

УДК 621.382.8

https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/21

ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОСТРУКТУРНОГО КАТОДА

©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р. физ.-мат. наук,
Киргизский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им.
Н. Исанова, г. Бишкек, Кыргызстан, i_yusupjan@mail.ru

©Ниязов Н. Т., SPIN-код: 1534-3805, Институт физики им. акад. Ж. Жеенбаева НАН
Киргизской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан, nurniyaz@mail.ru

©Джаманкызов Н. К., SPIN-код: 1471-6954, д-р физ.-мат. наук, Институт физики им. акад.
Ж. Жеенбаева НАН Киргизской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан, nasip49@gmail.com

©Жумалиев К. М., SPIN-код: 6579-1960, д-р техн. наук, акад. НАН Киргизской Республики,
Институт физики им. акад. Ж. Жеенбаева НАН Киргизской Республики, г. Бишкек,
Кыргызстан, jkm1956@mail.ru

THERMOELECTRONIC CONVERSION OF SOLAR ENERGY USING A HETEROSTRUCTURAL CATHODE

©Ismanov Yu., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil.,
Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov,
Bishkek, Kyrgyzstan, i_yusupjan@mail.ru

©Niyazov N., SPIN-code: 1534-3805, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of
the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nurniyaz@mail.ru

©Dzhamankyzyov N., SPIN-code: 1471-6954, Dr. habil., Institute of Physics of the National
Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nasip49@gmail.com

©Zhumaliev K., SPIN-code: 6579-1960, Dr. habil., Academician of the National Academy of
Sciences of the Kyrgyz Republic, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the
Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, jkm1956@mail.ru

Аннотация. В статье проведен теоретический анализ особенностей работы термоэлектронного преобразователя солнечной энергии с использованием гетероструктурного катода. Рассмотрена гетероструктура, в которую введены оконный слой с достаточно широкой запрещенной зоной и поглощающий слой, ширина запрещенной зоны которой остается постоянной. Это позволяет сильно снизить рекомбинационные потери на поверхности контакта. Однако, наличие широкой запрещенной зоны в оконном слое приводит к возникновению барьера для формирующихся фотоэлектронов, а это, в свою очередь, приводит к потерям при преобразовании энергии, так как фотоны с энергией меньшей ширины запрещенной зоны перестает работать на превращение энергии. Т. е. в электрическую энергию будет превращаться только часть энергии Солнца — работает только часть спектра солнечного излучения. Показано, что преодолеть этот недостаток можно создав градиент ширины запрещенной зоны. Такой градиент позволяет создать обратное внутреннее поле, снижающее высоту барьера на поверхности контакта, что повышает выход фотоэлектронов и, в конечном счете, общий коэффициент преобразования термоэлектронного преобразователя. Получены теоретические значения для тока выхода и коэффициента преобразования термоэлектронного преобразователя солнечной энергии, имеющего гетероструктурный катод.

Abstract. The article presents a theoretical analysis of the features of the operation of a thermionic solar energy converter using a heterostructure cathode. A heterostructure is considered, into which a window layer with a sufficiently wide band gap and an absorbing layer, the band gap of which remains constant, are introduced. This makes it possible to greatly reduce the recombination losses at the contact surface. However, the presence of a wide band gap in the window layer leads to the emergence of a barrier for the forming photoelectrons, and this, in turn, leads to losses during energy conversion, since photons with energies less than the band gap stop working for energy conversion. That is, only part of the Sun's energy will be converted into electrical energy — only part of the solar radiation spectrum is working. It is shown that this drawback can be overcome by creating a gradient of the band gap. This gradient makes it possible to create a reverse internal field, which reduces the height of the barrier at the contact surface, which increases the photoelectron yield and, ultimately, the overall conversion factor of the thermionic converter. Theoretical values are obtained for the output current and the conversion factor of a thermionic solar energy converter with a heterostructure cathode.

Ключевые слова: термоэлектронный преобразователь, солнечная энергия, гетероструктурный катод, оконный слой, запрещенная зона, коэффициент преобразования.

Keywords: thermionic converter, solar energy, heterostructure cathode, window layer, band gap, conversion factor.

Введение

Два наиболее широко используемых метода преобразования солнечной энергии – это фотоэлектрические солнечные батареи и схемы последовательного преобразования солнечной энергии в тепловую энергию, а тепловую в электрическую. Слабым местом фотоэлектронных преобразователей является то, что они могут преобразовывать энергию только части спектра излучения Солнца, хотя энергию этой части спектра фотоэлектронные преобразователи используют максимально эффективно. В случае с преобразованием солнечной энергии в тепловую ситуация прямо противоположна: в этом случае используется весь спектр излучения солнца, однако эффективность преобразования очень низкая [1–3]. Естественно желание разработчиков объединить оба типа преобразования солнечной энергии, тем самым обеспечив преимущества каждого из них. Теоретически эффективность таких комбинированных устройств должна была быть достаточно высокой [4–5], однако на практике все оказалось значительно сложнее, так как обычные фотоэлектрические солнечные батареи выходили из строя при высоких температурах [6–7]. Выход был найден в использовании так называемого фотонного усиления термоэлектронной эмиссии [1].

Схема с фотонным усилением состоит из двух электродов, разделенных вакуумным промежутком. В качестве катода берут полупроводниковый материал, причем ширина его запрещенной зоны подбирается таким образом, чтобы соответствовать значениям энергии спектра Солнца, т. е. ширина должна быть меньше минимальных значений энергии спектра Солнца. Важный момент — это низкая работа выхода электронов материала катода. При освещении такого катода солнечной энергией с достаточной концентрацией падающие фотоны позволяют электронам преодолевать запрещенную зону, что приводит к увеличению заселенности электронов в зоне проводимости выше уровня равновесия, а также к уменьшению работы выхода электронов за счет увеличения средней энергии электронов в

зоне проводимости. Как результат, данный катод начинает испускать больше электронов при более низких температурах, чем катоды в обычных фотоэлектронных преобразователях [8–9].

Вторым важным фактором является то, что увеличение средней энергии электронов в зоне проводимости приводит к дополнительному нагреву катода, и это тоже дает свой вклад в плотность тока эмиссии. Т. е. наличие фотонного усиления позволяет использовать для получения тока эмиссии не только обычный нагрев катода — тепловой процесс, но и фотонные процессы. Теоретические расчеты показывают, что термоэлектронные преобразователи солнечной энергии с фотонным усилением могут достигать эффективности до 50% при использовании солнечного излучения с концентрацией не меньше 1000 и рабочих температурах выше 250 °С. Термоэлектронные преобразователи энергии с фотонным усилением имеют важное преимущество перед обычными фотопреобразователями — они могут работать при высоких температурах. Данный факт позволяет использовать их совместно с тепловыми двигателями, настроив их на преобразование в электрическую энергию отработанное тепло и, таким образом, увеличив в целом к. п. д. до 60%. Указанные преимущества термоэлектронных преобразователей с фотонным усилением подтолкнули разработчиков к исследованиям в этом направлении. Были предложены много различных моделей этих устройств [4–7].

Анализ полученных результатов показал, что важнейшим фактором снижения эффективности преобразования энергии в термоэлектронных преобразователях является поверхностная рекомбинация носителей заряда, что и предопределило направление дальнейших исследований. Одним из способов снижения поверхностной рекомбинации носителей заряда стало предложение использовать гетероструктурный катод в устройствах с фотонным усилением термоэлектрического преобразования энергии [10]. Структура такого катода сконструирована из поглощающего слоя, состоящего из GaAs, и тонкого покрытия из AlGaAs, цель которого улучшить излучающие характеристики катода. Такая гетероструктура значительно повышает выход электронов с поверхности катода. Уменьшить поверхностную рекомбинацию можно, создав на поверхности катода гомоструктурный слой, формирующий обратное поле, который создает потенциальный барьер, препятствующий вылету электронов на поверхность катода [11]. Высота барьера сильно зависит от уровня легирования материала катода. Поэтому, увеличивая величину легирующих примесей в материале катода, можно уменьшать высоту барьера, что в свою очередь резко повышает эффективность работы катода и всего устройства. Причем высота легированного катода уменьшается с температурой, что позволяет увеличить эффективность работы устройства при высоких температурах. Для термоэлектрических преобразователей энергии с фотонным усилением можно использовать катод с гетероструктурным переходом. В этом случае в катод вводится материал с оконным слоем, имеющий достаточно широкую запрещенную зону. Это позволяет сильно снизить рекомбинационные потери на поверхности контакта. Однако широкая запрещенная зона приводит к возникновению барьера для формирующихся фотоэлектронов, а это, в свою очередь, приводит к потерям при преобразовании энергии, так как фотоны с энергией меньшей ширины запрещенной зоны перестают работать на превращение энергии. Т. е. в электрическую энергию будет превращаться только часть энергии Солнца — работает только часть спектра солнечного излучения.

Уменьшить поверхностную рекомбинацию можно формируя изменяющуюся ширину запрещенной зоны в оконном слое. Непрерывно изменяющаяся ширина запрещенной зоны позволяет формировать внутреннее электрическое поле, которое способно не только отбрасывать электроны от контактной поверхности, т. е. снизить поверхностную

рекомбинацию, но и использовать низкоэнергетические фотоны для воздействия на электроны.

Целью данной работы является изучение возможности использования катодов с гетероструктурным переходом, в котором присутствует изменяющийся по ширине зонный слой, в термоэлектрических преобразователях солнечной энергии с фотонным усилением.

Гетероструктурный катод с изменяющимся по ширине зонным слоем

Обобщенная схема гетероструктурных переходов с изменяющейся шириной запрещенной зоны представлена на Рисунке 1.

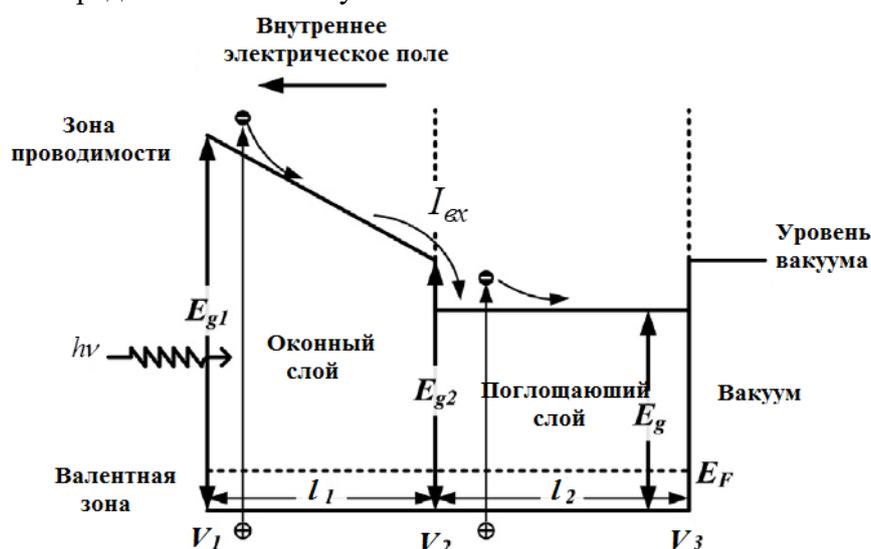


Рисунок 1. Обобщенная схема расположения гетероструктурных переходов с наличием градиента ширины запрещенной зоны.

Изменение ширины запрещенной зоны за счет граничных эффектов на рисунке не отмечены. V_1 , V_2 , V_3 — скорости рекомбинации носителей заряда вблизи контактной поверхности, на границе между слоями, формирующими гетеропереход, и вблизи поверхности, с которой происходит эмиссия, соответственно. l_1 — толщина оконного слоя, l_2 — толщина поглощающего слоя, E_F — уровень Ферми, I_{ex} — ток, входящий из оконного слоя в поглощающий слой, E_g — ширина запрещенной зоны в поглощающем слое, E_{g1} и E_{g2} — ширины запрещенных слоев на поверхности контакта и поверхности гетероперехода соответственно.

Катод, в котором присутствуют гетеропереходы, содержит оконный слой с запрещенной зоной, ширина которой меняется непрерывным образом, поглощающий слой, ширина запрещенной зоны которой остается постоянной. Также в поглотителе присутствует уровень легирования. Изменение ширины запрещенной зоны достигается изменением доли примесей в слоях, образующих гетеропереход. Изменение концентрации примесей, как видно из Рисунка 1, влияет в основном на минимальное значение зоны проводимости, но при этом не воздействует на максимум зоны валентной. Содержание примесей в оконном слое изменяется в диапазоне от $1,4 \cdot 10^{-19}$ ат/см⁻³ на поверхности контакта до $1,15 \cdot 10^{-19}$ ат/см⁻³ на границе раздела. Содержание примесей в слое поглотителя равно в среднем $1 \cdot 10^{-19}$ ат/см⁻³. Внутреннее электрическое поле, возникающее как следствие наличия переменной ширины запрещенной зоны, определяется следующим образом

$$E = \frac{E_{g1} - E_{g2}}{l_1 e} \quad (1)$$

где e — заряд электрона.

Излучение от Солнца направлено нормально контактной поверхности катода. Наличие оконного слоя приводит к тому, что фотоны в излучении Солнца, имеющие энергию в диапазоне от E_g до E_{g2} , поглощаются слоем поглотителя. При столкновении с фотонами, обладающими энергией больше чем E_{g2} , в оконном слое высвобождаются электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к границе гетероперехода. Часть этих электронов, достигшая границы раздела, переходит в зону проводимости в слое поглотителя. В свою очередь, внутреннее электрическое поле, возникшее, как следствие наличия запрещенной зоны переменной ширины, устраняет возможные потери носителей заряда из-за рекомбинации вблизи поверхности контакта. Комбинация всех указанных факторов значительно повышает эффективность работы термоэлектрического преобразователя.

Сделаем анализ рассмотренной выше гетероструктуры катода. Какое-либо влияние пространственных зарядов, а также изменений температуры, как в катоде, так и в аноде, учитывать не будем. Будем считать, что основной вклад в разность потенциалов дает разность потенциалов в вакуумном промежутке между катодом и анодом.

Электрическое поле внутри катода считаем равным нулю. Это следует из предположения, что в целом заряд внутри катода нейтрален, даже с учетом образования фотоэлектронов. Это возможно при условии слабой концентрации избыточных электронов, которая меньше равновесной концентрации дырок в оконном слое и в слое поглотителя. Уравнение непрерывности для избыточных электронов для равновесной ситуации в запрещенной зоне с наличием градиента ее ширины имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 n_{e1}}{dz^2} + \frac{v_n E}{DN_1} \frac{dn_{e1}}{dz} - \frac{n_{e1}}{LN_1^2} + \frac{U_1(x)}{DN_1} = 0 \quad (2)$$

Здесь n_{e1} — концентрация избыточных электронов, DN_1 — коэффициент диффузии электронов, LN_1 — длина диффузии электронов, v_n — подвижность электронов, $U_1(x)$ — функция, характеризующая скорость образования фотоэлектронов.

При слабой концентрации избыточных электронов можно считать, что длина диффузии электронов не зависит от нее, а значит общее решение уравнения (2) определено. В этом случае общее решение уравнения непрерывности можно записать как:

$$n_{e1} = B_1 \exp(K_1 z) + B_2 \exp(K_2 z) + \frac{1}{K_1 - K_2} [\exp(K_1 z) T_1(z) + \exp(K_2 z) T_2(z)] \quad (3)$$

Здесь:

$$K_1 = -\frac{v_n E}{2DN_1} + \left[\left(\frac{v_n E}{2DN_1} \right)^2 + \frac{1}{LN_1^2} \right]^{1/2}, K_2 = -\frac{v_n E}{2DN_1} - \left[\left(\frac{v_n E}{2DN_1} \right)^2 + \frac{1}{LN_1^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Принимая во внимание предположение, рассмотренное выше, можно сделать вывод, что уравнение (3) верно при низких значениях концентрации избыточных носителей. Функции $T_1(z)$ и $T_2(z)$ определяются соотношениями:

$$T_1(z) = -\frac{1}{DN_1} \int_0^z \exp(-K_1 z) U(z) dz \quad (5)$$

$$T_2(z) = -\frac{1}{DN_1} \int_0^z \exp(-K_2 z) U(z) dz \quad (6)$$

Константы B_1 и B_2 можно определить из граничных условий. Рекомбинация носителей заряда происходит на поверхности контакта, координата которой определяется как $z=0$, и она может быть задана соотношением:

$$DN_1 \left. \frac{dn_{e1}}{dz} \right|_{z=0} + n_{e1}(0) v_n E = n_{e1}(0) \Lambda_1 \quad (7)$$

где Λ_1 — скорость рекомбинации носителей заряда на контактной поверхности.

Если выполняется условие нулевого смещения для барьера на границе, то через гетеропереход осуществляется практически идеальный переход электронов зоны проводимости оконного слоя. Предполагается, что электроны, попадающие в запрещенную зону с переменной шириной, и достигающие границы поглощающего слоя ($z=l_1$), проникают внутрь этого слоя под действием электрического поля, возникающего за счет градиента ширины запрещенной зоны. Граничное условие для поглощающего слоя в этом случае записывается в виде:

$$n_{e1}(l_1) = 0 \quad (8)$$

Плотность тока, поступающего в поглощающий слой, равна:

$$I_{ex} = -eDN_1 \left. \frac{dn_{e1}}{dz} \right|_{z=l_1} \quad (9)$$

Решая уравнение непрерывности, и используя граничные условия (8) и (9), получаем для плотности тока, входящего в поглощающий слой, следующее соотношение:

$$I_{ex} = -\frac{eDN_1}{2} \left\{ \frac{[T_1(l_1) \exp(K_1 l_1) + T_2(l_1) \exp(K_2 l_1)] \left\{ \left(\frac{\Lambda_1}{DN_1} + a \right) \cos[h(fl_1)] + f \sin[h(fl_1)] \right\}}{\left(\frac{\Lambda_1}{DN_1} + a \right) \sin[h(fl_1)] + f \cos[h(fl_1)]} - [T_1(l_1) \exp(K_1 l_1) + T_2(l_1) \exp(K_2 l_1)] \right\} \quad (10)$$

Здесь:

$$a = -\frac{v_n E}{2DN_1}, f = \left[\left(\frac{v_n E}{2DN_1} \right)^2 + \frac{1}{LN_1^2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Для оконного слоя, имеющего запрещенный слой с изменяющейся шириной, коэффициент поглощения для носителей заряда можно записать в виде:

$$\beta_1(z) = B^* [h\nu - E_g(z)]^{1/2} \quad (12)$$

Здесь B^* некоторая константа. Ширина запрещенной зоны в оконном слое вдоль координаты z изменяется по следующему закону:

$$E_g(z) = E_{g1} + E'z \quad (13)$$

Здесь E_{g1} — ширина запрещенной зоны на контактной поверхности, E' — градиент ширины запрещенной зоны, величина которого равна значению внутреннего электрического поля E . Функция, определяющая скорость образования фотоэлектронов, имеет вид:

$$U_1(z) = -\frac{dI}{dz} = \beta_1(z)\Phi_1(z) \quad (14)$$

где $\Phi_1(z)$ поток фотонов, величина которого определяется соотношением:

$$\Phi_1(z) = \Phi_0 \exp\left(\int_0^z -\beta_1(z) dz\right) \quad (15)$$

Решение для уравнения (15) имеет вид:

$$\Phi_1(z) = \Phi_0 \exp\left\{\frac{2B^*}{3E} [(h\nu - E_{g1} - E'z)^{3/2} - (h\nu - E_{g1})^{3/2}]\right\} (h\nu > E_{g1}), \quad (16)$$

$$\Phi_1(z) = \Phi_0 \exp\left[\frac{2B^*}{3E} (h\nu - E_{g1} - E'z)^{3/2}\right] (h\nu > E_{g1}).$$

Уравнение непрерывности для электронов, захватываемых поглотителем, имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 n_{e2}}{dz^2} - \frac{n_{e2}}{LN_2^2} + \frac{U_2(z)}{DN_2} = 0 \quad (17)$$

где n_{e2} , DN_2 , LN_2 — концентрация избыточных электронов, коэффициент диффузии и длина диффузии электронов в поглощающем слое соответственно.

Функция, определяющая скорость образования фотоэлектронов в поглотителе, имеет следующий вид:

$$U_2(z) = \Phi_2 \beta_2 \exp(-\beta_2 z) \quad (18)$$

Здесь β_2 — коэффициент поглощения, Φ_2 — поток фотонов, величина которого равна $\Phi_1(l_1)$.

Направления токов, поступающего из оконного слоя в слой поглотителя, и рекомбинационного, противоположны. Отсюда, граничное условие для границы раздела — оконный слой-поглотитель имеет вид:

$$-eDN_2 \frac{dn_{e2}}{dz} \Big|_{z=l_1} = I_{ax} - en_{e2}(l_1)V_2 \quad (19)$$

где V_2 — скорость рекомбинации.

Граничное условие для излучающей поверхности, координата которой задается соотношением $z = l = l_1 + l_2$, записывается в виде:

$$-eDN_2 \frac{dn_{e2}}{dz} \Big|_{z=l} = en_{e2}(l)V_3 + I_{эм} - I_{ан} \quad (20)$$

Здесь предполагается, что электроны, эмитируемые из анода и попадающие на катод, вносят вклад в заселенность зоны проводимости поглотителя. V_3 — скорость рекомбинации на излучающей поверхности, $I_{эм}$ — ток эмиссии катода, $I_{ан}$ — ток от анода к катоду.

При положительном напряжении V ток эмиссии катода $I_{эм}$ и ток эмиссии анода $I_{ан}$ можно представить в следующем виде:

$$I_{эм} = RT_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT_K}\right) \frac{n_{e2}(l)}{n_{равн}}, V \leq V_{пл}, \quad (21)$$

$$I_{эм} = RT_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K + e(V - V_{пл})}{kT_K}\right) \frac{n_{e2}(l)}{n_{равн}}, V > V_{пл}.$$

$$I_{ан} = RT_A^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A + e(V_{пл} - V)}{kT_A}\right), V \leq V_{пл}, \quad (22)$$

$$I_{ан} = RT_A^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A}{kT_A}\right), V > V_{пл}.$$

Здесь R — постоянная Ричардсона, k — постоянная Больцмана и $n_{равн}$ — равновесная концентрация электронов в поглощающем слое. T_K и T_A — температуры катода и анода соответственно (температуры удобно оценивать голографическими [12–14] и интерферометрическими методами [15]), φ_K и φ_A — работы выхода катода и анода соответственно. $V_{пл} = (V_K - V_A)/e$ — контактная разность потенциалов. Результирующий ток на выходе термоэлектрического преобразователя равен:

$$I = I_{эм} - I_{ан} \quad (23)$$

Коэффициент преобразования термоэлектрического преобразователя может быть представлен в следующем виде:

$$\eta = \frac{I_{раб} V_{раб}}{P_{сол}} \quad (24)$$

где $I_{раб}$ и $V_{раб}$ — рабочие значения выходного тока и выходного напряжения соответственно, $P_{сол}$ — мощность излучения солнца.

Выводы

Проведен теоретический анализ гетероструктуры катода термоэлектронного преобразователя солнечной энергии. Рассмотрена гетероструктура в которую введены оконный слой с достаточно широкой запрещенной зоной и поглощающий слой, ширина запрещенной зоны которой остается постоянной. Это позволяет сильно снизить рекомбинационные потери на поверхности контакта. Однако, наличие широкой запрещенной зоны в оконном слое приводит к возникновению барьера для формирующихся фотоэлектронов, а это, в свою очередь, приводит к потерям при преобразовании энергии, так как фотоны с энергией меньшей ширины запрещенной зоны перестает работать на превращение энергии. Т. е. в электрическую энергию будет превращаться только часть энергии Солнца — работает только часть спектра солнечного излучения. Показано, что преодолеть этот недостаток можно создав градиент ширины запрещенной зоны. Такой градиент позволяет создать обратное внутреннее поле, снижающее высоту барьера на поверхности контакта, что повышает выход фотоэлектронов и, в конечном счете, общий коэффициент преобразования термоэлектронного преобразователя.

Получены теоретические значения для тока выхода и коэффициента преобразования термоэлектронного преобразователя солнечной энергии, имеющего гетероструктурный катод.

Список литературы:

1. Olawole O. C., De D. K. Theoretical studies of thermionic conversion of solar energy with graphene as emitter and collector // Journal of Photonics for Energy. 2018. V. 8. №01. P. 018001. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.8.018001>
2. Kafafi Z. H., Martín-Palma R. J., Nogueira A. F., O'carroll D. M., Pietron J. J., Samuel I. D., ... Tsakalacos L. The role of photonics in energy // Journal of photonics for energy. 2015. V. 5. №1. P. 050997. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.5.050997>
3. Deb S. K., Wallace W. L. Status of nonsilicon photovoltaic solar cell research // Role of Electro-Optics in Photovoltaic Energy Conversion. International Society for Optics and Photonics, 1980. V. 248. P. 37-57. <https://doi.org/10.1117/12.970584>
4. De D., Olukunle O. C. (2017). Graphene for thermoelectronic solar energy conversion. Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion VIII. <https://doi.org/10.1117/12.2276162>
5. Kribus A., Segev G. Solar energy conversion with photon-enhanced thermionic emission // Journal of Optics. 2016. V. 18. №7. P. 073001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/7/073001>
6. Smerdov R. S., Mustafaev A. S., Spivak Y. M., Moshnikov V. A. Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1135. №1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1135/1/012038>
7. Zheng W., Ogino A., Kando M. Effects of illumination on thermionic energy converter characteristics // Japanese Journal of Applied Physics. 2000. V. 39. №5R. P. 2816. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.2816>
8. Humphrey T. E., O'Dwyer M. F., Linke H. Power optimization in thermionic devices // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. V. 38. №12. P. 2051. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/12/029>
9. Dimmock, J. A., Kauer, M., Wu, J., Liu, H., Stavrinou, P. N., & Ekins-Daukes, N. J. A metallic hot-carrier photovoltaic device // Semiconductor Science and Technology. 2019. V. 34. №6. P. 064001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab1222>

10. Zhang X., Peng W., Su G., Su S., Chen J. Thermionic energy conversion based on 3D Dirac semimetals // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. V. 51. №40. P. 405501. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad975>
11. Исманов Ю. Х., Ниязов Н. Т., Джаманкызов Н. К., Жумалиев К. М. Термоэмиссионный генератор, работающий под действием концентрированного солнечного излучения // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020. №2. С. 125-130. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13023>
12. Исманов Ю. Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // *Вестник КГУСТА*. 2015. №4(40). С. 194-198.
13. Исманов Ю. Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // *Известия Национальной Академии наук Киргизской Республики*. 2015. №2. С. 20-23.
14. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography // *Journal of applied physics*. 1993. V. 74. №12. P. 7039-7043. <https://doi.org/10.1063/1.355041>
15. Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2018. С. 596-597.

References:

1. Olawole, O. C., & De, D. K. (2018). Theoretical studies of thermionic conversion of solar energy with graphene as emitter and collector. *Journal of Photonics for Energy*, 8(1), 018001. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.8.018001>
2. Kafafi, Z. H., Martín-Palma, R. J., Nogueira, A. F., O'carroll, D. M., Pietron, J. J., Samuel, I. D., ... & Tsakalacos, L. (2015). The role of photonics in energy. *Journal of photonics for energy*, 5(1), 050997. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.5.050997>
3. Deb, S. K., & Wallace, W. L. (1980). Status of Nonsilicon Photovoltaic Solar Cell Research. Role of Electro-Optics in Photovoltaic Energy Conversion. <https://doi.org/10.1117/12.970584>
4. De, D., & Olukunle, O. C. (2017). Graphene for thermoelectronic solar energy conversion. Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion VIII. <https://doi.org/10.1117/12.2276162>
5. Kribus, A., & Segev, G. (2016). Solar energy conversion with photon-enhanced thermionic emission. *Journal of Optics*, 18(7), 073001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/7/073001>
6. Smerdov, R. S., Mustafaev, A. S., Spivak, Y. M., & Moshnikov, V. A. (2018). Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1135(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1135/1/012038>
7. Zheng, W., Ogino, A., & Kando, M. (2000). Effects of illumination on thermionic energy converter characteristics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39(5R), 2816. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.2816>
8. Humphrey, T. E., O'Dwyer, M. F., & Linke, H. (2005). Power optimization in thermionic devices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(12), 2051. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/12/029>
9. Dimmock, J. A., Kauer, M., Wu, J., Liu, H., Stavrinou, P. N., & Ekins-Daukes, N. J. (2019). A metallic hot-carrier photovoltaic device. *Semiconductor Science and Technology*, 34(6), 064001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab1222>

10. Zhang, X., Peng, W., Su, G., Su, S., & Chen, J. (2018). Thermionic energy conversion based on 3D Dirac semimetals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(40), 405501. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad975>

11. Ismanov, Yu. Kh., Niyazov, N. T., Dzhamankyzov, N. K., Zhumaliev, K. M. (2020). Thermoemission Generator Operating under Concentrated Solar Radiation. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, (2), 125-130. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/mjpf.13023>

12. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Interferometriya na osnove metoda besshchelevoi raduzhnoi golografii. *Vestnik KGUSTA*, (4), 194-198. (in Russian)

13. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Golograficheskaya interferometriya na osnove effekta Tal'bota. *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, (2), 20-23. (in Russian)

14. Maripov, A., & Ismanov, Y. (1993). The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography. *Journal of applied physics*, 74(12), 7039-7043. <https://doi.org/10.1063/1.355041>

15. Ismanov, Yu. Kh., Dzhamankyzov, N. K., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2018). Vosstanovlenie besshchelevoi raduzhnoi gologrammy kogherentnoi volnoi. In *VII Mezhdunarodnaya konferentsiya po fotonike i informatsionnoi optike*. 596-597. (in Russian).

Работа поступила
в редакцию 14.08.2020 г.

Принята к публикации
19.08.2020 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Ниязов Н. Т., Джаманкызов Н. К., Жумалиев К. М. Термоэлектронное преобразование солнечной энергии с использованием гетероструктурного катода // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. №9. С. 211-221. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/21>

Cite as (APA):

Ismanov, Yu., Niyazov, N., Dzhamankyzov, N., & Zhumaliev, K. (2020). Thermoelectronic Conversion of Solar Energy Using a Heterostructural Cathode. *Bulletin of Science and Practice*, 6(9), 211-221. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/21>