

УДК 621.383.51

СВЕРХТОНКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $A^{III}B^V/Ge$

Н. А. Паханов¹, О. П. Пчеляков¹, В. М. Владимиров²

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²ООО «Научно-производственная фирма "Электрон"»,
660036, г. Красноярск, Академгородок, стр. 50
E-mail: pakhanov@isp.nsc.ru

Проведён сравнительный анализ перспектив создания супертонких, лёгких и высокоэффективных солнечных элементов на гетероструктурах $A^{III}B^V/InGaAs$ и $A^{III}B^V/Ge$. Обсуждаются технологические проблемы и перспективы каждого варианта. Предложен метод утонения гетероструктур $A^{III}B^V/Ge$ с помощью эффективного временного технологического носителя, который позволяет проводить процесс практически без риска разрушения гетероструктуры, утонять Ge-каскад до нескольких десятков (даже единиц) микрон и существенно увеличить процент выхода годных приборов, а также удобно и надёжно переносить утонённые солнечные элементы на произвольную лёгкую и гибкую подложку. Такая технология открывает возможность создания высокоэффективных тонких и лёгких солнечных элементов для космических аппаратов на массово производимых в настоящее время гетероструктурах $A^{III}B^V/Ge$.

Ключевые слова: сверхтонкие солнечные элементы на основе $A^{III}B^V/Ge$, гетероструктуры $A^{III}B^V/Ge$, солнечные элементы на основе $A^{III}B^V/GaInAs$.

DOI: 10.15372/AUT20170613

Введение. В настоящее время существует необходимость увеличения энергомассовых характеристик солнечных батарей (СБ) для космических аппаратов. Главными путями решения этой задачи считаются увеличение КПД и снижение веса солнечных элементов (СЭ) на основе соединений $A^{III}B^V$, которые обладают наибольшей эффективностью. Благодаря интенсивным исследованиям СЭ на $A^{III}B^V$ их эффективность непрерывно увеличивается примерно на 1 абс. % в год [1]. Сегодня для космических аппаратов используются СЭ на гетероструктурах (ГС) $A^{III}B^V/Ge$ с КПД около 29,5 %. Ожидается, что в ближайшие несколько лет эффективность СБ на соединениях $A^{III}B^V$ для космических применений сможет приблизиться к 35 %, для чего необходимы высокоэффективные, лёгкие и желательны гибкие солнечные элементы.

Для достижения таких КПД требуются новые архитектуры и качественные полупроводниковые материалы, оптимизированные по фотоэлектрическим параметрам. С этой целью разрабатываются сверхтонкие многокаскадные эффективные СЭ на гетероструктурах $A^{III}B^V$, например $InGaP/GaAs/GaInAs$, выращенные по инвертированной метаморфной (ИММ) технологии. Далее ГС отделяются от подложки за счёт создания в процессе роста жертвенного слоя и последующего вытравливания его в HF (плавиковой кислоте). Затем ГС переносятся на новый лёгкий носитель с помощью так называемой технологии ИММ + ELO (Epitaxial Lift Off) [2], суть которой наглядно представлена на рис. 1 и 2.

Несмотря на значительные и многолетние усилия ведущих мировых производителей солнечных батарей из-за сложности процесса и высокой стоимости СЭ на гетероструктурах $InGaP/GaAs/GaInAs$ вывести производство панелей на реальный коммерческий уровень до сих пор не удалось. Вероятно, это связано с недостатками данного метода: прежде

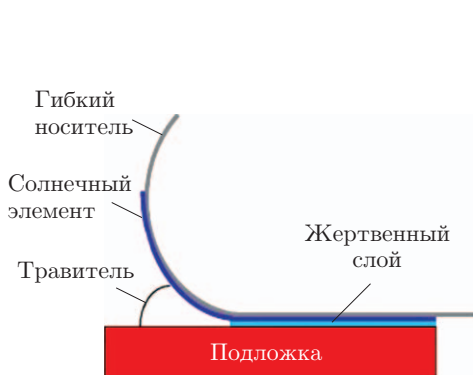


Рис. 1. Схема отделения ГС

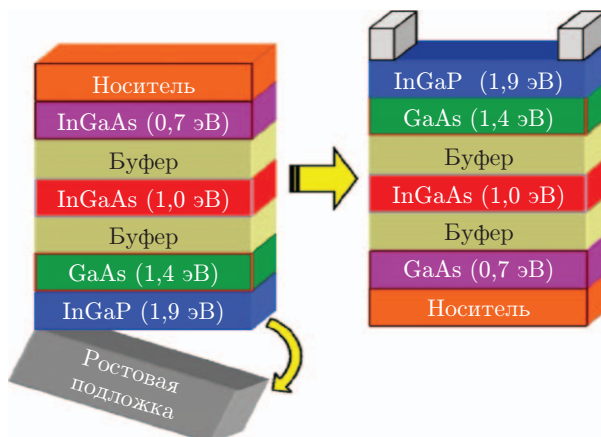


Рис. 2. Схема переноса ГС на лёгкий носитель

всего, длительностью нахождения ГС в плавиковой кислоте (сутки и более) при вытравливании жертвенного слоя и отделении от подложки. Эта кислота очень опасна, требует специальных защитных мер и оборудования, что ограничивает возможность использования данной технологии при масштабировании. При отделении от подложки сверхтонкие структуры (толщиной около 5 мкм) часто ломаются ввиду их крайней хрупкости, что снижает процент выхода годных и таким образом нивелирует основное достоинство этой технологии — повторное использование подложки. Недостатком является также наличие в данной архитектуре СЭ толстого укрепляющего металлического слоя (25–50 мкм), что значительно увеличивает вес элемента [2].

В то же время практически все солнечные элементы для космических СБ производятся газофазной эпитаксией на основе отработываемой длительное время и доведённой до очень высокого качества трёхкаскадной ГС (InGaP/GaAs/Ge) на германиевом $p-n$ -переходе-подложке (активном германии) с КПД около 30 % [1]. В мире ведутся интенсивные исследования по повышению КПД СЭ на таких гетероструктурах с перспективой до 35 % (для космического излучения AM0) за счёт увеличения числа $p-n$ -переходов до четырёх, пяти и даже шести. На рис. 3 показаны примеры архитектур ГС на активном германии для четырёхпереходных СЭ с прогнозируемыми и практически реализуемыми КПД до 33–35 % [3–5].

Таким образом, многокаскадные солнечные элементы на гетероструктурах $A^{III}B^V/Ge$ в перспективе не уступят по эффективности СЭ на гетероструктурах $A^{III}B^V/InGaAs$, вы-

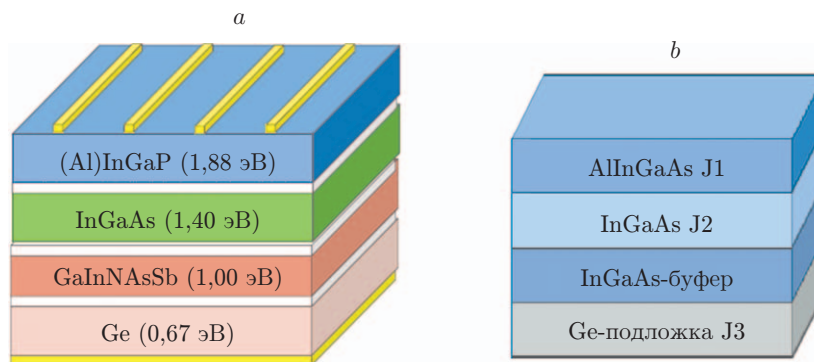


Рис. 3. Перспективные архитектуры СЭ $A^{III}B^V$ на активном германии, разрабатываемые ведущими мировыми фирмами: Solar Junction (a) и AZUR Space Solar Power (b)

ращенных по IMM + ELO-технологии. Их недостаток — это сложность послеростового утонения германиевого слоя, вес которого составляет около 95 % веса СЭ при типичной толщине 145 мкм. Понятно, что уменьшение толщины СЭ площадью около 30 см² и более до желаемых 20–50 мкм, а также дальнейшие процессы (ввиду крайней хрупкости СЭ) являются нетривиальной технологической проблемой. Поэтому СЭ на активном германии имеют высокую удельную массу, и их стараются заменить СЭ, выращенными по IMM + ELO-технологии. Отметим, что тонкие и лёгкие СЭ толщиной до 20 мкм с удельной массой до 34 мг/см² на гетероструктуре InGaP/GaAs/Ge предлагает фирма AZUR Space Solar Power [4]. Утонённые СЭ типа 3G30A прошли успешные лётные испытания на немецком технологическом спутнике TET-1, запущенном 22.07.2012 г. (по 31.10.2013 г.) на российском носителе «Союз». Наилучшую эффективность показали самые тонкие (20 мкм) СЭ. Однако технология создания таких СЭ является ноу-хау и не разглашается.

Эксперимент. В данной работе предлагается способ утонения германиевой подложки на гетероструктурах A^{III}B^V/Ge до толщин 20 мкм с помощью химически стойкого временного технологического носителя (ВТН). Как показано в [4], такой толщины вполне достаточно для полноценной работы Ge-каскада. Это позволяет уменьшить удельную массу СЭ на 50–60 % [4]. Наиболее удобным ВТН является термоскотч NITTO DENKO Revalpha [6]. С одной стороны он имеет клеевой слой, с помощью которого легко наносится на СЭ, а также просто удаляется при нагревании до заданной температуры: 90, 120, 150 или 170 °С. Сущность технологии процесса утонения в следующем. Выращенный на активном германии практически готовый СЭ с контактной сеткой, просветляющим покрытием и защитным от радиации стеклом, но без тыльного металлического контакта приклеивается лицевой стороной (защитным стеклом) на ВТН. Таким образом, получается достаточно прочная конструкция, опирающаяся на стекло (толщина 100 мкм) плюс ВТН (толщина 100–180 мкм), что позволяет проводить весь дальнейший процесс практически без риска разрушить ГС и тем самым существенно увеличить выход годных СЭ. Далее Ge-подложка травится до нужной толщины (при этом планарная сторона защищена ВТН) и создаётся тыльный контакт. Носитель легко и чисто удаляется нагреванием и таким образом процесс утонения СЭ завершается.

С помощью ВТН утонённый СЭ легко переносится на любую произвольную подложку, после чего ВТН аналогично удаляется. Подложка может быть лёгкой, гибкой с лучшей теплопроводностью и при металлизации осуществлять электрический контакт.

Очевидно, что данный ВТН аналогично можно использовать и для отделения германиевого *p-n*-перехода от гетероструктуры A^{III}B^V/Ge, сформировав на подложке при росте жертвенный или стоп-слой. Таким образом легко получить, например, тонкий (единицы микрон) двухкаскадный солнечный элемент InGaP/GaAs на защитном стекле.

Апробация технологии проводилась на СЭ 3G30A фирмы AZUR Space Solar Power с защитным стеклом и «коварными» контактами (рис. 4). На рис. 5 (внизу) показан утонённый нами фрагмент СЭ 3G30A, перенесённый на металлизированный индием углепластик. Начальная толщина германиевого слоя составляла 180 мкм, конечная — 50 мкм. При этом удельная масса согласно [4] уменьшилась со 116 до 63 мг/см². Травление проводилось в растворе H₃PO₄—H₂O₂—H₂O [7] в течение 180 мин после сошлифовывания многослойного тыльного контакта. Новый контакт создавался напылением сплошного слоя индия толщиной 1 мкм. Далее он приклеивался проводящим эпоксидным клеем к металлизированному In-углепластику. Верхний контакт изолирован. Основной проблемой было удаление многослойного тыльного контакта.

На рис. 6 показана картина дисплея солнечного тестера с численными значениями параметров (V_{oc} — напряжение холостого хода, I_{sc} — ток короткого замыкания, P_m — максимальная мощность, E_{eff} — эффективность (КПД)) и вольт-амперными ($I-V$) характеристиками утонённого фрагмента СЭ 3G30A (зелёная кривая, $V_{oc} = 2,662718$ В),

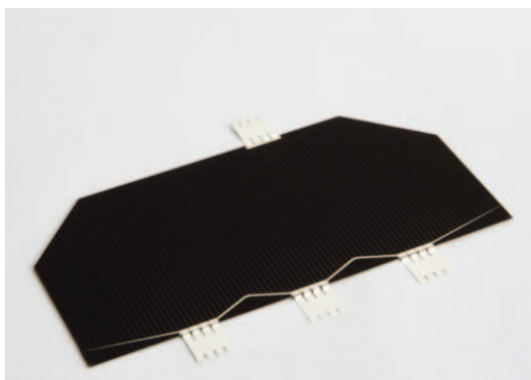


Рис. 4. Солнечный элемент 3G30A

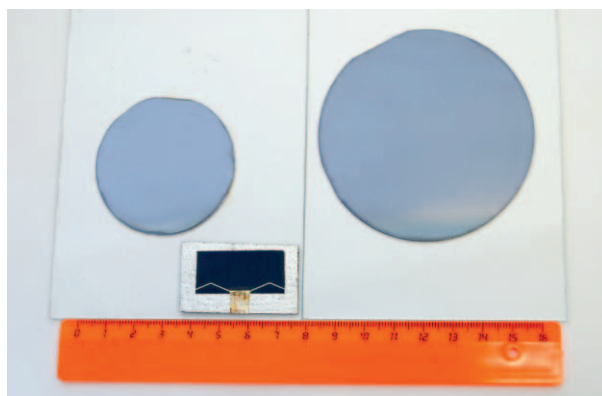


Рис. 5. Фрагмент СЭ 3G30A и пластины GaAs большой площади, перенесённые на стекло

а также I - V -характеристиками эталонов: кремниевого (красная линия, $V_{oc} = 0,61915$ В) и InGaP/GaInAs/Ge (синяя кривая, $V_{oc} = 2,45627$ В). Эталоны калиброваны в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН. Все I - V -характеристики измерены для спектра AM1.5D. Площадь фрагмента солнечного элемента 3G30A составляла $4,4$ см², а эталона InGaP/GaInAs/Ge — $0,316$ см².

Таким образом, рис. 6 демонстрирует, что для наземного спектра AM1.5D (1000 Вт/м²) значения параметров утонённого образца $V_{oc} = 2,66718$ и плотности тока $J_{oc} = 0,061570$ А/4,4 см² = $0,014$ А/см² совпадают со штатными значениями исходных СЭ InGaP/GaInAs/Ge [8]. Несколько ниже ожидаемой оказалась эффективность $E_{eff} = P_m(W)/0,1W$ см² · $4,4$ см² = $28,7$ %, что, скорее всего, связано с возникновением дефектов при сошлифовывании металла тыльного контакта. Понятно, что в реальной технологической цепочке нанесение тыльного контакта до травления исключается.

Образцы Ge размером 4×4 см регулярно удавалось травить до 10 – 15 мкм. Это даёт основание полагать, что на СЭ площадью 30 см² германиевую n - p -подложку можно утонить до таких толщин.

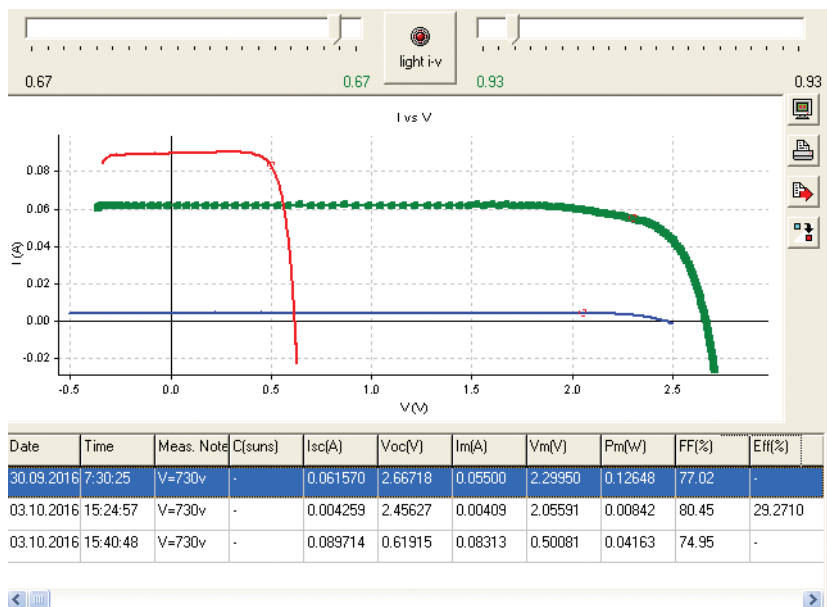


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики фрагмента СЭ 3G30A и эталонов

Для демонстрации возможности переноса пластин большой площади на произвольную основу посредством ВТН на рис. 5 приведены фотографии пластин GaAs (диаметром 50 и 76 мм), утонённых на ВТН с 200 до 100 мкм и в таком виде переклеенных на обычное стекло. До такой толщины травить достаточно, поскольку толщина защитного от радиации стекла на СЭ 100 мкм плюс толщина самого СЭ (практически Ge) 20 мкм — это уже 120 мкм. Ничто не мешает травить Ge до существенно меньших толщин.

Закключение. Таким образом, предлагаемая в данной работе технология открывает дополнительную возможность создания высокоэффективных тонких и лёгких СЭ на массово производимых в настоящее время ГС $A^{III}B^V/Ge$ с высоким процентом выхода годных СЭ, а также удобного способа их переноса на постоянный гибкий или «плиточный» лёгкий носитель. При этом эффективность таких СЭ в перспективе не должна уступать СЭ, полученным с помощью ИММ-технологии, а технология получения СЭ на основе ГС $A^{III}B^V/Ge$ должна быть существенно проще.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // Proc. of the 28th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Paris, France, Sept. 30–Oct. 4, 2013. P. 1–6.
2. **Youtsey C., Adams J., Chan R. et al.** Epitaxial lift-off of large-area GaAs thin-film multi-junction solar cell // Proc. of the Intern. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. Massachusetts, USA, April 23–26, 2012.
3. **Kirk A. P.** High efficacy thinned four-junction solar cell // Semicond. Sci. Technol. 2011. **26**. 125013.
4. **Strobl G. F. X., Ebel L., Fuhrmann D. et al.** Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end-of-life // Proc. of the IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conf. Colorado, USA, June 8–13, 2014. P. 3595–3600.
5. **Strobl G. F. X., Fuhrmann D., Guter W. et al.** About AZUR'S "3G30-advanced" space solar cell and next generation product with 35 % efficiency // Proc. of the 27th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Frankfurt, Germany, Sept. 24–28, 2012. P. 104–108.
6. **Nitto Denko Corporation.** Press Release. URL: <https://www.nitto.com/eu/en/press/2017/> (дата обращения: 5.06.2017).
7. **Kagawa Sh., Mikawa T., Kaneda T.** Chemical etching of germanium with $H_3PO_4-H_2O_2-H_2O$ solution // Jap. Journ. Appl. Phys. 1982. **21**, N 11. P. 1616–1618.
8. **Sabnis V., Yuen H., Wiemer M.** High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides // Proc. of the AIP Conf. 2012. **1477**, N 14. P. 14–19. DOI: 10.1063/1.4753823.

Поступила в редакцию 5 июня 2017 г.