МОУ «Лицей № 43»

(естественно-технический)

**"Преобразование тепловой энергии в электрическую"**

Шуляев Николай

10 класс

Саранск 2010

**Аннотация на русском:**

*По второму закону экспериментально продемонстрирован механизм поверхностной проводимости диэлектрика в магнитном поле, связанный с многократно повторяющимися процессами термоэмиссии электронов и последующей их адсорбцией.*

**Аннотация на английском:**

*According to the second law experimentally demonstrated the mechanism of surface conductivity of the dielectric in the magnetic field caused by multiple repetitive processes thermal emission of electrons and their subsequent adsorption.*

**Введение:**

Рассмотрена возможность использования наблюдаемого явления для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

Показано, что данный преобразователь является примером системы, в которой нет обратимости даже на микро уровне.

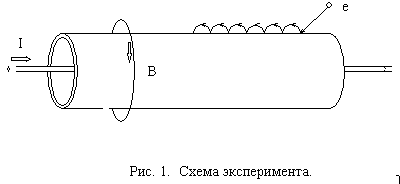
Основной постулат статистической физики - обратимость и равновесие на микро уровне, то есть на уровне элементарных процессов, другими словами, принцип детального равновесия. А можно ли экспериментально создать условия, при которых этот принцип будет заведомо нарушен? В классических системах этого сделать нельзя, так как классические уравнения движения инвариантны относительно обращения времени, замены t на -t. Поэтому, для каждой траектории движения частицы из одного состояния в другое, есть траектория обратного движения, и пространственно они совпадают.

Не только уравнения механики, но и уравнения движения заряженных частиц в электрическом поле также инвариантны относительно обращения времени. Однако уравнения движения заряженных частиц в магнитном поле не инвариантны относительно обращения времени, что, как хорошо известно, связано с релятивисткой природой магнитного поля. Заряженная частица в магнитном поле не может двигаться туда, и обратно по одной и той же траектории.

Уравнения релятивисткой механики не инвариантны относительно обращения времени, они инвариантны относительно полной инверсии - одновременной замены знаков у времени, и пространственных координат. Поэтому, и в магнитном поле, для каждой траектории движения из одного состояния в другое, есть траектория обратного движения, но пространственно они разные. Несмотря на пространственное различие, обычно, пути туда и обратно равноправные, принцип обратимости работает и в этом случае. Чтобы сделать систему необратимой на микро уровне, на физическом уровне, необходимо искусственно ввести преграду на обратном пути, что можно сделать, пользуясь пространственным различием траекторий.

И ещё, очень важное требование: необходимо большое количество последовательных, физически необратимых, переходов, чтобы снять вопрос о входе и выходе из такой системы во внешнюю, обратимую систему. Наконец, система должна быть предельно простой и не вызывать дополнительных вопросов.

Всем этим условиям удовлетворяет система, которая использовалась нами для исследования явления поверхностной термоэмиссионной проводимости диэлектрика в магнитном поле.



Основной элемент экспериментальной установки - труба из диэлектрика, находящаяся в магнитном поле линейного проводника тока, проходящем вдоль оси трубы (рис. 1).

Предположим: на поверхность диэлектрика садится свободный электрон от какого-либо внешнего источника электронов, например, термокатода. Электрон будет избыточным, по отношению к диэлектрику, энергия его связи с поверхностью будет невелика, и через некоторое время, в результате термоэмиссии он покинет поверхность. Его средняя энергия будет соответствовать температуре поверхности, а преимущественное направление движения - перпендикулярно поверхности.

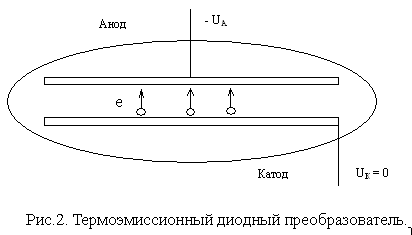
Магнитное поле, всюду на поверхности, параллельно поверхности, и перпендикулярно оси трубы. Под действием магнитного поля, электрон, описав полуокружность, снова сядет на поверхность диэлектрика, после чего процесс повторится. В результате возникает направленное движение электронов вдоль поверхности трубы. В каждом цикле электрон движется только в одном направлении - траектория обратного движения лежит на внутренней поверхности трубы, и этот путь преграждает диэлектрик.

Если, помимо магнитного поля, есть электрическое поле, направленное против движения электронов, электроны, тем не менее, будут двигаться против электрического поля, каждый раз теряя часть своей кинетической, тепловой энергии, необходимой для преодоления разности потенциала.

В принципе, такая система эквивалентна батарее большого количества (несколько тысяч), последовательно соединённых термоэмиссионных элементов, которые достаточно широко применяются в качестве источников тока [1 - 3].

Термоэмиссионный преобразователь (рис. 2) представляет собой вакуумный диод с очень большой поверхностью электродов. Чтобы избежать влияния объёмного заряда, ограничивающего ток диода, расстояние между электродами приходится выбирать очень малым, от 0,1mm до 1μm. ЭДС такого элемента равна примерно кТ/e, где Т - температура катода (кТ/e = 0,17 В при Т = 20000К). Из-за малой величины ЭДС, обычно используются батареи последовательно соединённых таких элементов.

Несмотря на внешнюю схожесть между нашей системой, и батареей термоэмиссионных элементов, есть принципиальное отличие: термоэлемент не может работать при одинаковой температуре анода и катода. Для работы термоэлемента необходимы две температуры, а в нашей системе, "катодом" и "анодом" служит одна и та же поверхность трубы, и для описания работы системы нужна только одна температура - температура трубы.



Вопрос слишком серьёзный, и чтобы понять, в чём разница, попробуем мысленно изменить нашу систему, упростить её, по возможности приблизив её к батарее термоэлементов. Нанесём на внешнюю поверхность трубы кольца из какого-нибудь материала, из которого изготавливаются катоды. И сделаем термоэлемент, у которого анод и катод сделаны из того же материала (рис. 3).



Принципиальное отличие между этими двумя системами только одно: в одном случае, электроны движутся в электрическом поле, а в другом - в магнитном. Уравнение движения электрона в магнитном поле не инвариантно относительно обращения времени. Если мы у полученного решения заменим t на -t, то такое решение не будет удовлетворять уравнению движения. Электрон в магнитном поле, вылетев из точки 2 (рис. 3а) в обратном направлении, обратно в точку 1 не попадёт. Он попадёт в точку 3.

Принцип детального равновесия является следствием инвариантности уравнений движения относительно обращения времени, и он неприменим для данного случая. Прежде чем говорить о вероятностях, нужно посмотреть: а есть ли дорога обратно? Вместе с принципом детального равновесия, становятся неприменимыми и все остальные построения, основанные на нём. Электроны в электрическом поле можно рассматривать как электронный газ, со свойствами, подобными обычному молекулярному газу. Электроны в магнитном поле молекулярным газом считать нельзя - законы движения молекул и электронов разные, у них разная симметрия.

Траектория обратного движения электрона из точки 2 в точку 1 (рис. 3а), разумеется, есть, но это другая траектория. В нашем случае, она лежит на внутренней поверхности трубки, и путь обратного движения преграждает диэлектрик.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА**

В качестве диэлектрической трубы, использовалась труба из сапфира диаметром 40mm, и длиной 400mm. Толщина стенки 2,5mm. Труба выращена из расплава целиком, и её поверхность не подвергалась какой-либо механической обработке, за исключением торцов. Труба установлена в вакуумной камере диаметром 160mm из нержавеющей стали, и откачивалась диффузионным паромасляным насосом.

Проводник с током представлял собой 12 проводников, уложенных в трубку из нержавеющей стали, и охлаждаемых потоком воды, проходящей по трубке. Проводники были включены последовательно, питание осуществлялось от источника, который обеспечивал ток до 100А. Таким образом, суммарный ток проводников, проходящих по оси диэлектрической трубы, мог достигать 1200А. В первых экспериментах такой ток не потребовался, и все измерения были выполнены при общем токе 600А. Магнитное поле на поверхности сапфировой трубы, при токе 600А, 6.10-3 Tesla (60 эрстед).

В качестве рабочей поверхности, можно использовать как внешнюю, так и внутреннюю поверхность трубы. Использовать внутреннюю поверхность предпочтительнее, так как поверхностный заряд не создаёт электрическое поле внутри трубы, и не влияет на движение электронов, однако, из-за влияния металлической трубки (в которой уложены проводники с током), падение потенциала вдоль оси диэлектрической трубы будет неравномерным. Устранить влияние металлической трубки можно, установив поверх её дополнительную диэлектрическую трубку со слабопроводящим покрытием, концы которого подключить к катоду и аноду. Но технологических возможностей изготовить такую, экранирующую трубку не было, поэтому первые эксперименты проводились на внешней поверхности сапфировой трубы, как показано на рис.1. При этом, была надежда, что электроны, в своём движении, выровняют падение потенциала вдоль трубы. Забегая вперёд, можно сказать, что надежда оправдалась, но только отчасти. Проблема создания постоянного градиента потенциала вдоль трубы (то есть против движения электронов) осталась.

Около одного из концов сапфировой трубы был установлен катод. Использовался простейший, вольфрамовый катод, изготовленный из кусочка вольфрамовой проволоки диаметром 0.1mm, и длиной 15mm, изогнутой в виде дуги, нижняя часть которой находилась примерно в 2mm от поверхности сапфировой трубы. На расстоянии от катода около 10mm, ближе к концу трубы, был установлен вспомогательный электрод - полоска фольги, намотанная на поверхность трубки.

Вспомогательный электрод использовался для модуляции потока электронов, и для измерения тока эмиссии катода.

На противоположном конце трубы был установлен анод - коллектор электронов, который также был изготовлен из фольги (полоска шириной 10mm), намотанной на сапфировую трубу. Расстояние между катодом и анодом - 320mm.

Труба полностью находилась в вакууме, лишь своими концами опираясь на керамические опоры. Труба имела электрический нагреватель - спираль из нихромовой проволоки, уложенную на внутреннюю поверхность трубы, в её нижней части, вдоль трубы. Для лучшего теплового контакта, спираль была засыпана порошком Al2O3. Перед началам всех экспериментов, нагреватель отключался от источника питания, и находился на нулевом потенциале. Температура трубы контролировалась термопарой, приваренной к аноду, и один из выводов термопары служил выводом анода. Нагреватель был рассчитан на нагрев сапфировой трубы до температуры 600С, однако, на первом этапе, такая температура не потребовалась, и все измерения проводились при температуре 100С.

При температуре поверхности 100С и магнитном поле 6.10-3 Tesla, средний радиус орбиты термоэлектрона - 75 μm.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

В большинстве экспериментов, все металлические детали установки: стенки вакуумной камеры, металлическая трубка с проводниками тока, вспомогательный электрод, и катод, находились под одним, нулевым потенциалом. В этом случае, ток катода определялся только температурой катода и мог достигать величины 0.8μА.

При любых токах катода, при выключенном источнике питания магнитной системы, т. е. в отсутствии магнитного поля, ток анода был ниже предела чувствительности аппаратуры - 3.10-11 А. При включении магнитного поля, появлялся достаточно значительный ток анода. Так, при токе катода 0.5μА, ток анода составлял 0,14μА, при сопротивлении в цепи нагрузки анода 1МΩ, и отрицательном потенциале на аноде 140mV. То есть, в этих условиях, почти треть электронов, покинувших катод, достигает анода. Фактически это означает, что все электроны, попавшие на поверхность сапфировой трубы, пройдя по её поверхности путь более 30сm, достигают анода - коллектора электронов. Объяснить наблюдаемый ток какими-то электронами, случайно попавшими на анод, невозможно - площадь поверхности стенок вакуумной камеры в 300 раз больше поверхности анода, анод находится в 30сm от катода, а от катода, до ближайшей стенки - 6сm. К тому же, на стенках камеры нулевой потенциал, а на аноде - отрицательный, который, в некоторых экспериментах, достигал величины 1,0V, что значительно больше тепловой энергии электрона, вылетевшего даже напрямую с катода.

При увеличении сопротивления в цепи нагрузки анода с 1МΩ до 10МΩ, напряжение на аноде увеличивается с 0,14V до 0,675V (при токе катода 0,5μА), а ток анода уменьшается вдвое. Таким образом, ЭДС можно считать равной 0,675V. Эта величина примерно в 30 раз меньше возможной, что связано с неравномерностью падения потенциала вдоль трубы. Падение потенциала сосредоточено в области анода, на длине примерно равной расстоянию от поверхности сапфировой трубы до поверхности металлической трубки с проводниками тока - 12mm. Поэтому, из 320mm трубы, в режиме преобразования работает только 12mm около анода, по остальной поверхности электроны движутся в поле постоянного потенциала.

Поле, создаваемое электронами, сидящими на поверхности трубы, слишком мало, чтобы существенно повлиять на движение электронов. Очевидно, что лимитирующей стадией на пути электрона от катода до анода, является промежуток катод - поверхность трубы. Температура катода только в 5 раз выше температуры трубы, а расстояние катод - поверхность (2mm) в 25 раз больше радиуса орбиты электрона (75μm). Кроме того, плотность поверхностного заряда вблизи катода выше: электроны садятся на поверхность около катода, а потом, в своём движении, расползаются по всей поверхности трубы.

Для определения времени движения электрона по поверхности трубы, от катода до анода, на вспомогательный электрод подавался положительный потенциал 100V. При этом, большая часть электронов собиралась электродом, ток анода падал, и измерялось время нарастания тока анода после подачи на вспомогательный электрод нулевого потенциала. Полученное таким образом время движения оказалось равным 1,2ms. Взяв за среднее расстояние, которое проходит термоэлектрон, диаметр орбиты (150μm), получим время пребывания электрона на поверхности - 0,6μs. Это время соответствует работе выхода примерно 0,6eV. Поверхностная плотность электронов, при равномерной плотности, 1,2.106 cm-2, и поле, создаваемое этими зарядами 1,0V/cm. Разность потенциала на расстоянии, равном радиусу орбиты 75μm - 7,5mV, что, как и следовало ожидать, заметно меньше кинетической энергии термоэлектрона.

Для более детального анализа движения электронов вдоль поверхности диэлектрика, необходимо в явном виде учитывать распределение термоэлектронов по скорости и углу вылета с поверхности. При использовании стандартного, так называемого, косинусного распределения:

которое используется в молекулярной физике для описания процессов десорбции атомов и молекул с поверхности твёрдых тел, задача о движении электронов, в отсутствие электрического поля, решается точно. Результат: среднее расстояние, которое проходит электрон вдоль поверхности за один цикл - L, равно

L=2R(p/4),

где R - радиус орбиты электрона со средней тепловой скоростью vt, R=mevt/eB.

Если, кроме магнитного поля - B, есть встречное электрическое поле, направленное вдоль оси трубы - E, задача анализируется также легко. В этом случае, существует критическая скорость vc = E/B. Если скорость электрона, вылетающего с поверхности диэлектрика, меньше критической скорости vc, электрон теряется - он уходит на стенку камеры. А среднее расстояние, которое проходят электроны, имеющие начальную скорость выше критической, за один цикл, в первом приближении, остаётся таким же, как и при E = 0. Поэтому, нужно только посчитать потери электронов.

Кинетическая энергия электронов, имеющих скорость меньше критической, во всех интересных для нас случаях, меньше kT, и в распределении по скорости экспоненциальный множитель можно положить равным единице. После этого, для нахождения доли электронов, теряемых в одном цикле - δ, останется проинтегрировать только предэкспоненциальный множитель, v2 от нуля до vc - критической скорости, и получим:

δ ~ vc3~ E3

Поэтому, при снижении напряжённости электрического поля, например, на порядок, потери электронов в одном цикле упадут на три порядка, что, при тех же общих потерях электронов, позволит на три порядка увеличить число циклов. Основной результат учёта распределения электронов по скорости: ЭДС источника растёт не пропорционально числу циклов N, а пропорционально числу циклов в степени 2/3,

ЭДС ~ N2/3,

при этом неважно, каким образом мы изменяем число циклов - изменением длины рабочей поверхности, или изменением величины магнитного поля. В любом случае, при любых, наперёд заданных, потерях электронов, сколь угодно малых, теоретически, можно получить сколь угодно большую величину ЭДС.

Экспериментально полученное значение ЭДС оказалось в 1,6 раза больше расчётного. Это, возможно, связано c отличием реального распределения электронов по скорости от молекулярного, взятого в качестве модельного. Действительно, основной механизм эмиссии электронов - туннельный, а вероятность прохождения электрона через барьер зависит от скорости. Поэтому, при учёте туннельного эффекта, доля медленных электронов в распределении будет меньше, и, соответственно, ЭДС больше. Но сейчас говорить о состояниях, в которых находятся электроны на поверхности, и о конкретных механизмах их эмиссии, невозможно - нет экспериментальных данных.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данное устройство, в описанном виде, конечно, не может иметь практического применения по целому ряду причин, прежде всего, из-за особой конфигурации магнитного поля. Но использовать магнитное поле аксиальной симметрии, и цилиндрическую поверхность диэлектрика вовсе не обязательно. Можно использовать поля обычных электромагнитов, и плоскую поверхность диэлектрика, а для исключения выхода электронов с рабочей поверхности, использовать электростатическое поле. Проблема эта, как и создание постоянного градиента потенциала, большей частью чисто технологическая.

Основная проблема - как обеспечить достаточно интенсивный поток электронов на поверхность. При этом нужно иметь в виду, что энергетические затраты на производство таких электронов не имеют значения. Даже в нашем устройстве, электрон может набрать энергию до 20eV. В магнитном поле обычного электромагнита, 1Tesla, радиус орбиты электрона будет в 160 раз меньше, и электрон, на том же пути, может набрать энергию 3.103eV. Даже при использовании фотокатода, начальные затраты будут гораздо меньше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярыгин В.И. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Обнинск. Изд. ГНЦ РФ-ФЭИ. 2004.

2. Эксперименты А.П. Перминова

3. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/153483/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5>

4.<http://slovari.yandex.ru/~%D0%BA%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B8/%D0%91%D0%A1%D0%AD/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%20%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8/>