



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-1-52-56

УДК 621.383.51

EDN: ННРНБ5

Научная статья / Research article

## Сверхтонкие высокоэффективные солнечные элементы на гетероструктурах $A^{III}B^V/Ge$ для космического применения

А.И. Никифоров<sup>✉</sup>, Н.А. Паханов<sup>✉</sup>, О.П. Пчеляков<sup>✉</sup>, А.В. Латышев<sup>✉</sup>

Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия

✉ nikif@isp.nsc.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 12 июня 2023 г.

Доработана: 15 сентября 2023 г.

Принята к публикации: 12 октября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Проведен анализ перспектив создания сверхтонких, легких и высокоэффективных солнечных элементов на гетероструктурах  $A^{III}B^V/Ge$ . Обсуждаются технологические проблемы и перспективы различных вариантов. В качестве наиболее перспективного метода предлагается использовать химическое утонение гетероструктур  $A^{III}B^V/Ge$  с применением временного технологического носителя. Выращенный на германиевой подложке солнечный элемент с контактной сеткой, просветляющим покрытием и защитным от радиации стеклом, но без тыльного металлического контакта, приклеивается лицевой стороной на технологический носитель. Далее Ge-подложка травится до нужной толщины и создается тыльный контакт, а носитель удаляется нагреванием. Данная методика позволяет утонять Ge-подложку до нескольких десятков микрон и существенно увеличить процент выхода годных приборов практически без риска разрушить гетероструктуру. Измерение вольтамперных характеристик утоненного солнечного элемента показали, что для наземного спектра значения параметров утоненного образца совпадают с исходными значениями. Напряжения холостого хода составляет 2,67 В, плотность тока 14 мА/см<sup>2</sup>. Это открывает возможность создания высокоэффективных тонких и легких солнечных элементов для космических батарей на основе массово производимых в настоящее время гетероструктур —  $A^{III}B^V/Ge$ .

**Ключевые слова:** солнечные преобразователи, гетероструктуры,  $A_3B_5$ , Ge, утонение

### Для цитирования

Никифоров А.И., Паханов Н.А., Пчеляков О.П., Латышев А.В. Сверхтонкие высокоэффективные солнечные элементы на гетероструктурах  $A^{III}B^V/Ge$  для космического применения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 1. С. 52–56. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-1-52-56>

© Никифоров А.И., Паханов Н.А., Пчеляков О.П., Латышев А.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Ultrathin High-Efficiency Solar Cells Based on A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/Ge Heterostructures for Space Applications

Alexandr I. Nikiforov<sup>✉</sup>, Nikolai A. Pakhanov<sup>✉</sup>, Oleg P. Pchelyakov<sup>✉</sup>, Alexandr V. Latyshev<sup>✉</sup>

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

✉ nikif@isp.nsc.ru

### Article history

Received: June 12, 2023

Revised: September 15, 2023

Accepted: October 12, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The analysis of the prospects for the creation of ultrathin, lightweight and highly efficient solar cells based on A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/Ge heterostructures. Technological problems and prospects of various options are discussed. As the most promising method, it is proposed to use chemical thinning of A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/Ge heterostructures using a temporary technological carrier. A solar cell grown on a germanium substrate with a contact grid, an antireflection coating and radiation-proof glass, but without a back metal contact, is glued face-on to a technological carrier. Next, the Ge substrate is etched to the desired thickness and a back contact is created, and the carrier is removed by heating. This technique makes it possible to thin the Ge substrate to several tens of microns and significantly increase the percentage of yield of suitable devices almost without the risk of destroying the heterostructure. Measurement of the current-voltage characteristics of a thinned solar cell showed that for the terrestrial spectrum, the values of the parameters of the thinned sample coincide with the initial values. The idling voltage is 2.67 V, the current density is 14 mA/cm<sup>2</sup>. This opens up the possibility of creating highly efficient thin and light solar cells for space batteries based on currently mass-produced heterostructures — A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/Ge.

**Keywords:** solar converters, heterostructures, A3B5, Ge, thinning

### For citation

Nikiforov AI, Pakhanov NA, Pchelyakov OP, Latyshev AV. Ultrathin high-efficiency solar cells based on A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/Ge heterostructures for space applications. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(1):52–56. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-1-52-56>

### Введение

В настоящее время имеется острая потребность улучшения энергомассовых характеристик солнечных батарей для космических аппаратов. Особенно важное значение эти характеристики будут иметь при построении солнечного аэрокосмического многофункционального энерготехнологического комплекса с дистанционной передачей энергии по СВЧ и лазерным каналам. Такие комплексы предполагают применение большого числа солнечных батарей с высокой мощностью генерируемой энергии.

Для решения этой задачи необходимо увеличение КПД преобразования солнечной энергии в электрическую и снижение веса солнечных элементов (СЭ). Наиболее широко используемые солнечные батареи изготавливаются на основе соединений A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, которые обладают наибольшей эффективностью. Благодаря интен-

сивным исследованиям эффективность СЭ на A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> непрерывно увеличивается и растет примерно на 1 абсолютный процент в год [1]. В настоящее время для космических аппаратов (КА) используются СЭ на гетероструктурах — A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> на подложках германия с КПД около 30 %. Ожидается, что в ближайшие несколько лет эффективность солнечных батарей на соединениях A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> для космоса может приблизиться к 40 %. Для таких батарей необходимы высокоэффективные, легкие и желательны гибкие СЭ.

### 1. Инвертированный эпитаксиальный метаморфный рост солнечных элементов

Для достижения высоких КПД необходимы новые архитектуры и качественные полупроводниковые материалы, оптимизированные по фотоэлектрическим параметрам. С этой целью разрабатываются сверхтонкие многокаскадные вы-

сокоэффективные СЭ на гетероструктурах  $A^{III}B^V$ , например InGaP/GaAs/GaInAs, получаемые инвертированным эпитаксиальным метаморфным ростом. Далее гетероструктура отделяется от подложки за счет создания в процессе роста и последующего вытравливания в HF

жертвенного слоя, который находится между подложкой и активной областью гетероструктуры. После этого гетероструктура переносится на новый легкий носитель [2]. Схематично технология отделения и переноса представлена на рис. 1.

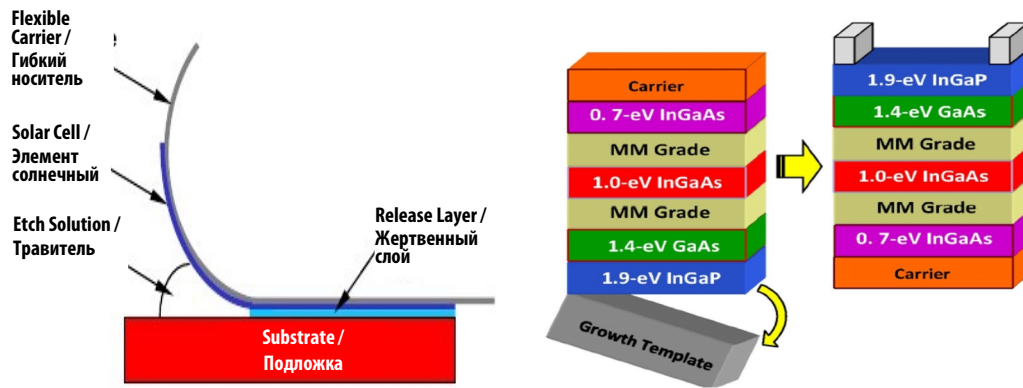


Рис. 1. Схема отделения и переноса гетероструктуры на легкий носитель для инвертированного эпитаксиального метаморфного роста [2]

Figure 1. Scheme of separation and transfer of heterostructure to a light carrier for inverted epitaxial metamorphic growth [2]

Несмотря на значительные и многолетние усилия ведущих мировых производителей производство СБ на гетероструктурах InGaP/GaAs/GaInAs довести до реальных коммерческих панелей до настоящего времени не удалось из-за сложности данной технологии. Это связано с недостатками данного метода, а именно с длительностью нахождения гетероструктуры в плавиковой кислоте (сутки и более) при вытравливании жертвенного слоя и отделении от подложки. К тому же при отделении от подложки такие сверхтонкие структуры (толщиной около 5 микрон) могут ломаться ввиду их крайней хрупкости, что снижает процент выхода годных. Положительной стороной данной технологии отделения является возможное повторное использование подложки. Недостатком является также наличие в данной архитектуре СЭ толстого укрепляющего металлического слоя (25–50 мкм), что значительно увеличивает вес элемента [2].

## 2. Утонения Ge-подложки на гетероструктурах $A^{III}B^V/Ge$

Уменьшение толщины таких СЭ до желаемых 20–50 мкм, а также дальнейшие послеростовые операции, ввиду их крайней хрупкости,

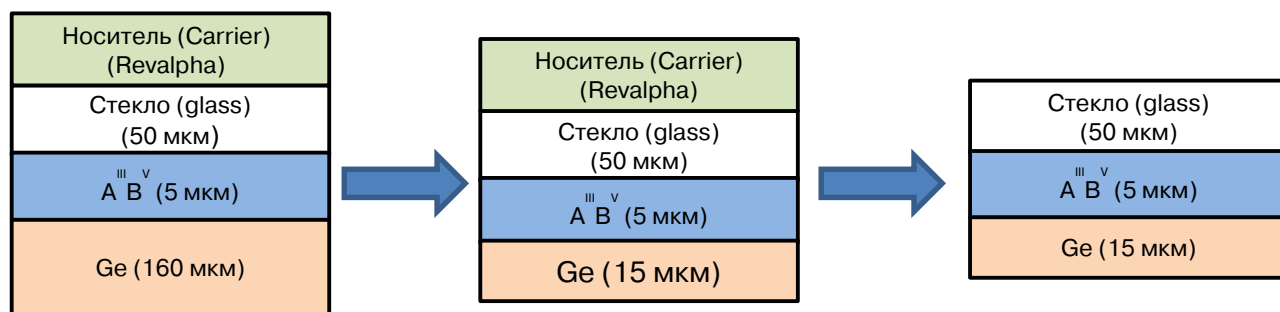
являются сложной технологической проблемой. Именно поэтому СЭ на Ge  $p-n$ -переходе имеют высокую удельную массу и поэтому их стараются заменить на СЭ, выращенные инвертированным эпитаксиальным метаморфным ростом с последующим отделением подложки. Такие тонкие и легкие СЭ толщиной до 20 мкм с удельной массой до 34 мг/см<sup>2</sup> на гетероструктуре InGaP/GaAs/Ge созданы фирмой AZUR Space Solar Power [3]. Утоненные СЭ прошли успешные летные испытания на немецком технологическом спутнике TET-1, запущенном в 2012 г. на российском носителе Союз. Наилучшую эффективность показали самые тонкие (20 мкм) СЭ. Однако технология создания таких СЭ является ноу-хау и не разглашается.

Другим, более технологичным, предложенным нами в [4] способом утонения Ge-подложки на гетероструктурах  $A^{III}B^V/Ge$  до толщин 20 мкм является химическое травление германия с применением временного химически стойкого технологического носителя (рис. 2). Как показано в [3], такой толщины вполне достаточно для полноценной работы Ge-каскада. Это позволяет уменьшить удельную массу СЭ на 70–80 % [3]. Наиболее удобным технологическим носителем является REVALPHA [5]. С одной стороны, он

имеет клеевой слой, который очень удобно наносится на СЭ, а также просто удаляется при нагревании до определенной заданной температуры: 90, 120, 150 или 170 °С.

Технология утонения германиевой подложки с использованием технологического носителя заключается в следующем: выращенный на германиевой подложке СЭ с контактной сеткой, просветляющим покрытием и защитным от радиации стеклом, но без тыльного металлического контакта, приклеивается лицевой стороной

(защитным стеклом) на технологический носитель. Таким образом получается достаточно прочная конструкция, опирающаяся на стекло (толщина 100 мкм) плюс REVALPHA (толщина 100–180 мкм), что позволяет проводить все дальнейшие операции практически без риска разрушить ГС. Далее Ge подложка травится до нужной толщины (при этом планарная сторона защищена технологическим носителем). Затем создается тыльный контакт и носитель легко и чисто удаляется нагреванием [6].



**Рис. 2.** Схема методики утонения подложки СЭ с использованием технологического носителя [4]  
**Figure 2.** Scheme of the technique for refining the substrate of a solar cell using a technological carrier [4]

Апробация данной методики проводилась на СЭ с защитным стеклом и коварными контактами. Начальная толщина германиевого слоя составляла 180 мкм, конечная 50 мкм. При этом удельная масса уменьшилась с 116 мг/см<sup>2</sup> до 63 мг/см<sup>2</sup>. Травление проводилось в растворе H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O [6] в течение 180 минут после шлифования многослойного тыльного контакта. Новый контакт создавался напылением сплошного слоя индия толщиной один микрон. Далее СЭ приклеивался проводящим эпоксидным клеем к металлизированному In углепластику. Верхний контакт изолирован.

Измерение вольтамперных характеристик утоненного солнечного элемента показало, что для наземного спектра (AM1.5D — 1000 Вт/м<sup>2</sup>) значения параметров утоненного образца совпадают со штатными значениями исходных СЭ InGaP/GaInAs/Ge. Они составляют: напряжение холостого хода  $V_{oc} = 2,66718$  В, плотность тока  $J_{oc} = 0,014$  А/см<sup>2</sup>. Несколько ниже ожидаемой оказалась эффективность  $E_{eff} = 28,7$  %, что, скорее всего, связано с возникновением дефектов при шлифовании металла тыльного контакта. Понятно, что в реальной технологической

цепочке нанесение тыльного контакта до травления исключается.

Большие перспективы представляет использование предлагаемых сверхтонких СЭ совместно с разработанными в России предприятиями НПП «Технология» и НПП «ТАИС» сверхлегкими углепластиковыми каркасами для солнечных батарей с удельной массой 0,5 кг/м<sup>2</sup>. В этом случае результирующая удельная масса солнечных батарей может быть уменьшена до рекордно низкой величины — 1 кг/см<sup>2</sup>. Особенно важно, что такой тип панелей может обеспечить гораздо более плотную упаковку СЭ, увеличить площадь и, следовательно, мощность при сохранении веса солнечных батарей.

## Заключение

Таким образом, технология химического утонения подложки открывает дополнительную возможность создания высокоэффективных тонких и легких СЭ на массово производимых в настоящее время гетероструктурах — A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/Ge, с высоким процентом выхода годных СЭ, а также удобного способа их переноса на постоянный

гибкий легкий носитель. При этом эффективность таких СЭ в перспективе не должна уступать исходному солнечному элементу на обычной подложке.

### Список литературы

1. Bett A.W., Philipps S.P., Essig S., Heckelmann S., Kellenbenz R., Klinger V., Bach M.G., Lackner D., Frank D. Overview about technology perspectives for high efficiency solar cells for space and terrestrial applications // 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition., Paris, France, 2013. <https://doi.org/10.4229/28thEUPVSEC2013-1AP.1.1>
2. Youtsey C., Adams J., Chan R., Elarde V., Hillier G., Osowski M., McCallum D., Miyamoto H., Pan N., Stender C., Tatavarti R., Tuminello F., Wibowo A. Epitaxial Lift-Off of Large-Area GaAs Thin-Film Multi-Junction Solar Cells // CS MANTECH Conference, April 23rd — 26th, 2012, Boston, Massachusetts, USA, 2012.
3. Strobl G.F.X., Ebel L., Fuhrmann D. et al. Development of lightweight space solar cells with 30% efficiency at end-of-life // IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Denver, CO, USA, 2014. P. 3595–3600. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924884>
4. Паханов Н.А., Пчеляков О.П., Владимиров В.М. Сверхтонкие солнечные элементы на гетероструктурах АШВ/Ge // Автометрия. 2017. Т. 53. № 6. С. 106–110. <https://doi.org/10.15372/AUT20170613>
5. Nitto Denko Corporation. Press Release. URL: <https://www.nitto.com/eu/en/press/2017/> (дата обращения: 15.04.2023).

### Сведения об авторах

**Никифоров Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6815-6777; ORCID: 0000-0003-0583-0508; E-mail: [nikif@isp.nsc.ru](mailto:nikif@isp.nsc.ru)

**Паханов Николай Андреевич**, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия; AuthorID: 164581; ORCID: 0000-0002-3999-5231; E-mail: [pakhanov@isp.nsc.ru](mailto:pakhanov@isp.nsc.ru)

**Пчеляков Олег Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия; ORCID: 0000-0003-0520-5905; E-mail: [pch@isp.nsc.ru](mailto:pch@isp.nsc.ru)

**Латышев Александр Васильевич**, доктор физико-математических наук, академик РАН, директор, Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия; AuthorID: 164581; ORCID: 0000-0002-4016-593X; E-mail: [latyshev@isp.nsc.ru](mailto:latyshev@isp.nsc.ru)

### About the authors

**Alexandr I. Nikiforov**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Head of Laboratory, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6815-6777; ORCID: 0000-0003-0583-0508; E-mail: [nikif@isp.nsc.ru](mailto:nikif@isp.nsc.ru)

**Nikolai A. Pakhanov**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Leading Engineer, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia; AuthorID: 164581; ORCID: 0000-0002-3999-5231; E-mail: [pakhanov@isp.nsc.ru](mailto:pakhanov@isp.nsc.ru)

**Oleg P. Pchelyakov**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Head of Department, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia; AuthorID: 274; ORCID: 0000-0003-0520-5905; E-mail: [pch@isp.nsc.ru](mailto:pch@isp.nsc.ru)

**Alexandr V. Latyshev**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, RAS Academician, Director, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia; AuthorID: 164581; ORCID: 0000-0002-4016-593X; E-mail: [latyshev@isp.nsc.ru](mailto:latyshev@isp.nsc.ru)

6. Kagawa S., Mikawa T., Kaneda T. Chemical Etching of Germanium with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Solution // Japanese Journal of Applied Physics. 1982. Vol. 21 (11R). <https://doi.org/10.1143/JJAP.21.1616>

### References

1. Bett A.W., Philipps S.P., Essig S. et al. Overview about technology perspectives for high efficiency solar cells for space and terrestrial applications. *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.*, Paris, France, 2013. <https://doi.org/10.4229/28thEUPVSEC2013-1AP.1.1>
2. Youtsey C., Adams J., Chan R. et al. Epitaxial Lift-Off of Large-Area GaAs Thin-Film Multi-Junction Solar Cell. // CS MANTECH Conference, April 23rd — 26th, 2012, Boston, Massachusetts, USA.
3. Strobl GFX, Ebel L, Fuhrmann D. et al. Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end-of-life. *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. Denver, CO, USA, 2014:3595–3600. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924884>
4. Pakhanov NA, Pchelyakov OP, Vladimirov VM. Superthin solar cells based on A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>/ Ge heterostructures. *Avtometriya*. 2017;6:106–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/AUT20170613>
5. Nitto Denko Corporation. Press Release. Available from: <https://www.nitto.com/eu/en/press/2017/> (accessed: 10.04.2023)
6. Kagawa S, Mikawa T, Kaneda T. Chemical Etching of Germanium with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Solution. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1982;21(11R):1616. <https://doi.org/10.1143/JJAP.21.1616>