

Легкий гибкий солнечный элемент на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaP/GaAs

© М.А. Путьято,¹ Н.А. Валишева,¹ М.О. Петрушков,¹ В.В. Преображенский,¹ И.Б. Чистохин,¹ Б.Р. Семягин,¹ Е.А. Емельянов,¹ А.В. Васев,¹ А.Ф. Скачков,² Г.И. Юрко,² И.И. Нестеренко²

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

² Публичное АО „Сатурн“, 350072 Краснодар, Россия
e-mail: puma@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 27 декабря 2018 г.

Принято к публикации 7 февраля 2019 г.

Обсуждены проблемы создания легких гибких солнечных элементов на основе гетероэпитаксиальных структур соединений $A^{III}B^V$ с удалением подложки методом растворения. Предложены подходы к их решению. Изготовлен двухкаскадный легкий гибкий солнечный элемент на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaP/GaAs. Определены массогабаритные характеристики солнечного элемента и проведены его испытания на изгиб. Удельный вес составил 0.51 kg/m^2 , а допустимый радиус изгиба — 36 mm. Измерены вольт-амперные характеристики солнечного элемента для спектра AM0 и AM1.5D при 28.6 и 25°C соответственно. В первом случае значение коэффициента полезного действия солнечного элемента составило 23.1, а во втором — 28.3%.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47802.438-18

Введение

Осуществление перспективных космических проектов требует значительного повышения энерговооруженности космических аппаратов, что предполагает качественное улучшение массоэнергетических характеристик солнечных батарей. Помимо повышения эффективности солнечных элементов (СЭ), необходимо увеличивать и площадь батарей. При этом из-за ограничений, накладываемых на массогабаритные характеристики грузов космического назначения, увеличение площади солнечной батареи должно сопровождаться снижением ее удельной массы и повышением компактности укладки изделия под обтекателем ракеты-носителя. Эти задачи могут быть решены, если использовать легкие и гибкие солнечные батареи. Структурной единицей таких батарей является СЭ, сформированный на базе гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС) соединений $A^{III}B^V$ с утоненной или полностью удаленной подложкой [1–6]. Для достижения предельных параметров по удельному весу и гибкости солнечного элемента подложку необходимо удалять полностью.

При изготовлении легких гибких солнечных элементов (ЛГСЭ) операция по удалению подложки является ключевой. Вне зависимости от типа архитектуры ГЭС и способа ее получения подложка может быть удалена либо путем растворения (метод растворения — МР), либо путем ее отделения по „жертвенному слою“ (так называемый метод Epitaxial Lift-off — ELO) [7].

В методе ELO для растворения „жертвенного слоя“ используется агрессивный водный раствор фтористого

водорода, что определяет жесткие требования к используемым конструкционным материалам, технологическому оборудованию, оснастке, а также к обеспечению безопасности труда и защите окружающей среды. Более того, скорость растворения „жертвенного слоя“ составляет всего несколько миллиметров в час [8]. В результате отделение подложки занимает десятки часов, что значительно усугубляет вышеперечисленные проблемы. Поэтому, несмотря на то, что метод ELO позволяет сохранить подложку для многократного использования [9], в целом он сложен в реализации.

МР технологически более доступен [10–12] по сравнению с ELO. Длительность процесса растворения подложки определяется лишь ее толщиной и скоростью травления, которая составляет для GaAs несколько микрометров в минуту [13]. При этом используемые реактивы менее агрессивны и токсичны по сравнению с методом ELO. При применении МР подложка полностью разрушается. Но продукты реакции растворения могут быть утилизированы с извлечением чистых компонентов, пригодных для синтеза ростовых или подложечных материалов.

К настоящему времени в мире накопилось большое количество публикаций, посвященных созданию легких гибких солнечных элементов с удалением подложки по „жертвенному слою“ [14]. Статей, посвященных технологии созданию ЛГСЭ с удалением подложки МР, значительно меньше. Кроме того, в литературных источниках мало уделено внимания проблемам, обусловленным тем, что ЛГСЭ изготавливаются из материалов, значительно различающимися по своим химическим и физическим

свойствам, в частности, коэффициентами теплового расширения (КТР).

В настоящей работе рассматриваются проблемы создания ЛГСЭ на основе ГЭС соединений $A^{III}B^V$ с прямой архитектурой слоев и удалением подложки МР.

1. Строение ЛГСЭ

По своему строению ЛГСЭ представляет собой тонкую многослойную структуру, состоящую из полупроводниковой ГЭС, слоев полимеров, диэлектриков и металлов, которые соединены между собой силами адгезии различной природы.

На рис. 1 приведена схема поперечного сечения ЛГСЭ. Архитектура ЛГСЭ строится вокруг гетероэпитаксиальной структуры соединений $A^{III}B^V$, освобожденной от ростовой подложки 1. На планарной стороне ГЭС сформирована лицевая контактная инфраструктура 2 и 4 и антиотражающее покрытие (на рисунке не показано), а на обратной — слои тыльной металлизации (ТМ) 3. Периферия ГЭС защищена слоем диэлектрика 11. Несущей основой ЛГСЭ является гибкий носитель (ГН) на основе полимерной пленки 9. ГН сопряжен с ГЭС через слой силиконового адгезива 10. К контактным площадкам СЭ присоединены внешние электрические выводы (ЭВ) 8, 15. Места присоединения ЭВ усилены клеевыми вставками 6, 16. На лицевой стороне СЭ закреплено стекло радиационной защиты (СРЗ) 17.

Приведенная выше схема носит описательный характер и отражает общие принципы и подходы к построению ЛГСЭ на основе гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур, освобожденных от ростовой подложки.

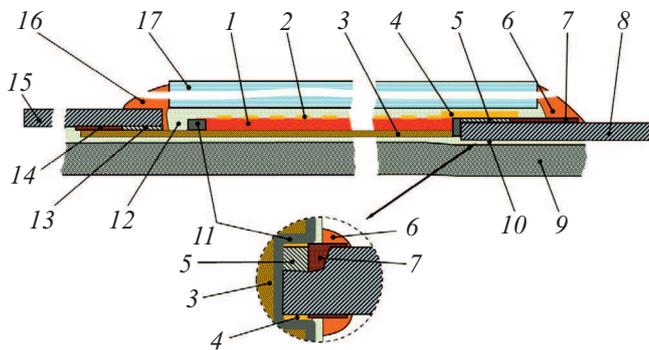


Рис. 1. Схема поперечного сечения ЛГСЭ. Антиотражающее покрытие не показано. 1 — ГЭС; 2 — лицевой контакт; 3 — слои тыльной металлизации; 4 — контактная площадка лицевого контакта; 5 — слой индия; 6 — фиксатор вывода лицевого контакта; 7 — клей; 8 — вывод лицевого контакта; 9 — ГН; 10 — силиконовый клей; 11 — изоляция периферии ГЭС; 12 — силиконовый клей; 13 — слой индия; 14 — клей; 15 — вывод тыльного контакта; 16 — фиксатор вывода тыльного контакта; 17 — СРЗ.

Таблица 1. Профиль слоев ГЭС

Прямая архитектура слоев ГЭС	
Подконтактный слой	Рабочие слои ГЭС. Переносятся на гибкий носитель.
Каскад на основе InGaP	
Туннельный диод	
Каскад на основе GaAs	
Подконтактный слой	Вспомогательный слой ГЭС. Удаляется перед формированием слоя тыльной металлизации.
Стоп-слой InGaP	
Подложка: GaA(001) или Ge(001)	Переходит в раствор.

2. Проблемы создания ЛГСЭ и подходы к их решению

Состав, строение, способы формирования и последовательность сопряжения компонентов гибкого СЭ определяются их функциональным назначением, свойствами материалов, условиями изготовления и эксплуатации изделия. Используемые для изготовления ЛГСЭ материалы значительно различаются между собой по своим физическим, химическим и технологическим свойствам, что создает ряд трудностей при проектировании и изготовлении ЛГСЭ и его компонентов. Ниже рассмотрены проблемы создания гибкого СЭ на основе ГЭС с прямой архитектурой слоев и удалением подложки методом растворения, а также предложены подходы к их решению на уровне конструкции основных компонентов ЛГСЭ.

2.1. ГЭС, подложка и лицевая инфраструктура солнечного элемента

Фоточувствительным компонентом ЛГСЭ является полупроводниковая ГЭС. Для изготовления гибких СЭ используют ГЭС как с прямой, так и с обратной последовательностью слоев относительно подложки [15,16]. В табл. 1 дано упрощенное описание профиля гетероэпитаксиальной структуры с прямой архитектурой слоев, предназначенной для использования в технологии с удалением подложки МР. Стоп-слой служит для предотвращения травления рабочих слоев ГЭС после полного растворения подложки.

В случае ГЭС с прямой архитектурой слоев изготовление ЛГСЭ начинается с формирования лицевой контактной инфраструктуры СЭ и нанесения антиотражающего покрытия. Технологические процессы при этом проводятся на эпитаксиальных слоях, еще неотделенных от подложки. Возможность использования на этом этапе хорошо отработанных типовых технологических операций и стандартного оборудования значительно упрощает задачу создания технологии изготовления ЛГСЭ.

Подложка, на которой выращивается ГЭС, удаляется после формирования лицевой инфраструктуры СЭ и приклеивания стекла радиационной защиты. ГЭС СЭ

на основе соединений $A^{III}B^V$ выращиваются на подложках GaAs либо Ge. Основной проблемой метода растворения является подбор травителей, обладающих высокой селективностью травления пары материалов подложка/стоп-слой и обеспечивающих необходимую равномерность скорости травления по всей поверхности подложки от начала и до конца процесса.

Важно, чтобы травитель обладал низкой активностью по отношению к различного рода дефектам, пронизывающим ГЭС. К таким дефектам, например, относятся прорастающие дислокации и ростовые дефекты. Существует вероятность протравливания ГЭС на всю ее толщину по некоторым дефектам даже через стоп-слой. При нанесении тыльной металлизации в протравленных отверстиях будут формироваться шунтирующие каналы.

Перечисленные проблемы решаются путем подбора состава травителей и режимов растворения подложечного материала. В частности, применением многоступенчатого химико-динамического травления.

2.2. Стекло радиационной защиты

В настоящее время для радиационной защиты СЭ используют специальные стекла толщиной 60–120 μm . СРЗ приклеивается силиконовым компаундом. В случае изготовления ЛГСЭ на основе ГЭС с прямой архитектурой слоев целесообразно приклеивать СРЗ еще до удаления подложки. После удаления подложки оно будет выполнять функцию промежуточного носителя для ГЭС (вплоть до закрепления СЭ на гибком носителе).

2.3. Слои тыльной металлизации

Слои ТМ СЭ обеспечивают омический контакт к ГЭС и повышают ее механическую прочность. Кроме того, слои ТМ компенсируют термомеханические напряжения в гетероструктуре, которые возникают при термоциклировании. Влияние термомеханических нагрузок сказывается уже на стадии изготовления ЛГСЭ, так как ряд технологических операций по формированию лицевой и тыльной инфраструктуры солнечного элемента требуют нагрева ГЭС. Кроме того, в процессе эксплуатации ЛГСЭ подвергается термоциклированию в диапазоне от -60 до 130°C . Термомеханические напряжения приводят к разрыву тонкой эпитаксиальной пленки, отделенной от подложки. Даже при использовании металлов с КТР, близкими к КТР GaAs (например, молибдена), риск разрушения полупроводника остается. Это обусловлено наличием плоскостей спайности в монокристаллических пленках соединений $A^{III}B^V$. Поэтому необходимо решать проблему компенсации термомеханических напряжений в ЛГСЭ, в том числе и на уровне состава и строения слоев ТМ СЭ.

Для компенсации термомеханических напряжений в ГЭС слои ТМ должны содержать металлы, значение модуля Юнга которых меньше, чем у слоев полупроводниковых материалов. Желательно, чтобы предел

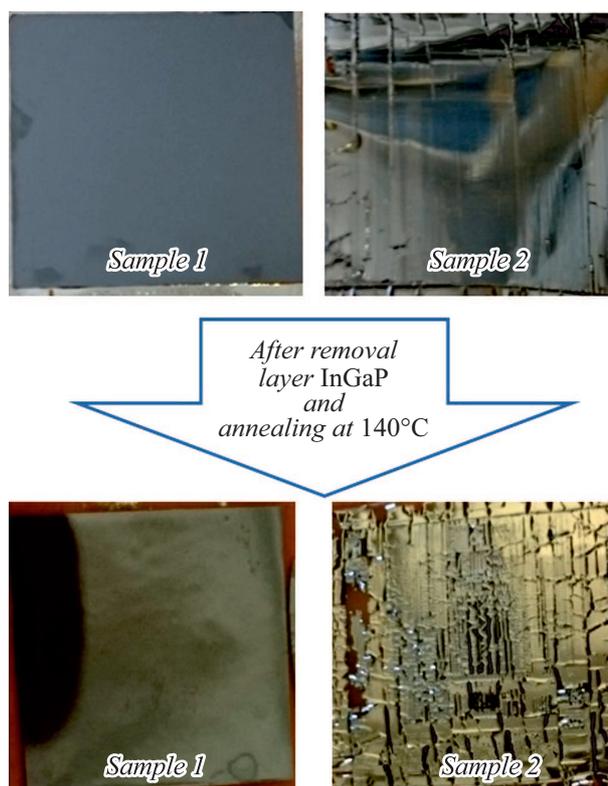


Рис. 2. Внешний вид образцов ГЭС со слоями ТМ, перенесенных на ГН.

текучности компенсирующих слоев металлизации был ниже порога трещинообразования в самом „слабом“ слое ГЭС. Такими свойствами обладают Al и Au [17–20].

На рис. 2 приведены фотографии образцов ГЭС двухкаскадных СЭ InGaP/GaAs размером 2×2 см, перенесенных с ростовой подложки на гибкий носитель из полиимидной пленки толщиной 50 μm . Образцы различаются составом слоев ТМ. На образце № 1 слой металлизации состоит из 10 nm Ti и 3080 nm Al, а на образце № 2 — из 10 nm Ti и 1890 nm Mo. Слои Ti нанесены при температуре 70°C , а слои Al и Mo — при 100 и 90°C соответственно. После формирования слоев ТМ методом вакуумного напыления ГЭС были приклеены к гибкому носителю силиконовым компаундом. Затем методом растворения были удалены подложки.

В верхней части рис. 2 приведены фотографии образцов № 1 и № 2 сразу после удаления подложки, а в нижней — после удаления стоп-слоя и отжига до 140°C . Видно, что эпитаксиальная пленка со слоями Ti/Mo (образец № 2) потрескалась уже в процессе удаления подложки, несмотря на то, что КТР GaAs и молибдена близки по своим значениям, а температура формирования металлических слоев относительно невелика (см. выше). Образец со слоем металлизации состава Ti/Al (образец № 1) сохранил свою целостность даже после отжига, но его поверхность приобрела рельеф типа „апельсиновой корки“.

Следует отметить, что с точки зрения механических свойств и удельного веса слоев ТМ наиболее подходящим материалом для формирования компенсационного слоя является Al. Но этот металл легко растворяется в водных растворах многих щелочей и кислот. Поэтому слой Al необходимо защищать материалом, стойким к травителям, например, слоем золота.

2.4. Адгезивные слои

Адгезивы, применяемые для изготовления ЛГСЭ, должны быть термостойкими и не разрушаться под действием химических сред, используемых в технологии изготовления прибора. Для соединения между собой компонентов гибкого СЭ необходимо использовать клеи, не дающие усадки и сохраняющие эластичность после полимеризации. Эластичность адгезивного слоя обеспечивает возможность сдвига относительно друг друга разнородных слоев композитной системы при механических и термомеханических нагрузках. При этом за счет деформации слоя адгезива снижается уровень механических напряжений в сопрягаемых элементах ЛГСЭ. В настоящей работе лучшие результаты по компенсации механических напряжений в слоях гибкого солнечного элемента за счет эластичности адгезивов были получены при применении слоев силиконовых компаундов толщиной несколько микрон. Применение жестких клеев в большинстве случаев приводило к растрескиванию ГЭС при термоциклировании.

2.5. Гибкий носитель

Несущей основой ЛГСЭ является ГН, который обеспечивает механическую прочность конструкции преобразователя как в процессе изготовления прибора, так и в процессе его эксплуатации. Наиболее часто в качестве полимерной основы для ГН используются полиимидные пленки (ПП). Этот материал обладает достаточной радиационной стойкостью, высокими механическими и температурными характеристиками и используется для изготовления деталей аэрокосмической техники как самостоятельно, так и в составе композитов. Однако ПП необходимо защищать от прямого контакта с водой. Из-за гигроскопичности объем ПП увеличивается за счет поглощения воды из растворов (до 4% от своей массы). Размеры ПП восстанавливаются при сушке изделия в кипящих растворителях или при нагреве в вакууме. Изменение геометрических размеров полиимидной основы в процессе изготовления ЛГСЭ повышает риск разрушения ГЭС.

Еще одна проблема использования ПП в качестве носителя для ГЭС связана с большим значением КТР этого материала ($2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ при 25°C), в то время как у GaAs — $5.7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Столь большое рассогласование по КТР приводит к возникновению значительных термомеханических напряжений в ГЭС, которые необходимо компенсировать.

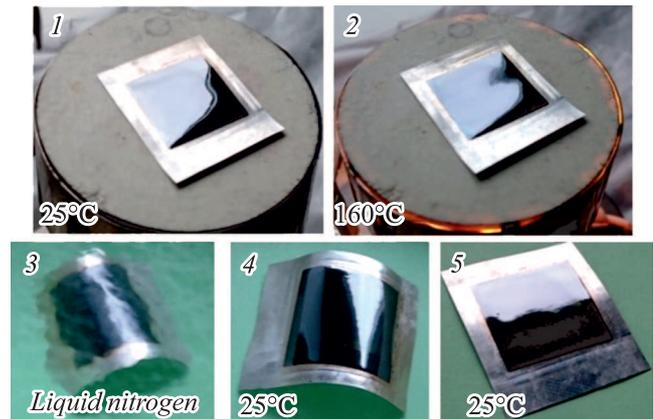


Рис. 3. Влияние термообработки на внешний вид образца ГЭС InGaP/GaAs площадью $\sim 4 \text{ cm}^2$ со слоями ТМ на основе Ti/Al, перенесенного на ГН.

В качестве эффективной защиты ПП от воздействия водных технологических сред можно использовать двухстороннее покрытие пленки слоями металлов толщиной до нескольких микрон. Наиболее подходящим по своим механическим свойствам является алюминий, КТР которого близок к КТР ПП. Но алюминиевое покрытие следует защищать от агрессивных технологических сред. Наилучшим защитным слоем для алюминиевого покрытия является сплошная тонкая пленка химически инертного золота.

При изготовлении ГН алюминиевые слои целесообразно приклеивать в виде фольги с использованием тонких (толщиной несколько микрон) прослоек силиконового компаунда. Двухстороннее покрытие ПП фольгой и наличие эластичных прослоек компаунда снижают амплитуду коробления полотна гибкого носителя при термоциклировании.

С применением описанных выше подходов изготовлен образец, представляющий собой ГЭС InGaP/GaAs со слоем металлизации $10 \text{ nm Ti}/3 \text{ nm Al}$, перенесенную на ГН. В качестве гибкого носителя использовалась ПП толщиной $25 \mu\text{m}$, ламинированная с двух сторон фольгой из Al. Подложка удалялась методом растворения.

Конструкция была подвергнута термоциклированию. На фотографиях (рис. 3) показан внешний вид образца: 1 — при комнатной температуре; 2 — при нагреве до 160°C ; 3 — в жидком азоте; 4 — после испарения жидкого азота; 5 — при комнатной температуре после выравнивания.

При нагреве видимой деформации образца не наблюдалось (2 на рис. 3). В процессе охлаждения в жидком азоте образец выгнулся в сторону ГЭС и сохранил принятую форму после нагрева до комнатной температуры (3 и 4 на рис. 3). Такое поведение объясняется тем, что при низких температурах существенно возрастают значения констант упругости полимерных материалов при сохранении пластичности Al. Проведенное тестирование

показало, что разрушения ГЭС (образования трещин и сколов) и расслоения образца по адгезионным слоям при термоциклировании не происходит. Это свидетельствует о том, что предложенная конструкция образца эффективно компенсирует термомеханические напряжения.

2.6. Электрические выводы СЭ

Критической операцией при изготовлении ЛГСЭ является присоединение к тонкому СЭ электрических выводов. В случае монолитных СЭ электрические выводы присоединяются к лицевым контактным площадкам и слоям ТМ с помощью двухточечной односторонней контактной сварки. В случае ГЭС, перенесенной на полимерное основание, механические контактные нагрузки в точках сварки способны повредить тонкую эпитаксиальную пленку. В этой связи необходимо принимать меры, позволяющие исключить разрушение ГЭС при подсоединении ЭВ.

На компоновочной схеме (рис. 1) показаны способы крепления ЭВ 8 и 15 к гибкому СЭ. Лицевые электрические выводы 8 к контактным площадкам 4 присоединены с тыльной стороны через окна, сформированные в ГЭС после удаления подложки (круглая вставка со штриховым контуром на рис. 1). Тыльные выводы 15 присоединены к слоям металлизации, продленным за габариты ГЭС и стекла радиационной защиты. ЭВ можно крепить методом сварки давлением через тонкие слои индия 5 и 13 с увеличением механической прочности соединения клеевыми элементами 6, 7, 14, 16.

В качестве материала для изготовления ЭВ представляется целесообразным использовать металлизированные пленки из полиимида. Нанесение металлического покрытия необходимо делать двусторонним для понижения величины деформаций ЭВ при термоциклировании.

3. Изготовление и испытания ЛГСЭ

С применением описанных выше подходов изготовлен образец полноформатного двухкаскадного ЛГСЭ на основе InGaP/GaAs ГЭС с прямой архитектурой слоев. ГЭС была выращена на подложках Ge диаметром 100 mm методом MOCVD. Архитектура ГЭС полностью повторяет архитектуру $A^{III}B^V$ каскадов серийных InGaP/InGaAs/Ge СЭ. Планарная геометрия, габаритные размеры, топология и антиотражающее покрытие СЭ были сформированы по стандартной технологии в условиях промышленного производства. После изготовления лицевой контактной инфраструктуры и нанесения антиотражающего покрытия к СЭ было приклеено СРЗ, которое обеспечивало сохранность ГЭС при последующих технологических операциях. Далее была удалена ростовая подложка, сформированы слои ТМ, присоединены лицевые электрические выводы и приклеен гибкий носитель.

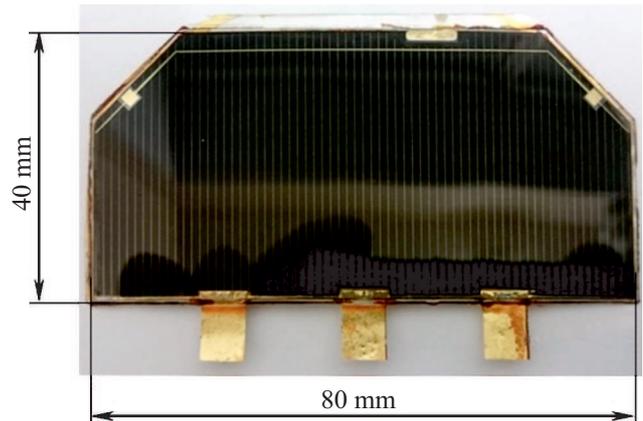


Рис. 4. ЛГСЭ InGaP/InGaAs с СРЗ.

Таблица 2. Массогабаритные характеристики ЛГСЭ и его компонентов

Параметр	Величина
Форм-фактор базового СЭ	40 × 80 mm
Площадь ЛГСЭ по габаритам ГН, cm ²	31
Площадь ГЭС, cm ²	30.18
Площадь фотоактивной части СЭ, cm ²	28.15
Толщина ЛГСЭ, μm	226
Толщина ГЭС, μm	4.5
Толщина СРЗ из K-208, μm	120
Толщина ГН, μm	80
Вес СРЗ, g	0.93
Полный вес ЛГСЭ, g	1.58
Удельный вес, kg/m ² (относительно площади по габаритам ГН)	0.51

Подложка из Ge толщиной 140 μm была удалена в два этапа путем ее растворения в перекисно-кислотном (на основе ортофосфорной кислоты) и перекисно-щелочном (на основе аммиака) травителях. В качестве стоп-слоя использовался слой InGaP, сформированный на границе раздела ГЭС/подложка. Основная часть материала удалялась химико-динамическим травлением с использованием кислотного травителя (скорость травления 0.6 μm/min), а оставшуюся — в аммиачно-перекисном (скорость травления 0.2 μm/min). Общее время удаление подложки составило 5 h.

Перед напылением тыльного омического контакта в ГЭС были сформированы окна доступа к лицевым контактным площадкам, а затем удален стоп-слой InGaP. В качестве материала для формирования омического контакта к p^{++} -GaAs использовалась пара Ti/Au.

Лицевые электрические выводы были прикреплены к контактным площадкам с тыльной стороны СЭ через окна доступа методом вакуумной сварки давлением через слои сплава In/Au. ЭВ были изготовлены из термостойкой полимерной пленки, покрытой с двух сторон золотом.



Рис. 5. Гибкий СЭ InGaP/InGaAs с СРЗ на цилиндре радиусом 36 mm.

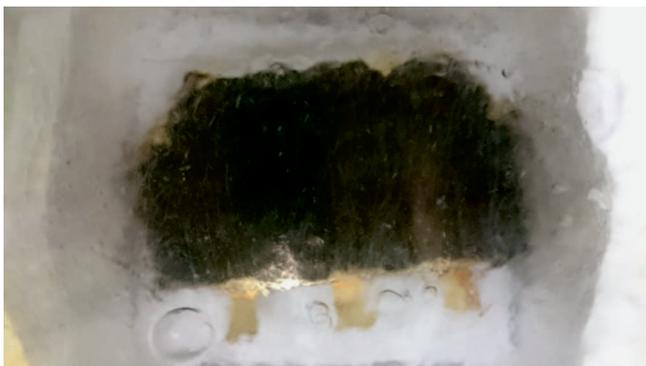


Рис. 6. ЛГСЭ InGaP/InGaAs с СРЗ в ванне с жидким азотом.

После присоединения лицевых выводов к СЭ был приклеен гибкий носитель, изготовленный из ПП, фольгированной с двух сторон алюминием.

На рис. 4 приведена фотография лицевой стороны ЛГСЭ.

Массогабаритные характеристики ЛГСЭ приведены в табл. 2.

ЛГСЭ был испытан на стойкость к изгибающим нагрузкам. Испытания проводились на цилиндрических оправках (рис. 5). Допустимый (без разрушения элементов ЛГСЭ) радиус изгиба составил 36 mm.

При испытании ЛГСЭ на предельные температурные нагрузки прибор нагревался до 200°C и охлаждался до -196°C от комнатной температуры. Нагрев до 200°C проводился в вакууме как без нагрузки, так и с распределенной нагрузкой 5 kg/cm². Охлаждение до -196°C осуществлялось в ванне с жидким азотом путем погружения (рис. 6). ЛГСЭ подвергались длительному экспонированию под прямым солнечным излучением при спокойной атмосфере. При удельной мощности излуче-

Таблица 3. Вольт-амперные и массоэнергетические характеристики ЛГСЭ

Параметр	Величина	
	AM0	AM1.5D
Спектр излучения	AM0	AM1.5D
Температура ЛГСЭ, °C	28.6	25
Напряжение холостого хода, V	2.368	2.420
Ток короткого замыкания, A	0.482	0.438
Максимальная мощность, W	0.887	0.797
Фактор заполнения вольт-амперной характеристики, %	77.7	75.2
КПД с учетом только фотоактивной части поверхности ЛГСЭ, %	23.1	28.3
Удельная максимальная мощность ЛГСЭ, W/kg	561.39	504.43
Удельная максимальная мощность ЛГСЭ (для общей площади СЭ), W/m ²	286.13	257.1

ния ~ 960 W/m² и естественной конвекции температура ЛГСЭ составила ~ 56°C.

Термоциклирование не привело к разрушениям ГЭС и стекла радиационной защиты. Расслаивания конструкции ЛГСЭ также не наблюдалось. Фотография лицевой стороны гибкого СЭ после термоциклирования представлена на рис. 4.

Проведена проверка работоспособности ЛГСЭ при засветке излучением со спектром AM0 при температуре 28.6°C и AM1.5D при 25°C. В табл. 3 приведены параметры вольт-амперных и массоэнергетических характеристик ЛГСЭ в условиях освещенности спектрами AM0 и AM1.5D.

Заключение

Обсуждены проблемы создания легкого гибкого СЭ на основе ГЭС соединений A^{III}B^V с прямой архитектурой слоев и удалением подложки МР. Предложены и апробированы подходы к решению проблемы растворения подложки, компенсации термомеханических напряжений (как на уровне тыльной металлизации СЭ, так и на уровне конструкции ГН), а также присоединения электрических выводов к гибкому СЭ.

С применением предложенных подходов изготовлен образец полноформатного двухкаскадного ЛГСЭ на основе InGaP/GaAs ГЭС с прямой архитектурой слоев по технологии с удалением подложки МР. Определены массогабаритные характеристики ЛГСЭ (табл. 2). Толщина ЛГСЭ составила 226 μm. Причем на СРЗ и ГН приходится 88.5% от общей толщины СЭ. СЭ на германиевой подложке имел бы толщину ~ 280 μm.

Удельный вес прибора составил 0.51 kg/m². Основной вклад в вес ЛГСЭ после удаления подложки вносят СРЗ и ГН. Удельный вес СЭ на германиевой подложке был равен ~ 1.1 kg/m².

Проведены испытания образца на изгиб с использованием цилиндрических оправок. Показано, что предложенная конструкция ЛГСЭ со СРЗ толщиной $120\ \mu\text{m}$ может быть изогнута с радиусом кривизны $36\ \text{mm}$ без ее разрушения. При достигнутой гибкости ЛГСЭ возможна реализация рулонной укладки солнечных батарей, собранных на основе подобных преобразователей.

Массогабаритные характеристики и гибкость ЛГСЭ можно улучшить без принципиального изменения его конструкции, если уменьшить толщину СРЗ и ГН. Температурные испытания показали, что ЛГСЭ сохраняет целостность конструкции в диапазоне от температуры жидкого азота до 200°C . Требуется дополнительные долговременные эксперименты по изучению влияния термоциклирования в различных температурных диапазонах на механическую прочность и КПД преобразователя. Необходимо решать проблему утилизации тепла, получаемого солнечной батареей с излучением.

Проведена проверка работоспособности ЛГСЭ при засветке излучением со спектром АМ0 при температуре 28.6°C и излучением со спектром АМ1.5D при 25°C . КПД при АМ0 составил 23.10%, а при АМ1.5D — 28.32%. Полученные значения КПД меньше известных из литературы для двухкаскадных InGaP/GaAs СЭ в монолитном исполнении ($\sim 25.7\%$ для АМ0 и 29.5% для АМ1.5 [21]). Это обусловлено невысоким значением фактора заполнения вольт-амперной характеристики ЛГСЭ (табл. 3). Причиной относительно низких значений фактора заполнения ВАХ гибкого СЭ, изготовленного нами, является наличие шунтирующих утечек по дефектам, растравленным в процессе удаления подложки. Если площадь ЛГСЭ сравнима с площадью подложки, то даже при плотности дефектов всего в несколько единиц на подложку возможна деградация свойств прибора. С уменьшением площади ЛГСЭ снижается вероятность получения СЭ с шунтирующими дефектами. Авторами работы [1] были изготовлены ультратонкие гибкие СЭ на основе InGaP/GaAs ГЭС с обратной последовательностью слоев, выращенной методом МOCVD на германиевой подложке диаметром $100\ \text{mm}$. Площадь ультратонких гибких СЭ составляла $\sim 1\ \text{cm}^2$. Из-за относительно малой площади приборов вероятность изготовления СЭ с шунтирующими дефектами в [1] была существенно ниже по сравнению с нашим ЛГСЭ, имеющим площадь ГЭС $30.18\ \text{cm}^2$. Для лучшего образца из [1] при спектре АМ1.5 достигнута эффективность 28.1%. Напряжение холостого хода и плотность тока короткого замыкания при этом были равны $23.12\ \text{V}$ и $14\ \text{mA/cm}^2$ соответственно. Это меньше значений аналогичных параметров, полученных нами. Но из-за более низкой величины фактора заполнения вольт-амперных характеристик нашего ЛГСЭ (75.2% против 86.8% в [1]), его эффективность лишь ненамного превышает эффективность СЭ из [1] (28.3% против 28.1% для их лучшего образца). Для достижения высоких значений КПД ЛГСЭ большой площади, изготавливаемых по технологии с удалением подложки методом

растворения, необходимо улучшать фактор заполнения вольт-амперной характеристики. С этой целью следует снижать плотность дефектов, шунтирующих ГЭС.

Финансирование работы

Работа проводилась при поддержке СП-749.2016.1.

Список литературы

- [1] *Shahrjerdi D., Bedell S.W., Bayram C., Lubguban C.C., Fogel K., Lauro P., Ott J.A., Hopstaken M., Gayness M., Sadana D.* // *Adv. Energy Mater.* 2012. Vol. 3. N 5. P. 566–571. DOI: 10.1002/aenm.201200827
- [2] *Strobl G.F.X., Ebel L., Fuhrmann D., Guter W., Kern R., Khorenko V., Kostler W., Meusel M.* // *Proc. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. Denver, CO, USA, 2014. P. 3595–3600. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6924884
- [3] *Паханов Н.А., Андреев В.М., Шварц М.З., Пчеляков О.П.* // *Автометрия*. 2018. Т. 54. Вып. 2. С. 93–112. DOI: 10.15372/AUT20180211
- [4] *Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D., Levi D.H., Ho-Baillie A.W.Y.* // *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 2016. Vol. 25. N 1. P. 3–13. DOI: 10.1002/pip.2855
- [5] *Green M.A.* // *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2017. Vol. 25. N 4. P. 333–334. DOI: 10.1002/pip.2876
- [6] *Pan N.* // *Proc. IEEE Int. Conf. on Semiconductor Electronics (ICSE2014)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. P. 347–349. DOI: 10.1109/SMELEC.2014.6920869
- [7] *Yablonovitch E., Gmitter T., Harbison J.P., Bhat R.* // *Appl. Phys. Lett.* 1987. Vol. 51. N 26. P. 2222–2224. DOI: 10.1063/1.98946
- [8] *Voncken M.M.A.J., Schermer J.J., van Niftrik A.T.J., Bauhuis G.J., Mulder P., Larsen P.K., Peters T.P.J., de Bruin B., Klaassen A., Kellyd J.J.* // *J. Electrochem. Soc.* 2004. Vol. 151. N 5. P. G347–G352. DOI: 10.1149/1.1690293
- [9] *Kyusang Lee, Zimmerman Jeremy D., Xiao Xin, Sun Kai, Forrest Stephen R.* // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111. N 3. P. 033527-1. DOI: 10.1063/1.3684555
- [10] *Zhang C., Lubyshev D., Jackson T.N., Miller D.L., Mayer T.S.* // *J. Electrochem. Soc.* 1999. Vol. 146. N 4. P. 1597–1601. DOI: 10.1149/1.1391811
- [11] *Arslan D., Dehe A., Hartnagel H.L.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1999. Vol. 17. N 2. P. 784–787. DOI: 10.1116/1.590640
- [12] *Moran P.D., Hansen D.M., Matyi R.J., Redwing J.M., Kuecha T.F.* // *J. Electrochem. Soc.* 1999. Vol. 146. N 9. P. 3506–3509. DOI: 10.1149/1.1392505
- [13] *Clawson A.R.* // *Mater. Sci. Eng.* 2001. Vol. 31. N 1–6. P. 1–438. DOI: 10.1016/S0927-796X(00)00027-9
- [14] *Solar cells and their applications* / Ed. by L. Fraas, L. Partain. Second Edition. Hoboken, New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., 2010. 648 p. ISBN: 978-0-470-44633-1
- [15] *Wanlass M., Ahrenkiel R.K., Albin D.S., Car Wanlass M.W.J., Duda A., Emery K., Friedman D., Geisz J.F., Jones K.M., Kibbler A.E., Kiel J., Kurtz S., McMahon W.E., Moriarty T., Olson J.M., Ptak A.J.* *Monolithic, Ultra-Thin GaInP/GaAs/GaInAs Tandem Solar Cells*. In: *Proc. 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, USA, 2006*. P. 729. DOI: 10.1109/WCPEC.2006.279559

- [16] Patel P., Aiken D., Boca A., Cho B., Chumney D., Clevenger M.B., Cornfeld A., Fatemi N., Lin Y., McCarty J., Newman F., Sharps P., Spann J., Stan M., Steinfeldt J., Strautin C., Varghese T. // IEEE J. Photovolt. 2012. Vol. 2. N 3. P. 377–381. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2198048
- [17] Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины: справочник. Первое издание. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [18] Дриц М.Е., Будберг П.Б., Бурханов Г.С., Дриц А.М., Пановко В.М. Свойства элементов. Справочник. Металлургия. Первое издание. М.: Metallurgy, 1985. 671 с.
- [19] Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов. Второе издание. М.: Metallurgy, 1987. 208 с.
- [20] Blakemore J.S. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 10. P. R123–R181. DOI: 10.1063/1.331665
- [21] Bertness K.A., Kurtz S.R., Friedman D.J., Kibbler A.E., Kramer C., Olson J.M. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. N 8. P. 989–991. DOI: 10.1063/1.112171