветвей это увлечение (величина передачи энергии от фононов к электронам проводимости) больше чем в другой. Различны абсолютные значения термоЭДС материалов пары.

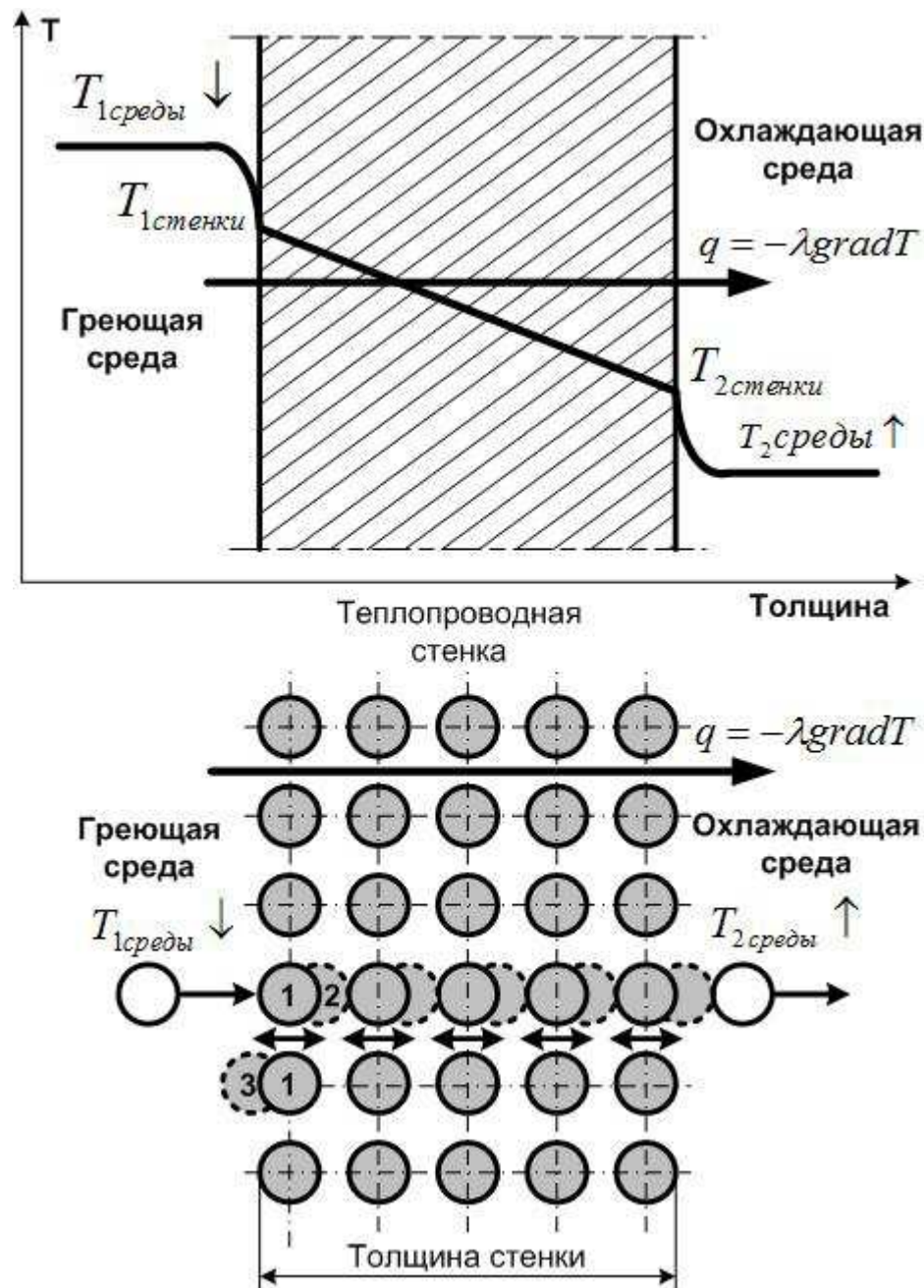


Рис. 5

Разность между этими энергиями даёт термоЭДС термопары. Так на рисунке - 1 платина имеет большую абсолютную термоЭДС по отношению к хромелю, но меньшую по отношению к копели. Отсюда у этих термопар различное направление течения тока электронов. Получается, что у платино-копелевой термопары положительная термоЭДС, а у платино-хромелевой термопары отрицательная. У материалов с положительной термоЭДС эффект увлечения электронов фононами сильнее, чем у материалов с отрицательной термоЭДС. Причём чем больше по абсолютной величине отрицательная термоЭДС, тем слабее электрон-фононное увлечение. По мере роста отрицательной термоЭДС это взаимодействие стремится к нулю. У свинца эффект увлечения электронов фононами получается где то посередине, что даёт относительно одних материалов положительную, а относительно других материалов отрицательную термоЭДС.

Вроде бы всё просто, но идея увлечения электронов фононами вступает в противоречие с экспериментальным эффектом Томсона. Как мы уже отмечали выше: "В некоторых металлах тепло выделяется в том стержне, в котором направление теплового потока и электрического тока совпадают, в других металлах тепло поглощается при этих же условиях". [9]. В эксперименте

Томсона нет пары материалов, там только один материал. Но результаты эксперимента для различных материалов противоположны. Получается, что у одних материалов энергия фононного потока передаётся электронам проводимости по тепловому потоку фононов, а для других материалов в противоположном направлении. То есть во втором случае электроны не увлекаются фононным потоком, а как бы отталкиваются в противоположную сторону. Рассмотрим нижнюю часть рисунка - 5. На рисунке изображена структура ионных остовов кристаллической решётки теплопроводной стенки. Стенка расположена перпендикулярно плоскости рисунка. При равномерном нагреве стеки (при постоянной температуре) ионные остовы совершают хаотические колебания возле положения равновесия, при этом постоянно взаимодействуя по законам столкновения с соседями. В случае перепада температур по сторонам стенки, тепло от греющей среды к охлаждающей переносится направленным против градиента температуры фононным потоком в кристаллической среде теплопроводной стенки. На хаотические колебания ионных остовов накладываются согласованные волновые колебания. Ионный остов-1 (Рис. 5), получив энергию и импульс от молекулы греющей среды, отклоняется вправо и соударяется с соседним ионом, передавая ему полученную энергию и импульс. Второй ион в свою очередь передаёт энергию и импульс соседу справа и так далее, пока последний в цепочке ион не передаст энергию и импульс молекуле охлаждающей среды. Первый ион при этом по законам колебательных систем отклоняется влево от положения равновесия (положение - 3) и получает новую порцию энергии от греющей среды. Но направленный колебательный процесс ионных остовов в форме фононного потока, переносящего направленно (против градиента температуры) энергию и импульс, происходит с среде омывающих ионные остовы свободных электронов. Поэтому ионные остовы при колебании передают энергию по цепочке не только в форме теплового фононного потока, но часть энергии в результате взаимодействия по законам столкновения передаётся электронам проводимости. Так как фононная передача энергии носит направленный характер, то и доля этой направленной энергии переданная электронам проводимости тоже носит направленный характер. Действуют законы сохранения энергии и импульса. Эта переданная электронам направленная энергия согласованного колебания ионных остовов и есть термоЭДС. Но согласно экспериментов Томсона получается, что в зависимости от свойств колебательных систем ионных остовов и свободных электронов проводимости энергия от колеблющегося иона к электрону передаётся в одном случае при движении колебания иона вправо (по тепловому потоку), в другом случае при обратном отклонении (влево). Отсюда и возникает в первом случае положительная термоЭДС, а во втором случае - отрицательная.

Моды колебательных систем ионных остовов и свободных электронов проводимости трёхмерны. При этом не всегда возбуждены все три взаимно перпендикулярные составляющие данной моды. Возбуждение тех или иных мод зависит от структуры кристалла (включая примеси и методы обработки), температурной зоны. Это приводит к сложной картине согласованных колебаний, накладываемых на хаотические колебания. К тому же энергия колебательных систем вещественных частиц передаётся через нецентральное соударение, что ещё больше усложняет общую картину взаимодействия и делает задачу построения количественной теории достаточно трудной. Выход видится в построении теории колебаний в тонких плёнках, где создаются благоприятные условия для когерентного взаимодействия. [6]. Структуры с когерентным взаимодействием позволят резко поднять коэффициент передачи энергии согласованных колебаний ионных остовов электронам проводимости и повысить КПД преобразования тепловой энергии в термоэлектричество. Структуры формирования плёнок с когерентным взаимодействием можно получить используя нанотехнологии.

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕТЕ ВЕКТОРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Теперь исходя из механизма образования положительной и отрицательной термоЭДС и положений векторной энергетике дадим качественное объяснение термоэлектрическим эффектам Пельтье, Томсона и Зеебека.

- Эффект Пельтье. Рассмотрим схему рисунка - 3. На этой схеме электроны самопроизвольно переходят из верхнего проводника в нижний. Это определяется



электрохимическими свойствами материалов пары. Если электрический ток (ток электронов) от внешнего источника по термопаре направлен как указано на рисунке, то левый спай будет нагреваться, а правый охлаждаться. Направленная энергия перескока электронов в контакте слева направлена против движения электронов от внешнего источника. Это приводит к хаотизации направленного потока энергии и вызовет нагрев спая. В спае справа потоки складываются, происходит дополнительное выравнивание энергии электронов, имеющих энергию выше уровня Ферми, что приводит к охлаждению спая.

- Эффект Томсона. Обратимся к схеме рисунка - 4. Если направление теплового потока и электрического тока (тока электронов) таково как изображено на рисунке, то нагрев и одного и охлаждение другого куска однородного материала определяются термоэлектрическими свойствами материала. Если материал обладает положительной термоЭДС, то левый кусок будет нагреваться, а правый охлаждаться. Это связано с тем, что в левом куске ток термоЭДС будет направлен против тока от внешнего источника, что приводит к хаотизации и нагреву. В правом куске всё будет наоборот. В случае с материалом имеющим отрицательную термоЭДС картина будет обратной той, что мы описали.

- Эффект Зеебека. Выше мы пришли к выводу, что ЭДС термопары обязана своим происхождением эффекту увлечения электронов фононами, а другие рассматриваемые причины (контактная разность потенциалов и градиент концентрации электронов проводимости) могут лишь уменьшать или увеличивать термоЭДС в зависимости от согласованности со знаком фоновой термоЭДС. Эффект Зеебека скрытно включает в себя и два других термоэлектрических эффекта, которые необходимо учитывать при количественных оценках. Но в основе эффекта Зеебека лежит взаимодействие двух колебательных подсистем кристаллического тела. Причём это взаимодействие двойного рода. В одном случае энергия теплового потока передаётся электронам проводимости от узлов решётки при их колебательном движении по потоку тепла, в другом в обратном направлении, что и порождает или положительную, или отрицательную термоЭДС.

#### ***а) Особенности конструкции тонкоплёночных термопар и их соединений.***

Вернёмся к рисунку - 5. Из него просматривается конструкция плоской плёночной термопары новой архитектуры, которая позволит выйти на другой уровень эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую в термоэлектрических явлениях.

Особенностью существующих термопар, в том числе и плёночных термопар, используемых в измерительной технике, является большое внутреннее сопротивление термопары как источника электродвижущей силы (ЭДС), вызванные большой длиной и малым поперечным сечением ветвей термопары:  $r_{вн.} = \rho_1 \frac{\lambda_1}{s_1} + \rho_2 \frac{\lambda_2}{s_2}$ , где:  $\rho_1$  и  $\rho_2$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $s_1$  и  $s_2$  - удельное сопротивление, длина и поперечное сечение ветвей термопары.

Это же является причиной большого термического сопротивления для теплового потока через ветви термопары, часть кооперативной энергии которого и преобразуется термопарой в электрическую энергию. Такая особенность приводит к тому, что КПД современных термопар, по превращению тепловой энергии в электрическую, не превышает 1% для металлических и 5-7% для полупроводниковых термопар и не позволяет получить большие мощности термоэлектрических преобразователей. Термопары изображённые на рисунках 6 и 7 имеют электрическое сопротивление на порядки меньше сегодняшних проволочных термопар, а через большие площади плоских плёночных термопар можно пропускать большие потоки тепла даже при малых перепадах температур. Обратим внимание на отличительные особенности термопар на рисунках 6 и 7. На рисунке - 6 изображена термопара традиционной компоновки, когда в одной ветви тепловой поток и ток электронов совпадают по направлению, а в другой противоположны. Это требует для ветвей материалы с положительной и отрицательной термоЭДС. На рисунке - 7 изображена термопара в которой тепловой поток через обе ветви или совпадает или противоположен направлению тока электронов. В такой схеме материалы пары должны иметь одинаковую по знаку термоЭДС. На рисунках слои в 50 микрон представляют собой фольгу, на которую производится напыление.



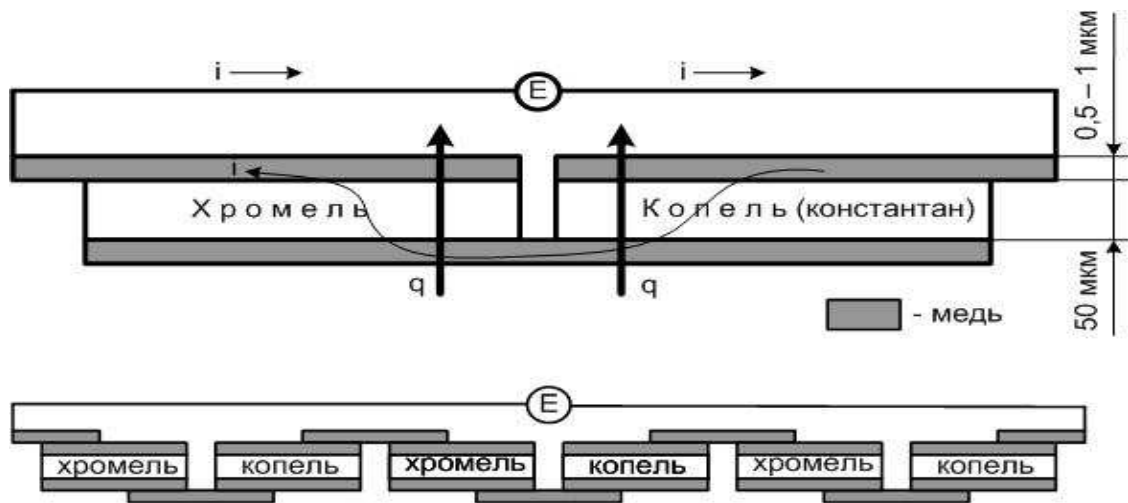


Рис. 6

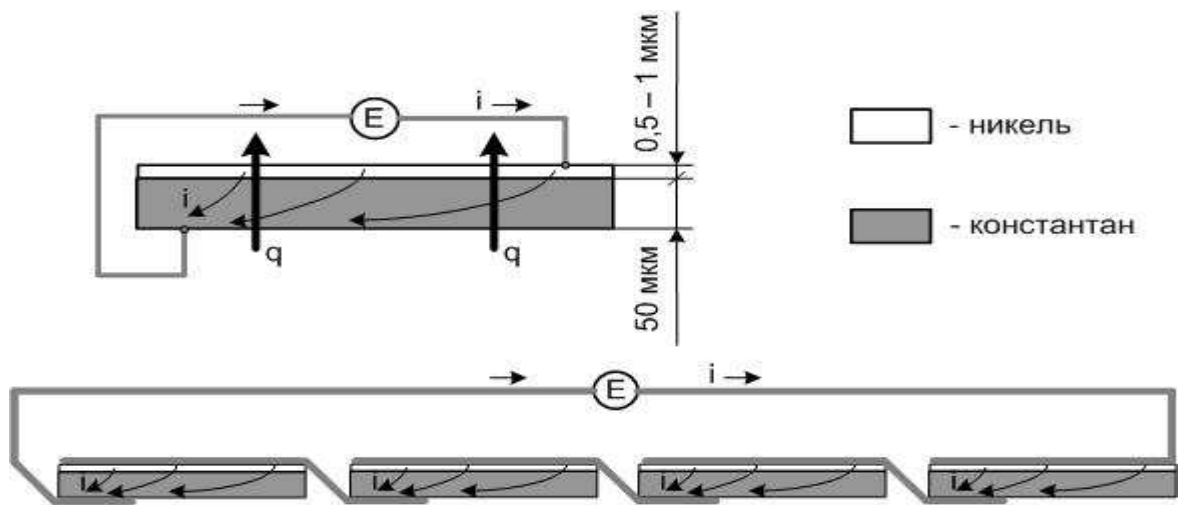


Рис. 7

Нужно учитывать ещё один момент. Необходимо, чтобы направление электрического тока через контакт поверхностей совпадало по направлению с контактной разностью потенциалов на площади касания плёнок. В противном случае это будет создавать дополнительное сопротивление.

На схемах рисунков 6 и 7 видны различия в последовательном соединении термопар различной компоновки.

### б) КПД термоэлектрических генераторов.

КПД определяется для любых других технических устройств как отношение полезной энергии к затраченной. Для термопары это будет отношение электрической мощности снимаемой с клемм термопары к мощности теплового потока прошедшего через ветви термопары.  $\eta_{т.п.} = \frac{N}{q}$ .

Сегодня, ссылаясь на фундаментальный характер термодинамических законов по преобразованию тепла в работу, умножают КПД термопары полученный из общетехнической формулы на множитель  $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$  равный КПД Карно. [1]. Это представляется не правомерным. Законы

теплопередачи, Ома и Зеебека, используемые при подсчёте КПД термопары являются экспериментальными законами, проверенными в самом широком диапазоне. Коль скоро множитель Карно является фундаментальным законом, то он должен реализовываться в

экспериментальных законах, которые мы используем. Если применять множитель, то закон Карно учитывается дважды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источником ЭДС и электрической энергии в термопаре служит не разность температур как таковая, а тепловой поток энергии. Температурная неравновесность является термодинамической силой порождающей кооперативный поток тепловой энергии. Тепловой поток, в форме согласованных колебаний кристаллической решётки, передаёт часть своей энергии свободным электронам проводимости.

Видимо нужно вести речь не об увлечении электронов фононами, а о двух формах взаимодействия узлов кристаллической решётки и свободных электронов проводимости. При своём периодическом колебании узлы кристаллической решётки различных веществ по разному взаимодействуют со свободными электронами проводимости. В одном случае энергия и импульс от узлов кристаллической решётки к электронам проводимости передается в полупериод, когда колебание ионных узлов решётки совпадает с направлением теплового потока. В веществах с таким взаимодействием формируется положительная термоЭДС. В другом случае энергия и импульс от узлов кристаллической решётки к электронам проводимости передается в полупериод, когда колебание ионных узлов решётки противоположно с направлением теплового потока. В веществах с таким взаимодействием формируется отрицательная термоЭДС.

Встаёт задача построения количественной теории возникновения положительной и отрицательной термоЭДС и задача экспериментального изучения тонкоплёночных термопар.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн А.С. Термоэлектрические генераторы. -М.: “ГосЭнергоИздат”, 1956г., 48с.
2. Блатт Ф.Д. и др. Термоэлектродвижущая сила металлов. – М.: “Металлургия”, 1980г., 248с.
3. Вонсовский С.В., Кацнельсон М.И. Квантовая физика твёрдого тела. – М.: “Наука”, 1983г., 336с.
4. Исакович Р.Я. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: “Недра”, 1970г., 488с.
5. Каганов М.И., Лифшиц И.М. Квазичастицы: Идеи и принципы квантовой физики твёрдого тела. – М.: “Наука”, 1989г., 96с.
6. Косарев А.В. Динамика эволюции неравновесных диссипативных сред. Издание второе, переработанное и дополненное. - Из-во: LAMBERT Academic Publishing, г. Саарбрюккен, Германия, 2013г., 354с.
7. Савельев И.В. Курс физики. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: “Наука”, 1989г., 304с.
8. Строшио М., Дута М. Фононы в наноструктурах. / Пер. с англ. Под ред. Г.Н. Жижина. – М.: “Физматлит”, 2006г., 320с.
9. Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. – М.: “Просвещение”, 1969г., 488с.

*P.S. Доклад представлен на 19-й Российской научно-практической конференции “Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах”. Балаково, декабрь, 2017г.*