

ТЕХНИКА ИЛИМДЕРИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

Ниязов Н.Т., Акымбеков А.М., Джаманкызов Н.К., Назаров Б.Б.

**КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛАНГАН КҮН ШООЛАСЫ АРКЫЛУУ ЭЛЕКТР
 ТОГУН ЧЫГАРУУ ПРОЦЕССИН ИЗИЛДӨӨ**

Ниязов Н.Т., Акымбеков А.М., Джаманкызов Н.К., Назаров Б.Б.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ
 ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО
 СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

N.T. Niyazov, A.M. Akymbekov, N.K. Djamankyrov, B.B. Nazarov

**RESEARCH OF THE PROCESS OF ELECTRIC CURRENT GENERATION
 THROUGH THE CONCENTRATED SOLAR RADIATION**

УДК: 621.362, 537.58, 537.533.3, 681.2

Электр энергиясын чындыгында багытталган күн нурларынын, күйүү, химиялык же ядролук бөлүнүү карап энергия кайрылуу тарабынан жылуулук абдан натыйжалуу ыкмасын алууга болот. Карап кечирүү - карап чыгаруу күчүнө пайдалануу аркылуу жылуулук энергия кечирүү электр энергия. Бул жогорку температурага чейин аны жылытуу, катод жылуулук менен камсыз кылып турган диод чыгуу болуп саналат. Акысыз жаатындагы таасирин таасирсиз кылышы жана заты буулардын ши-милдетин кумура бирдигине киргизилсе кыскартуу менен карап катод көбөйтүү. Электр энергиясын, жылуулук жана химиялык энергияга кайра башка ыкмалар менен салыштырганда, карап ыкма төмөнкүдөй артыкчылыктарга ээ: бирдиги өндүрүшүнүн күнүнө эң төмөн салмагы мүнөздөмөлөрү жана муздаткычка жогорку температурада иштейт - бир каттоодо; кыймылдоочу бөлүктөргө алардын жоютуу; жогорку ишенимдүүлүк жана тыгыздык; үзгүлтүксүз сактабастан иштөө мүмкүнчүлүгү. Бул артыкчылыктар карап кечирүү бир туруп-жалгыз электр генераторлору өзөктүк реактор менен космос түзүү үчүн пайдаланылышы мүмкүн. Карап өзгөртүүчүлөр да узартууну электр энергиясы, жылуулук энергияны берүүнүн натыйжалуулугун жогорулатуу үчүн, кадимки жылуулук электр участкаларында пайдаланылышы мүмкүн. Термоэлектрондук эмиссиясы аркылуу генерацияны электр тогунун жардамы менен күндүн нурлануу концентратору мүмкүнчүлүгүн пайдалануу жөнүндө каралып жатат. Электрдик заряд муунга тийүүсү концентратор колдонуу мүмкүнчүлүгү жөнүндө маселе. Жылуулук барабардык чечим пайда жана концентратор тийүүсү эмитенти жер бетиндеги температуранын ортосундагы байланышты орнотууга жардам берди. Эмиттерди температурага чейин жылытуу үчүн, термоэлектрондук эмиссиясы баиталышы үчүн, жогорку күчтүүлгөн коэффициентте күндүн нурлануу концентраторун колдонуу керек экендиги көрсөтүлгөн. Термоэлектрондук эмиссия оптималдуу процессин ишке ашырылууда, концентратордун күчтөндүрүү коэффициенти баалоого мүмкүндүк берүүчү туюнтууга табылган.

Негизги сөздөр: термоэлектрондук эмиссия, генератор, рефлектор, электро энергиясы, күн энергиясы, жылуулук энергия, жогорку температура.

Электрическая мощность может в сущности быть получена высокоэффективным способом из тепла, создаваемого сфокусированным солнечным облучением, химическим сгоранием или ядерным распадом посредством термоэлектронной конверсии энергии. Термоэмиссионный преобразователь - преобразователь тепловой энергии в электрическую на основе использования эффекта термоэлектронной эмиссии. Представляет собой ламповый диод, к катоду которого подводится тепло, разогревая его до высокой температуры. Для нейтрализации влияния поля объемного заряда и увеличения термоэмиссии путём снижения работы выхода катода в колбу прибора вводятся пары цезия. По сравнению с другими методами преобразования тепловой и химической энергии в электрическую, термоэмиссионный метод имеет следующие преимущества: самые низкие весовые характеристики на единицу выходной мощности и возможность работы при высокой температуре холодильника - анода; отсутствие в них движущихся частей; высокая надёжность и компактность; возможность эксплуатации без систематического обслуживания. Эти преимущества термоэмиссионного преобразователя могут быть использованы для создания автономных энергетических генераторов космических аппаратов с использованием ядерных реакторов. Термоэмиссионные преобразователи также могут применяться в обычных тепловых электростанциях, в качестве наставок, повышающих коэффициент полезного действия преобразования тепловой энергии в электрическую. Рассматривается задача о возможности использования концентратора солнечного излучения для генерации электрического тока посредством термоэлектронной эмиссии. Решение уравнения теплопроводности позволило установить связь между коэффициентом усиления концентратора солнечного излучения и температурой поверхности эмиттера. Показано, что для того, чтобы нагреть эмиттер до температуры, при которой начинается термоэлектронная эмиссия, необходимо использовать концентратор солнечного излучения с высоким коэффициентом усиления. Найдено выражение, позволяющее оценить коэффициент усиления концентратора, при котором реализуется оптимальный процесс термоэлектронной эмиссии.

Ключевые слова: термоэлектронная эмиссия, генератор, рефлектор, электроэнергия, солнечная энергия, тепловая энергия, высокая температура.

Electrical power can in fact be obtained in a highly efficient manner from the heat created by focused solar radiation, chemical combustion, or nuclear decay through thermoelectronic energy conversion. Thermo emission converter – converter of thermal energy into electrical energy based on the use of thermionic emission. It is a tube diode, to the cathode of which heat is supplied, heating it to a high temperature. To neutralize the influence of the space charge and increase the thermoemission, by reducing the work function of the cathode, cesium vapor is introduced into the flask of the device. Compared with other methods of converting thermal and chemical energy into electrical, thermionic methods has the following advantages: the lowest weight characteristics per unit of output power and the possibility of operating at a high temperature of the refrigerator-anode; absence of moving parts in them; high reliability and compactness; The possibility of exploitation without systematic maintenance. These advantages of a thermionic converter can be used to create autonomous energy generators of space vehicles using nuclear reactors. Thermionic imaging converters can also be used in conventional thermal power plants, as extensions, which increase the efficiency of conversion of thermal energy into electrical energy. The problem of the possibility of using a solar radiation concentrator for generating electric current by means of thermionic emission is considered. The solution of the heat conduction equation made it possible to establish a relationship between the gain of the solar concentrator and the temperature of the emitter surface. It is shown that in order to heat the emitter to the temperature at which thermionic emission begins, it is necessary to use a solar concentrator with a high gain. An expression is obtained that allows one to estimate the concentrator gain at which the optimal thermionic emission process is realized.

Key words: thermionic emission, generator, reflector, electric power, solar energy, thermal energy, high temperature.

Введение. Солнечная энергия, как возобновляемый и неисчерпаемый источник энергии, используется как для получения тепловой, так и электрической энергии. Получение электроэнергии может осуществляться как посредством промежуточного теплового процесса, так и напрямую - с помощью фотоэлектрических преобразователей (солнечные батареи) – иначе говоря, с помощью фотовольтаики [1]. Такие батареи относительно чисты в экологическом отношении, автономны, не требуют дорогой эксплуатации и выдают электрическую энергию во многих местах. Эти аспекты делают солнечные батареи практически безальтернативными устройствами преобразования энергии солнца в электрическую энергию. Существуют также другие методы, которые способны преобразовать в электрическую энергию не только солнечную, но и бесцельно теряющуюся тепловую энергию любого другого источника. Эти методы – термофотовольтаического [1] и термоэмиссионного [1-3] преобразования энергии. Термовольтаика работает на основе полупроводниковых преобразователей, действующих в ИК области. Поэтому термовольтаические элементы способны преобразовывать тепловую энергию любой природы в электричество, поскольку большая часть энергии, излученной из теплового источника, находится в ИК области спектра ($\lambda \geq 1$ мкм). Следовательно, для термофотовольтаического производства электроэнергии требуется подогрев материала эмиттера до температуры 1000-2000°С [1-3], что является основным отличием данного метода от фотовольтаики.

Работа устройств термоэлектронной эмиссии основана на испускании электронов нагретыми телами, происходящем в результате теплового возбуждения электронов в этих телах. Простейший термоэмиссионный генератор состоит из двух поверхностей, размещенных в вакууме. Одна из них (эмиттер) при нагреве до достаточно высокой температуры эмитирует электроны с этой поверхности, а другая поверхность (коллектор), находящаяся при более низкой температуре, собирает эти электроны. Источник тепла может иметь любую природу: джоулево тепло; пламя; ядерный реактор; тепло, выделяющееся в реакциях ядерного распада; концентрированное солнечное излучение и т.д. Термоэлектронная эмиссия широко применяется в различных областях физики и техники, лежит в основе работы электронно-вакуумных приборов. В качестве примера можно привести устройства для получения электрической энергии, используемой в космосе, под водой, а также в местностях, где недоступно обычное электроснабжение. Отметим также, что особенности принципа действия термоэмиссионных устройств преобразования энергии позволяют легко состыковывать их с атомными реакторами. Масса и размеры такой малогабаритной атомной электростанции позволяют использовать ее на космических аппаратах для питания бортовых приборов и электрических двигателей [2,4-6].

Метод термоэмиссионного преобразования энергии в классическом варианте досконально изучен, выявлены его недостатки и преимущества. "Потенциал развития" этого метода практически исчерпан, ибо достигнутые в настоящее время его физико-технические характеристики близки к теоретически возможным предельным значениям [2]. Но, с развитием нанотехнологий появились новые подходы к методу преобразования тепловой энергии в электрическую энергию. Методы нанотехнологии позволяют выращивать на эмитирующей поверхности нанотрубки, которые формируют наноструктурированную поверхность эмиттера. Когда такую структуру нагревают, то перенос электронов с эмиттера в сторону коллектора и эмиссионные процессы происходят от воздействия конкретно подобранной суперпозиции магнитного и электрического полей. Такой подход позволяет создавать устройства преобразования энергии, энергетическая эффективность которых может значительно (на порядки) превышать эффективность существующих классических термоэмиссионных преобразователей [2]. Эти устройства, функционирующие в условиях полевой (автоэлектронной) эмиссии электронов, позволяют осуществлять прямое преобразование тепловой энергии окружающей среды ($T \sim 300$ К) в электрическую энергию [2].

Интерес к производству электрической энергии нетрадиционными способами с каждым годом становится все выше, так как эти способы являются экологически чистыми и, кроме того, обеспечивают возможность получения электрической энергии в местах, удаленных от обычных источников электрической энергии. Однако их использование не всегда целесообразно из-за высокой стоимости элементной базы преобразователей энергии. Поэтому вопросы снижения себестоимости и улучшения электрических характеристик преобразователей энергии были и остаются актуальными по сегодняшний день. Целью настоящей работы является теоретическое

исследование возможности осуществления процесса термоэлектронной эмиссии под действием сконцентрированного солнечного излучения. О такой возможности много упоминается в литературе, однако конкретной информации по данному вопросу практически нет.

Нагрев эмиттера концентрированным солнечным излучением. Концентратор солнечного излучения [7-8,3] – прибор, посредством которого увеличивается плотность солнечного потока, вызываемая излучением до отметки, поддерживающего его оптимальное и экономически эффективное преобразование в требуемый вид энергии.

Средний коэффициент концентрации K_c , выводится путем отношения среднего значения плотности сконцентрированного потока лучей на приемнике I_c к плотности на поверхности, перпендикулярной к направлению его распространения, V_0 , т.е. $K_c = \frac{I_c}{V_0}$. Этот средний коэффициент концентрации и есть интегральный показатель, который характеризует особенности концентратора. Характерные значения K_c лежат в диапазоне от единиц до сотен крат.

Плотность потока (мощности) солнечного излучения на поверхности Земли V_0 называют инсоляцией (insolation) или солнечной постоянной. Она равна на уровне моря в южных широтах, когда Солнце в зените, $V_0 = 1,36$ кВт/м². В реальности инсоляция изменяется во времени и на ее значение влияет большое число факторов, такие как широта местности, количество ясных дней, облачность, ветреность, время года и т.д. Например, на широте 42° – широта, на которой находится г. Бишкек - её средняя величина при идеальных условиях равна $V_0 \sim 0,45$ кВт/м² [9]. Так как конструкции различных видов солнечных концентраторов хорошо известны [1], то и останавливаться на них не будем.

Рассмотрим процесс нагрева эмиттера концентрированным солнечным излучением. Пусть на пластинчатый эмиттер толщиной $h \approx 1-2$ мм, находящийся в вакууме, перпендикулярно его плоскости падает концентрированный солнечный луч интенсивностью I_c (Вт/м²). Предположим, что металлический эмиттер имеет коэффициент поглощения ε . Тогда количество поглощенной эмиттером энергии будет равно

$$q = \varepsilon I_c = \varepsilon K_c V_0 \quad (1)$$

Нагрев эмиттера в течение солнечного дня можно определить решив одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} t = 0, \quad T(z, 0) &= T_0 \\ z = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial z} &= q; \\ z = h, \quad -\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Последнее условие $z = h$ показывает отсутствие теплового потока, что объясняется тем, что эмиттер находится в вакууме, и он теплоизолирован со всех сторон, кроме стороны, с которой падает солнечный свет. Здесь λ - теплопроводность, a – температуропроводность материала эмиттера. Для решения краевой задачи теплопроводности применим к уравнению теплопроводности (2) и граничным условиям (3) преобразование Лапласа по времени

$$\bar{u} = \int_0^\infty e^{-pt} u(t) dt \quad (4)$$

Опуская промежуточные вычисления, которые производятся по стандартной методике, для лапласовского образа температуры катода $\bar{T}(z)$ получим в результате:

$$\bar{T}(z) = \frac{q}{\lambda p \sqrt{\frac{p}{a}}} \frac{1}{1 - e^{-2h\sqrt{\frac{p}{a}}}} \left[e^{-\sqrt{\frac{p}{a}}z} + e^{-\sqrt{\frac{p}{a}}(2h-z)} \right] + \frac{T_0}{p} \quad (5)$$

Характерной особенностью нагрева эмиттера солнечным излучением является длительность облучения, т.е. длительность дня. Это обстоятельство позволяет в (5) использовать условие $\sqrt{p} \ll \sqrt{a}/2h$, так как малое значение параметра \sqrt{p} отвечает длительному действию солнечного облучения. Разлагаем в (5) экспоненциальный член в знаменателе в ряд и, опираясь на условие $\sqrt{p} \ll \sqrt{a}/2h$, ограничиваемся первыми двумя членами ряда. Переходя к оригиналам, находим решение поставленной краевой задачи теплопроводности, которое имеет вид:

$$T(z,t) = \frac{qt}{2\rho ch} \left\{ \left(1 + \frac{z^2}{2at}\right) \Phi^* \left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) - \frac{z}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{z^2}{4at}} + \left(1 + \frac{(2h-z)^2}{2at}\right) \Phi^* \left(\frac{2h-z}{2\sqrt{at}}\right) - \frac{2h-z}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{(2h-z)^2}{4at}} \right\} + T_0 \quad (6)$$

Здесь, ρ – плотность, c – теплоемкость материала эмиттера, $\Phi^*(x) = \operatorname{erfc}(x)$ – дополнительная функция ошибок. Поскольку нас больше интересует температура поверхности эмиттера, то из (6), при $z = 0$ и с учетом (1), легко находим

$$T(0,t) = \frac{\varepsilon I_c t}{2\rho ch} \left[1 + \left(1 + \frac{2h^2}{at} \right) \Phi^* \left(\frac{h}{\sqrt{at}} \right) - \frac{2h}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{h^2}{at}} \right] + T_0 \quad (7)$$

Полученное выражение показывает связь температуры поверхности эмиттера с мощностью плотности концентрированного излучения солнца I_c и учитывает теплофизические свойства и геометрию эмиттера. Поскольку на практике эмиттер изготавливается из вольфрама, температуропроводность которого составляет $a = (62,78-41,4) 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ при (200-1000) К, то условие $h \ll \sqrt{at}$ легко выполняется. В этом случае, как видно из (7), выражение для температуры поверхности эмиттера намного упрощается и принимает вид

$$\Delta T(t) = T(0,t) - T_0 \approx \varepsilon \frac{I_c t}{\rho ch} = \varepsilon \frac{K_c B_0 t}{\rho ch} \quad (8)$$

Таким образом, нагрев эмиттера концентрированным солнечным излучением с хорошей точностью описывается выражением (8) и, согласно (1), прямо зависит от коэффициента усиления концентратора K_c и от времени облучения. Преимущество полученного выражения заключается в том, что при известном коэффициенте усиления можно оценить время облучения для достижения требуемого значения температуры и наоборот. Например, для вольфрама, у которого $\rho = 19 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $c = 132,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}^2}$, $h = 1 \text{ мм}$, $\varepsilon = 0,04$ и, беря величину инсоляции на широте г. Бишкек $B_0 \sim 0,45 \text{ кВт/м}^2$, получаем, что при $K_c = 1$ эмиттер за одну минуту нагреется лишь до 45°C . Для того, чтобы нагреть эмиттер до 1000- 2000 К за одну минуту требуется концентратор с усилением $K_c > 3$. Таким образом, полученная формула позволяет качественно оценить процесс нагрева эмиттера концентрированным солнечным излучением в зависимости от параметров материала эмиттера и от конструкции концентратора, обеспечивающего нужное усиление солнечного потока. Однако ясно, что выражение (8) дает завышенные оценки, так как в исходной формуле не были учтены радиационные потери энергии при излучении, которые в рассматриваемом случае избежать невозможно.

Оценим максимальную температуру, которая может быть достигнута на поверхности приемника – эмиттера солнечного излучения в зависимости от коэффициента концентрации. Наши оценки будут верны только для идеального приемника, работающего в вакууме (т. е. при отсутствии конвективных тепловых потерь), и при идеальной теплоизоляции (тепловые потери, связанные с теплопроводностью, также отсутствуют). Будем учитывать только радиационные потери. Известно [3], что с ростом температуры радиационные потери энергии при излучении растут как $\sim T^4$, согласно закону Стефана-Больцмана, и этот рост продолжается до момента наступления термодинамического равновесного состояния. Ход развития нагрева эмиттера до наступления термодинамического равновесия можно определить из уравнения теплового баланса в каждый момент времени

$$mc \frac{\partial T}{\partial t} = \varepsilon S (K_c B_0 - \sigma T^4), \quad (9)$$

где m – масса, S – площадь эмиттера. В состоянии термодинамического равновесия значение падающего на приемник излучения равно значению испускаемого им излучения. Температура приемника эмиттера при этом перестает расти и становится равной равновесной температуре, т.е. $T = T_p$. В этом случае (9) принимает вид

$$K_c B_0 = \sigma T_p^4, \quad (10)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ К}^{-4}$ - постоянная Стефана-Больцмана. Отсюда искомая температура

$$T_p = \left(\frac{K_c B_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (11)$$

Как видно, равновесное значение температуры эмиттера при заданном значении инсоляции B_0 , т.е. при выбранном значении широты местности, зависит от конструкции концентратора, определяющей коэффициент усиления солнечного потока. Для каждого значения коэффициента усиления концентратора и для каждой широты будут свои значения равновесной температуры. Например, на широте г. Бишкек, где инсоляция имеет значение $B_0 \sim 0,45 \text{ кВт/м}^2$ [9], равновесная температура T_p , при $K_c = 1$, составляет 25°C , а на экваторе, где $B_0 = 1,36 \text{ кВт/м}^2$, эта температура равна 120°C . Следовательно, низкое значение инсоляции на любых широтах не дает возможности обеспечить высокое значение равновесной температуры эмиттера и, как следствие, невозможен эффективный термоэлектронный процесс. Поэтому для получения термоэлектрического тока с помощью солнечного излучения необходимо использовать концентраторы солнечного излучения для нагрева эмиттера до 1000-2000 К [4]. Например, для обеспечения стабильной равновесной температуры эмиттера 1000 К в районе г. Бишкек, согласно (11), требуется концентратор солнечного излучения с коэффициентом усиления $K_c \geq 126$, а для обеспечения температуры эмиттера 2000 К коэффициент усиления должен быть $K_c \geq 2016$. Аналогичные цифры для коэффициента усиления на экваторе, для выше указанных температур эмиттера, соответственно составляют $K_c \geq 42$ и 667. Таким образом, при помощи сильных солнечных концентраторов можно генерировать электрический ток посредством метода термоэлектронной эмиссии, не используя дорогих фотоэлектрических преобразователей.

Термоэлектронная эмиссия под действием концентрированного солнечного излучения. В соответствии с [4-6], метод работы всех видов термоэмиссионных преобразователей базируется на применении двух физических явлений – термоэлектронной эмиссии и контактной разности потенциалов. Так как два тела по своей структуре разнородны и есть электрическая связь между ними, то между их поверхностями появляется контактная разность потенциалов.

Контактная разность потенциалов имеет место быть между поверхностями тел, в которых работы выхода равны соответственно (V_c), называемая контактной, которая численно равна разности работ выхода:

$$V_c = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (12)$$

где Φ_1 и Φ_2 – численные значения работ выхода в вольтах (В). Термоэлектронная эмиссия характеризуется плотностью тока насыщения эмиссии (J_s), т. е. максимально возможной плотностью тока эмиссии при данной температуре эмитирующей поверхности. Плотность тока насыщения определяется формулой Ричардсона-Дэшмана:

$$J_s = A_0(1-R)T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right) \quad (13)$$

где $A_0 = 4\pi em^2 k^2 / h^3 = 120,4 \text{ А/см}^2 \text{К}^2$ – термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда; e – абсолютное значение величины заряда электрона; R – коэффициент отражения электронов от потенциального барьера на границе раздела (эмитирующая поверхность – вакуум); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура катода; $e\Phi$ – работа выхода электронов эмиттера (В); m – масса электрона; h – постоянная Планка. Нужно сделать акцент на тот факт, что выражение (13) показывает значение плотности эмиссионного тока насыщения для момента, когда внешнее, электрическое поле у поверхности катода равняется нулю.

Когда имеется внешнее электрическое поле (E), то у тока (эмиссионного) отсутствует истинное насыщение и постоянно увеличивается при увеличении электрического поля. Этот эффект получил название эффекта Шоттки (*V. Schottky*). В этом случае плотность эмиссионного тока (*Schottky Emission*) определяется формулой:

$$J_{schot} = J_s \exp\left(-\frac{1}{kT} \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi \epsilon_0}}\right), \quad (14)$$

где E – напряженность электростатического поля на эмитирующей поверхности катода (В/см), ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Формула (14) указывает на то, что эффект Шоттки влияет на образование зависимости термоэмиссионной плотности тока насыщения от разности потенциалов эмиттер-коллектор (анод-катод), которая приложена извне.

Если величина напряженности электрического поля вблизи поверхности тела достигает $E(t) \approx 106 \text{ В/см}$ [4], то в (13) следует учитывать проявление эффекта Шоттки – понижение величины работы выхода под действием внешнего электрического поля. Отметим, что истинное насыщение тока термоэлектронной эмиссии $I = J_{schot} S$, где S – поверхность эмиттера, экспериментально не наблюдается, так как изменение $E(t)$ влечет за собой изменение тока насыщения I [4].

Плотность термоэмиссионного тока под действием концентрированного солнечного излучения в процессе нагрева эмиттера до равновесной значения температуры эмиттера определяется из (13) с учетом (8)

$$J_s(t) = A_0(1-R) \left(\frac{K_c B_0 t}{\rho ch}\right)^2 \exp\left(-\frac{e\Phi \rho ch}{k K_c B_0 t}\right), \quad (15)$$

а при равновесном значении температуры эмиттера плотность термоэмиссионного тока можно найти из соотношения

$$J_s = J_s(\infty) = A_0(1-R) \left(\frac{K_c B_0}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{e\Phi}{k} \left(\frac{K_c B_0}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}\right). \quad (16)$$

Из анализа (15) вытекает, что плотность термоэмиссионного тока зависит от теплофизических параметров и геометрии материала эмиттера и от коэффициента усиления плотности потока солнечного излучения с учетом инсоляции местности.

Об эффективности работы солнечного термоэлектронного преобразователя. Чтобы создать стабильные условия работы, нужно подвести к эмиттеру ту мощность $P_{об}$, которая равна теряемой эмиттером мощности $P_э$, при эмиссии электронов, а также на излучение $P_и$ (потери от теплопроводности $P_к$ не будем учитывать, так как они очень малы)

$$P_{об} = P_э + P_и. \quad (17)$$

Для $P_э$, с учетом того факта, что вылетевшие из эмиттера термоэлектроны имеют максвелловское распределение по скоростям со средней энергией $2kT$, получим:

$$P_э = J_s S (\Phi_k + 2kT)/e. \quad (18)$$

Потери на излучение определяются выражением:

$$P_и = S \epsilon \sigma T^4. \quad (19)$$

Максимальная удельная полезная мощность термоэлектронной эмиссии равна:

$$P_{\max} = J_s \frac{\Phi_k - \Phi_a}{e} \quad (20)$$

Коэффициент полезного действия диода (η) равен отношению полезной электрической мощности к полной подводимой к эмиттеру тепловой мощности.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{об}}} = \frac{J_s \frac{\Phi_k - \Phi_a}{e}}{J_s S (\Phi_k + 2kT) + P_{\text{и}}} \quad (21)$$

Здесь J_s определяется формулами (15) и (16), а значение T формулами (8) и (11).

В заключении отметим, что полученные выражения (11) и (15) позволяют проводить качественный анализ процесса термоэлектронной эмиссии, которая возникает при нагреве эмиттера концентрированным солнечным излучением.

Литература:

1. Миличко В.А. и др. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / Журнал «Успехи физических наук». - М., 2016. - Т.186. - №8. - С. 801-852.
2. Птицын В.Э. Современное состояние и перспективы развития термоэлектронного преобразования энергии. / Научное приборостроение. - М., 2013, Т.23. - №4. - С. 23-39.
3. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - 704 с.
4. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. - М.: Наука, 1966. - 564 с.
5. Стаханов И.П., Черковец В.Е. Физика термоэмиссионного преобразователя. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 208 с.
6. Ярыгин В.И. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Ч.1. Введение в специальность. Учебное пособие. - Обнинск: ИАТЭ, 2006. - 104 с.
7. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. - Л.: Наука, 1989. - 310 с.
8. Преобразование солнечной энергии. Под редакцией Н.Н. Семенова, А.Е. Шилова. - М.: Наука, 1985. - 184 с.
9. Строительные нормы и правила «Строительная климатология Кыргызской Республики». - Бишкек, 01.06.2000 г.

Рецензент: к.т.н. Раимкулов М.Н.