

КОРОЛЕВСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ДЕПАРТАМЕНТ ЭКОЛОГИИ
НИИ Альтернативных источников энергии

ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА
Русскоязычная электронная версия

«ТЕРМОТРОН» - ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Полагаю, что доступная форма изложения, для большинства читателей, не имеющих даже минимальной подготовки, поможет и им, и всем нам лучше понять всю перспективность получения электрического тока путем прямого преобразования тепла в электричество. Осознать, что такое термоэмиссионные генераторы, в чем их преимущества и недостатки, где прячутся основные противоречия, мешающие термоэмиссионным генераторам занять подобающее им лидирующее положение в энергетике.

Термоэлектронная эмиссия была открыта Эдисоном в 1884 году. Несколько позже в 1897г. Томсон показал, что с нагретого катода эмитируются электроны. Этот эффект получил название «электронной эмиссии» - явление выхода электронов за пределы проводника.

В металле даже при невысокой комнатной температуре присутствует большое количество свободных электронов, находящихся в хаотическом тепловом движении. Скорости свободных электронов в любой фиксированный момент времени различны и изменяются во времени вследствие взаимодействия электронов между собой и с ионами кристаллической решетки металла. При нагревании металла скорости электронов и их кинетическая энергия возрастает.

Находясь в беспорядочном тепловом движении, часть электронов достигает поверхности металла. Далеко не все из них могут пересечь поверхность металла и перейти в окружающую среду. На электроны, приближающиеся к поверхности, начинают действовать электрические силы, втягивающих их обратно в металл. У поверхности металла образуется два слоя разноименных электрических зарядов, на преодоление которых электроном тратится определенная энергия. Для выхода же электронов за пределы металла они должны обладать достаточным запасом кинетической энергии, еще и по преодолению задерживающей их в металле силы. Подобная работа носит название работы выхода. Она является характеристической величиной, и для каждого металла она своя. Как уже было сказано тормозящее действие, которое оказывает металл на покидающий его электрон, не заканчивается на момент пересечения электроном границы металла. В результате выхода электрон оказывается положительно заряженным. Отдаляясь же от металла, он перемещается в тормозящем электрическом поле.

При комнатной температуре только немногие электроны металла обладают запасом энергии, достаточным для выхода из металла. Поэтому в этих условиях эмиссия электронов практически не заметна. Увеличить число электронов, покидающих металл, можно путем сообщения электронам дополнительной энергии или уменьшения работы выхода из металлов.

На практике используют оба эти средства.

Дополнительная энергия Q сообщается электронам путем нагрева катода, что вызывает возрастание тока электронной эмиссии (Рис.1). Если нагреть катод (1) до температуры (T_K) равной $1100 - 2500^\circ\text{K}$, то с поверхности металла катода начнут вылетать электроны в направлении анода (Рис.1), имеющего более низкую температуру (T_A) равную $700-1100^\circ\text{K}$. Если внешняя цепь ТЭМГ замкнута, то электроны с анода, через внешнюю нагрузку (R) вернуться на катод. Направленное движение электронов будет продолжаться до тех пор, пока между катодом и анодом будет поддерживаться разность температур (ΔT). $\Delta T = T_K - T_A$

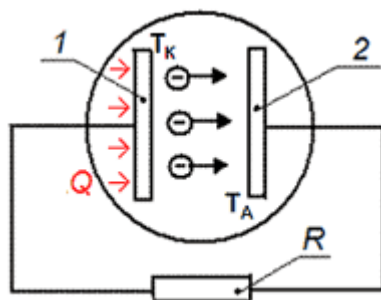


Рис. 1

1 - катод, 2 - анод, Q - нагревательный элемент, R- нагрузка.

Таким образом, часть тепловой энергии (Q), подведенной к катоду, непосредственно преобразуется в постоянный электрический ток. При разомкнутой внешней цепи ТЭМГ напряжение на его выводах будет равно ЭДС.

Зависимость плотности тока эмиссии от температуры в рабочих пределах ее измерения точно следует закону $J_3 = AT^2 e^{-\frac{b}{T}}$ установленному в результате исследований Ричардсона и Дэшмана.

В формуле J_3 - плотность тока термоэлектронной эмиссии в амперах на квадратный сантиметр (a/ см^2); T -температура катода в градусах абсолютной шкалы. A и b - постоянные величины, зависящие от вещества катода.

Из формулы следует, что наиболее сильно ток эмиссии зависит от величины b , которая пропорциональна работе выхода электрона из металла. Чем больше величина b , a , следовательно, и работа выхода, тем меньше при заданной температуре плотность тока эмиссии. Значение параметра A для большинства чистых металлов, из которых изготавливаются катоды, различаются сравнительно мало.

Таблица. 1

Металл	A Авольфрам	b бвольфрам
Вольфрам	1.0	1.00
Молибден	0.9	0.92
Тантал	1.0	0.91
Торий	1.2	0.75
Барий	1.0	0.47
Цезий	2.7	0.04

Нетрудно заметить, что наибольшей термоэмиссионной способностью обладает цезий, за ним следует барий и т.д., наименьшей - вольфрам, однако цезий легко испаряется, вольфрам же наоборот хорошо переносит разогрев до 2700°K . В лампах накаливания например вольфрамовый катод в течение длительного времени имел удельную эмиссию до 300 ма/см^2 . Экономичность же такого вольфрамового катода была очень низка и составляла всего 5 ма/Вт . Характеристики оставляли желать лучшего, потому впоследствии появились активированные катоды для ламп, представляющие собой обычно вольфрамовую основу, покрытую тонким (атомарным) слоем тория, бария, или другого металла с малой работой выхода. Таким путем удалось уменьшить работу выхода в 1.7 раза при ториевом покрытии, в 3.1 - при бариевом покрытии, и как логическое завершение - появление активированных катодов, уменьшающих еще больше работу выхода электронов. Среди них наибольшее распространение получили оксидные катоды, покрывающие тот же вольфрам атомарным слоем из смеси бария и стронция. И хотя сегодня лампы, можно сказать, исчезли из нашего поля зрения, как когда-то паровозы с железнодорожных путей, принципы получения термоэмиссионного тока остались незыблемыми.

Классификация термоэмиссионных преобразователей

До начала классифицирования проясним для себя основную сущность термоэмиссионной энергетики. А она достаточно проста - и заключается в переносе максимального количества электронов с горячего катода на холодный анод при минимальной потере тепла. А этого никак не избежать, потому что нагрев катода с последующим отрывом электронов от своих ядер сопровождается излучением фотонов (а это и есть теплопередача излучением). Пытаясь отодвинуть анод от катода, мы уменьшаем тепловое воздействие на анод, придвигая его к катоду, увеличиваем эмиссию - ток, но анод начинает перегреваться. И если электрон, как носитель отрицательного элементарного заряда стабилен и обладает массой покоя, то фотон может существовать только в движении, его невозможно остановить, или при помощи полей повернуть, при «соударении» с веществом он может только испытывать «упругие или неупругие столкновения». Самих же фотонов в атоме и в ядре в готовом виде нет, они рождаются в момент перестройки структуры атома, в данном случае при его нагреве. Чем дальше фотонный поток от анода, тем легче его вернуть на катод с помощью «упругого столкновения» за счет «механического» отражения фотонов зеркалами. В этом и суть. Зазор между катодом и анодом не нужен по определению, без него электронам с горячего катода легко «перепрыгнуть» на холодный анод. Но их близкое расположение приводит к нагреву анода и сводит на нет преимущества свободного электронного перехода. Задача в том и состоит, чтобы отделить «зерна от плевел - фотоны направо, электроны налево».

Отсюда и большое количество направлений, по которым развивается термоэмиссионная энергетика. Нет и единой точки зрения даже на то, как называть устройство для получения термоэмиссионного тока, кто называет ТЭМГ, а кто и ТЭП (термоэмиссионный преобразователь).

Остается их только классифицировать (табл.2)

В базовом исполнении все, или почти все термоэмиссионные генераторы (ТЭМГ) как уже было показано на рис.1 составляется из двух плоских (или коаксиальных) электродов, разделенных небольшим вакуумным промежутком с $h = 0.1 - 0.001\text{ мм}$ с включенных в цепь нагрузочным сопротивлением.

1. Вакуумные с малым межэлектродным расстоянием до 0.01 мм. Под вакуумом обычно понимается газ, в частности воздух имеющий такую высокую степень разряжения (давление порядка 10^{-6} - 10^{-7} мм рт.ст.) при котором движение электронов происходит практически без столкновения с оставшимися молекулами газа, вакуум в данном случае является не теплопроводящей средой;

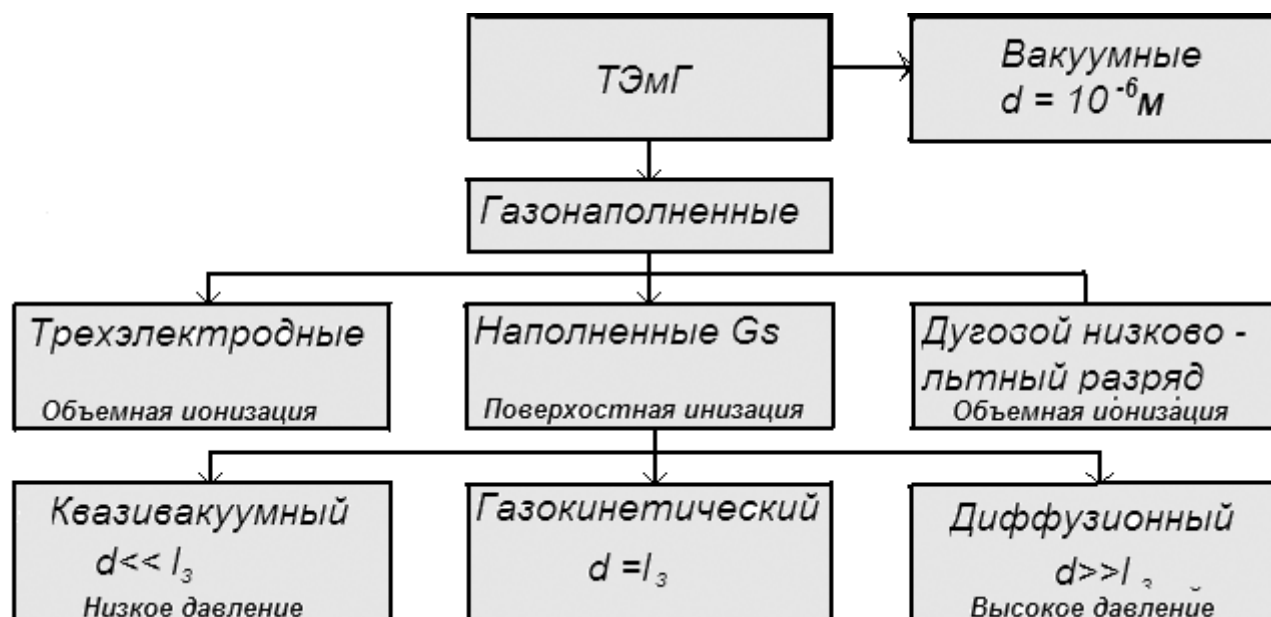
2. Трехэлектродный, требующий вспомогательного источника питания повышенного напряжения (осуществляющий объемную ионизацию);

3. Газонаполненный (Gs), в котором осуществляется поверхностная, или контактная ионизация на катоде.

4. Преобразователь с объемной ионизацией - где устойчивый дуговой разряд осуществляется при низком напряжении и значительном по силе токе.

В табличной форме это будет выглядеть следующим образом:

Таблица 2.



где l_3 - длина свободного пробега электрода; d - межэлектродный зазор.

Вакуумный ТЭМГ

В нем, да и во всех термоэмиссионных преобразователях также заложен принцип выхода из металла свободных электронов за счет придания им кинетической энергии от подводимого тепла такой силы, что они начинают вылетать за поверхность электронной пленки (Рис.2) в направлении к аноду, образуя облако электронов между катодом и анодом с неким пространственным зарядом имеющим объемный потенциал - δ . Объемное облако электронов достигает высоты порядка 10^{-5} - 10^{-6} м. Преодолев поверхностный барьер (ϕ) и объемный потенциал (δ), электроды достигают анода, если он расположен от катода на таком же расстоянии - 10^{-5} - 10^{-6} м. При больших зазорах между катодом и анодом соударение между электронами в электронном облаке не позволяет электронам достичь анода. Поэтому вакуумные ТЭМГ не могут работать при больших расстояниях между электродами, а существующие величины зазоров в межэлектродном пространстве конструктивно трудновыполнимы.

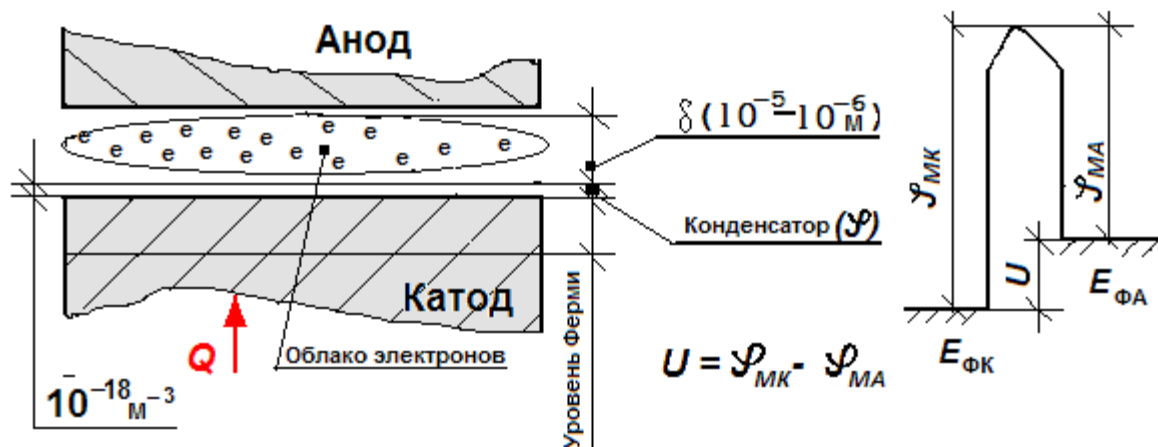


Рис 2.

U - напряжение (ЭДС - электродвижущая сила). $\psi_{МК}$ и $\psi_{МА}$ - поверхностные потенциальные барьеры катода и анода. $E_{ФК}$ и $E_{ФА}$ - уровень Ферми катода и анода.

А вот что пишут на эту тему (по источникам преобразования энергии) в издании под редакцией А.Ф. Бертинова от 1982 года в «Специальных электрических машинах». Цитируем дословно: «для снижения влияния объемного потенциального барьера δ возможны два пути: а) снижение межэлектродного расстояния до 10^{-6} м; б) создание внешних электрических или электромагнитных полей для компенсации δ . Оба эти способа трудноосуществимы и поэтому вакуумный ТЭМГ малоперспективен. Основной недостаток - трудность изготовления и сохранения при высоких температурах (коробление и разбухание поверхности) малых межэлектродных расстояний, а также отсутствие материалов для катодов, могущих длительно работать при высоких температурах».

К этому абзацу мы еще обязательно вернемся. Так как трудно понять, что на самом деле имелось в виду (проведенный самым тщательным образом патентный поиск ни к чему не привел). При обилии материала на эту тему нет никакой ясности в этом вопросе.

А пока продолжим. Чем выше температура катода, тем выше эмиссионный ток но тем и интенсивнее испарение кристаллической решетки катода, доходящей до 0.1 мм. на 1000 часов работы при рабочей температуре катода около 2800°К . Это значительно больше межэлектродного расстояния вакуумного ТЭМГ, где перенос материала с катода на анод в конце концов замкнет межэлектродное пространство и установка перестанет работать.

Газонаполненные ТЭМГ

В газонаполненных генераторах компенсация пространственного заряда достигается путем введения положительных ионов в межэлектродное пространство, которое генерируется поверхностной или объемной ионизацией. Для этих целей обычно используют цезий.

На рисунке 3 изображен газонаполненный трехэлектродный генератор с объемной ионизацией.

При помощи дополнительного третьего электрода осуществляется вспомогательный разряд на катод. На него расходуется от 10 до 20% всей мощности ТЭМГ. Используется при низкой температуре катода не превышающей 1500°К . КПД установки не дотягивает и до 10%.

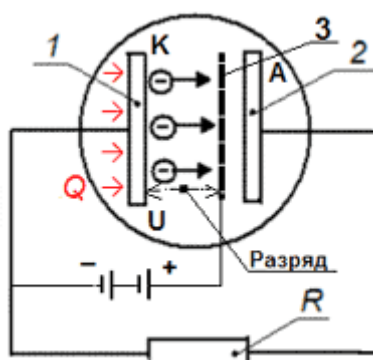


Рис 3.

1 - Катод, 2 - Анод, 3 - Вспомогательный электрод (экран), Q - нагревательный элемент, U - напряжение между катодом и экраном, R - нагрузка

Следующий тип газонаполненного ТЭМГ, получивший наибольшее распространение, основан на использовании эффекта поверхностной ионизации нейтрального газа на катоде. При ударе таких атомов о поверхность горячего металла они отдают свои электроны, превращаясь в положительно заряженные ионы. При этом происходит нейтрализация пространственного заряда электронов находящихся над поверхностью катода. Цезий, заполняющий межэлектродное пространства и имея низкий потенциал ионизации ($\phi=3.89\text{В}$) нейтрализует объемный пространственный заряд электронов. Число ионов цезия относительно невелико, и ионизированного газа при давлении 10-2 уже достаточно, чтобы электрическое поле в межэлектродном зазоре стало равным нулю. Чем выше давление паров цезия, тем больше эмиссия электронов с катода на анод. В целом, частично сконденсировавшийся на электродах цезий повышает выходное напряжение элемента.

Плотность «электронного газа» между электронами неоднородна, у катода имеется избыток электронов, а в области анода находится тонкий изолирующий барьер из относительно холодных неионизированных паров цезия (Cs). Их электроны обходят без особых затруднений. Данный барьер действует как термоэлектрический материал с высоким коэффициентом Зеебека (α), поэтому в этой области может генерироваться значительная доля напряжения элемента.

Еще один распространенный класс ТЭМГ - с объемной дуговой нейтрализацией. Во время работы в нем при определенных условиях между электродами может возникнуть длительная низковольтная холодная дуга. Напряжение такого элемента удается поднять до 6 вольт (все термоэмиссионные генераторы низковольтные). Ток ионизации возрастает примерно на порядок, растет как следствие и мощность. С единицы площади (S) такого генератора в 1м² можно снять до 250 кВт мощности (P) и поднять КПД (η) установки до 17% при $T_K = 2000\text{ К}$ и $T_A = 1000\text{ К}$.

Коэффициент Полезного Действия

Как и любая тепловая машина ТЭМГ обладают определенным КПД.

В таблице 3 показаны значения КПД без учета реальных потерь.

Полученные значения существенно ниже и составляет порядка 10~15 %. (Таблица 4).

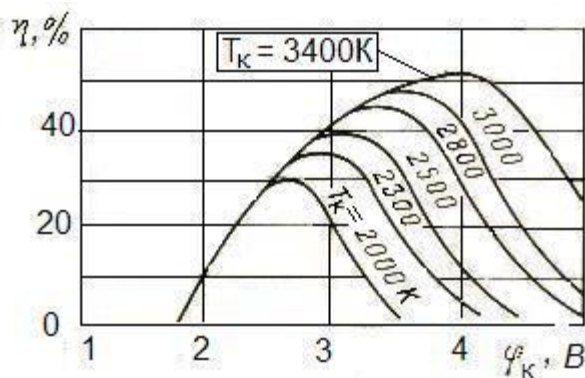


Таблица 3

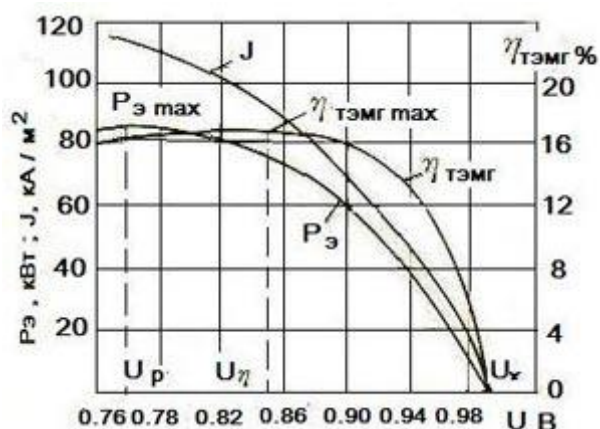


Таблица 4

Подводимая к катоду мощность теплового источника (P_T) расходуется на электронное охлаждение катода ($P_э$), взаимный теплообмен излучением ($P_{и}$), потери с теплопроводностью ($P_{к}$) и потери в подводящих проводах. ($P_{пп}$) т.е.: $P_T = P_э + P_{и} + P_{к} + P_{пп}$.

По оценкам некоторых экспертов среди существующих ТЭМГ наилучшими показателями могут стать генераторы, размещенные непосредственно в ядерных реакторах с урансодержащим цезиевым катодом. При температуре около 2000 градусов от них ожидают до 40% КПД при удельной мощности катода ($P_э$) доходящей до 1000 кВт/м². Такие установки могут быть применены разве что в космических полетах. Вот мы и остановились на месте, на котором сегодня топчется наука, а вместе с ней и всё остальное прогрессивное человечество. А дальше что ... «Термотрон»

Термотрон – а что это такое?

Амплитрон - знаем, магнетрон - знаем, даже клистрон знаем, термотрон не знаем. И не мудрено, речь пойдет о преобразователе, точнее о ТЭМГ, который был изготовлен 15 лет назад в виде лабораторной любительской установки и прожил 3 минуты. Правда, при этом показал многообещающие результаты.

Но до знакомства опять придется немного отступить в историю вопроса.

Рассмотрим для начала СВЧ генератор - амплитрон (магнетрон). Он преобразует мощность постоянного тока в СВЧ мощность. Амплитрон позволяет получить большие значения СВЧ мощности при высоких КПД, доходящих до 85-90%.

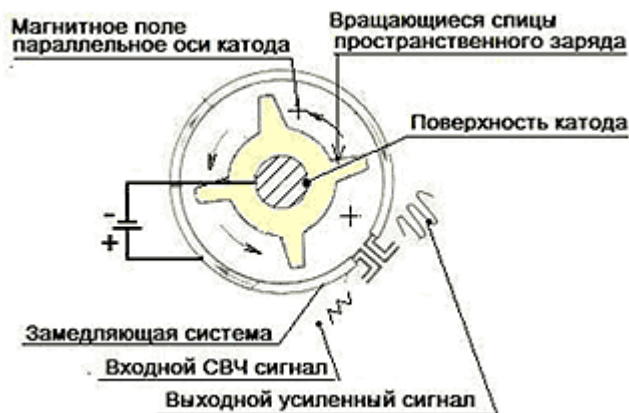


Рис. 4.

Вращающиеся спицы пространственного заряда амплитрона (магнетрона) согласно наводят токи в СВЧ цепи и обеспечивают усиление сигнала. Основное предназначение: магнетронная радиолокация, и конечно космос - точнее солнечная орбитальная космическая электростанция (СОЭС). Это та программа, которая предусматривает трансляцию солнечной энергии на Землю. Согласно «плану», на геостационарной орбите (35800 км) располагают крупные солнечные панельные батареи (СБ), которые вырабатывают постоянный электрический ток, питающий мощные СВЧ генераторы (клистроны), а они в свою очередь транслируют энергию на Землю пучком электромагнитных волн. Сюда и встраиваются амплитроны. На Земле же ректенна в виде магнетрона с не меньшим КПД принимает постоянный или переменный ток и преобразует его в промышленный ток. Вот и все. Мы вплотную подошли к физической модели термотрона. Для удобства изложения материала рассмотрим сначала прототип - плоскую модель, такую же, как и некогда изготовленную лабораторную модель.

Для получения тока в таком термоэмиссионном генераторе катод и анод необходимо расположить параллельно рабочими поверхностями с одной стороны воображаемой плоскости, имеющей, условно говоря <общий энергетический уровень> и, поместить их во взаимно скрещенное электрическое и магнитные поля, как это изображено на Рис.5. При нагреве катода эмиссия электронов с его поверхности и движение электронов к аноду будет осуществляться в электромагнитном поле. Траектория такого движения электронов будет аналогична при работе магнетрона - по циклоиде.

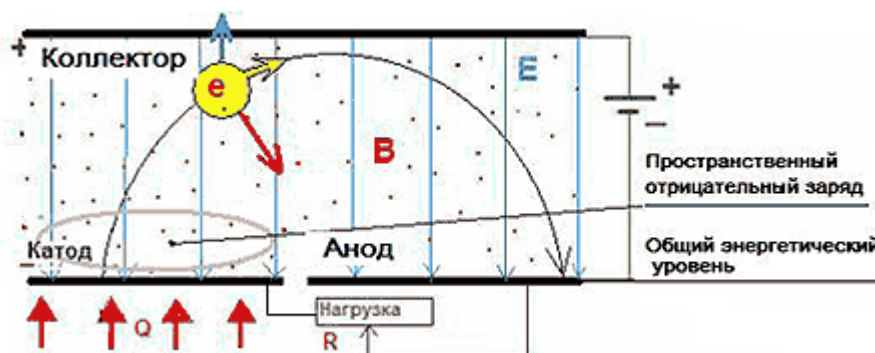


Рис. 5.

При создании между источником электрического поля подключенного между коллектором анодом, и катодом с обогреваемого катода к коллектору начнут равноускоренно двигаться электроды, испытывая со стороны электрического поля действие постоянно ускоряющейся силы, за счет которой кинетическая энергия электронов непрерывно увеличивается, достигая своего максимума у поверхности коллектора. Если теперь в данное пространство начать вводить возрастающее значение величины магнитного поля, увеличивая магнитную индукцию, то траектория движения электронов начнет существенно изменяться, искривляясь тем больше, чем больше величина магнитной индукции. При достижении определенной величины магнитной индукции, выступающей центростремительной силой по отношению к движущимся электронам, их траектория искривится настолько, что они уже не смогут попадать на коллектор а, описывая в пространстве сложную кривую, в данном случае циклоиду опустятся на анод. Последний будет находиться на значительном расстоянии от катода, обогреваемого внешним источником тепла.

В зависимости от расстояния между электродами можно регулировать величину электромагнитного поля для достижения всеми электронами тела анода. Рассмотрим взаимодействие движущегося электрона с указанным двойным полем. Понятно, что с магнитным полем электрон энергией не обменивается, оно лишь искривляет его траекторию движения. Поэтому кинетическая энергия электрона всецело определяется той разницей потенциалов, которую электрон пролетел в электрическом поле. Покидая катод, электрон разгоняется электрическим полем, увеличивая свою кинетическую энергию, двигаясь при этом по восходящей ветви циклоиды. На вершине кривой электрон пересекает электрические силовые линии, под прямым углом, имея максимальную кинетическую энергию. Получить большую энергию от электрического поля не дает магнитное поле, которое искривляет его траекторию, вызывая обратное движение электрона на тот же энергетический уровень, с которого он начал свое движение. Если расстояние, которое пролетел электрон больше длины катода, то его «посадка» произойдет на анод со скоростью равной или близкой к «тепловой скорости». Таким образом, сколько энергии электрон отобрал у электрического поля при движении вверх по циклоиде, столько же и вернул этому полю, опускаясь по нисходящей ветви циклоиды. А в некоторых случаях даже больше, так как это изображено на Рис.6, здесь анод расположен ниже катода на величину, не превышающую разности работы выхода катода и анода. В этом случае электрическую энергию можно снимать не с анода, а с источника создающего электрическое поле между катодом и анодом. Что очень важно.



Рис. 6.

В обоих случаях электрон, у которого вся кинетическая энергия будет отдана полю, не будет вызывать значительного нагревания ни коллектора, ни анода. Для значительного повышения КПД установки поверхности анода и коллектора должны обладать высокими светоотражательными свойствами для возврата <рассеянной катодом теплоты> обратно в работу. Таким требованиям удовлетворяют отполированные аноды с шероховатостью поверхности не ниже 12-14 класса, у них высота микронеровностей должна быть на уровне длины полуволны фотона, с покрытием серебром, хромом или тем же цезием. Тогда их отражательная способность может достигать 99,5%. В этом не надо даже сомневаться. Таким образом, можно получить термоэмиссионный генератор с выдающимися характеристиками и высочайшим КПД. Кроме того, любое короткое замыкание между электродами исключается, здесь на атомы кристаллической решетки будет действовать отрицательная сила электрического поля.

Меняя напряженность электромагнитного поля можно менять ток эмиссии с единицы площади катода, аналогично используемому в радиолампах накаливания закону $3/2$, где при увеличении напряжения между электронами и увеличивается и ток эмиссии. На момент полной эмиссии наступает режим автоэмиссии, для которой будет справедливо следующее уравнение термодинамики:

$\text{КПД} = T_2 - T_1 / T_2 \times 100\%$, где T_1 - температура анода, T_2 - температура катода.

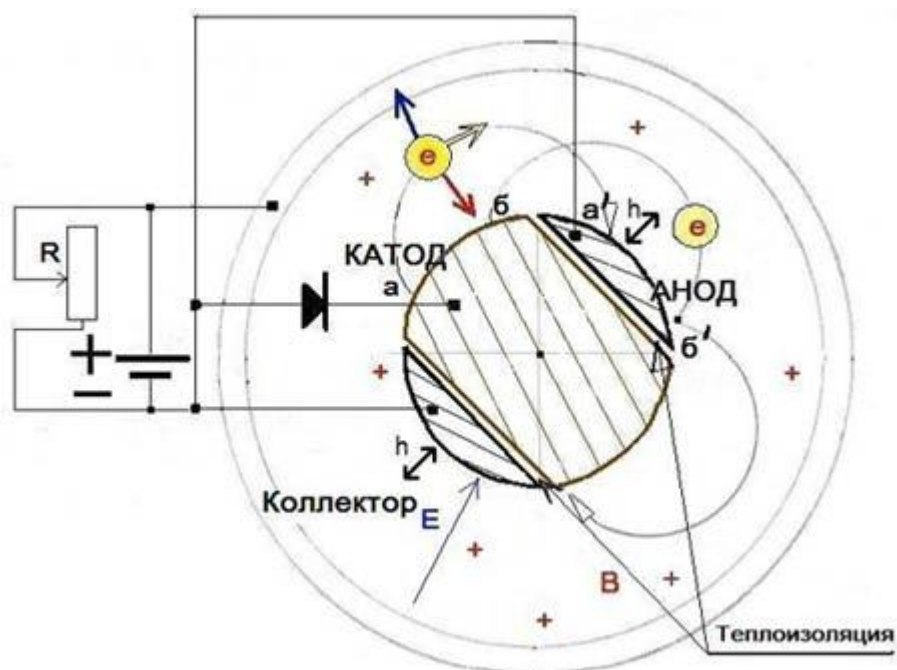


Рис. 7.

На Рис.7 изображен коаксиальный тип Термотрона. В круговом варианте можно использовать несколько анодов, в данной схеме хорошо видно «парные аноды». Траектории движения электронов будет точно такая, как и в плоской модели - циклоида (траектория а - а'). Какая то часть электронов, безусловно, не будет с первого раза попадать на анод (траектория б - б'), но и в случае неудачного «полета» энергия таких электронов не теряется. Все электроны возвращаются на тот «уровень энергии», с которого они и начали свой путь. Для регулирования мощности термоэмиссионного генератора помимо изменения характеристик электромагнитного поля и нагрузки(R), есть возможность чисто физического воздействия на аноды.

Путь - механическая регулировка выступления анодов над поверхностью катода в пределах разности их работы выхода.

Температура анодов свободно может поддерживаться на уровне 300°K. Это еще больше увеличит способность «холодных анодов» захватывать в свое поле подлетающие электроны. Соответственно, между анодами и катодом должна быть предусмотрена как тепловая изоляция, так и подобающее этому охлаждение анодов.

Что бы ни раздражать специалистов описанием преимуществ рассмотренных термоэмиссионных генераторов, остановимся на этой оптимистической ноте, и пусть как говорится, каждый сам для себя додумывает то, что он хочет, страна же ждет своих героев для совершения трудовых подвигов, ведь еще не скоро подрастут те вундеркинды, которых сегодня ищут в детских садах!