

УДК 621.382.8  
AGRS P06

https://doi.org/10.33619/2414-2948/101/45

## ФОТОННОЕ УСИЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р физ.-мат. наук,  
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,  
Кыргызстан, i\_yusupjan@mail.ru

©Джаманкызов Н. К., Scopus Author ID: 7801566578, SPIN-код: 1471-6954, д-р физ.-мат.  
наук, Институт физики им. акад. Ж. Ж. Жээнбаева НАН Кыргызской Республики,  
г. Бишкек, Кыргызстан, nasip49@gmail.com

©Тынышова Т. Д., ORCID: 0009-0007-5235-7115, ResearcherID: HPB-7352-2023, SPIN-код:  
9917-4190, канд. физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет  
им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ttynyshova@mail.ru

©Абдулаев А. А., канд. техн. наук, Кыргызский государственный технический университет  
им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, aabdulaev@mail.ru

## PHOTON AMPLIFICATION OF THERMOELECTRONIC SOLAR ENERGY CONVERTERS

©Ismanov Yu., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil.,  
Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,  
Bishkek, Kyrgyzstan, i\_yusupjan@mail.ru

©Dzhamankizov N., Scopus Author ID: 7801566578, SPIN-code: 1471-6954, Dr. habil., Institute  
of Physics named after Academician Zh. Z. Zheenbaev of the National Academy of Sciences of the  
Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nasip49@gmail.com

©Tynyshova T., ORCID: 0009-0007-5235-7115, ResearcherID: HPB-7352-2023, SPIN-code:  
9917-4190, Ph.D., Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,  
Bishkek, Kyrgyzstan, ttynyshova@mail.ru

©Abdulaev A., Ph.D., Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,  
Bishkek, Kyrgyzstan, aabdulaev@mail.ru

*Аннотация.* Работа посвящена теоретическому анализу эффективности термоэмиссионного устройства с фотонным усилением. При анализе эффективности термоэмиссионных устройств с фотонным усилением были рассмотрены два физических эффекта, которые не рассматривались в предыдущих анализах, и их влияние на к. п. д. преобразования термоэмиссионных устройств с фотонным усилением. Первый эффект — это влияние переменного напряжения на поведение термоэмиссионных устройств с фотонным усилением и определение величины максимальной мощности. Влияние концентрации носителей заряда на величину максимальной мощности оценивалось с помощью баланса генерации и потери носителей заряда. При данной оценке делалось предположение, что концентрация носителей заряда, температура и электростатический потенциал одинаковы по всему катоду. Эффектами области отрицательного объемного заряда пренебрегли. При оценке также предполагалось, что обратный ток в направлении от анода к катоду влияет на концентрацию электронов в зоне проводимости. Получено выражение для к. п. д. термоэмиссионных устройств с фотонным усилением, которое определяется как функция максимального рабочего напряжения, тока эмиссии катода и обратного анодного тока. Вторым важным эффектом, рассмотренным при анализе — тепловой баланс катода. Для учета этого эффекта рассматривался катод с конфигурацией, в которой катод термически изолирован, т. е.

не имеются какие-либо дополнительные возможности для теплоотвода от катода. Это дало возможность, исходя из теплового баланса, определять температуру катода для данного входного потока излучения и заданной электрической рабочей точки. Показано, что для определения реального к. п. д. при произвольных рабочих условиях расчет электрической рабочей точки необходимо проводить одновременно с балансом энергии катода.

*Abstract.* The work is devoted to a theoretical analysis of the efficiency of a thermionic device with photonic amplification. In analyzing the efficiency of photon-enhanced thermionic devices, two physical effects that were not considered in previous analyzes and their impact on the conversion efficiency of photon-enhanced thermionic devices were considered. The first effect is the influence of alternating voltage on the behavior of thermionic devices with photonic amplification and determining the maximum power value. The effect of charge carrier concentration on the maximum power was assessed using the balance of generation and loss of charge carriers. In this assessment, the assumption was made that the carrier concentration, temperature, and electrostatic potential are the same throughout the cathode. The effects of the negative space charge region were neglected. The assessment also assumed that the reverse current in the direction from the anode to the cathode affects the electron concentration in the conduction band. An expression for the efficiency of thermionic devices with photonic amplification is obtained and is determined as a function of the maximum operating voltage, cathode emission current and reverse anode current. The second important effect considered in the analysis is the thermal balance of the cathode. To account for this effect, a cathode configuration was considered in which the cathode is thermally isolated, i.e., there are no additional opportunities for heat removal from the cathode. This made it possible, based on the thermal balance, to determine the cathode temperature for a given input radiation flux and a given electrical operating point. It is shown that to determine the real efficiency under arbitrary operating conditions, the calculation of the electrical operating point must be carried out simultaneously with the cathode energy balance.

*Ключевые слова:* термоэмиссионные преобразователи энергии, фотонное усиление, тепловой баланс, ток эмиссии, зона проводимости, уровень Ферми.

*Keywords:* thermionic energy converters, photonic amplification, thermal balance, emission current, conduction band, Fermi level.

При помещении металлической или полупроводниковой поверхностей в разреженную газовую среду или вакуум электроны могут начать отрываться с поверхности этих материалов, причем скорость вылетающих электронов сильно зависит от температуры поверхности. Это явление хорошо известно под названием термоэлектронная эмиссия может быть использовано для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую [1, 2].

Простейшая схема процесса термоэмиссионного преобразования тепловой энергии представляет собой катод, который разогревается за счет подвода к нему тепловой энергии от источника тепла, например, солнечного концентратора, и анода, который отводит тепло посредством радиатора, обязательного вакуумного зазора между катодом и анодом, а также электрического выхода во внешнюю электрическую цепь. Преобразование тепловой энергии за счет термической эмиссии электронов предполагает, нагрев катода до очень высоких температур, 1200°C и выше, но даже при таких температурах к. п. д. термической эмиссии не

превышает 18-20%. Это стало основной причиной отсутствия широкого применения методов термоэмиссионного преобразования тепловой энергии.

В термоэлектронной эмиссии с использованием фотонного усиления [3-5] на катод направляются фотоны, обладающие энергией, превышающей ширину запрещенной зоны материала катода, что приводит к увеличению количества электронов в зоне проводимости катода и повышению уровня Ферми зоны проводимости. Как следствие, работа выхода электронов из материала катода в вакуум сильно снижается, что позволяет осуществлять эмиссию электронов при температурах, значительно более низких, чем в термоэлектронной эмиссии без фотонного усиления. Процесс преобразования энергии в термоэлектрическом преобразователе с фотонным усилением подразделяется на три стадии. На первом этапе происходит поглощение фотонов с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, что приводит к увеличению количества электронов в зоне проводимости. Далее, электроны, присутствующие в зоне проводимости за счет фотонного усиления, получают дополнительную энергию за счет нагрева катода, и те из них, которые приобретают достаточную энергию для преодоления энергетического барьера, вылетают с поверхности катода и захватываются анодом [6-7].

Для эффективной работы термоэмиссионного преобразователя энергии с фотонным усилением при освещении солнечным излучением, катод должен быть изготовлен из полупроводника с подходящей шириной запрещенной зоны, не превышающей энергии фотонов солнечного излучения, например, в диапазоне 0,8–1,6 эВ. Энергия падающего солнечного излучения только частично идет на перевод электронов в зону проводимости. Часть энергии солнечного излучения преобразуется в тепловую энергию в виде нагрева катода, а фотоны, энергия которых меньше ширины запрещенной зоны, также дает вклад в тепловую энергию, если каким-либо образом предусмотреть возможность поглощения катодом и этих фотонов. Термоэмиссионное преобразование энергии с фотонным усилением потенциально может быть более эффективным, чем фотоэлектрическое преобразование без фотонного усиления, так как в этом случае электроэнергия извлекается также из той части солнечного излучения, которая тратится на создание тепловой энергии. Термоэмиссионное преобразование энергии с фотонным усилением также должен быть более эффективным, чем обычное термоэмиссионное преобразование без фотонного усиления: поглощение фотонов с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны полупроводникового катода, приводит к насыщению электронами зоны проводимости. Следствием данного факта становится понижение потенциального барьера для эмиссии электронов по сравнению с обычным катодом керамического вида, активация которого происходит только за счет нагрева, что приводит к более высокому току эмиссии.

В работе [8] экспериментально показано, что в случае использования комбинации нагрева и освещения производимые электрический ток и выходная мощность значительно выше, чем, если бы нагрев или освещение катода производились по отдельности. При определенных условиях результирующая выходная мощность оказывалась выше, чем сумма мощностей при нагреве и освещении по отдельности [9-10].

*Целью данной работы* является анализ предельно возможной эффективности комбинированного процесса преобразования солнечной энергии. При анализе предполагается, что электроны после облучения светом испускаются еще до разогрева катода.

Проведенный в работе [11] анализ показал, что к. п. д. преобразования энергии, значительно более высокий в комбинированных системах, чем для чистой термоэлектронной эмиссии, например, к. п. д., превышающий 42% при 1000-кратной концентрации падающего

солнечного излучения и температуре катода ниже  $900^{\circ}\text{C}$ . Т. е. к. п. д. преобразования энергии в термоэмиссионных устройствах с фотонным усилением, при наличие концентрированного солнечного излучения, теоретически сравним с к. п. д. самых эффективных фотоэлектрических элементов. К. п. д. преобразования энергии можно еще сильнее повысить, если анод в термоэмиссионных устройствах с фотонным усилением будет нагреваться до умеренных температур, т. е. не настолько высоких, чтобы создать значительный обратный ток, а тепло, отобранное у анода, необходимо будет затем использовать для выработки дополнительной электроэнергии [12].

При анализе эффективности термоэмиссионных устройств с фотонным усилением необходимо рассмотреть два физических эффекта, которые не рассматривались в предыдущих анализах, и их влияние на к. п. д. преобразования термоэмиссионных устройств с фотонным усилением. Первый эффект — это влияние переменного напряжения на поведение термоэмиссионных устройств с фотонным усилением и определение величины максимальной мощности.

Следующий существенно важный эффект, который необходимо учесть — это тепловой баланс катода. Для учета этого эффекта рассматривается катод с конфигурацией, в которой катод термически изолирован, т. е. не имеются какие-либо дополнительные возможности для теплоотвода от катода. Это дает возможность исходя из теплового баланса, определять температуру катода для данного входного потока излучения и заданной электрической рабочей точки. Предполагается использование совмещенного баланса тепловой и электрической энергии и представление температуры катода и к. п. д. термоэмиссионного устройства с фотонным усилением как функцию концентрации потока на входе системы.

#### *Анализ эффективности термоэмиссионного устройства с фотонным усилением*

Рассмотрим вначале условие постоянства температуры катода. Влияние концентрации носителей заряда на величину максимальной мощности оценивается с помощью баланса генерации и потери носителей заряда. Делается предположение, что концентрация носителей заряда, температура и электростатический потенциал одинаковы по всему катоду. Эффектами области отрицательного объемного заряда пренебрегаем. При оценке также считаем, что обратный ток в направлении от анода к катоду, влияет на концентрацию электронов в зоне проводимости. При указанных условиях реальный ток представляет собой разницу между током, возникающим под действием солнечного излучения, и рекомбинацией [13-14]:

$$H(O - P) = \frac{I_e - I_p}{e} \quad (1)$$

здесь  $O$  — ток, возникающий за счет облучения солнечным светом,  $P$  — потеря электронов за счет рекомбинации,  $I_e$  и  $I_p$  — токи эмиссии катода и анода соответственно,  $H$  — толщина катода, а  $e$  — элементарный заряд. Подстановка соответствующих выражений вместо каждого из членов уравнения (1) позволяет определить величину  $n$  — концентрацию электронов в зоне проводимости. Ток  $O$ , возникающий за счет облучения солнечным светом, рассчитывается по количеству фотонов в солнечном излучении с энергией превышающей ширину запрещенной зоны и равномерно распределенных по всему катоду

$$O = \frac{\Phi(E > E_g)}{H} \quad (2)$$

Здесь  $\Phi(E > E_g)$  — поток фотонов в солнечном излучении с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны катода,  $E$  — энергия фотона, а  $E_g$  — ширина запрещенной зоны катода. Ток эмиссии определяется следующими соотношениями:

$$I_e = en \langle v_y \rangle \exp\left(\frac{\eta}{kT}\right), U \leq \varphi_c - \varphi_a \quad (3)$$

$$I_e = en \langle v_y \rangle \exp\left(\frac{\eta + (\varphi_a + U - \varphi_c)}{kT}\right), U > \varphi_c - \varphi_a.$$

Здесь  $k$  — постоянная Больцмана,  $\langle v_y \rangle = \sqrt{ekT / 2\pi m_e}$  — средняя скорость электрона, перпендикулярная поверхности,  $m_e$  — эффективная масса электрона, а  $\eta$  — сродство к электрону. Эмиссионный ток является линейной функцией концентрации электронов, т. е. его можно представить, как  $I_e = Kn$ .  $U$  — рабочее напряжение,  $\varphi_c$ ,  $\varphi_a$  — работы выхода катода и анода соответственно. В идеальном случае, если омический контакт с внешней цепью совершенен, то уровни Ферми валентной зоны и зоны проводимости сходятся к равновесному уровню на контакте. Отсюда можно сделать вывод, что рабочее напряжение определяется как разница между равновесными уровнями Ферми катода и анода. При анализе необходимо учесть, что в термоэмиссионном устройстве с фотонным усилением концентрация электронов определяется уравнением (1) и зависит от напряжения. Т. е. возникающий ток не является чисто экспоненциальным для напряжений, превышающих ширину плоской зоны. С другой стороны, в термоэмиссионных преобразователях без фотонного усиления катод обычно изготавливается из металла или неметалла при очень высокой температуре, а концентрация электронов  $n$  очень высока и близка к равновесной концентрации, которая сильно зависит от температуры катода. В этом случае количество эмитированных электронов не оказывает существенного влияния на величину концентрации электронов. Т. е. формирующийся ток будет падать по экспоненте при значениях напряжения, превышающих ширину плоской зоны.

Для напряжений, превышающих ширину плоской зоны, вставка  $\varphi_c = \eta + E_g - E_f$  устраняет зависимость от сродства к электрону:

$$I_e = en \langle v_y \rangle \exp\left(\frac{\varphi_a + U - (E_g - E_f)}{kT}\right). \quad (4)$$

Соотношение (4) показывает, что для напряжений, превышающих ширину плоской зоны, ток эмиссии не зависит от сродства к электрону. Обратный ток представляет собой обычное:

$$I_p = CT_a^2 \exp\left(\frac{\varphi_c - U}{kT}\right), U \leq \varphi_c - \varphi_a \quad (5)$$

$$I_p = CT_a^2 \exp\left(\frac{\varphi_a}{kT}\right), U > \varphi_c - \varphi_a.$$

Здесь  $C = 120 \text{ A}/(\text{см}^2 \text{ K}^2)$  — постоянная Ричардсона,  $T_a$  — температура анода. При анализе предполагается, что рекомбинация при излучении является преобладающей рекомбинацией. Скорость рекомбинации при излучении рассчитывается исходя из

ограничений баланса. В равновесном состоянии число фотонов, испускаемых в единицу времени с единицы площади, определяется соотношением [15]:

$$S_0 = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{(hv)^2 d(hv)}{\exp\left(\frac{hv}{kT}\right) - 1} \quad (6)$$

Эта скорость увеличивается по экспоненте в неравновесных условиях [6]:

$$S = S_0 \exp\left(\frac{E_{f,n} - E_{f,p}}{kT}\right) = S_0 \frac{np}{n_{pa} p_{pa}} \quad (7)$$

Здесь  $E_{f,n}$  и  $E_{f,p}$  — уровни Ферми зоны проводимости и валентной зоны соответственно, а  $n_{pa}$ ,  $p_{pa}$  — равновесные концентрации носителей заряда. Следовательно, неравновесная рекомбинация на единицу объема  $S'$  равна:

$$S' = \frac{1}{H} \frac{S_0}{n_{pa} p_{pa}} (np - n_{pa} p_{pa}) = K_S (np - n_{pa} p_{pa}) \quad (8)$$

Вставка соотношений (2), (3), (8) в выражение (1) приводит к выражению:

$$O + \frac{I_p}{eH} = K_S (np - n_{pa} p_{pa}) + \frac{I_p}{eH} n \quad (9)$$

Делая предположение, что концентрации избыточных носителей дырок и электронов равны,  $\Delta n = n - n_e = p - p_e$ , и делая перестановку, получаем:

$$-K_S \Delta n^2 - \left[ \frac{K}{eH} + K_S (n_e + p_e) \right] \Delta n + \left( O + \frac{I_p}{eH} - \frac{K}{eH} n_e \right) = 0 \quad (10)$$

Для определения концентрации электронов катода необходимо решить уравнение (10) относительно концентрации избыточных носителей  $\Delta n$ . Зависимость  $n$  от рабочего напряжения можно выразить через зависимость  $K$  от напряжения. Плотность тока для при заданном напряжении можно получить из соотношения (3). К. п. д. преобразования определяется как:

$$\xi = \frac{(I_e - I_p) U_{\max}}{P_{co}} \quad (11)$$

где  $U_{\max}$  — максимальное напряжение,  $P_{co}$  — концентрированный поток солнечного излучения,  $I_e$  и  $I_p$  — токи эмиссии электронов на аноде и катоде соответственно при заданном рабочем напряжении. Далее рассмотрим более общий случай, при котором температура катода зависит от концентрации потока. Если теплоотвод от внешнего катода исключен, то температуру катода можно рассчитать через поток падающего солнечного излучения посредством баланса тепловой энергии в сочетании с уравнениями носителей заряда, описанными ранее. При анализе мы предполагаем, что анод абсолютно не поглощает внешнее излучение, что исключает любую передачу тепла между катодом и анодом посредством излучения. Если предположить, что в катоде встроен инфракрасный (ИК)

элемент, который позволяет поглощать фотоны падающего излучения с энергией ниже запрещенной зоны в виде тепла, энергетический баланс для катода будет иметь вид:

$$P_{co} + I_p(\phi_b + 2kT_a) = P_{ИК} + P_0 + P_{из} + I_e(\phi_b + 2kT) \quad (12)$$

где  $T_a$  — температура анода. Слагаемые  $I_p 2kT_a$  и  $I_e 2kT$  обозначают тепло, которое уносят электроны, испускаемые из анода и катода.  $\phi_b$  — работа выхода для электронов в катоде.

$$\begin{aligned} \phi_b &= \phi_c, U \leq \phi_c - \phi_a \\ \phi_b &= U + \phi_a, U > \phi_c - \phi_a \end{aligned} \quad (13)$$

$P_0$  — равновесные потери на катоде при рекомбинации за счет излучения [6]

$$P_0 = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{(h\nu)^3 d(h\nu)}{\exp\left(\frac{h\nu}{rT}\right) - 1} \quad (14)$$

$P_{из}$  — усиление потерь при рекомбинации за счет излучения из-за неравновесности [6]

$$P_{из} = P_0 \left[ \exp\left(\frac{E_{f,n} - E_{f,p}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (15)$$

$P_{ИК}$  — излучение, испускаемое ИК-элементом, который позволяет поглощать фотоны падающего излучения с энергией ниже запрещенной зоны и полностью прозрачен для фотонов падающего излучения с энергией выше запрещенной зоны

$$P_{ИК} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_0^{E_g} \frac{(h\nu)^3 d(h\nu)}{\exp\left(\frac{h\nu}{rT}\right) - 1} \quad (16)$$

Суммарное значение  $P_{ИК}$  и  $P_0$  представляет собой полный спектр излучения абсолютно черного тела при температуре  $T$ . В данном анализе мы предполагаем, что электрические контакты являются идеальными изоляторами тепла. Следовательно, теплом, переносимым в катод электронами, инжектируемыми из контакта, можно пренебречь. Для определения реального к. п. д. при произвольных рабочих условиях, расчет электрической рабочей точки, показанный ранее, проводится одновременно с балансом энергии катода в соответствии с соотношением (12).

### Выводы

Проведен теоретический анализ эффективности термоэмиссионного устройства с фотонным усилением. При анализе эффективности термоэмиссионных устройств с фотонным усилением были рассмотрены два физических эффекта, которые не рассматривались в предыдущих анализах, и их влияние на к. п. д. преобразования термоэмиссионных устройств с фотонным усилением. Первый эффект — это влияние переменного напряжения на поведение термоэмиссионных устройств с фотонным усилением и определение величины максимальной мощности. Влияние концентрации носителей заряда на величину максимальной мощности оценивалось с помощью баланса генерации и потери носителей заряда. При данной оценке делалось предположение, что концентрация носителей

заряда, температура и электростатический потенциал одинаковы по всему катоду. Эффектами области отрицательного объемного заряда пренебрегли. При оценке также предполагалось, что обратный ток в направлении от анода к катоду, влияет на концентрацию электронов в зоне проводимости. В идеальном случае, если омический контакт с внешней цепью совершенен, то уровни Ферми валентной зоны и зоны проводимости сходятся к равновесному уровню на контакте. На этом основании был сделан вывод, что рабочее напряжение определяется как разница между равновесными уровнями Ферми катода и анода. При анализе было учтено, что в термоэмиссионном устройстве с фотонным усилением концентрация электронов зависит от напряжения. Т. е. возникающий ток не является чисто экспоненциальным для напряжений, превышающих ширину плоской зоны. Получено выражение для к. п. д. термоэмиссионных устройств с фотонным усилением, которое определяется как функция максимального рабочего напряжения, тока эмиссии катода и обратного анодного тока.

Второй важный эффект, рассмотренный при анализе — тепловой баланс катода. Для учета этого эффекта рассматривался катод с конфигурацией, в которой катод термически изолирован, т. е. не имеются какие-либо дополнительные возможности для теплоотвода от катода. Это дало возможность, исходя из теплового баланса, определять температуру катода для данного входного потока излучения и заданной электрической рабочей точки. Показано, что для определения реального к. п. д. при произвольных рабочих условиях расчет электрической рабочей точки необходимо проводить одновременно с балансом энергии катода.

#### *Список литературы:*

1. Wolf M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences // *Energy Conversion*. 1976. V. 16. №1-2. P. 79-90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)
2. Florschuetz L. W. On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration // 11th photovoltaic specialists conference. 1975. P. 318-326.
3. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // *Renewable Energy*. 2018. P. Vol4\_88-Vol4\_119.
4. Kraemer D., McEnaney K., Chiesa M., Chen G. Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications // *Solar Energy*. 2012. V. 86. №5. P. 1338-1350. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.025>
5. Gou X., Xiao H., Yang S. Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system // *Applied energy*. 2010. V. 87. №10. P. 3131-3136. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.013>
6. Van Sark W. Feasibility of photovoltaic–thermoelectric hybrid modules // *Applied Energy*. 2011. V. 88. №8. P. 2785-2790. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.008>
7. Wang N., Han L., He H., Park N. H., Koumoto K. A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device // *Energy & Environmental Science*. 2011. V. 4. №9. P. 3676-3679. <https://doi.org/10.1039/C1EE01646F>
8. Zhang J., Xuan Y., Yang L. Performance estimation of photovoltaic–thermoelectric hybrid systems // *Energy*. 2014. V. 78. P. 895-903. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.087>
9. Liao T., Lin B., Yang Z. Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation device // *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. V. 77. P. 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.013>

10. Kraemer D., Poudel B., Feng H. P., Caylor J. C., Yu B., Yan X., Chen G. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration // *Nature materials*. 2011. V. 10. №7. P. 532-538. <https://doi.org/10.1038/nmat3013>

11. Ma T., Yang H., Zhang Y., Lu L., Wang X. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 43. P. 1273-1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.003>

12. Исманов Ю. X., 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>

13. Исманов Ю. X., Тынышова Т. Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2019. С. 695-696.

14. Исманов Ю. X. Восстановление изображения волнами различной длины // *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2015. №4. С. 30-33.

15. 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>

#### References:

1. Wolf, M. (1976). Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 16(1-2), 79-90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)

2. Florschuetz, L. W. (1975). On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration. In *11th photovoltaic specialists conference* (pp. 318-326).

3. Chow, T. T. (2018). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Renewable Energy*, Vol4\_88-Vol4\_119.

4. Kraemer, D., McEnaney, K., Chiesa, M., & Chen, G. (2012). Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications. *Solar Energy*, 86(5), 1338-1350. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.025>

5. Gou, X., Xiao, H., & Yang, S. (2010). Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Applied energy*, 87(10), 3131-3136. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.013>

6. Van Sark, W. G. J. H. M. (2011). Feasibility of photovoltaic–thermoelectric hybrid modules. *Applied Energy*, 88(8), 2785-2790. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.008>

7. Wang, N., Han, L., He, H., Park, N. H., & Koumoto, K. (2011). A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3676-3679. <https://doi.org/10.1039/C1EE01646F>

8. Zhang, J., Xuan, Y., & Yang, L. (2014). Performance estimation of photovoltaic–thermoelectric hybrid systems. *Energy*, 78, 895-903. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.087>

9. Liao, T., Lin, B., & Yang, Z. (2014). Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation device. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.013>

10. Kraemer, D., Poudel, B., Feng, H. P., Caylor, J. C., Yu, B., Yan, X., ... & Chen, G. (2011). High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. *Nature materials*, 10(7), 532-538. <https://doi.org/10.1038/nmat3013>

11. Ma, T., Yang, H., Zhang, Y., Lu, L., & Wang, X. (2015). Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1273-1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.003>
12. 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>
13. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2019). Umen'shenie ob"ema vvodimykh dannykh pri komp'yuternoй obrabotke interferogramm. In *VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po fotonike i informatsionnoy optike* (pp. 695-696). (in Russian).
14. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Vosstanovlenie izobrazheniya volnami razlichnoy dliny. *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, (4), 30-33. (in Russian).
15. 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>

Работа поступила  
в редакцию 12.03.2024 г.

Принята к публикации  
20.03.2024 г.

*Ссылка для цитирования:*

Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Абдулаев А. А. Фотонное усиление термоэлектронных преобразователей солнечной энергии // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10. №4. С. 403-412. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/101/45>

*Cite as (APA):*

Ismanov, Yu., Dzhamankizov, N., Tynyshova, T., & Abdulaev, A. (2024). Photon Amplification of Thermoelectronic Solar Energy Converters. *Bulletin of Science and Practice*, 10(4), 403-412. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/101/45>