

УДК 621.382.8
AGRIS P07

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/107/11>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 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

©Джаманкызов Н. К., SPIN-код: 1471-6954, д-р физ.-мат. наук, Институт физики им. акад.
Ж. Ж. Жээнбаева НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан

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

©Кайназаров А. Т., SPIN-код: 8765-4810, канд. техн. наук, Кыргызский государственный
технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ascarkainaz@mail.ru

INCREASING THE EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC CONVERSION OF SOLAR ENERGY

©Ismanov Y., 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

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

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

©Kainazarov A., SPIN-code: 8765-4810, Ph.D., Kyrgyz State Technical University named after I.
Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ascarkainaz@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются современные достижения в области термоэмиссионного преобразования солнечной энергии. Анализируются ключевые аспекты термоэлектронной эмиссии, проблемы снижения работы выхода электродов и повышения эффективности устройств. Показано, что привлекательным материалом для целей термоэлектронной эмиссии могут быть алмазы, легированные фосфором. В этом случае наличие донорных состояний может сильно сужать область пространственного заряда, а вместе с этим снижают потенциальный барьер в работе выхода. Исследования также установили, что наиболее успешным и широко используемым методом преодоления эффекта объемного заряда является заполнение межэлектродного промежутка цезием. КПД устройств термоэмиссионного преобразования солнечной энергии повышается в 1,6 раза. Особое внимание уделяется использованию новых материалов, таких как наноструктуры и углеродные нанотрубки, а также перспективным технологиям, таким как фотонное усиление термоэмиссионных процессов. Анализ результатов показал, что фотонное усиление выхода электронов из-за освещения больше в кремнии р-типа, как и предсказывают теоретические модели. Термоэмиссионный ток возрастает в 1,7 раза по сравнению с кремнием. Расстояние между квазиуровнем Ферми и уровнем Ферми в кремнии п-типа меньше этого расстояния в кремнии р-типа. Как следствие, количество электронов в зоне проводимости меньше.

Обсуждаются методы борьбы с эффектом пространственного заряда и оптимизация конфигурации систем преобразования энергии.

Abstract. The article considers the latest achievements in the field of thermionic conversion of solar energy. The key aspects of thermionic emission, the problems of reducing the electrode work function and increasing the efficiency of devices are analyzed. It is shown that diamonds doped with phosphorus can be an attractive material for the purposes of thermionic emission. In this case, the presence of donor states can significantly narrow the space charge region, and at the same time reduce the potential barrier in the work function. The studies also found that the most successful and widely used method for overcoming the space charge effect is filling the interelectrode gap with cesium. The efficiency of thermionic conversion devices for solar energy increases by 1.6 times. Particular attention is paid to the use of new materials, such as nanostructures and carbon nanotubes, as well as promising technologies, such as photonic enhancement of thermionic processes. The analysis of the results showed that the photonic enhancement of the electron yield due to illumination is greater in p-type silicon, as predicted by theoretical models. The thermionic current increases by 1.7 times compared to silicon. The distance between the quasi-Fermi level and the Fermi level in n-type silicon is less than this distance in p-type silicon. As a consequence, the number of electrons in the conduction band is smaller. Methods for combating the space charge effect and optimizing the configuration of energy conversion systems are discussed.

Ключевые слова: термоэмиссионное преобразование, солнечная энергия, фотонное усиление, работа выхода, солнечная концентрация.

Keywords: thermionic conversion, solar energy, photonic gain, work function, solar concentration.

Солнечная энергия является одной из наиболее эффективных возобновляемых видов энергии, абсолютно не влияющей на окружающую среду при ее использовании. Данные современных исследований в области использования возобновляемых источников энергии показывают, что уже в ближайшие 20-30 лет доля солнечной энергии в общем количестве энергии, потребляемой человечеством, может вырасти не менее, чем 28%, основательно заменив ископаемые источники энергии [1, 2].

В основе получения солнечной энергии лежат два подхода- концентрация солнечной энергии и ее отсутствие. Системы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии без использования концентрации могут собирать и преобразовывать в электричество как прямое, так и рассеянное солнечное излучение [3].

Однако, учитывая довольно низкую среднюю интенсивность солнечной энергии у поверхности Земли (не превышает 900 Вт/м^2), для сбора солнечной энергии необходимо использовать огромные площади дорогостоящих солнечных элементов. При использовании метода концентрации солнечной энергии в фотоэлектрических системах преобразования используются либо системы собирающих зеркал, либо оптические линзы, которые фокусируют солнечные лучи на солнечных элементах, что приводит к уменьшению количества необходимых солнечных элементов и одновременно кратно повышает эффективность преобразующей системы [4, 5].

Важным моментом является то, что при использовании концентрации солнечной энергии необходимо учитывать температурный режим для поддержания необходимой выходной мощности и срока службы концентрирующих элементов системы преобразования

солнечной энергии [6]. Другой подход в концентрации солнечной энергии заключается в солнечно-тепловом преобразовании, которое может быть интегрировано с накоплением тепла и в основном включает в себя производимую тепловую энергию [7, 8] и термоэлектрическое преобразование солнечной энергии [9].

Эффективность солнечной энергетики, которую предсказывают теоретические исследования и то, что имеется на практике сильно отличаются на практике в худшую сторону. В первую очередь это объясняется необходимостью добиться компромисса между работой выхода электронов нагреваемых электродов и их рабочей температурой. Низкий к. п. д. и высокая стоимость сдерживают развитие солнечной энергетики. Однако в последние годы наблюдается резкий рост интереса к солнечной энергетике благодаря достижениям в микро- и нанотехнологиях.

В статье рассмотрены некоторые результаты в области термоэлектрического преобразования солнечной энергии, современные достижения в области термоэлектронной эмиссии, возникающей под действием солнечного излучения, и термоэлектронной эмиссии с фотонным усилением.

Термоэмиссионное преобразование солнечной энергии

Изначально устройства термоэмиссионного преобразования солнечной энергии были разработаны в качестве источников энергии для космических аппаратов. Было предложено три основных типа термоэмиссионных преобразователей солнечной энергии. Самую первую действующую систему термоэмиссионного преобразования солнечной энергии создали в Лаборатории реактивного движения (США) в 1961 г [10].

Предложенный рабочий термоэмиссионный преобразователь солнечной энергии имел значение выходной мощности около 115 Вт и эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую около 8% при температуре катода 1730°C. Из-за низкой эффективности подобных систем работы в этом направлении были практически заморожены почти на 35 лет. В конце 1990-х было реализовано прорывное устройство термоэмиссионного преобразования солнечной энергии в Японии [11].

Предложенный термоэмиссионный преобразователь солнечной энергии достигал мощности в 18 Вт, а к. п. д. доходил до 24% при температуре накаливания катода в 1580°C.

Почти сразу за японцами в США было предложено устройство термоэмиссионного преобразования солнечной энергии, в котором выходная мощность достигла 32 Вт при более низкой температуре эмиттера в 1400°C [12].

Такие важные характеристики термоэмиссионного преобразования солнечной энергии как выходная мощность и к. п. д. определяются в первую очередь общей конфигурацией системы, а также материалами, используемыми при создании устройств преобразования [13].

Т. J. Hsueh, J. M. Shieh, Y. M. Yeh подробно рассмотрели влияние на к. п. д. преобразователя энергии высоты и радиуса концентратора энергии. Анализ показал, что при нужной подборке конфигурации устройства преобразования энергии можно значительно снизить потери энергии и повысить к. п. д. устройства [14].

Но надо помнить, что к. п. д. термоэмиссионного преобразования солнечной энергии ограничено фундаментальными свойствами термоэмиссионного преобразования солнечной энергии, такими как неидеальная эмиссия электронов, эффектом пространственного заряда в вакуумном пространстве и характером его сбора у анода [15].

Повышения выхода электронов при термоэлектронной эмиссии

Слабым местом в устройствах термоэмиссионного преобразования солнечной энергии является высокая температура накаливания электродов, что предполагает использование для электродов тугоплавких материалов, таких как вольфрам (работа выхода равна 4,54 эВ),

рений (4,7 эВ), молибден (4,15эВ) и др. Однако, существенный недостаток этих материалов — высокая работа выхода, что не позволяет достигнуть высоких показателей в термоэлектронной эмиссии. Из сказанного следует, что снижение работы выхода — это основной способ повышения эффективности термоэлектронной эмиссии и, в конечном счете увеличения выходной мощности термоэмиссионного преобразования солнечной энергии. Прямой зависимости между ростом эмиссия электронов за счет снижения потенциального барьера и уменьшения работы выхода и увеличения выходной мощности нет. Это связано, в первую очередь, с тем, что более высокий выходной ток эмиттера вызывает большее действие пространственного заряда. Уменьшение работы выхода за счет уменьшения потенциального барьера эмиттера выгодно лишь в относительно небольшой степени из-за ограничивающего воздействия пространственного заряда. Другая важная причина связана с тем, что выходная мощность определяется произведением выходного тока и выходного напряжения. Наиболее широко используемым методом снижения потенциального барьера является метод напыления на подложку материалов с низкой работой выхода, таких как цезий (2,14 эВ) или барий (2,7 эВ). Т. Liao, В. Lin, Z. Yang провели анализ влияния подложек из рения, вольфрама и молибдена на величину эмиссии электронов, по результатам которого сделан вывод, что работы выхода эмиттеров с указанными подложками схожи, однако, ток эмиссии довольно значительно различается под воздействием паров Cs [16].

Недавние исследования показали эффективность еще одного метода уменьшения работы выхода за счет изменения характеристик поверхности эмиттера на уровне микроструктуры и даже наноструктуры [17].

Wu Y. Y., Wu S. Y., Xiao L. показали, что термоэмиссионный ток от излучающего эмиттера с поверхностью, имеющей сложную структуру, в 4–5 раз выше, чем от эмиттера с гладкой поверхностью, что объясняется увеличением площади поверхности эмиттера [18].

Указанные факторы приводят к значительному снижению эффективной работы выхода эмиттера. Правильное расположение микроструктурных неоднородностей позволяет сильно влиять на угловые характеристики плотности тока на макроуровне [19].

Такая возможность значительно облегчает перенос электронов к коллектору, что, в свою очередь, увеличивает общий ток за счет эмиссии. В работе К. Ismail, М. Goncalves рассмотрен многослойный вакуумный термоэмиссионный преобразователь солнечной энергии, в котором используется квантовый туннельный эффект [20]. Авторы утверждают, что образующиеся на поверхности ряды квантовых ям затрудняют электронам заполнение энергетических уровней, что приводит к повышению химического потенциала и, как следствие, к снижению работы выхода. Тугоплавкие металлы обладают высокой прочностью, химической инертностью и высокой тепло-/электропроводностью, что делает их почти идеальными материалами для термоэлектронной эмиссии. Однако, важным их недостатком с точки зрения термоэлектронной эмиссии является то, что при повышенных температурах происходит межкристаллитное ослабление, что подталкивает исследования в этом направлении на уровне нанотехнологий. Использование наноматериалов позволяет преодолеть проблемы обычных устройств термоэмиссионного преобразования солнечной энергии благодаря превосходным термическим и оптическим характеристикам наноматериалов [21].

В работе М. J. Huang, Р. С. Eames, N. J. Hewitt представлены результаты исследования термоэлектронной эмиссии графена [22]. По результатам исследования было предложено устройство термоэмиссионного преобразования солнечной энергии на основе графена. Устройство позволяет повысить, теоретически, к. п. д. преобразования солнечной энергии в электрическую до 47%.

Очень хорошие характеристики с точки зрения использования для термоэмиссионного преобразования солнечной энергии показал алмаз, в который ведены соответствующие легирующие добавки. Алмаз имеет значительно более низкую рабочую температуру (меньше 950°C) и меньшей работы выхода (меньше 1,9 эВ) [23].

Наиболее подходящими характеристиками обладает алмаз, легированный азотом. После обработки этого соединения водородом его поверхность приобретает отрицательное сродство к электрону. Наиболее привлекательным является алмаз, легированный азотом, который после обработки водородом содержит поверхность с отрицательным сродством к электрону и примеси азота в качестве доноров электронов.

В работе S. Maiti, S. Banerjee, K. Vyas рассмотрены алмазные пленки, легированные азотом и имеющие очень низкую работу выхода в 1,97 эВ [24]. Однако, существенный недостаток в виде изгиба зон вверх из-за шероховатой поверхности и наличие неоднородностей алмазной пленки сильно ограничивают возможности термоэлектронной эмиссии. Привлекательным материалом для целей термоэлектронной эмиссии могут быть алмазы, легированные фосфором. В этом случае наличие донорных состояний может сильно сужают область пространственного заряда, а вместе с этим снижают потенциальный барьер в работе выхода. Эффективная работа выхода может опускаться до значения 0,85 эВ, а значение постоянной Ричардсона становится хуже, снижаясь до величины $11 \text{ мкА}/(\text{см}^2 \text{ К}^2)$ [25].

Выходом может быть использование сильного легирования фосфором с концентрацией более $1040 \text{ атомов}/\text{см}^3$ может значительно увеличить константу Ричардсона до $16 \text{ А}/(\text{см}^2 \text{ К}^2)$ [24].

В работе C. S. Malvi, D. W. Dixon-Hardy, R. Crook проведено сравнение характеристик углеродных нанотрубок с характеристиками вольфрама и алмаза, легированного азотом [26]. Сравнение показало, что углеродные нанотрубки обеспечивают более высокую термоэлектронную эмиссию из-за наличия очень хорошей температурной стабильности. Также подтверждено, что работа выхода для углеродных нанотрубок значительно снижается примерно до 1,9 эВ при 328°C при обработке щелочью [27].

Еще одно преимущество углеродных нанотрубок то, что они обладают способностью избегать потери тепла. Это объясняется тем, что, когда массив многостенных углеродных нанотрубок освещается концентрированным светом, возникает эффект тепловой ловушки. Кроме того, потери энергии из-за накала эмиттера можно существенно уменьшить за счет уменьшения работы выхода углеродных нанотрубок.

В углеродных нанотрубках скорость повышения температуры становится более высокой ($\sim 1950 \text{ К}$ при интенсивности солнечного излучения $110 \text{ Вт}/\text{см}^2$) и более высокий к. п. д. ($\sim 49\%$ при солнечном излучении $1100 \text{ Вт}/\text{см}^2$) за счет возникновения тепловой ловушки по сравнению с изотропными по объему материалами [28, 29].

Снижение влияния пространственного заряда

Некоторые исследования показали, что оптимальные расстояния между электродами в термоэмиссионных устройствах находятся в диапазоне 0,95–3,1 мкм, что примерно равно длине волны теплового излучения эмиттера [30].

На практике сборка системы эмиттер-коллектор, которая работает при высоком значении разницы температур в сотни градусов Цельсия, причем необходимо соблюдать жесткий допуск, задача довольно сложная. Высокая температура работы устройств термоэмиссионного преобразования солнечной энергии с такими расстояниями между электродами затруднена еще и из-за возможности возникновения короткого замыкания устройства термоэмиссионного преобразования солнечной энергии из-за теплового

расширения электродов. При расстояниях между электродами меньше 1 мкм теплопередача за счет излучения затухающих волн [31], вырастает на несколько порядков, что сильно снижает к. п. д. преобразования солнечной энергии в электрическую. При расстояниях между электродами больше 3 мкм воздействие облака пространственного заряда преобладает при переносе электронов, что значительно снижает выходную мощность устройства преобразования энергии [32]. Но действие пространственного заряда можно ослабить, изменив распределение электрического потенциала в пространстве между электродами [33].

Наибольшего эффекта снижения воздействия пространственного заряда достигают при заполнении пространства между электродами цезием [34]. Наиболее успешным и широко используемым методом преодоления эффекта объемного заряда является заполнение межэлектродного промежутка цезием. К. п. д. устройств термоэмиссионного преобразования солнечной энергии повышается в 1,6 раза. Действие паров цезия проявляется следующим образом. Цезий адсорбируется на поверхности электродов, что приводит к снижению работы выхода и, как следствие, к большему выходу электронов в вакуум. Кроме того, атомы цезия при нагреве испускаются с поверхности электродов, что приводит к частичной нейтрализации испускаемых электронов и, как следствие, снижается негативное воздействие пространственного заряда. И последнее заключается в том, что пары цезия ионизируются в пространстве между электродами, что также приводит к снижению негативного действия пространственного заряда.

Другой метод ограничения воздействия пространственного заряда основан на использовании в эмиттере материала с отрицательным сродством к электрону. Довольно широко распространенным методом получения материала с отрицательным сродством к электрону является обработка как единого целого смеси цезия и кислорода на поверхности эмиттера. Еще один метод заключается в использовании водородной плазмы для обработки легированного алмазного слоя, в котором возникает дипольная поверхность за счет образования ионной связи между ионами цезия и водорода. Устройства термоэмиссионного преобразования солнечной энергии с эмиттерами на основе материалов, имеющих отрицательное сродство электрона, имеют более низкую температуру эмиттера и более низкое влияние объемного заряда, так как отрицательное сродство электрона снижает электростатические характеристики на границе, непосредственно за пределами излучающего электрода [35, 36].

Еще один метод снижения воздействия пространственного заряда заключается в использовании дополнительного положительно заряженного электрода в качестве затвора, который помещается между эмиттером и коллектором. Данный затвор служит целью снижению потенциального барьера, создаваемого статическим пространственным зарядом. Затвор создает дополнительное ускорение электронов, вылетающих с эмиттера и замедляет их при приближении к коллектору.

Графен или подобные ему двумерные материалы можно использовать как высокоэффективные затворы из-за их высокой прозрачности, достигающей 65 % для электронов от 3 до 45 эВ [34, 36].

Графеновые пленки обладают прозрачностью, достигающей 99,9% для электронов с энергиями меньше 2,9 эВ [32]. Такой материал может быть очень эффективным в качестве электронного затвора.

Для управления направлением движения электронов используется дополнительное однородное магнитное поле. Отмечено, что использование магнитного поля порядка 250 мТл, повышает выходной ток почти в пять раз. Оптимизация геометрических параметров электронного затвора позволяет значительно уменьшить влияние объемного заряда [27].

Последние исследования показали возможность использования молекулярного переноса электронов в пространство между электродами [29]. Этот прорывной метод использует в качестве молекулы-переносчика электронов молекулы газообразных веществ (в случае эмиттера с алмазным напылением это может быть метан). Снижение воздействия объемного заряда можно объяснить разными причинами. В первую очередь это то, что молекулы газа захватывают электроны при столкновении с поверхностью эмиттера и переносят их к коллектору. Вторая причина заключается в том, что при повышении температуры эмиттера происходит ионизация поверхности и образуются отрицательно заряженные ионы, а образующиеся положительные ионы способствуют восстановлению состояния поверхности, например, восстановление алмазной пленки, которая подверглась воздействию водородом. Иными словами, молекулярный перенос электронов аналогичен по воздействию на объемный заряд цезию, который заполнял бы пространство между электродами. Показано, что использование молекулярного переноса электронов позволяет повысить выходную мощность устройства почти до 2,5 раза при давлении метана 3,5 Па.

Термоэлектронное преобразование солнечной энергии с использованием фотонов

Устройства термоэмиссионного преобразования солнечной энергии используют эмиттеры с температурой нагрева, достигающей 1500°C, что представляет собой довольно сложную задачу даже для самых эффективных современных солнечных концентраторов. Необходимость снижения рабочей температуры эмиттера без потери в к. п. д. подтолкнула исследователей к разработке новых методов термоэлектронного преобразования солнечной энергии.

Совместное использование термоэлектронной эмиссии и фотоэлектрической эмиссии синергически усиливает выходную электрическую мощность устройства преобразования солнечной энергии [14].

J. Zhang, Y. Xuan, L. Yang впервые предложили механизм термоэмиссионного преобразования солнечной энергии с фотонным усилением, который объединяет фотоэлектрический и термоэлектронный эффекты в единый физический процесс [15]. Усиленный фотонами термоэмиссионный преобразователь солнечной энергии имеет представляет собой систему параллельных пластин, аналогичную обычному термоэмиссионному преобразователю солнечной энергии, с нагревом эмиттера, кроме одной важной особенности – в качестве эмиттера используется полупроводник [34].

Такой тип эмиттера позволяет использовать как квантовую энергию фотонов, так и тепловую энергию солнечного излучения. Ширина валентной зоны в полупроводниковом эмиттере подобрана таким образом, что часть падающих фотонов обладают энергией, превышающей ширину валентной зоны. Поглощая такие фотоны, электроны переходят в зону проводимости. После нагрева эмиттера такие электроны легко преодолевают потенциальный барьер, определяющий работу выхода, и вылетают в вакуум, достигая коллектора. Такая возможность привела к тому, что в последние годы началось быстрое развитие усиленных фотонами термоэмиссионных преобразователей солнечной энергии. Развитие усиленных фотонами термоэмиссионных преобразователей солнечной энергии происходит, в основном, по двум направлениям: усиленные фотонами термоэмиссионные преобразователи солнечной энергии с использованием эмиттера с положительным сродством к электрону и усиленные фотонами термоэмиссионные преобразователи солнечной энергии преобразование на основе эмиттера с отрицательным сродством к электрону.

Усиленные фотонами термоэмиссионные преобразователи солнечной энергии с использованием эмиттера с положительным сродством к электрону

Материалы с положительным сродством к электрону широко используются в качестве эмиттера в термоэмиссионных преобразователях солнечной энергии с фотонным усилением. В качестве материала для эмиттера в термоэмиссионных преобразователях солнечной энергии с фотонным усилением использовалось соединение NaCsSb [25]. Полученный к. п. д. преобразования солнечной энергии составил 0,02% при освещении длиной волны 410 нм при температуре 22 °С, а при повышении температуры до 75 °С к. п. д. вырос до 0,04%. Исследования позволили сделать рывок в теоретических изысканиях, связанных с повышением к. п. д. термоэмиссионных преобразователей солнечной энергии с фотонным усилением. Результаты исследований показали, что оптимальная ширина запрещенной зоны эмиттера составляет от 1,15 до 1,75 эВ [15].

Достаточно высокая ширина запрещенной зоны является препятствием для использования фотонов солнечного излучения, имеющих энергию, превышающую ширину запрещенной зоны. Например, только 1,1% фотонов солнечного излучения обладают энергией больше, чем ширина запрещенной зоны в полупроводнике GaN (ширина запрещенной зоны 3,51 эВ при 320 К), что приводит к очень низкому выходу электронов за счет квантового эффекта, порядка $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} электронов на падающий фотон, т. е. использование этого материала для целей термоэмиссионного преобразования с фотонным усилением. Другим отрицательным эффектом является то, что большая ширина запрещенной зоны приводит к большему сродству к электрону, что требует более высокой температуры для создания идентичного тока и требует более основательной обработки цезия. Минусом покрытий на основе цезия является их частая нестабильность при более высоких температурах [30].

Но, если уменьшить ширину запрещенной зоны, то сильно возрастает охлаждение эмиттера за счет уноса энергии электронами, формируемыми фотонами, что в целом снижает эффективность термоэмиссионных преобразователей солнечной энергии с фотонным усилением. Проведено теоретическое сравнение возможностей кремния (1,13 эВ при 310 К), GaAs (1,44 эВ при 310 К) и InP (1,36 эВ при 310 К) при использовании их в качестве эмиттера [24]. Результатом анализа стал вывод, что большая ширина запрещенной зоны GaAs и InP является следствием более высокого напряжения зон и, как следствие, более высокого значения к. п. д. по сравнению с кремнием при одном и том же значении сродства к электрону (22–27% для GaAs и InP против 11–16% для кремния).

Рассмотрены экспериментальные результаты по термоэмиссионным преобразователям солнечной энергии с фотонным усилением с эмиттером на основе кремния n- и p-типа, легированного цезием [36]. Для кремния работу выхода можно снизить с 4,6 эВ до 2,2 эВ за счет покрытия поверхности кремния цезием, а рабочие характеристики остаются стабильными с течением времени при рабочей температуре до 290°С. Анализ результатов показал, что фотонное усиление выхода электронов из-за освещения больше в кремнии p-типа, как и предсказывают теоретические модели. Термоэмиссионный ток возрастает в 1,7 раза по сравнению с кремнием. Расстояние между квазиуровнем Ферми и уровнем Ферми в кремнии n-типа меньше этого расстояния в кремнии p-типа. Как следствие, количество электронов в зоне проводимости меньше. Схема построения электрических контактов (подразумевается использование схемы с передним или задним контактом) сильно влияет на производительность термоэмиссионных преобразователей солнечной энергии с фотонным усилением. Опыт показывает, что схема построения с задним контактом превосходит схему построения с передним контактом. Объяснить это можно тем, что в первом случае омическими потери меньше, а эффективность захвата ИК-излучения выше [31].

Итак, современные достижения в области термоэмиссионного преобразования солнечной энергии показывают значительный прогресс, однако существует ряд технических препятствий, таких как высокая работа выхода и эффект пространственного заряда. Использование нанотехнологий и фотонного усиления открывают перспективы для значительного повышения эффективности термоэлектронных устройств. Будущие исследования должны быть направлены на оптимизацию этих технологий и преодоление существующих ограничений.

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. Florschuetz L. W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors // Solar energy. 1979. V. 22. №4. P. 361-366. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7)
4. Kern Jr E. C., Russell M. C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab., 1978. №COO-4577-3; CONF-780619-24.
5. Hendrie S. D. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab., 1979. №COO-4577-8; CONF-790541-54.
6. Raghuraman P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. 1981. <https://doi.org/10.1115/1.3266256>
7. Cox Iii C. H., Raghuraman P. Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors // Solar energy. 1985. V. 35. №3. P. 227-241. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90102-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90102-1)
8. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Renewable Energy. 2018. P. Vol4_88-Vol4_119.
9. Kraemer D. et al. 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>
10. 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>
11. 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>
12. Moh'd A A. N., Tashtoush B. M., Jaradat A. A. Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate // Energy. 2015. V. 90. P. 1239-1250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.090>
13. 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>
14. Hsueh T. J., Shieh J. M., Yeh Y. M. Hybrid Cd-free CIGS solar cell/TEG device with ZnO nanowires // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2015. V. 23. №4. P. 507-512. <https://doi.org/10.1002/pip.2457>

15. 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>
16. 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>
17. Dallan B. S., Schumann J., Lesage F. J. Performance evaluation of a photoelectric–thermoelectric cogeneration hybrid system // *Solar Energy*. 2015. V. 118. P. 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.034>
18. Wu Y. Y., Wu S. Y., Xiao L. Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover // *Energy Conversion and Management*. 2015. V. 93. P. 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.013>
19. Lin J., Liao T., Lin B. Performance analysis and load matching of a photovoltaic–thermoelectric hybrid system // *Energy Conversion and Management*. 2015. V. 105. P. 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.054>
20. Ismail K. A. R., Goncalves M. M. Thermal performance of a PCM storage unit // *Energy conversion and management*. 1999. V. 40. №2. P. 115-138. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00042-9)
21. Huang M. J., Eames P. C., Norton B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials // *International Journal of heat and mass transfer*. 2004. V. 47. №12-13. P. 2715-2733. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015>
22. Huang M. J., Eames P. C., Hewitt N. J. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. V. 90. №13. P. 1951-1960. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.02.002>
23. Huang M. J., Eames P. C., Norton B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics // *Solar energy*. 2006. V. 80. №9. P. 1121-1130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006>
24. Maiti S., Banerjee S., Vyas K., Patel P., Ghosh P. K. Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal–wax composite phase change matrix // *Solar energy*. 2011. V. 85. №9. P. 1805-1816. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.021>
25. Aelenei L., Pereira R., Gonçalves H., Athienitis A. Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation // *Energy Procedia*. 2014. V. 48. P. 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.056>
26. Malvi C. S., Dixon-Hardy D. W., Crook R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material // *Solar Energy*. 2011. V. 85. №7. P. 1440-1446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.027>
27. Zhang P., Li Q., Xuan Y. M. Thermal contact resistance of epoxy composites incorporated with nano-copper particles and the multi-walled carbon nanotubes // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. V. 57. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.022>
28. 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>
29. 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>

30. 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>
31. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2019. С. 695-696.
32. Исманов Ю. Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. №4. С. 30-33.
33. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography // Journal of optics. 1995. V. 26. №1. P. 25. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/26/1/004>
34. Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной // Материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2018. С. 596-597.
35. Исманов Ю. Х., Алымкулов С. А. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. №7. С. 3-5.
36. Жумалиев К. М., Алымкулов С. А., Исманов Ю., Исмаилов Д. А. Анализ голографических интерферограмм // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2016. №3-1. С. 56-60.

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. Florschuetz, L. W. (1979). Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar energy*, 22(4), 361-366. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7)
4. Kern Jr, E. C., & Russell, M. C. (1978). *Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems* (No. COO-4577-3; CONF-780619-24). Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab..
5. Hendrie, S. D. (1979). *Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors* (No. COO-4577-8; CONF-790541-54). Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab..
6. Raghuraman, P. (1981). Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. <https://doi.org/10.1115/1.3266256>
7. Cox Iii, C. H., & Raghuraman, P. (1985). Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors. *Solar energy*, 35(3), 227-241. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90102-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90102-1)
8. Chow, T. T. (2018). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Renewable Energy*, Vol4_88-Vol4_119.
9. 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>

10. 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>
11. 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>
12. Moh'd A, A. N., Tashtoush, B. M., & Jaradat, A. A. (2015). Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate. *Energy*, 90, 1239-1250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.090>
13. 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>
14. Hsueh, T. J., Shieh, J. M., & Yeh, Y. M. (2015). Hybrid Cd-free CIGS solar cell/TEG device with ZnO nanowires. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(4), 507-512. <https://doi.org/10.1002/pip.2457>
15. 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>
16. 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>
17. Dallan, B. S., Schumann, J., & Lesage, F. J. (2015). Performance evaluation of a photoelectric–thermoelectric cogeneration hybrid system. *Solar Energy*, 118, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.034>
18. Wu, Y. Y., Wu, S. Y., & Xiao, L. (2015). Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover. *Energy Conversion and Management*, 93, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.013>
19. Lin, J., Liao, T., & Lin, B. (2015). Performance analysis and load matching of a photovoltaic–thermoelectric hybrid system. *Energy Conversion and Management*, 105, 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.054>
20. Ismail, K. A. R., & Goncalves, M. M. (1999). Thermal performance of a PCM storage unit. *Energy conversion and management*, 40(2), 115-138. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00042-9)
21. Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of heat and mass transfer*, 47(12-13), 2715-2733. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015>
22. Huang, M. J., Eames, P. C., & Hewitt, N. J. (2006). The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(13), 1951-1960. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.02.002>
23. Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar energy*, 80(9), 1121-1130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006>
24. Maiti, S., Banerjee, S., Vyas, K., Patel, P., & Ghosh, P. K. (2011). Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal–wax composite phase change matrix. *Solar energy*, 85(9), 1805-1816. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.021>
25. Aelenei, L., Pereira, R., Gonçalves, H., & Athienitis, A. (2014). Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation. *Energy Procedia*, 48, 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.056>

26. Malvi, C. S., Dixon-Hardy, D. W., & Crook, R. (2011). Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. *Solar Energy*, 85(7), 1440-1446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.027>
27. Zhang, P., Li, Q., & Xuan, Y. (2014). Thermal contact resistance of epoxy composites incorporated with nano-copper particles and the multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.022>
28. 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>
29. 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>
30. 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>
31. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2019). Umen'shenie ob"ema vvodimykh dannyykh pri komp'yuternoi obrabotke interferogramm. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov, Moscow*, 695-696. (in Russian).
32. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Vosstanovlenie izobrazheniya volnami razlichnoi dliny. *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, (4), 30-33. (in Russian).
33. Maripov, A., & Ismanov, Y. (1995). Interferometer based on the Talbot effect in holography. *Journal of optics*, 26(1), 25. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/26/1/004>
34. Ismanov, Yu. Kh., Dzhamankyzov, N. K., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2018). Vosstanovlenie besshchelevoi raduzhnoi gologrammy kogerentnoi volnoi. In *Materialy VII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike, Moscow*, 596-597. (in Russian).
35. Ismanov, Yu. Kh., & Alymkulov, S. A. (2015). Samoreproduktivirovanie regulyarnyykh ob"ektov s ogranichennoi aperturoi. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana*, (7), 3-5. (in Russian).
36. Zhumaliev, K. M., Alymkulov, S. A., Ismanov, Yu., & Ismailov, D. A. (2016). Analiz golograficheskikh interferogramm. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*, (3-1), 56-60. (in Russian).

Работа поступила
в редакцию 30.08.2024 г.

Принята к публикации
08.09.2024 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Кайназаров А. Т. Повышение эффективности термоэлектрического преобразования солнечной энергии // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10. №10. С. 85-97. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/107/11>

Cite as (APA):

Ismanov, Y., Dzhamankyzov, N., Tynyshova, T. & Kainazarov, A. (2024). Increasing the Efficiency of Thermoelectric Conversion of Solar Energy. *Bulletin of Science and Practice*, 10(10), 85-97. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/107/11>