

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 629.78.064.56; 621.317.6

Научная специальность ВАК – 1.3.11 физика полупроводников

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12808>

Влияние переизлучающего слоя органической тонкой плёнки на КПД кремниевых солнечных батарей

А. С. Тютюник[✉], В. С. Гурченко, А. С. Мазинов

ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского,
проспект Академика Вернадского 4, Симферополь 295007, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: Фотоэлектрические технологии преобразования солнечной энергии представляют собой многообещающие пути к производству экологически чистой и возобновляемой энергии. Исследования органических солнечных элементов активно развиваются, особенно в последнее десятилетие они привлекли научный и экономический интерес, вызванный быстрым увеличением эффективности преобразования энергии. В последние годы были синтезированы и использованы люминесцентные материалы, способные преобразовывать широкий спектр света в электроны определенной длины волн, чтобы минимизировать потери в процессе преобразования энергии на основе солнечных элементов. В данной работе представлено исследование оптических и люминесцентных свойств тонких пленок комплексов меди $C_{62}H_{50}Cu_2I_2N_8P_2$.

Экспериментальная часть: Предложено использование данного материала в качестве переизлучающего слоя на поверхности солнечного элемента с целью увеличения коэффициента полезного действия (КПД) последнего за счет преобразования энергии из области ультрафиолетового диапазона в область видимого диапазона. Проведено исследование вольт-амперных характеристик чистого монокристаллического солнечного элемента и элемента с переизлучающим слоем комплекса меди.

Выводы: Показано, что нанесение $C_{62}H_{50}Cu_2I_2N_8P_2$ на поверхность солнечных элементов позволяет повысить КПД преобразователей на 1.45 % в ультрафиолетовом диапазоне при небольших экономических затратах. Обсуждаются механизмы повышения преобразования энергии и анализируются недавние экспериментальные результаты по аналогичным исследованиям.

Ключевые слова: солнечный элемент, фотоэлектрические преобразователи, оптический спектр, люминесценция, тонкие плёнки, комплекс меди

Источник финансирования: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-22-10007 и региона Крым.

Для цитирования: Тютюник А. С., Гурченко В. С., Мазинов А. С. Влияние переизлучающего слоя органической тонкой плёнки на КПД кремниевых солнечных батарей. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(2): 316–322. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12808>

[✉] Тютюник Андрей Сергеевич, e-mail: tyutyunikas@mail.ru

© Тютюник А. С., Гурченко В. С., Мазинов А. С., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Проблема поиска альтернативных источников энергии весьма актуальна в настоящее время, предпринимаются попытки более широкого использования солнечной и других видов энергии. Исследования органических солнечных элементов развивались в течение последних 40 лет, но особенно в последнее десятилетие они привлекли научный и экономический интерес, вызванный быстрым увеличением эффективности преобразования энергии. Это было достигнуто за счет внедрения новых материалов, улучшения технологии производства и более сложных конструкций устройств [1]. По оценкам ученых в период с 2004 по 2030 год ежегодное глобальное потребление энергии вырастет более чем на 50 %. Ожидается соразмерное увеличение выбросов CO_2 , большая часть которых связана с сжиганием угля — самого быстрорастущего источника энергии в мире. Несмотря на прогнозируемый устойчивый рост цен на нефть и газ, согласно прогнозам, менее 10 % мирового производства энергии в 2030 году будет приходиться на возобновляемые источники энергии, такие как гидроэлектроэнергия, солнечная энергия, энергия ветра, гидротермальная энергия и биомасса. Чтобы снизить глобальную зависимость от исчерпаемых природных ресурсов и их экологически опасного сжигания, необходимо направить больше научных усилий на снижение стоимости производства энергии из возобновляемых источников. Текущее годовое использование солнечной энергии значительно ниже 1 % от общего энергопотребления, тогда как на ископаемое топливо приходится более 90 % энергопотребления. Прежде чем начать широкомасштабное использование солнечной энергии, необходимо разработать более эффективные фотоэлектрические системы с меньшими затратами [2–8].

Высокая стоимость преобразования солнечного излучения в значительной степени сдерживает развитие данного направления. Возможным способом ее удешевления является привлечение новых недорогостоящих материалов и технических устройств на их основе, повышающих эффективность преобразования солнечного света [9]. К таким системам можно отнести фотоэлектрические концентраторы, которые предназначены для увеличения электрической энергии, получаемой от солнечной батареи [10]. Высокая оптическая концентрация без избыточного нагрева в стационарной системе может быть достигнута с помощью люминесцентных сол-

нечных концентраторов (LSC) [11–13]. Люминесцентные солнечные концентраторы состоят из красителя, диспергированного в прозрачный волновод. Падающий свет поглощается красителем и затем переизлучается. Разница в энергии между поглощением и излучением предотвращает повторное поглощение света красителем. Таким образом, люминесцентные солнечные концентраторы могут достичь высокие оптические концентрации без отслеживания солнечного света [14]. К сожалению, КПД люминесцентных солнечных концентраторов ограничена потерями при самопоглощении.

В последние годы были синтезированы и использованы люминесцентные материалы, способные преобразовывать широкий спектр света в фотоны определенной длины волн, чтобы минимизировать потери в процессе преобразования энергии на основе солнечных батарей [15]. Данная методика, названная преобразованием солнечных фотонов третьего поколения, предполагает внедрение пассивного люминесцентного слоя в фотоэлектрические элементы [16–18]. Важным аспектом использования этой технологии является то, что спектральные преобразователи легко применимы к существующим солнечным элементам с небольшими изменениями, поскольку спектральные преобразователи и солнечные элементы можно оптимизировать независимо. Чтобы повысить эффективность однопереходных солнечных элементов, в настоящее время исследуются три процесса люминесценции, включая повышающее преобразование, квантовое сокращение и понижающее смещение, для разработки эффективных фотоэлектрических устройств. Трехвалентные ионы лантаноидов являются основными кандидатами на эффективное спектральное преобразование из-за их богатой структуры энергетических уровней (известной как диаграмма Диже), которая позволяет легко управлять фотонами [19–21]. Для увеличения КПД исходных солнечных элементов в рамках проведенных исследований в качестве люминесцентных материалов использовались биядерные комплексы меди с пиридилитриазолом, а именно рассмотрен комплекс меди $\text{C}_{62}\text{H}_{50}\text{Cu}_2\text{I}_2\text{N}_8\text{P}_2$ [22].

2. Материалы, методы и основная идея

Основная идея увеличения КПД солнечного элемента (СЭ) заключается в нанесении на поверхность СЭ тонкопленочного материала, обладающего такими оптическими свойствами, при

которых материал будет пропускать основной спектр падающего электромагнитного излучения. При этом данный материал за счет люминесцентных свойств будет преобразовывать часть спектра из области низкоэффективной работы солнечного элемента в область спектра более эффективной работы СЭ. Реализация данной задачи возможна, благодаря достижениям в области органической и неорганической химии, которые позволяют создавать материалы с заданными оптическими свойствами. В частности, предлагается нанести на поверхность солнечного элемента материал, обладающий поглощением в области ультрафиолетового диапазона и переизлучением в области видимого диапазона.

Объектами исследований служили биядерные комплексы меди с пиридилилтриазолом, а именно рассмотрен комплекс меди $C_{62}H_{50}Cu_2I_2N_8P_2$ (b-phen). Методика синтеза данных материалов подробно описана в работе [22]. Комpleксы меди b-phen являются интересными материалами за счет их механохромных свойств. При измельчении данного материала механическим способом наблюдается сдвиг спектров люминесценции из зеленой в желтую область. При этом данный эффект является обратимым посредством мягкого отжига [22]. Вторым интересным свойством данного соединения является изменение спектра люминесценции в зависимости от длины волны возбуждения. Данное явление проявляется в диапазоне длин волн возбуждения от 385 до 435 нм с соответствующим переизлучением в диапазоне от 508 до 595 нм. Отметим, что квантовый выход соединения $C_{62}H_{50}Cu_2I_2N_8P_2$ составляет 28 % при комнатной температуре и 55 %, при температуре 77 К [22].

Исследование спектров поглощения и прохождения осуществлялось с использованием спектрофотометра GBC Cintra 4040. В качестве источников применялись вольфрамовая и дейтериевая лампы, что позволило реализовать диапазон падающего излучения от 250 до 800 нм с шириной щели 0.1–2 нм. Анализируя спектры поглощения комплексов меди, отметим, что максимум поглощения данных материалов находится в диапазоне 290–350 нм с последующим спадом в области видимого диапазона (рис. 1a). В свою очередь, анализируя спектры прохождения, подчеркнем факт практически полного пропускания электромагнитного излучения в видимом диапазоне и ближнем ИК (рис. 1a). Исследование спектров люминесценции осуществлялось с использованием прибора FluoroMax-4. Для выявления оптимального максимума возбуждающего излучения была задействована стандартная методика импульсного возбуждения, при которой производится многократное облучение пленочных структур. На рис. 1a представлен спектр люминесценции комплекса меди b-phen при длине волны возбуждения 400 нм. Отметим, что максимум люминесценции наблюдается при длине волны 530 нм (рис. 1b).

Представленные комплексы меди полностью соответствуют поставленной задаче по увеличению КПД солнечных элементов, однако важным фактором также является толщина и однородность соответствующей пленки. В связи с этим формирование тонких пленок b-phen на поверхности СЭ осуществлялось методом центрифugирования (рис. 2b). Для создания раствора из исходного твердотельного, порошкового соединения комплексов меди был использован

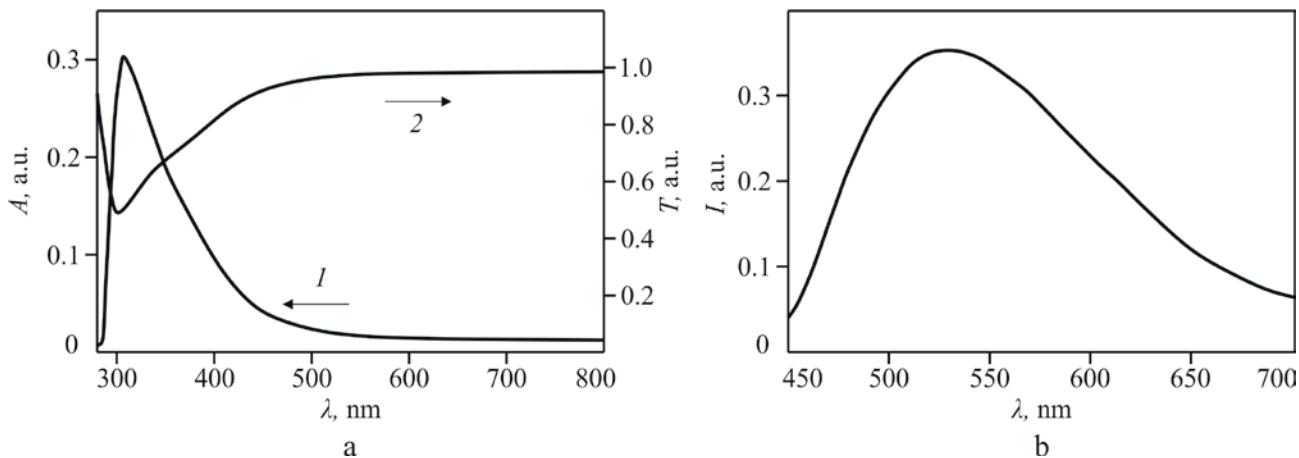


Рис. 1. Оптические спектры (а) поглощения (1) и прохождения (2), а также люминесценция (б) комплексов меди b-phen

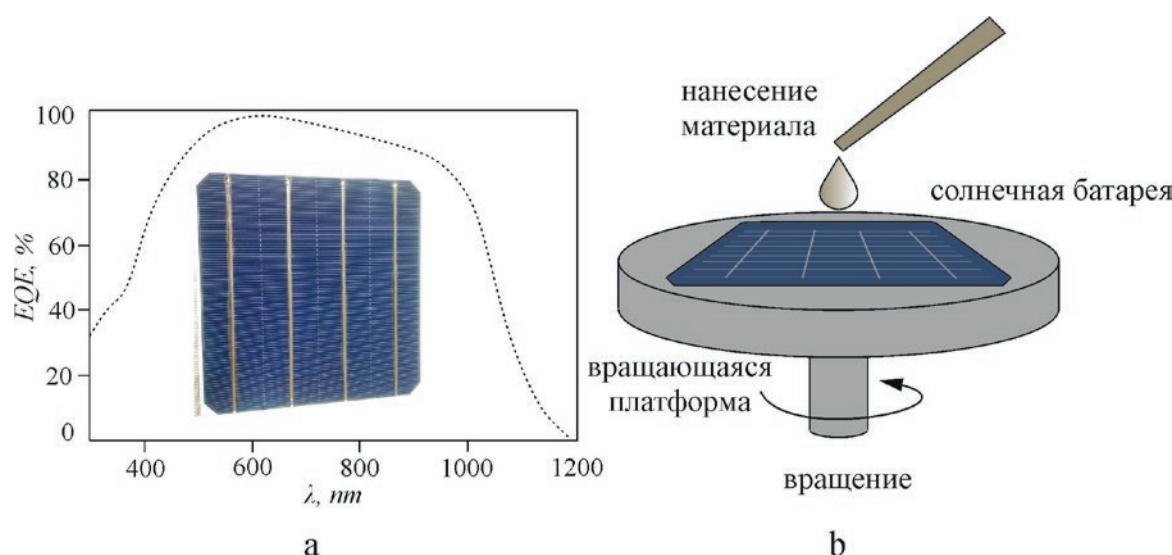


Рис. 2. Квантовая эффективность монокристаллического солнечного элемента (а) схема нанесения комплексов меди b-phen на солнечный элемент методом центрифугирования (б)

хлороформ (CHCl_3). Концентрация исходного вещества в растворе составила 1 мг/мл. Массу порошковых материалов контролировали взвешиванием на высокоточных аналитических весях HR-250AZ. В процессе нанесения материала скорость вращения центрифуги ПЭ-6900 доводили до 1500–3000 об/мин с шагом 500 об/мин [23]. Объем нанесенного вещества за цикл нанесения составлял 1 мл.

В данных исследованиях использованы монокристаллические кремниевые солнечные элементы, созданные по диффузионной технологии с КПД ~ 22 %. (вставка рис. 2а) [24]. На рис. 2а представлена квантовая эффективность кремниевого солнечного элемента. Стоит отметить спад эффективности преобразования элемента в УФ диапазоне, что обусловлено такими факторами, как рассеивание части энергии на фонах – переход в тепловую энергию, а также рекомбинация на поверхностных состояниях носителей заряда [24].

Важным фактором при проведении измерений параметров чистого солнечного элемента и элемента с люминесцентным покрытием, являлось строгое соблюдение идентичности условий проведения эксперимента. Исследование электрических параметров солнечных элементов осуществлялось с использованием анализатора полупроводников Keysight B1500A. Посредством анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) и последующих расчетов, были получены основные характеристики, в том числе КПД и коэффициент заполнения (Fill factor (FF)). Измерения проводились при температуре 20 °C. В качестве

источника освещения использовалась светодиодная матрица, спектр излучения которой находится в диапазоне 400–950 нм. Общая приходящая мощность составила ~ 22 Вт/м².

3. Результаты и обсуждение

Измерение ВАХ проводилось при двух вариациях падающего излучения, а именно в диапазоне от 400 до 950 нм и мощностью 22 Вт/м², а также при падающем излучении с максимумом длины волны 400 нм и мощности 6 Вт/м². Выбор отдельного узкого диапазона падающего излучения в области ультрафиолета обусловлен длиной волны возбуждения комплексов меди.

На рис. 3 представлены ВАХ как чистого СЭ, так и с поверхностным слоем комплекса меди. В ходе проведения эксперимента осуществлялось послойное нанесение тонкопленочного комплекса меди на поверхность солнечного элемента с проведением измерений ВАХ на каждом этапе.

Анализируя полученные результаты, отметим, что в диапазоне излучения 400–950 нм, КПД чистого монокристаллического солнечного элемента составило 21.74 %, тогда как с поверхностным слоем комплекса меди наблюдается прирост эффективности СЭ (рис. 3а). Максимальное увеличение КПД прослеживается при объеме нанесенного материала $V = 2$ мл, на поверхность СЭ, КПД составило 22.17 %.

При падающем излучении с максимумом 400 нм увеличение эффективности солнечного элемента с поверхностным переизлучающим слоем наблюдается более выражено (рис. 3б). Эф-

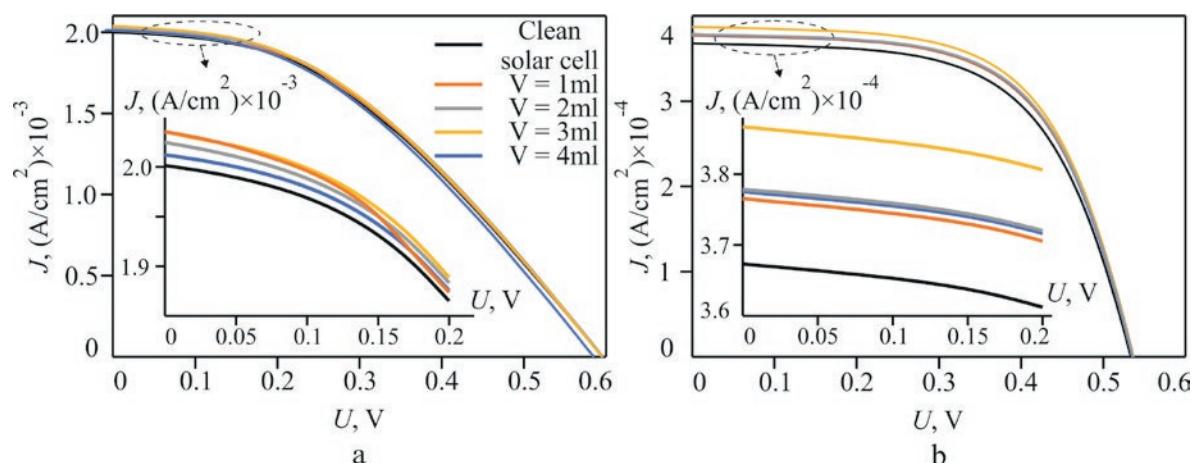


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики в диапазоне 400–950 нм (а) и при $\lambda = 400$ нм (б)

фективность чистого элемента в таком случае составила 19.76 %. В свою очередь, при объеме нанесенного материала $V = 3$ мл, КПД составило 21.21 %.

Эффективность фотоэлектрического преобразования определяется как отношение максимальной выходной электрической мощности к полной мощности падающего излучения, при этом учитывается коэффициент заполнения солнечного элемента:

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{OC} I_{SC}}, \quad (1)$$

где FF – коэффициент заполнения солнечной батареи; P_{\max} – мощность солнечной батареи; U_{OC} – напряжение холостого хода солнечной батареи; I_{SC} – ток короткого замыкания солнечной батареи.

КПД солнечного элемента в свою очередь определяется как:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{ES}, \quad (2)$$

где E – интенсивность излучения, падающего на солнечный элемент; S – площадь поверхности солнечного элемента.

Результаты измерения, а также расчетные значения параметров солнечного элемента с нанесенным переизлучающим покрытием и без него представлены в табл. 1 и 2 для диапазона 400–950 нм и узкого диапазона с максимумом 400 нм соответственно.

4. Заключение

Таким образом нанесение тонкой пленки комплекса меди $C_{62}H_{50}Cu_2I_2N_8P_2$ на поверхность монокристаллического солнечного элемента позволило увеличить эффективность солнечной батареи за счет преобразования энергии из области ультрафиолетового диапазона в область

Таблица 1. Параметры солнечного элемента при падающей длине волны 400–950 нм

Параметр	Монокристаллическая солнечная батарея	1 слой материала	2 слой материала	3 слой материала	4 слой материала
P_{\max} , мВт	114.79	115.92	117.06	116.97	116.52
U_{\max} , мВ	325	325	325	325	325
I_{\max} , мА	353.22	356.69	360.18	359.92	358.53
U_{OC} , мВ	595.25	595.22	595.80	595.37	595.14
I_{SC} , мА	480.33	488.50	485.94	488.55	482.95
FF	0.401	0.398	0.404	0.402	0.405
η , %	21.74	21.95	22.17	22.15	22.06
E , мВт/см ²	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
S , см ²	240	240	240	240	240

Таблица 2. Параметры солнечного элемента при падающей длине волны 400 нм

Параметр	Монокристаллическая солнечная батарея	1 слой материала	2 слой материала	3 слой материала	4 слой материала
P_{\max} , мВт	28.47	29.66	29.90	30.56	29.80
U_{\max} , мВ	400	400	400	400	400
I_{\max} , мА	71.17	74.17	74.77	76.41	74.51
U_{OC} , мВ	534.42	537.03	537.35	537.81	536.67
I_{SC} , мА	88.15	90.36	90.69	92.80	90.60
FF	0.604	0.611	0.613	0.612	0.612
η , %	19.77	20.6	20.76	21.22	20.69
E , мВт/см ²	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
S , см ²	240	240	240	240	240

Где: η – эффективность солнечной батареи; P_{\max} – мощность солнечной батареи

видимого диапазона. В частности, наблюдается возрастание тока короткого замыкания СЭ и, как следствие, прирост КПД.

Послойное нанесение исследуемого материала на поверхность СЭ позволило определить оптимальное соотношение количества нанесенного материала, при максимальном увеличении КПД. В результате, при падающем излучении 400–950 нм и объеме нанесенного материала в растворе – 2 мл мы наблюдаем прирост эффективности на 0.43 %, увеличение с 21.74 до 22.17 %. В свою очередь при падающем излучении в области ультрафиолета с максимумом 400 нм и объеме нанесенного материала в растворе – 3 мл, прирост КПД составляет 1.45 %, увеличение с 19.76 до 21.21 %. Стоит отметить, что дальнейшее возрастание толщины поверхностного слоя комплекса меди приводит к паразитному поглощению данного материала в видимом диапазоне, которое ощутимо снижает КПД.

Традиционные модели неорганических солнечных элементов, основанные на работах Шокли, широко используются для понимания реакции органических солнечных элементов с объемным гетеропереходом. Хотя эти модели могут быть полезны, есть ключевые моменты, которые отличаются от традиционного поведения солнечных элементов. Конкуренция двух физических процессов, описанных выше, приводит к необходимости строгого контроля нанесения люминесцентного материала на поверхность СЭ при соблюдении максимальной эффективности последнего. Наличие пика люминесценции комплексов меди при длинах волн 530–550 нм открывает явные перспективы для применение

исследуемого материала для GaAs фотоэлементов, у которых максимум преобразования приходится на данный участок. В том числе, результаты, приведенные в данной работе, представляют существенный интерес в космической отрасли, где доля высокоэнергетического спектра значительно выше.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Hoppe H., Saricifti N. S. Organic solar cells: an overview. *Journal of Materials Research*. 2004;19(7): 1924–1945. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.0252>
2. Roy S. S., Patra S. K. Synthesis and characterization of diferrocenyl conjugates: varying π -conjugated bridging ligands and its consequence on electrochemical communication. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2019;(16): 2193–2201. <https://doi.org/10.1002/ejic.201900114>
3. Servaites J. D., Ratner M. A., Marks T. J. Organic solar cells: a new look at traditional models. *Energy & Environmental Science*. 2011;4(11): 4410–4422. <https://doi.org/10.1039/c1ee01663f>
4. Yella A., Lee H.-W., Tsao H. N., Yi C., ... Gratzel M. Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)-based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency. *Science*. 2011;334(6056): 629–634. <https://doi.org/10.1126/science.1209688>

5. Kelzenberg M. D., Boettcher S. W., Petykiewicz J. A., ... Atwater H. A. Enhanced absorption and carrier collection in Si wire arrays for photovoltaic applications. *Nature Materials*. 2010;9(3): 239–244. <https://doi.org/10.1038/nmat2635>
6. Huang K.-Y., Luo Y.-H., Cheng H.-M., Tang J., Huang J.-H. Performance enhancement of CdS/CdSe quantum dot-sensitized solar cells with (001)-oriented anatase TiO_2 nanosheets photoanode. *Nanoscale Research Letters*. 2019;14(1): 18. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2842-5>
7. Peng K.-Q., Lee S.-T. Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion. *Advanced Materials*. 2011;23(2): 198–215. <https://doi.org/10.1002/adma.201002410>
8. Hochbaum A. I., Yang P. Semiconductor nanowires for energy conversion. *Chemical Reviews*. 2010;110(1): 527–546. <https://doi.org/10.1021/cr900075v>
9. Wengeler L., Schmitt M., Peters K., Scharfer P., Schabel W. Comparison of large scale coating techniques for organic and hybrid films in polymer based solar cells. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2013;68: 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.03.004>
10. Currie M. J., Mapel J. K., Heidel T. D., Goffri S., Baldo M. A. High-efficiency organic solar concentrators for photovoltaics. *Science*. 2008;321(5886): 226–228. <https://doi.org/10.1126/science.1158342>
11. Weber W. H., Lambe J. Luminescent greenhouse collector for solar radiation. *Applied Optics*. 1976;15(10): 2299–2300. <https://doi.org/10.1364/ao.15.002299>
12. Barnham K., Marques J. L., Hassard J., O'Brien P. Quantum-dot concentrator and thermodynamic model for the global redshift. *Applied Physics Letters*. 2000;76(9): 1197–1199. <https://doi.org/10.1063/1.125981>
13. Batchelder J. S., Zewail A. H., Cole T. Luminescent solar concentrators 2: experimental and theoretical analysis of their possible efficiencies. *Applied Optics*. 1981;20(21): 3733–3754. <https://doi.org/10.1364/ao.20.003733>
14. Smestad G., Ries H., Winston R., Yablonovitch E. The thermodynamic limits of light concentrators. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1990;21(2–3): 99–111. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(90\)90047-5](https://doi.org/10.1016/0165-1633(90)90047-5)
15. Huang X., Han S., Huang W., Liu X. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. *Chemical Society Reviews*. 2013;42(1): 173–201. <https://doi.org/10.1039/c2cs35288e>
16. Strümpel C., McCann M., Beaucarne G., ... Tobias I. Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency – an overview of available materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91(4): 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.09.003>
17. Richards B. S. Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Down-conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006;90(9): 1189–1207. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.07.001>
18. Shalav A., Richards B. S., Green M. A. Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: up-conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91(9): 829–842. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.02.007>
19. Eliseeva S. V., Bünzli J.-C. G. Lanthanide luminescence for functional materials and bio-sciences. *Chemical Society Reviews*. 2010;39(1): 189–227. <https://doi.org/10.1039/b905604c>
20. Huang C.-S., Jakubowski K., Ulrich S., ... Boesel L. F. Nano-domains assisted energy transfer in amphiphilic polymer conetworks for wearable luminescent solar concentrators. *Nano Energy*. 2020;76: 105039. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105039>
21. Van der Ende B. M., Aarts L., Meijerink A. Lanthanide ions as spectral converters for solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2009;11(47): 11081. <https://doi.org/10.1039/b913877c>
22. Gusev A., Kiskin M., Braga E., ... Linert W. Structure and emission properties of dinuclear copper(I) complexes with pyridyltriazole. *RSC Advances*. 2023;13(6): 3899–3909. <https://doi.org/10.1039/d2ra06986e>
23. Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S., Mazinov A. S. Study of the electrochemical and electrical properties of Zn(II) pyrazolone-based azomethine complexes and their temperature dependences. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022;13(5): 1216–1222. <https://doi.org/10.1134/S2075113322050434>
24. Эйдельман Б. Л., Эйдельман К. Б., Гудков Д. В., Полисан А. А. Полупроводниковый фотоэлектрический преобразователь. Патент РФ: № 2750366. Опубл. 28.06.2021, бюл. № 19. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2750366C1_20210628.pdf

Информация об авторах

Тютюник Андрей Сергеевич, к. ф.-м. н., м. н. с. кафедры радиофизики и электроники, Физико-технический институт, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского (Симферополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9017-9996>
tyutyunikas@mail.ru

Гурченко Владимир Сергеевич, м. н. с. кафедры радиофизики и электроники, Физико-технический институт, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского (Симферополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-8270-3820>
gurchenko_v@mail.ru

Мазинов Алим Сейт-Аметович, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой радиофизики и электроники, Физико-технический институт, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского (Симферополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8015-8841>
mazinovas@cfuv.ru

Поступила в редакцию 10.07.2024; одобрена после рецензирования 04.09.2024; принята к публикации 16.09.2024; опубликована онлайн 25.06.2025.