

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Suresh, P. Role of (La,Gd) co-doping on the enhanced dielectric and magnetic properties of BiFeO<sub>3</sub> ceramics / P. Suresh, P.D. Babu, S. Srinath // *Ceram. Intern.* – 2016. – V. 42, № 3. – p. 4176–4184.
2. Khomchenko, V.A. Substitution-driven structural and magnetic phase transitions in Bi<sub>0.86</sub>(La,Sm)<sub>0.14</sub>FeO<sub>3</sub> system / V.A. Khomchenko, L.C.J. Pereira, J.A. Paixão // *J. Phys. D Appl. Phys.* – 2011. – V. 44. – P. 185406-1–185406-5.
3. Zhang, X. Multiferroic and magnetoelectric properties of single-phase Bi<sub>0.85</sub>La<sub>0.1</sub>Ho<sub>0.05</sub>FeO<sub>3</sub> ceramics / X. Zhang [et al.] // *J. All. Comp.* – 2011. – V. 509. – P. 5908–5912.
4. Qian, F.Z. Multiferroic properties of Bi<sub>0.8</sub>Dy<sub>0.2-x</sub>La<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> nanoparticles / F.Z. Qian [et al.] // *J. Phys. D Appl. Phys.* – 2010. – V. 43. – P. 025403-1–025403-7.
5. Magnetoelectricity at room temperature in the Bi<sub>0.9-x</sub>Tb<sub>x</sub>La<sub>0.1</sub>FeO<sub>3</sub> system / V.R. Palkar [et al.] // *Phys. Rev.* – 2004. – V. B 69. – P. 212102-1–212102-3.
6. Enhanced multiferroic properties in La and Ce co-doped BiFeO<sub>3</sub> nanoparticles / P. Priyadharsini [et al.] // *J. Phys. Chem. Sol.* – 2014. – V. B 75(7). – P. 797–802.
7. Varshney, M. Structural, magnetic and magnetoelectric properties of single phase La<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> co-doped Bi<sub>0.85-x</sub>La<sub>0.15</sub>Er<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> (0 ≤ x ≤ 0.1) ceramics / M. Varshney, K.L. Yadav and A.K. Mall // *Mater. Res. Exp.* – 2016. – V. 3(117). – P. 115703-1–115703-13.
8. Evolution of structure and magnetic properties in Eu<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>FeO<sub>3</sub> multiferroics obtained under high pressure / I.I. Makoed [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – V. 489. – P. 165379-1–165379-10.
9. Effect of Co-Doping on Magnetic Properties of Bismuth Ferrite / I.I. Makoed [et al.] // *Acta Phys. Polonica.* – 2020. – V. 137, No. 5. – P. 985–988.
10. Shannon, R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R.D. Shannon // *Acta Cryst.* – 1976. – V. A32. – P. 751–767.
11. Kuzmenko, A.B. (2005). Kramers–Kronig constrained variational analysis of optical spectra / A.B. Kuzmenko // *Rev. Sci. Instrum.* – 2005. – V. 76, № 8. – P. 083108-1–083108-9.
12. Krupicka, S. Fyzika ferritu pribuznych magnetikuch kyslicniku / S. Krupicka. – Academia. : Praha, 1969. – 594 c.
13. Danilkevich, M.I. Dielectric Properties of Spinel, Garnet and Perovskite Oxides / M.I. Danilkevitch and I.I. Makoed // *Phys. Stat. Sol.* – 2000. – V. 222, № 2. – P. 541–551.
14. Electronic polarizability and optical basicity of lanthanide oxides / X. Zhao [et al.] // *Phys. Cond. Matt.* – 2007. – V. 392(1). – P. 132–136.
15. Tauc, J. Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium / J. Tauc, R. Grigorovici, A. Vancu // *Phys. Stat. Sol. (b).* – 1966. – V. 15. – P. 627–637.
16. Duffy, J.A. Chemical bonding in the oxides of the elements: A new appraisal / J.A. Duffy // *J. Sol. Stat. Chem.* – 1986. – V. 62. – P. 145–157.
17. T.S. Optical Properties of Semiconductors / T.S. Moss. – Butterworth Sci. Pub. London 1959. – 279 p.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЗА СЧЕТ КОМБИНАЦИИ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

**К. М. Москальков, Ю. В. Тимошков, В. И. Курмашев**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П.Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: Rabbit\_by@list.ru*

Рассматривается возможность увеличения суммарного коэффициента преобразования солнечных элементов за счет использования одного потока солнечного излучения на преобразователях двух разных типов: фотоэлектрическом и пьезоэлектрическом. Для реализации предполагается использовать оптический концентратор с

последующим расщеплением солнечного потока на необходимые каждому преобразователю диапазоны длин волн.

**Ключевые слова:** солнечный элемент; спектральное расщепление; линза Френеля; пьезо-фотоэлемент.

## IMPROVED EFFICIENCY OF SOLAR CELL DUE TO COMBINATION OF SEVERAL TYPES OF ENERGY CONVERSION

K. M. Moskalkov, U. V. Timoshkov, V. I. Kurmashev

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*

*6 P. Brovki Street, 220013 Minsk, Belarus*

*Corresponding author: K. M. Moskalkov (Rabbit\_by@list.ru)*

The possibility of increasing the total conversion coefficient of solar cells due to the use of one stream of solar radiation on converters of two different types is considered: photovoltaic and piezoelectric. For implementation, it is planned to use an optical concentrator with subsequent splitting of the solar flow into the wavelength ranges required for each converter.

**Key words:** solar cell; spectral splitting; Fresnel lens; piezoelectric cell.

### ВВЕДЕНИЕ

При использовании фотоэлектрических установок их главным недостатком является невысокая эффективность преобразования потока солнечной радиации в электрическую энергию (КПД промышленных фотоэлементов составляет 15–20 %). Поскольку эффективность пьезоэлектрических материалов часто может достигать 90 %, для повышения КПД системы целесообразно использовать комбинированную солнечную установку, фотоэлектрический и пьезоэлектрический модули.

Когда солнечный свет достигает Земли в виде электромагнитного излучения, длина его оптического пути через земную атмосферу определяется как коэффициент воздушной массы (АМ) относительно длины вертикального пути. Солнечный спектр АМ1.5, который в основном ограничен  $0,3 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2,5 \text{ мкм}$ , повсеместно используется для характеристики солнечного спектра. Солнечное излучение от АМ1.5 обычно можно преобразовать в полезные формы электрической и тепловой энергии, используя широкий спектр технологий солнечной энергии, таких как фотоэлектрические [1], солнечная термохимическая реакция и концентрированная солнечная энергия [2]. В последние годы альтернативно предлагались технологии разделения солнечного спектра для сбора солнечной энергии в широком спектре [3]. Используя дихроичные фильтры с разделением спектра, часть инфракрасного излучения отделяется от широкого солнечного спектра, и солнечный свет в единственном видимом диапазоне затем направляется в солнечные элементы для преобразования фотоэлектрических элементов. Из солнечных элементов можно не только удалить чрезмерный нагрев, чтобы улучшить их фотоэлектрические характеристики, но также и отфильтрованный солнечный спектр в инфракрасном диапазоне одновременно используется для других солнечных тепловых приложений, таких как нагрев воды и термоэлектричество.

## КОМБИНИРОВАННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Комбинированный солнечный элемент представляет собой совокупность двух преобразователей солнечной энергии – фотоэлемента и фото-пьезоэлемента.

Принцип работы заключается в концентрации и разложении поступающего на оптический усилитель солнечного света на 2 диапазона длин волн:  $0,4 \text{ мкм} \leq \lambda < 1,2 \text{ мкм}$  (для фотоэлемента) и  $1,2 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2,5 \text{ мкм}$  (для пьезоэлемента). Выбор предельной длины волны в  $1,2 \text{ мкм}$  обосновывается шириной запрещенной зоны ( $1,12 \text{ эВ}$ ) у кристаллического кремния (с-Si), являющегося самым распространенным материалом для фотоэлементов.

На рис. 1 показан оптический усилитель, представляющий собой комбинацию из линзы Френеля и находящейся под ней дисперсионной оптической системы, состоящей из дифракционной решетки и составной призмы: призма Литтроу с низкой дисперсией и еще одна треугольная призма с высокой дисперсией, аналогичная концепции призмы Амичи [4].

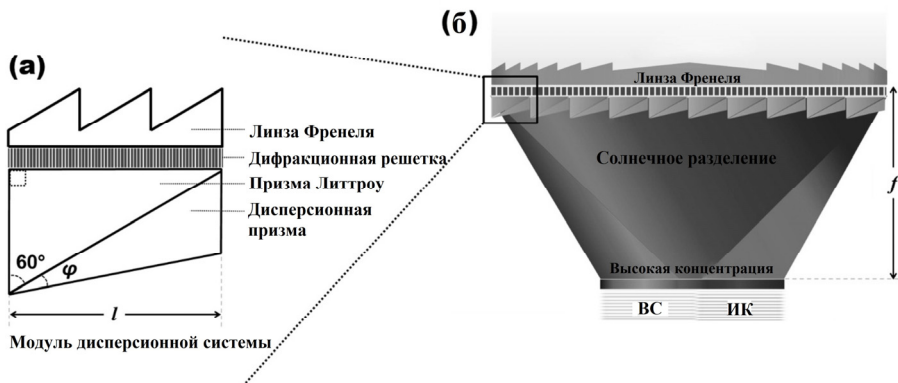


Рисунок 1. – Схема дисперсионной оптической системы (а) Модуль дисперсионной системы. Принцип работы системы (б)

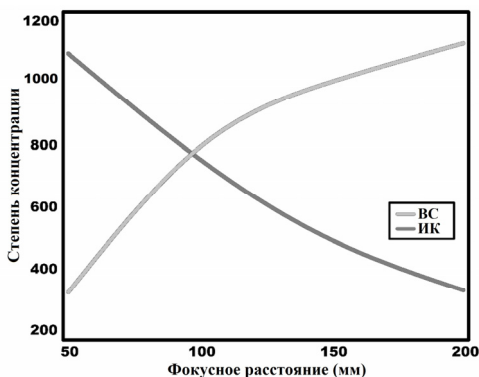


Рисунок 2. – Влияние фокусного расстояния ( $f$ ) на характеристики солнечной концентрации для диапазонов длин волн ВС и ИК. Коэффициенты концентрации для каждого диапазона длин волн имеют обратную зависимость

Входящий солнечный свет фокусируется внешним концентратором, разделяется на две полосы длин волн видимого (ВС) и инфракрасного (ИК) света через массив модуля дисперсионной системы, прежде чем достигнет соответствующих солнечных приемников, таких как солнечные элементы и тепловые поглотители, расположенные на той же фокальной плоскости. Фокусное расстояние внешней линзы Френеля, как характеристика оптического расстояния, на котором сходятся световые лучи, имеет ключевое влияние на оптические характеристики, достигаемые дисперсионной оптической системой. На рис. 2 показаны концентрации для видимого и инфракрасного диапазона длин волн.

Единственный диапазон видимого солнечного света может быть сфокусирован на солнечных элементах с коэффициентом концентрации  $798\times$ , чтобы улучшить его фотоэлектрическое преобразование. В то же время разделенное инфракрасное излучение может также использоваться для нагревания приемной пластины пьезоэлемента с коэффициентом концентрации до  $755\times$ . Такие высокие концентрационные характеристики для обоих диапазонов длин волн могут быть достигнуты за счет использования дополнительных оптических компонентов - дифракционной решетки и дисперсионных призм, которые позволяют свести к минимуму оптические aberrации за счет дифракции и преломления и приводят к высококонцентрированному разделению солнечного света. Безусловно, в системе есть потери на каждом уровне: плотность прилегания дифракционной решетки и угла призмы, потери на отражение, дисперсии из-за материалов совмещенных призм, однако оптическая система способна обеспечить высокую концентрацию солнечного излучения для минимизации занимаемой площади солнечных приемников как для видимого, так и для инфракрасного диапазонов длин волн, но и уменьшить тепловую деградацию солнечных элементов за счет подавления ИК-излучения, при коммерческом использовании за счет высокой степени концентрации солнечного излучения.

Не используемая на фотоэлементе часть солнечного излучения ( $1,2\text{ мкм} \leq \lambda \leq 2,5\text{ мкм}$ ) используется для нагревания приемных пластин пьезоэлементов. ИК-излучение используется для нагрева теплоприемников биметаллических пьезоэлементов [5]. Это могут быть как кантилеверы [6] рис. 3, так и комбайны с пьезоэлектрической частью в виде меандра рис. 4.

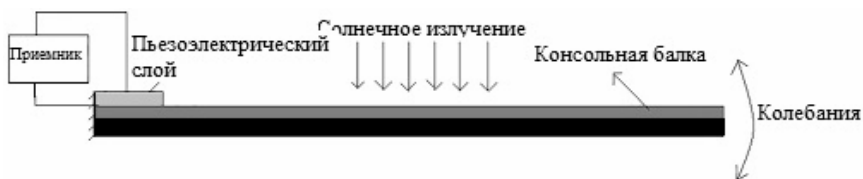


Рисунок 3. – Микрокантилеверный фотоэлемент

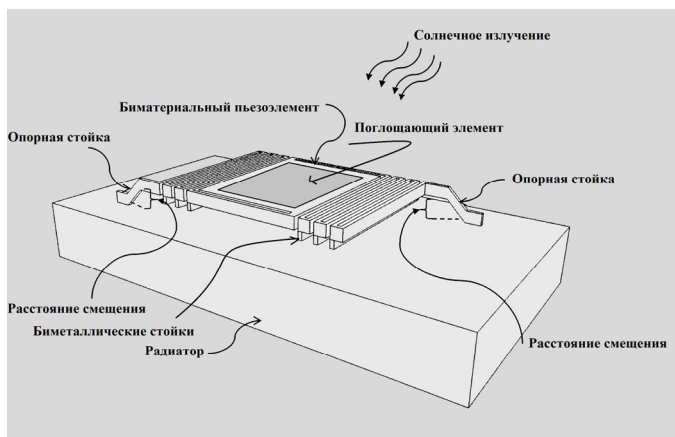


Рисунок 4. – Солнечный элемент с биматериальной микроэлектромеханической системой

Способ выработки электроэнергии с помощью устройства генератора солнечной энергии с биматериальной микроэлектромеханической системой (MEMS) [7, 8] заключается в:

- получении ИК-излучения на биматериальной пьезоэлектрической структуре;
- преобразовании части указанной солнечной энергии в тепловую энергию биматериальной пьезоэлектрической структурой;
- преобразование части тепловой энергии в механическую энергию за счет биморфного эффекта биматериальной пьезоэлектрической структурой;
- преобразовании механической энергии в электрическую энергию посредством пьезоэлектрического эффекта биматериальной пьезоэлектрической структурой;
- передача части указанной тепловой энергии от пьезоэлектрического материала к структуре теплоотвода в положении максимального смещения, так что пьезоэлектрический материал и указанные покрытия не деформируются.

Физический способ работы биматериальной микромеханической системы заключается в использовании материалов с разными коэффициентами теплового расширения. Пьезоэлектрический материал представляет собой такой материал, как нитрид алюминия (AlN) [9] или карбонат кремния (SiC), а в качестве второго материала в биматериальной системе может выступать любой материал с отличным от пьезоматериала коэффициентом теплового расширения.

Исследованный размер биматериальной микромеханической системы составляет  $200\text{ мкм} \times 200\text{ мкм}$ , что позволяет ей демонстрировать разность потенциалов в 80 мВ. За счет миниатюрных размеров и большого количества свободной площади под линзой Френеля в комбинированном солнечном элементе, биматериальные микроэлектромеханические системы могут собираться в большие массивы, а также характер их соединения (последовательно или параллельно) можно настроить для поддержки энергетических потребностей конкретной нагрузки.

## ВЫВОДЫ

Комбинированный солнечный элемент представляет собой дисперсионную оптическую систему, которая обеспечивает высококонцентрированное спектральное расщепление для эффективного сбора солнечной энергии по всему спектру AM1.5. Разделив солнечный свет на две полосы длин волн, видимую и инфракрасную, концепция комбинированного солнечного элемента может помочь расширить использование всего спектра солнечного света для фотоэлектрического преобразования солнечных элементов, в то же время, собирая энергию из остальной части спектра солнечного света для ее преобразования с помощью микромеханических систем. Достаточно низкие потери на отражение, вызванные оптическими компонентами в дисперсионной оптической системе, оцениваются только с дополнительными потерями около 2,7 по сравнению с обычными солнечными применениями с одной концентрирующей линзой.

После успешной реализации комбинированный солнечный элемент может собирать солнечную энергию при высоких концентрациях по всему спектру AM1.5 с солнечными элементами c-Si, преобразующими  $0,4\text{ мкм} \leq \lambda < 1,2\text{ мкм}$  света в электричество, в то время как остальная часть солнечного излучения ( $1,2\text{ мкм} \leq \lambda \leq 2,5\text{ мкм}$ ) будет преобразована в электричество с помощью биматериальных электромеханических систем. Комбинированный солнечный элемент может быть экономически жизнеспособным.

неспособном, эффективным и практичным как для промышленного, так и для домашнего использования.

Коллектив авторов имеет опыт и показал возможность использования MEMS технологий в оптических системах, а проведенное предварительное моделирование в среде ANSYS, с использованием пакета программ Zemax OpticStudio, показало, что реальное увеличение КПД составит от 5 до 15 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Baran, D.; Ashraf, R.S.; Hanifi, D.A.; Abdelsamie, M.; Gasparini, N.; Röhr, J.A.; Holliday, S.; Wadsworth, A.; Lockett, S.; Neophytou, M.; et al. Reducing the efficiency–stability–cost gap of organic photovoltaics with highly efficient and stable small molecule acceptor ternary solar cells. *Nat. Mater.* 2016, 16, 363.
2. Narasimhan, V.; Jiang, D.; Park, S.-Y. Design and optical analyses of an arrayed microfluidic tunable prism panel for enhancing solar energy collection. *Appl. Energy* 2016, 162, 450–459.
3. Zamfirescu, C.; Dincer, I. Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production. *Sol. Energy* 2014, 107, 700–713.
4. Duarte, F. Tunable laser optics: Applications to optics and quantum optics. *Prog. Quantum Electron.* 2013, 37, 326–347.
5. Liu H.C., Zhong J.W., Lee C., Lee S.W., Lin L.W. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Appl. Phys. Rev.* 2018;5:041306. doi: 10.1063/1.5074184.
6. Du Y., Xu J., Paul B., Eklund P. Flexible thermoelectric materials and devices. *Appl. Mater. Today*. 2018;12:366–388. doi: 10.1016/j.apmt.2018.07.004.
7. Tian W.C., Ling Z.Y., Yu W.B., Shi J. A Review of MEMS Scale Piezoelectric Energy Harvester. *Appl. Sci.* 2018;8:645. doi: 10.3390/app8040645.
8. Todaro M.T., Guido F., Mastronardi V., Desmaele D., Epifani G., Algieri L., De Vittorio M. Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectron. Eng.* 2017;183:23–36. doi: 10.1016/j.mee.2017.10.005.
9. Fei C., Liu X., Zhu B., Li D., Yang X., Yang Y., Zhou Q. AlN piezoelectric thin films for energy harvesting and acoustic devices. *Nano Energy*. 2018;51:146–161. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.06.062.

#### ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО *n-p-n*-ТРАНЗИСТОРА

**В. Б. Оджаев<sup>1</sup>, А. Н. Петлицкий<sup>2</sup>, В. А. Пилипенко<sup>2</sup>, В. С. Просолович<sup>1</sup>,  
В. А. Филипеня<sup>2</sup>, Д. В. Шестовский<sup>2</sup>, В. Ю. Явид<sup>1</sup>, Ю. Н. Янковский<sup>1</sup>**

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: prosolovich@bsu.by*

<sup>2)</sup> *Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., д.121А, 220108, Минск, Беларусь, e-mail: petan@tut.by*

Исследованы температурные зависимости статического коэффициента усиления по току ( $\beta$ ) биполярных *n-p-n*-транзисторов, сформированных по аналогичным технологическим маршрутам (серии *A* и *B*), в интервале температур 20–125 °С. Содержание технологических примесей в приборах серии *A* было ниже предела обнаружения методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения (по  $\text{Fe} < 4.0 \cdot 10^9$  ат/см<sup>2</sup>). В приборах серии *B* вся поверхность пластин была покрыта сло-