

07

Трехкаскадный InGaP/GaAs/Ge фотоэлектрический преобразователь с утоненной германиевой подложкой

© М.А. Путьято,¹ В.В. Преображенский,¹ Б.Р. Семягин,¹ Н.В. Протасевич,¹ И.Б. Чистохин,¹ М.О. Петрушков,¹ Е.А. Емельянов,¹ А.В. Васев,¹ А.Ф. Скачков,² В.В. Олейник,² С.В. Янчур,³ А.В. Дрондин³

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

² Акционерное общество „Сатурн“, 350072 Краснодар, Россия

³ Государственный научный центр „Центр Келдыша“, 125438 Москва, Россия
e-mail: putya@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 26 января 2024 г.

В окончательной редакции 13 марта 2024 г.

Принято к публикации 25 марта 2024 г.

Обсуждены проблемы создания легких гибких InGaP/GaAs/Ge фотоэлектрических преобразователей с утоненной германиевой подложкой. Рассмотрены подходы к их решению. На базе стандартного фотоэлектрического преобразователя с форм-фактором 40×80 mm и стеклом радиационной защиты толщиной $120 \mu\text{m}$ реализована конструкция легкого гибкого солнечного элемента с подложкой Ge, утоненной до $\sim 10 \mu\text{m}$. Удельный вес экспериментальных образцов $\sim 0.6 \text{ kg/m}^2$, предельный радиус изгиба — ~ 54 mm. Для спектра АМ0 и температуры 28°C эффективность преобразования составляет 27.6% при факторе заполнения $\sim 83.8\%$. Пассивация поверхности утоненной подложки германия путем осаждения атомов кремния в количестве нескольких атомных слоев при температуре ниже 80°C снижает рекомбинационные потери преобразователя.

Ключевые слова: космические солнечные элементы, массогабаритные характеристики, тонкие солнечные элементы, проблемы создания тонких солнечных элементов.

DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57817.21-24

Введение

Повышение уровня сложности текущих и перспективных научных и прикладных задач, решаемых в космосе, а также расширение их перечня предполагают наращивание энерговооруженности космических аппаратов (КА). Основным первичным источником энергии для КА служат солнечные батареи (СБ). В [1] дан обзор развития СБ КА и предложена классификация их современных конструкций, определены тенденции их эволюции. В работе другого авторского коллектива [2] представлены результаты расчетов основных абсолютных и относительных эксплуатационных характеристик современных и перспективных СБ для КА. Систематизированная информация о современных конструкциях СБ, их фотогенерирующих частях (ФГЧ) и разработках в сфере космической сборки конструкций и аддитивных технологий приведена в [3]. Согласно [1–3] одним из основных путей повышения энерговооруженности КА является качественное улучшение массоэнергетических и массогабаритных характеристик СБ, а также уменьшение их объемов в транспортном положении. Достигается это за счет повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), снижения удельной массы ФГЧ и обеспечения более плотной укладки СБ.

Перспективным материаловедческим решением по повышению эффективности ФЭП является использование многокаскадных гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на основе соединений $A^{III}B^V$, которые позволяют создавать преобразователи с лучшими значениями удельных массовых, габаритных и объемных характеристик мощности [1–4].

Снизить удельный вес СБ можно за счет использования легких и гибких ФГЧ, структурной единицей которых являются ФЭП, изготовленные на базе ГЭС соединений $A^{III}B^V$, с утоненной или полностью удаленной подложкой (см., например, [5–7]). В процессе изготовления легких гибких ФЭП (ЛГФЭП) частично или полностью освобожденная от подложки ГЭС переносится на более легкий композитный носитель. Повышенная гибкость таких ФЭП позволяет применять конструкторские решения, обеспечивающие большую компактность СБ в транспортном положении.

Достичь предельного снижения удельного веса ЛГФЭП при прочих равных условиях можно в случае полного удаления подложки. Утонение же подложки целесообразно применять в случае, когда ее отсутствие критически снижает эффективность и/или надежность преобразователя. Следует отметить, что предельная гибкость ЛГФЭП в значительной мере определяется толщи-

ной хрупкого покровного стекла, которая варьируется от $50\text{--}150\ \mu\text{m}$ [6].

Теме создания ЛГФЭП с полностью удаленной подложкой посвящено подавляющее количество исследований. В настоящее время в развитии находятся несколько материаловедческих и технологических направлений. С точки зрения возможности наращивания эффективности лидируют ФЭП на основе инвертированных метаморфных ГЭС с InGaAs длинноволновым каскадом или ГЭС с разбавленными нитридами GaInNAs или GaInAsNSb и прямой архитектурой слоев [1–4,7]. Технология изготовления ЛГФЭП на базе инвертированных метаморфных ГЭС с InGaAs каскадом достигла достаточно высокого уровня. Ряд производителей рекламируют свою продукцию [8–10], а с 2017 г. NASA на МКС ведет испытания гибких рулонных СБ ROSA (Roll Out Solar Array), изготавливаемых на основе подобных ЛГФЭП [1]. Отметим, что исследования, направленные на совершенствование конструкции и технологии изготовления ЛГФЭП на основе инвертированных метаморфных структур, продолжают (см., например, [11]). Реализация же на промышленном уровне технологии изготовления ФЭП на базе ГЭС со слоями разбавленных нитридов возможна лишь в долгосрочной перспективе. Это обусловлено недостаточным уровнем развития технологии молекулярно-лучевой эпитаксии каскадов с разбавленными нитридами, а также необходимостью решения проблем по совмещению методов молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и МОС-гидридной эпитаксии в едином технологическом комплексе.

Идея ЛГФЭП с утоненной подложкой реализуется в мире на базе гетеросистемы InGaP/GaAs/Ge, в которой третий каскад формируется за счет автолегирования подложки германия при выращивании на ней слоев соединений $A^{III}B^V$. Теме InGaP/GaAs/Ge ФЭП с утоненной подложкой посвящены не только научные статьи, но и диссертации [12,13]. Промышленное производство таких ФЭП в мире хорошо освоено [4], тем не менее исследовательские работы по развитию этой тематики продолжают и в настоящее время [12,14]. Перечисленные обстоятельства, а также данные работ научного и прикладного плана [15–18] обуславливают привлекательность гетероструктур InGaP/GaAs/Ge в качестве основы ЛГФЭП с утоненной подложкой.

В настоящее время для решения рядовых космических задач AZUR и CESI SpA предлагают InGaP/GaAs/Ge ФЭП с толщиной полупроводниковой части $80 \pm 20\ \mu\text{m}$. Технические характеристики таких ФЭП имеются в свободном доступе на их официальных сайтах [19,20]. В [6] сообщается, что для важных космических миссий AZUR может поставлять облегченные версии преобразователей с толщиной полупроводниковой части $20\text{--}50\ \mu\text{m}$. Отмечается, что разработанная технология ограничивается суммарной толщиной слоев InGaP/GaAs и Ge в $20\ \mu\text{m}$. Обычно толщина ГЭС достигает $\sim 5\ \mu\text{m}$, следовательно, минимальная толщина Ge составляет $\sim 15\ \mu\text{m}$. Но данная толщина далека от значений, меньше которых

начинается значимая деградация характеристик германиевого каскада. Так, в работах [17,18] утверждается, что толщина Ge может быть уменьшена до $7\ \mu\text{m}$ без критического снижения эффективности ФЭП. Настоящая работа посвящена решению проблем создания InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП с подложкой германия, утоненной до толщины меньше $\sim 15\ \mu\text{m}$.

1. Проблемы создания конструкции и технологии изготовления InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП

Рассмотрим проблемы создания InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП с подложкой германия, утоненной до толщины $\sim 15\ \mu\text{m}$ и меньше. Одной из таких проблем является нарастание рекомбинационных потерь на тыльной стороне германиевого каскада по мере уменьшения толщины германиевой подложки [17]. Это затрудняет достижение максимального уровня улучшения массоэнергетических характеристик ЛГФЭП за счет уменьшения его удельного веса. Необходимо предпринимать меры по снижению концентрации центров рекомбинации неосновных носителей и созданию барьера для них на тыльной стороне германиевой подложки. Снизить концентрацию центров рекомбинации можно путем удаления окислов германия с поверхности подложки непосредственно перед формированием омического контакта в установке нанесения металлов, например, методом ионной бомбардировки. Дополнительная пассивация поверхности германия, очищенной от окислов, возможна с помощью слоев аморфного и эпитаксиального кремния [21–24]. Но сложность заключается в том, что предлагаемые в литературе методы с осаждением слоев кремния предполагают нагрев подложки германия до температуры выше 300°C . Для композитного объекта, коим является ЛГФЭП (см. ниже), подобный нагрев недопустим. Известные способы формирования тыльного барьера имеют те же температурные ограничения по применимости. Например, в работе [25] омический контакт и тыльный барьер отдельного германиевого преобразователя формируются одновременно путем напыления слоя Al и последующего отжига изделия до 426°C . Отметим, что создание омического контакта к германию *p*-типа не является сложной задачей, и его формирование не требует значительного нагрева изделия (см., например, [26]).

По своему строению InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП представляет собой тонкопленочную многослойную композитную структуру, слои которой соединены между собой силами адгезии различной природы. Используемые для создания компонентов ЛГФЭП материалы значительно различаются между собой по своим физическим, химическим и технологическим свойствам, что существенно усложняет проектирование и технологию изготовления преобразователя. В [27], посвященной обсуждению конструкции и технологии изготовления двухкаскадных ЛГФЭП на основе InGaP/GaAs/Ge ГЭС с полностью

удаленной подложкой германия, авторами подробно рассматривались вопросы термомеханических напряжений, технологической стойкости преобразователя, а также роли полимерных материалов в компенсации напряжений. Отметим, что в случае полного удаления германиевой подложки ЛГФЭП приобретает высокую гибкость [27], лимитированную исключительно гибкостью покровного стекла. Это обусловлено большим деформационным потенциалом $A^{III}B^V$ ГЭС толщиной $\sim 5 \mu\text{m}$. Но опыт [27] не может быть полностью перенесен на ЛГФЭП с утоненной подложкой германия. Проблема заключается в хрупкости германиевого слоя, которая проявляется даже после его утонения до $15 \mu\text{m}$ и меньше.

Несущим элементом конструкции ЛГФЭП, в значительной мере обуславливающим его прочностные характеристики, является пленочный полимерный носитель. Наиболее часто в качестве основы для гибкого носителя используются полиимидные пленки. Этот материал обладает требуемой радиационной стойкостью, высокими механическими и температурными характеристиками. Его используют для изготовления деталей аэрокосмической техники и гибкой электроники как самостоятельно, так и в составе композитов. Более подробно достоинства и недостатки использования полиимидной пленки в качестве основы для гибкого носителя рассмотрены в [27]. Там же предложены способы компенсации недостатков полиимидной пленки как на конструктивном, так и на технологическом уровнях.

При разработке конструкции и технологии изготовления ЛГФЭП приходится решать задачи по упрочнению и защите периферии утоненной гетероструктуры и мест крепления к ней электрических выводов. Критической операцией при изготовлении InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП является присоединение электрических выводов к слоям тыльной металлизации утоненной гетероструктуры, закрепленной на покровном стекле через слой упругого полимера. Экстремальная хрупкость полупроводникового полотна, и в особенности его краевой консоли, налагает дополнительные ограничения на допустимый уровень локальных тепловых и механических нагрузок при соединении выводов со слоем металлизации. Следует отметить, что конструкция гибкого носителя и электрического вывода тыльного контакта ЛГФЭП в значительной мере будут определяться конкретными особенностями архитектуры гибкой ФГЧ и СБ в целом. Например, в работе [15] был предложен вариант организации вывода тыльного контакта через отверстия, равномерно распределенные в фольгированном полотне полимерного носителя по всей поверхности ФЭП. Коммутация тыльного контакта с фольгированной наружной поверхностью гибкого носителя осуществляется пайкой индием через эти отверстия. При этом фольгированная поверхность может быть использована для формирования элементов проводниковой инфраструктуры. Авторы успешно реализовали описанный способ подсоединения вывода к тыльному контакту на фрагменте серийно выпускаемого на AZUR ФЭП после утонения подложки

германия до $\sim 50 \mu\text{m}$. Возможность применение такого подхода при толщине подложки германия менее $20 \mu\text{m}$ неочевидна и требует проверки.

С целью снижения вероятности разрушения утоненного ФЭП в процессе технологических манипуляций его необходимо закреплять на временном носителе [16,18]. Функцию временного носителя может выполнять покровное стекло. Данный подход предложен в работе [6]. Авторы отмечают, что укрепления покровным стеклом требуют ФЭП с полупроводниковой частью, утоненной до толщин $50 \mu\text{m}$ и менее. В [16] предлагается использовать технологический носитель даже в случае, когда утоняемый ФЭП уже оснащен покровным стеклом.

Основной проблемой метода утонения подложки большой площади путем ее растворения является подбор состава травителя и режимов травления. Травитель должен обладать высокой планарной однородностью вертикальной скорости травления вне зависимости от характера и степени развитости рельефа поверхности на макро- и микроуровнях. Желательно, чтобы исходный рельеф поверхности сохранялся в процессе травления без видимого изменения его планарных и вертикальных характеристик вплоть до полного удаления материала подложки. В таком случае появляется возможность формирования рассеивающих свет элементов на поверхности подложки перед ее утонением и их сохранения в процессе утонения. Зависимость скорости растворения от времени не является критической характеристикой. Важно, чтобы травитель обладал низкой селективностью по отношению к структурным дефектам, понижающим ГЭС (дислокациям, дефектам упаковки, микротрещинам и т.д.).

Для удаления и утонения германиевой подложки обычно используют травители на основе фтористоводородной [28–30] или ортофосфорной кислот [16,27,31]. Использование травителей на основе фтористоводородной кислоты не желательно, так как она проявляет высокую активность по отношению ко многим конструкционным материалам, а также к тканям человеческого организма. Поэтому необходимо надежно защитить покровное стекло, торцевую поверхность ГЭС и германиевого $p-n$ -перехода от разрушающего воздействия травителя. Более предпочтительными являются травители на основе ортофосфорной кислоты. Вне зависимости от состава травителя для утонения подложки целесообразно использовать технику химико-динамического травления (см., например, [30]). Ранее для полного удаления подложки Ge мы применяли двухступенчатую технологию химико-динамического травления [27]. Подобранные в [27] режимы в целом соответствуют требованиям, сформулированным выше.

Отметим, что экспериментальные исследования, направленные на решение проблем создания конструкции и технологии изготовления ЛГФЭП, обычно реализуются на модельных образцах упрощенной конструкции с относительно малыми размерами. Удачно реализованные по упрощенной схеме подходы не всегда

могут быть успешно воспроизведены применительно к полноформатным ФЭП. Поэтому поисковые работы целесообразно выполнять на базе стандартных полноформатных ФЭП. Также важно, чтобы предлагаемые решения обладали потенциалом их адаптации к условиям серийного производства ФЭП.

2. Конструкция экспериментального InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП

Конструкция и технология изготовления экспериментального ЛГФЭП были разработаны на основе серийно выпускаемого на АО „Сатурн“ InGaP/GaAs/Ge преобразователя солнечной энергии с форм-фактором $40 \times 80 \text{ mm}$ и подложкой германия толщиной $145 \mu\text{m}$. Исходные ФЭП, использованные для изготовления ЛГФЭП, были оснащены стеклом радиационной защиты толщиной $120 \mu\text{m}$, электрическими выводами лицевого контакта и шунтирующего диода, но не имели тыльных слоев омического контакта и металлизации. Изготовление исходных ФЭП было выполнено полностью по стандартной технологии с применением стандартных комплектующих и материалов.

Компоновочная схема экспериментального ЛГФЭП представлена на рис. 1. Толстой контурной линией выделен стандартный ФЭП с утоненной подложкой германия. Архитектура ЛГФЭП строится вокруг полупроводниковой гетероструктуры. Здесь и далее под гетероструктурой подразумевается комплекс, состоящий из подложки германия 1 и ГЭС $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ 2. На верхней стороне ГЭС сформирована система лицевых контактов 5 и антиотражающее покрытие (на рисунке не показано). К сетке лицевых контактов подсоединены гибкие электрические выводы 6. Лицевая сторона ФЭП закрыта покровным стеклом радиационной защиты 4. Покровное стекло крепится с помощью прозрачного клея 3. На обратной стороне утоненной германиевой подложки сформирован сплошной омический контакт и нанесены слои тыльной металлизации 11, к которым подсоединен гибкий электрический вывод 16. Торцевая периферия ГЭС и Ge $p-n$ -перехода защищены слоем диэлектрика 10. Несущей основой ЛГФЭП является композитный гибкий носитель 14, формируемый на базе полимерной пленки. Гибкий носитель крепится к тыльной стороне ФЭП через слой адгезива 13. В конструкции учтена необходимость повышения надежности крепления лицевых электрических выводов. С этой целью основания выводов крепятся клеевой стяжкой 7 к стеклу и слою прозрачного клея, выдавливаемого в некотором количестве из зазора между стеклом и гетероструктурой при их сопряжении на этапе изготовления исходного ФЭП. Перед формированием стяжки на места крепления наносится реагент, повышающий адгезию материалов. Дополнительно защищена вся периферия утоненного ФЭП от физико-химического и механического воздействия в процессе изготовления и испытаний

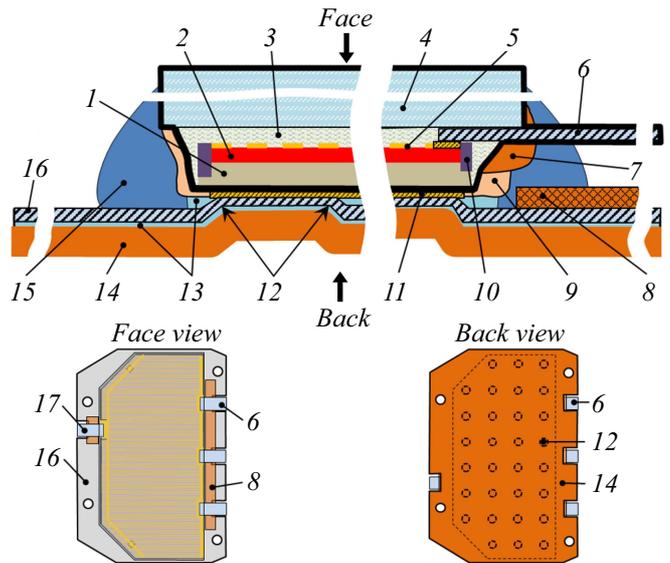


Рис. 1. Компоновочная схема экспериментального ЛГФЭП: 1 — утоненная подложка Ge, 2 — $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ГЭС, 3 — прозрачный клеевой слой, 4 — стекло, 5 — лицевой контакт, 6 — гибкий вывод лицевого контакта, 7 — дополнительное крепление вывода лицевого контакта, 8 — изолирующая прокладка, 9 — упрочнение периферии утоненного ФЭП, 10 — слои пассивации периферии ГЭС и $p-n$ -перехода германиевого каскада, 11 — тыльный контакт, 12 — контактная площадка вывода тыльного контакта, 13 — силиконовый компаунд, 14 — полиимидная пленка, 15 — дополнительная фиксация периферии утоненного ФЭП к носителю, 16 — вывод тыльного контакта, 17 — вывод шунтирующего диода.

ЛГФЭП 9. Предусмотрено усиление крепления ФЭП к гибкому носителю по периферии покровного стекла с целью снижения вероятности расслаивания композитной структуры ЛГФЭП под воздействием нагрузок, возникающих при его изгибании и скручивании 15.

Гибкий носитель и вывод тыльного контакта собраны в единую композитную тонкопленочную конструкцию. Несущей основой конструкции является полиимидная пленка толщиной $25 \mu\text{m}$ 14, к которой приклеивается алюминиевая фольга толщиной $10 \mu\text{m}$. На композитном полотне гибкого носителя формируется равномерно распределенный массив выпуклостей, выступающих на высоту $20 \mu\text{m}$ над его плоскостью со стороны алюминиевого слоя. Вершины выпуклостей 12 являются контактными площадками вывода. Распределение контактных площадок по тыльной поверхности ФЭП показано на изображении тыльной стороны ЛГФЭП (см. „Back view“ на рис. 1). Механический электрический контакт между выводом и слоем металлизации ЛГФЭП создается путем прижатия массива контактных площадок к слою тыльной металлизации 11 в процессе приклеивания гибкого носителя к ФЭП в вакуумных условиях. Усилие прижатия упругих контактных площадок к тыльной металлизации обеспечивается деформацией их трехмерного профиля. Фиксация гибкого носителя к ФЭП осуществляется

с помощью клеевого слоя, нанесенного на плоскую алюминиевую поверхность между выпуклостями.

3. Изготовление образцов ЛГФЭП

Изготовлены две группы образцов. Одна — без утонения германиевой подложки, а другая — с ее утонением. Каждая группа содержит образцы как с подслоем кремния, так и без подслоя. Группа неутоненных ФЭП состоит из двух образцов. Образец с подслоем кремния обозначается как A^{Si} , а без подслоя — A . В группу ЛГФЭП входят 4 образца. Два с подслоем кремния (B_1^{Si} и B_2^{Si}) и два без подслоя кремния (B_1 и B_2). Образцы с утоненной германиевой подложкой отличаются друг от друга по толщине германиевого каскада (D) и количеству осажденного кремния (Q). В качестве единицы измерения Q выбран атомный слой (atomic monolayer — AML). Один AML соответствует количеству атомов, необходимому для заполнения всех узловых решеточных позиций на грани Ge(001). Данные по остаточным толщинам германиевых подложек и количеству осажденного кремния приведены в табл. 1 (см. разд. 4).

3.1. Утонение подложки

Маршрут изготовления ЛГФЭП начинается с утонения германиевой подложки. Утонение выполняется методом химико-динамического травления в растворе на основе ортофосфорной кислоты, перекиси водорода и воды. ФЭП крепится на многообразовом пленочном технологическом носителе с помощью слоя липкости на основе кремнийорганических соединений. Технологический носитель с ФЭП помещается на предметный столик установки травления. В процессе утонения столик совершает плоскопараллельное планетарное движение относительно наклонной оси вращения ванны травления. Ванна содержит дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие интенсивное движение жидкости над поверхностью германиевой подложки. Время удаления $135 \mu\text{m}$ германия составляет около 3.5 h. В процессе травления раствор не обновляется. Средняя скорость травления равна $\sim 0.62 \mu\text{m}/\text{min}$ при 23°C . Состав травителя, температура раствора, режимы его перемешивания и течения над поверхностью образца обеспечивают равномерное удаление германия по всей поверхности ФЭП. Максимальный перепад высот оставшейся части подложки при удалении $\sim 140 \mu\text{m}$ материала оценивается приблизительно в $5 \mu\text{m}$.

Контроль количества удаленного материала осуществляется с помощью легкосъемного образца спутника, который крепится в непосредственной близости от одной из сторон ФЭП. Спутник готовился путем приклеивания гетероструктуры без покровного стекла к кремниевой оправке с помощью беззасадочного эпоксидного клея. При удалении $\sim 75\%$ подлежащего растворению германия производится контрольное измерение толщины

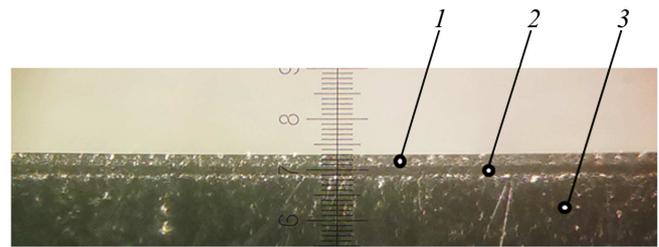


Рис. 2. Поперечный срез образца-спутника с утоненной до $\sim 11 \mu\text{m}$ InGaP/GaAs/Ge гетероструктурой без антиотражающих слоев и лицевой контактной инфраструктуры. Цена деления линейки $5 \mu\text{m}$. 1 — гетероструктура, слой $A^{III}B^V$ ГЭС и германиевая подложка имеют одинаковый контраст, 2 — слой клея, 3 — кремниевая оправка.

образца спутника и рассчитывается время, необходимое для завершения процесса. Измерение толщины производится с помощью микрометра. Финальный контроль толщины оставленного слоя германия можно осуществлять методами оптической микроскопии с использованием шлифов поперечного скола образца-спутника. На рис. 2 представлена фотография поперечного среза образца-спутника с $D \approx 6.5 \mu\text{m}$.

3.2. Пассивация поверхности германия атомами кремния

Проведены эксперименты по пассивации окисленной поверхности утоненной подложки германия сверхтонкими слоями кремния, формируемыми из атомарного потока в условиях сверхвысокого вакуума при температуре не выше 80°C . Пассивация выполнялась перед нанесением омического контакта и слоев металлизации.

Образцы перед загрузкой в вакуум обрабатывались в травителе на основе ортофосфорной кислоты, состав которого отличался от состава травителя, используемого для утонения подложки. Обработка проводилась с целью создания на поверхности германия рельефа, удовлетворяющего требованиям эпитаксии из молекулярных потоков в двумерно-слоевом режиме, а также для формирования тонкого окисного слоя.

Слой кремния выращивались в установке МЛЭ соединений $A^{III}B^V$. Для создания потока атомов кремния использовался тигельный источник, предназначенный для легирования слоев соединений $A^{III}B^V$. Скорость осаждения кремния составляла 0.017 AML/s (atomic monolayer per second). Специальный нагрев образцов не осуществлялся, но за счет теплового излучения источника кремния температура образцов повышалась до значений, не превышающих 80°C . Отметим, что образцы, содержащие полимерные материалы, используемые для изготовления ЛГФЭП, могут быть нагреты до 160°C без нарушения условий сверхвысокого вакуума, что было выяснено в результате предварительных экспериментов.

Состояние поверхности германия в установке МЛЭ контролировалось методом дифракции быстрых элек-

Таблица 1. Характеристики образцов ФЭП и ЛГФЭП

Образец	D μm	Q AML	I_{SC} , А	U_{OC} , В	I_{Pmax} , А	U_{Pmax} , В	P_{max} , W	FF , %	η_{max} %
C	145	0	0.516	2.686	0.499	2.42	1.208	87.13	29.3
A	145	0	0.518	2.661	0.498	2.348	1.169	84.84	28.36
A^{Si}	145	6	0.520	2.652	0.499	2.348	1.172	82.02	28.43
B_1	~ 15	0	0.523	2.622	0.490	2.263	1.109	80.80	26.89
B_2	~ 8	0	0.520	2.609	0.481	2.263	1.089	80.16	25.82
B_1^{Si}	~ 10	6	0.520	2.613	0.497	2.292	1.139	83.78	27.60
B_2^{Si}	~ 10	9	0.522	2.575	0.501	2.264	1.134	84.45	27.52

тронов на отражение (ДБЭО). На картине ДБЭО от исходной поверхности наблюдались относительно интенсивные и узкие линейные рефлексы от грани Ge (001) без сверхструктурных особенностей. Точечные рефлексы от дифракции на просвет и признаки фазетирования поверхности отсутствовали во всех азимутах. В процессе осаждения первых 2–3 AML четкость линейные рефлексов несколько возрастала. При дальнейшем увеличении Q начинал нарастать диффузный фон.

На формирование омического контакта и слоев металлизации образцы с осажденным кремнием передавались после их выдержки при нормальных условиях на атмосфере в течение суток. Дополнительная химическая обработка и ионная очистка образцов с подслоем кремния не выполнялась.

3.3. Формирование омического контакта и слоев металлизации

Несплавной омический контакт на образцах как с подслоем кремния, так и без подслоя кремния формировался на основе титана путем вакуумного напыления. Температура образцов не превышала 80°C . Неконтролируемый нагрев образцов обусловлен тепловым излучением источников металлов. Общая толщина слоев тыльной металлизации не превышала $0.5\mu\text{m}$. Образцы без подслоя кремния перед загрузкой в вакуум обрабатывались в травителе на основе ортофосфорной кислоты и дополнительно очищались путем ионной бомбардировки непосредственно перед формированием омического контакта. Состав травителя и режимы обработки идентичны подготовке образцов к нанесению кремния.

3.4. Сборка ЛГФЭП

После нанесения слоев металлизации к образцам приклеивался гибкий носитель с выводом тыльного контакта. Соединение гибкого носителя с ФЭП выполнялось путем вакуумного ламинирования. Для этого из зазора между гибким носителем и ФЭП удалялась атмосфера. Затем к гибкому носителю прилагалась равномерно распределенная нагрузка, создаваемая давлением атмосферы через силиконовую мембрану. В случае неутоненных образцов гибкий носитель и внешний вывод тыльного

контакта не использовался, так как прочность толстой германиевой подложки позволяла выполнять измерения без риска повреждения гетероструктуры с тыльной стороны, а проведение испытаний на изгиб данных образцов не предполагалось.

4. Свойства экспериментальных ЛГФЭП

4.1. Вольт-амперные характеристики образцов

Образцы ЛГФЭП и ФЭП с неутоненной подложкой были испытаны на имитаторе солнечного излучения АМО постоянного горения при температуре предметного столика 28°C . Для фиксации ЛГФЭП на предметном столике использовался вакуумный прижим. В условиях непрерывной засветки был возможен некоторый перегрев полупроводниковой части ЛГФЭП по отношению к температуре предметного столика из-за наличия между ней и предметным столиком гибкого композитного носителя. Но в силу малой толщины гибкого носителя (несколько десятков μm) и входящего в его состав слоя алюминиевой фольги, обладающей хорошей теплопроводностью, возможный перегрев в рассматриваемом случае не был.

В табл. 1 представлены основные фотоэлектрические характеристики экспериментальных образцов и контрольного (стандартного) ФЭП, обозначенного в таблице символом C : ток короткого замыкания — I_{SC} ; напряжение холостого хода — U_{OC} ; ток и напряжение в точке максимальной мощности — I_{Pmax} и U_{Pmax} соответственно; максимальная мощность — P_{max} ; фактор заполнения ВАХ — FF ; эффективность преобразователя в точке максимальной мощности — η_{max} . Приведены также данные по толщинам германиевых каскадов D и количеству осажденного кремния Q .

На рис. 3 показаны ВАХ неутоненных образцов A и A^{Si} , а также контрольного ФЭП C . Свойства образцов типа A очень близки друг к другу (см. линии 2 и 3). Некоторое увеличение значения η_{max} при переходе от A к A^{Si} (табл. 1) нельзя однозначно связать с влиянием прослойки кремния.

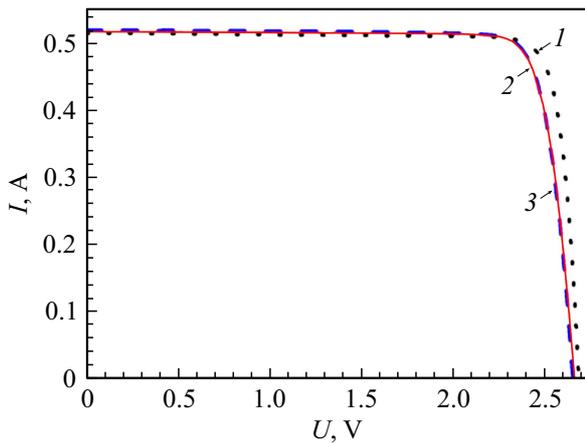


Рис. 3. ВАХ ФЭП с неутоненной подложкой: 1 (точки) — образец С; 2 (сплошная линия) — ФЭП без подслоя кремния, А; 3 (штрихи) — ФЭП с подслоем кремния, А_{Si}.

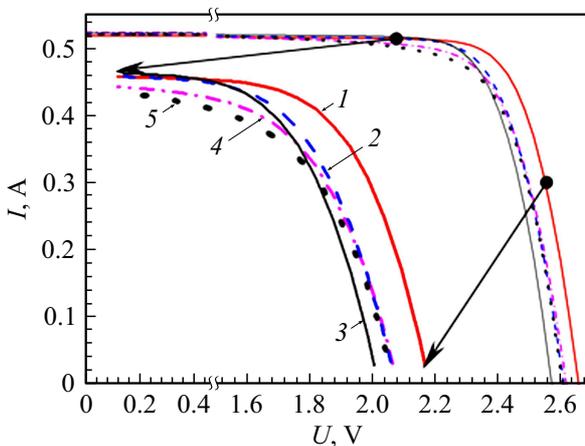


Рис. 4. ВАХ: 1 (толстая линия) — образец А, 2 (штрихи) — B_1^{Si} , 3 (тонкая линия) — B_2^{Si} , 4 (штрихпунктир) — B_1 , 5 (точки) — B_2 .

Наблюдаемое отличие ВАХ образцов А и A^{Si} от характеристик контрольного образца обусловлено наличием в них последовательного сопротивления, что объясняется, вероятно, малой толщиной слоев металлизации ФЭП А и A^{Si} . Их тыльная металлизация составляла всего $\sim 0.5 \mu\text{m}$, в отличие от металлизации образца С в несколько μm .

ВАХ ЛГФЭП представлены на рис. 4. Утоненные образцы B_1^{Si} , B_2^{Si} , B_1 и B_2 обладают меньшими значениями напряжения холостого хода по сравнению с образцами типа А (табл. 1). Характеристики образца B_1 с $D = 15 \mu\text{m}$ несколько лучше характеристик образца B_2 с $D = 8 \mu\text{m}$. Отличия наблюдаются в части FF , P_{max} и η_{max} . Но в данном случае нельзя сделать однозначный вывод о том, что отличия в значениях характеристик обусловлены отличиями в толщинах остаточного слоя германия — для этого слишком мало данных по влиянию D на свойства ЛГФЭП.

Сравнение кривых, представленных на рис. 4, и данные табл. 1 позволяют заключить, что образцы ЛГФЭП с подслоем кремния имеют более высокие фотоэлектрические характеристики, чем образцы без подслоя. Обращает на себя внимание низкое значение напряжения холостого хода образца B_2^{Si} по отношению к другим ЛГФЭП (рис. 4, линия 3). Тем не менее значения FF и η_{max} образца B_2^{Si} сравнимы со значениями соответствующих характеристик образца B_1^{Si} . По своему строению образцы B_2^{Si} и B_1^{Si} отличаются только величиной Q . Количество осажденного кремния в случае образца B_2^{Si} в 1.5 раза больше, чем в случае B_1^{Si} (табл. 1).

4.2. Массовые и габаритные характеристики ЛГФЭП

В табл. 2 приведены массовые и габаритные характеристики ЛГФЭП B_1^{Si} , а также его компонентов.

Согласно данным табл. 2, утонение германиевой подложки до $10 \mu\text{m}$ позволяет снизить массогабаритные характеристики преобразователя в рамках реализованных в работе конструкторских и технологических решений в ~ 2 раза по сравнению со стандартным ФЭП. Массоэнергетическая характеристика ЛГФЭП B_1^{Si} в точке максимальной мощности составляет $\sim 632.8 \text{ W/kg}$, а стандартного ФЭП — $\sim 327.40 \text{ W/kg}$.

4.3. Испытание ЛГФЭП на гибкость

Экспериментальный ЛГФЭП был испытан на изгиб с использованием цилиндрической оправки диаметром 108 mm (рис. 5). При испытании одна из коротких сторон ЛГФЭП закреплялась на оправке по кромке стекла полоской липкой ленты. Далее преобразователь последовательно прижимался к оправке путем приложения усилия, распределенного вдоль линии контакта ЛГФЭП с оправкой, с постепенным смещением этого усилия от закрепленного к свободному краю ЛГФЭП. Единичные деформационные циклы видимого влияния на характеристики ЛГФЭП не оказали. Испытания на устойчивость к многократному изгибанию не проводились, так как конструкция и технология изготовления ЛГФЭП на данном этапе исследований под эту задачу не оптимизировались.

Обнаружено, что радиус изгиба 54 mm крайне близок к критическому для данной конструкции ЛГФЭП и толщины стекла $120 \mu\text{m}$. Об этом свидетельствует разрушение стекла вблизи его поперечной оси симметрии при незначительной радиальной деформации оправки, увеличивающей ее кривизну в месте расположения ЛГФЭП. При использовании оправки несколько большего диаметра подобный эффект не наблюдался.

Таблица 2. Массогабаритные характеристики исходного ФЭП, ЛГФЭП B_1^{Si} и его компонентов

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Вес стандартного ФЭП размером 40×80 mm с подложкой германия толщиной $145 \mu\text{m}$, покровным стеклом толщиной $\sim 120 \mu\text{m}$, гибкими выводами и слоями тыльной металлизации	g	~ 3.69
Вес исходного ФЭП размером 40×80 mm с подложкой германия толщиной $145 \mu\text{m}$, покровным стеклом толщиной $\sim 120 \mu\text{m}$, гибкими выводами, но без слоев тыльной металлизации	g	~ 3.45
Площадь исходного и стандартного ФЭП	cm^2	30.17
Площадь покровного стекла исходного и стандартного ФЭП	cm^2	~ 30.41
Толщина ГЭС	μm	~ 4.50
Остаточная толщина подложки германия ЛГФЭП	μm	~ 10
Толщина полотна гибкого носителя (без учета высоты контактных площадок)	μm	~ 50
Общая толщина ЛГФЭП (с учетом высоты контактных площадок)	μm	~ 250
Вес утоненного ФЭП	g	~ 1.28
Вес гибкого носителя ЛГФЭП	g	~ 0.50
Общий вес ЛГФЭП	g	~ 1.80
Вес ЛГФЭП, приведенный к площади исходного ФЭП	kg/m^2	~ 0.60
Вес стандартного ФЭП, приведенный к его площади	kg/m^2	~ 1.22

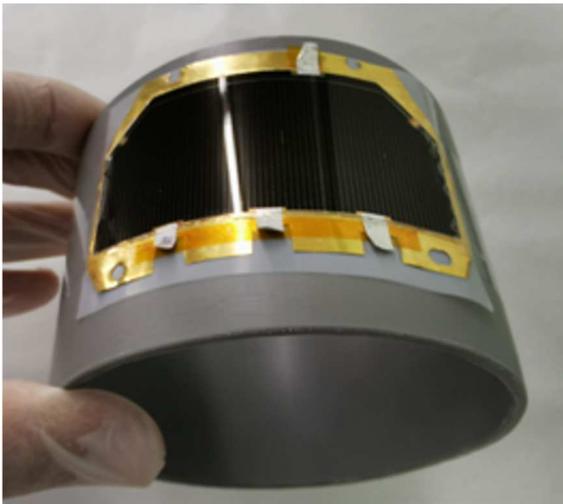


Рис. 5. ЛГФЭП, закрепленный на оправке диаметром 108 mm.

5. Обсуждение результатов

5.1. Конструкция

Архитектура экспериментальных ЛГФЭП не оптимизировались по составу, толщинам и способам сопряжения его компонентов. Предложенные решения носят экспериментальный характер. Так, конструкция гибкого носителя и метод его сопряжения с преобразователем позволили решить задачу надежного присоединения электрических выводов к тыльному контакту ФЭП с утоненной до толщины менее $15 \mu\text{m}$ германиевой подложкой. Предложенный подход пригоден для изготовления экспериментальных образцов полноформатных ЛГФЭП и проведения их испытаний на лабораторном уровне.

Но его применимость для создания ЛГФЭП, предназначенных для эксплуатации в реальных условиях, неочевидна и нуждается в изучении. В целом конструкция ЛГФЭП требует проведения дальнейших комплексных исследований, направленных на ее оптимизацию с целью повышения стойкости преобразователя к различного рода воздействиям, в том числе контактными нагрузкам со стороны гибкого носителя.

5.2. Утонение подложки германия

Приведенная выше оценка неоднородности травления, представленная в виде перепада высот в $5 \mu\text{m}$ при удалении $140 \mu\text{m}$ Ge, вероятно, завышена. Прямой промер толщины образца по его площади с использованием механических средств измерения был затруднен из-за экстремальной хрупкости и низкой жесткости ультратонкой гетероструктуры, лежащей на эластичном клеевом слое толщиной около $25 \mu\text{m}$. Поэтому оценка выполнена по скорости травления и интервалу времени между моментом появления первого окна в германии, открывшего доступ к слоям $A^{III}B^V$, и моментом полного удаления всех видимых невооруженным глазом следов подложки. Измерения толщины образца по его площади при контрольной толщине подложки $\sim 50 \mu\text{m}$ дают оценку перепада высот в $3 \mu\text{m}$ при линейной экстраполяции полученных данных на $140 \mu\text{m}$ удаленного материала. Следует отметить, что утонению целесообразно подвергать ФЭП, на котором уже установлены выводы лицевого контакта и шунтирующего диода. Это требует принятия мер по защите выводов от потоков травящего раствора, а также по снижению локального возмущающего воздействия элементов их защиты на режимы течение жидкости. С целью повышения однородности

травления необходимо усовершенствовать конструкцию установки химико-динамического травления и оптимизировать режимы течения травителя.

Одной из особенностей примененной технологии утонения подложки германия является воспроизводство исходного макрорельефа поверхности без видимого изменения его геометрии вплоть до полного удаления материала. Сохранение рисунка рельефа наблюдается на фоне возрастания отражающей способности поверхности, т.е. происходит выглаживание поверхности на уровне элементов рельефа с размерами меньше $1\ \mu\text{m}$. Вероятно, травление реализуется путем послойного растворения террас с ориентацией (001) при локализации процессов диссоциации материала вдоль их краев.

Основными факторами, определяющими плотность центров рекомбинации, являются состав и структура слоя окисла, а также строение границы раздела между ним и полупроводником. На свойства границы раздела существенное влияние оказывает рельеф поверхности кристалла на уровне атомных террас и их систем. Террасы образуются как за счет отклонением подложки от сингулярной грани (001), так и за счет нарушения плоскостности поверхности. Изрезанность краев террас и наличие мелких ямок и выступов нанометровых размеров на их поверхности являются нежелательными элементами рельефа даже при отсутствии окисла. В этой связи после утонения подложки выполнялось дополнительное финишное травление поверхности германия с целью повышения упорядоченности рельефа поверхности на уровне системы террас.

Как отмечалось выше, на картине ДБЭО от исходной поверхности наблюдались только основные линейные рефлексы от грани (001), при этом точечные рефлексы и признаки фасетирования отсутствовали. Это означает, что поверхность утоненной подложки образована системой террас (001) без трехмерных объектов нанометрового размера, на которых могла бы реализоваться трансмиссионная дифракция и сформироваться фасетки. Наблюдаемая картина ДБЭО позволяет также заключить, что на поверхности присутствует окисный слой малой толщины, о чем свидетельствует относительно высокая интенсивность и малая ширина основных линейных рефлексов при отсутствии сверхструктурных особенностей. Таким образом, подобранный режим химико-динамического травления и дополнительное травление поверхности непосредственно перед помещением образцов в вакуум позволили существенно снизить развитость рельефа на обсуждаемом выше уровне и сформировать тонкий окисный слой.

5.3. Пассивация поверхности германия и фотоэлектрические свойства ЛГФЭП

Выбор способа пассивации окисленной поверхности германия с помощью атомов кремния, осаждаемых в условиях сверхвысокого вакуума из атомарного потока, обусловлен данными работ [21,32,33]. Так, в [21]

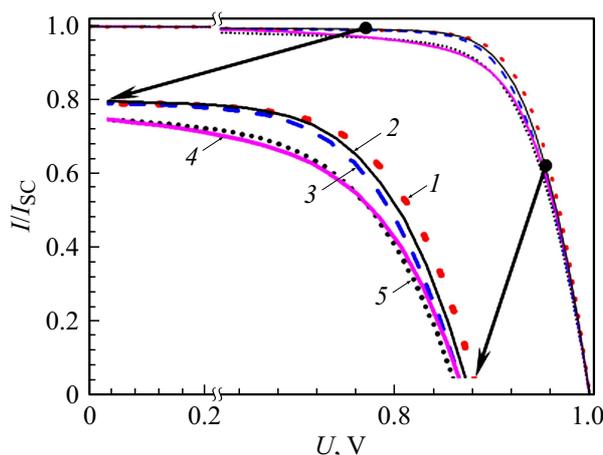


Рис. 6. Нормированные ВАХ: 1 (жирные точки) — образец A^{Si} , 2 (тонкая сплошная линия) — B_2^{Si} , 3 (штрихи) — B_1^{Si} , 4 (толстая сплошная линия) — B_2 , 5 (маленькие точки) — B_1 .

обсуждаются способность эпитаксиальных слоев кремния снижать концентрацию поверхностных состояний германия, а также оптимальные условия формирования таких слоев. Авторами [33] была продемонстрирована высокая восстановительная активность атомов кремния, поступающих на окисленную поверхность GaAs в условиях сверхвысокого вакуума в виде атомарного потока. Оказалось, что атомы кремния способны восстанавливать окислы GaAs даже при комнатной температуре. В работе [32] было показано, что эпитаксиальные пленки кремния толщиной несколько атомных слоев, выращенные методом МЛЭ на поверхностях GaAs (001) и (111), предотвращают окисление кристалла на атмосфере. Мы предполагали, что в результате взаимодействия потока атомов кремния с окисленной поверхностью германия произойдет модификация его окисла с понижением концентрации свободных состояний и сформируется защитная пленка, препятствующая дальнейшему окислению подложки на атмосфере.

Полученные в работе данные позволяют заключить, что атомы кремния, поступающие на поверхность германия в количестве, эквивалентном нескольким атомным слоям, модифицируют окисный слой и препятствуют увеличению его толщины при дальнейшей выдержке на атмосфере. Модификация окисного слоя, предположительно, способствует снижению рекомбинации неосновных носителей на тыльной стороне утоненных подложек германия. На рис. 6 приведены нормированные ВАХ ЛГФЭП и ФЭП с подложкой толщиной $145\ \mu\text{m}$ для АМ0 (табл. 1). ВАХ ЛГФЭП с $D \geq 10\ \mu\text{m}$ образуют две группы линий: {2, 3} и {4, 5}.

ЛГФЭП с подслоем кремния обладают более высокими характеристиками (линии 2, 3 на рис. 6, табл. 1). В нашей работе детальный анализ ВАХ не выполнялся, так как мала статистика образцов по каждой группе. Необходим совместный анализ ВАХ большего количества идентичных по конструкции ЛГФЭП с учетом

нюансов технологии их изготовления и состояния периферии утоненной гетероструктуры.

Обсудим возможный механизм влияния атомов кремния на окисный слой поверхности германия, опираясь на данные ДБЭО. Учитывая высокую восстановительную способность атомов кремния, можно предположить, что атомы кремния, поступающие на поверхность, вступают в окислительно-восстановительные реакции, меняющие состав и структуру кислородсодержащих слоев, в том числе и на гетерогранице германий–окисел. Эффективность и механизмы обменных гетерогенных реакций контролируются молекулярной формой, в которой кремний поступает на поверхность. Отдельные адсорбированные атомы более эффективно вступают в обменные реакции, а механизм самих реакций проще. При формировании сплошной поликристаллической или аморфной пленки кремния обменные процессы будут происходить уже между твердыми фазами. Их скорость может быть ниже, чем скорость реакций между отдельными адсорбированными атомами и приповерхностными слоями окисла, поэтому плотность потока атомов кремния должна быть согласована со скоростью обменных реакций. Контролировать с высокой точностью процессы массопереноса на поверхности в нашем случае позволил метод МЛЭ. Об изменении структуры окисного слоя при взаимодействии с атомами кремния можно было судить по кратковременному уменьшению ширины линейных рефлексов картины ДБЭО в процессе осаждения первых 2–3 АМЛ. Дальнейший процесс выдержки поверхности в потоке кремния сопровождался постепенным возрастанием диффузного фона картины ДБЭО. Предположительно активная фаза изменения свойств окисла к этому моменту завершалась, и атомы кремния начинали накапливаться на поверхности в виде аморфного или поликристаллического слоя. Определить строение верхней части слоя кремния методом ДБЭО затруднительно из-за его малой толщины.

В работе показано, что количество кремния, осаждаемое на поверхность германия, имеет значение. Об этом свидетельствует снижение напряжения холостого хода в случае образца с $Q \approx 9$ АМЛ относительно образцов с $Q \approx 6$ АМЛ, а также образцов без подслоя кремния (табл. 1, рис. 4). Эффект, вероятно, обусловлен тем, что с повышением толщины кремниевого слоя снижается его туннельная прозрачность, и начинает вносить свой вклад барьер для дырок. Следует отметить, что в установке МЛЭ А^{III}В^V всегда присутствует фон по элементам пятой группы, поэтому слой кремния может захватывать некоторое количество атомов мышьяка или фосфора. В случае монокристаллического или поликристаллического строения пленка кремния может содержать донорные уровни, что в системе Ge/Si может привести к формированию барьера для дырок при переходе от германия к кремнию. Высота барьера будет зависеть от уровня легирования, механических напряжений, толщины пленки кремния и ее структу-

ры [34]. С целью компенсации донорной примеси пленку кремния можно легировать атомами третьей группы.

В работе [25] авторы для единовременного формирования тыльного омического контакта и тыльного барьера отдельного германиевого преобразователя использовали слой алюминия с последующим отжигом образца до 426°С. Из-за высокой температуры отжига напрямую использовать предложенный подход при изготовлении ЛГФЭП нельзя. Напомним, что верхний технологический порог нагрева ЛГФЭП в условиях сверхвысокого вакуума не превышает 160°С. Но атомы алюминия, как и атомы кремния, обладают высокими восстанавливающими свойствами. В этой связи представляет интерес исследование возможности комбинированного использования потоков атомов кремния и алюминия с целью пассивации поверхности, формирования тыльного барьера и омического контакта.

Заключение

Разработана конструкция экспериментальных ЛГФЭП на основе ФЭП InGaP/GaAs/Ge с форм-фактором 40 × 80 mm и толщиной германиевой подложки 145 μm, серийно выпускаемых на АО „Сатурн“. Изготовлены и испытаны образцы ЛГФЭП с утоненными до ~ 15, ~ 10 и ~ 8 μm германиевыми подложками и толщиной покровного стекла ~ 120 μm.

Технология изготовления базируется на результатах анализ литературных данных и имеющегося в ИФП СО РАН опыта изготовления ЛГФЭП на базе структур InGaP/GaAs/Ge с полным удалением подложки германия [27]. Конструкция и технология изготовления экспериментального ЛГФЭП разработаны и реализованы применительно к исходному ФЭП, оснащеному покровным стеклом, электрическими выводами лицевого контакта и шунтирующего диода, но без тыльного омического контакта и слоев металлизации.

Отработана технология химико-динамического утонения германиевой подложки ФЭП. Решены задачи по обеспечению однородности травления, качества получаемой поверхности, сохранения целостности и эксплуатационных характеристик преустановленных конструктивных элементов ФЭП. Перепад высот по поверхности при удалении слоя германия толщиной ~ 140 μm не превышает 5 μm. Травитель готовится на основе ортофосфорной кислоты, перекиси водорода и воды. Средняя по времени скорость травления при выбранных режимах течения жидкости над поверхностью подложки составляет 0.62 μm/min при 23°С. Строение поверхности утоненной подложки германия на микроуровне соответствует требованиям, необходимым для реализации эпитаксиальных процессов с использованием молекулярных потоков.

Проведены эксперименты по пассивации поверхности германия с тонким окисным слоем путем осаждения методом МЛЭ атомов кремния в количестве, эквивалент-

ном нескольким атомным слоям. Показано, что атомы кремния, поступающие на поверхность при температуре ниже 80°C, взаимодействуют с окисным слоем и меняют его свойства. Модификация окисного слоя, предположительно, позволяет снизить рекомбинационные потери на тыльной поверхности утоненной германиевой подложки. Имеется возможность оптимизации условий пассивации поверхности германия в потоке атомов кремния в условиях сверхвысокого вакуума в диапазоне температур от 80 до 160°C.

Испытания на изгибную прочность ЛГФЭП со слоем германия ~ 10 μm показали, что при толщине покровного стекла 120 μm критический радиус изгиба экспериментального преобразователя с габаритными размерами 40 × 80 mm близок к 54 mm. С целью уменьшения радиуса изгиба необходимо уменьшать толщину покровного стекла, например, до 90–50 μm.

Предложенные и апробированные подходы к решению проблем технологии изготовления InGaP/GaAs/Ge ЛГФЭП представляются перспективными и требуют дальнейшего развития по следующим направлениям:

1. Исследование возможности пассивации поверхности германия и формирования на ней тыльного барьера и омического контакта с комплексным применением атомарных потоков кремния и алюминия.

2. Совершенствование ЛГФЭП в части его архитектуры, используемых материалов и технологии изготовления с целью повышения его прочности при изгибных, скручивающих и контактных деформациях со стороны гибкого носителя.

3. Оптимизация режимов химико-динамического утонения подложки с целью повышения однородности скорости травления по ее поверхности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А. Казанцев А.М. Ерошенко, Л.А. Бабкина, А.В. Лопатин. Ракетно-космическая техника, **5** (37), 121 (2021). DOI: 10.26732/j.st.2021.3.01 [Z.A. Kazantsev, A.M. Eroshenko, L.A. Babkina, A.V. Lopatin. Spacecrafts Technol., **5** (3), 121 (2021). DOI: 10.26732/j.st.2021.3.01]
- [2] М.В. Рябцева, А.А. Лебедев, А.А. Наумова, А.М. Болотин, Н.Т. Вагапова, П.Г. Черенков. Инженерный журнал: наука и инновации, **3**, 1 (2022). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-3-2162
- [3] А.В. Дрондин, А.М. Протасов, А.В. Семенкин, А.А. Шевдин, С.В. Янчур. Космонавтика и ракетостроение, **6** (123), 105 (2021).
- [4] Е.В. Слыщенко, А.А. Наумова, А.А. Лебедев, М.А. Генали, Н.Т. Вагапова, Б.В. Жалнин. Сибирский журнал науки и технологий, **19** (2), 308 (2018). DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-308-324
- [5] D. Shahrjerdi, S.W. Bedell, C. Bayram, C.C. Lubguban, K. Fogel, P. Lauro, J.A. Ott, M. Hopstaken, M. Gayness, D. Sadana. Adv. Energy Mater., **3** (5), 566 (2012). DOI: 10.1002/aenm.201200827
- [6] G.F.X. Strobl, L. Ebel, D. Fuhrmann, W. Guter, R. Kern, V. Khorenko, W. Kostler, M. Meusel. Proc. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (Denver, CO, USA, 2014), 3595-3600/2014, DOI: 10.1109/PVSC.2014.6924884
- [7] Н.А. Паханов, В.М. Андреев, М.З. Шварц, О.П. Пчеляков. Автометрия, **54** (2), 93 (2018). DOI: 10.15372/AUT20180211
- [8] THE AIR FORCE RESEARCH LABORATORY. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://afresearchlab.com/technology/space-vehicle/roll-out-solar-arrays> (дата обращения: 05.07.2023)
- [9] MicroLink Devices. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://mldevices.com/index.php/news?start=4> от 24 октября 2017 года (дата обращения: 05.07.2023)
- [10] Sharp Energy Solutions Corporation (SESJ). Электронный ресурс. Режим доступа: <https://global.sharp/solar/en/high-efficiency/> (дата обращения: 05.07.2023)
- [11] J. Schön, M.M. Gunther, W. Bissels, P. Mulder, R.H. van Leest, N. Gruginskie, E. Vlieg, D. Chojniak, D. Lackner. Progr. Photovoltaics: Res. Appl., **30** (8), 1003 (2022). DOI: 10.1002/rip.3542
- [12] А.Ф. Скачков, автореф. канд. т.н. дисс. („Южно-Российский гос. политех. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова“, Новочеркасск, 2021)
- [13] С.А. Минтаиров, автореф. канд. ф-м.н. дисс. (ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе, СПб., 2015)
- [14] А.В. Малевская, Н.Д. Ильинская, Ю.М. Задиранов, А.А. Блохин, Д.А. Малевский, П.В. Покровский. ЖТФ, **92** (1), 108 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.01.51860.220-21. [A.V. Malevskaya, N.D. Il'inskaya, Yu.M. Zadiranov, A.A. Blokhin, D.A. Malevskii, P.V. Pokrovskii. Tech. Phys., **67** (1), 82 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.01.52537.210-21]
- [15] N.F. Pakhanov, M.Z. Shvarts. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4409073> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4409073>
- [16] Н.А. Паханов, О.П. Пчеляков, В.М. Владимиров. Автометрия, **53** (6), 106 (2017). DOI: 10.15372/AUT20170613
- [17] I. Lombardero, M. Ochoa, N. Miyashita, Yo. Okada, C. Algora. Prog. Photovolt. Res. Appl., **28** (11), 1097 (2020). DOI: 10.1002/rip.3281
- [18] C. Colin, A. Jaouad, M. Darnon, M. De Lafontaine, M. Volatier, A. Boucherif, R. Arés, S. Fafard, V. Aimez. AIP Conf. Proceed., 1881, 040001-1 (2017). DOI: 10.1063/1.5001423
- [19] AZUR SPACE Solar Power. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.azurspace.com/images/products/0004148-00-01_DB_GBK_80.m.pdf (дата обращения: 05.07.2023)
- [20] CESI SpA. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.cesi.it/app/uploads/2020/03/Datasheet-CTJ30-Thin.pdf> (дата обращения: 05.07.2023)
- [21] B. De Jaeger, R. Bonzom, F. Leys, O. Richard, J. Van Steenberghe, G. Winderickx, E. Van Moorhem, G. Raskin, F. Letertre, T. Billon, M. Meuris, M. Heyns. Microelectron. Eng., **80**, 6, (2005). DOI: 10.1109/ESSDER.2004.1356521
- [22] J. Liu, L. Gu, N. Cui, S. Bai, S. Liu, Q. Xu, Y. Qin, R. Yang, F. Zhou. Nanoscale Res. Lett., **14**, 1 (2019).

- [23] B. Vincent, R. Loo, W. Vandervorst, J. Delmotte, B. Douhard, V.K. Valev, M. Vanbel, T. Verbiest, J. Rip, B. Brijs, T. Conard, C. Claypool, S. Takeuchi, S. Zaima, J. Mitard, B. De Jaeger, J. Dekoster, M. Caymax. *Solid-State Electron.*, **60** (1), 116 (2011). DOI: 10.1016/J.SSE.2011.01.049
- [24] T. Nagashima, K. Hokoi, K. Okumura, M. Yamaguchi. *IEEE 4th World Conf. Photovoltaic Energy Conf.*, 656 (2006). DOI: 10.1109/WCPEC.2006.279540
- [25] N.E. Posthuma, J. van der Heide, G. Flamand, J. Poortmans. *IEEE Transactions Electron Devices*, **54** (5), 1210 (2007). DOI: 10.1109/TED.2007.894610
- [26] V.P. Kishore, P. Paramahans, S. Sadana, U. Ganguly, S. Lodha. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 142107 (2012). DOI: 10.1063/1.3700965
- [27] М.А. Путьято, Н.А. Валишева, М.О. Петрушков, В.В. Преображенский. *ЖТФ*, **87** (7), 1071 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47802.438-18.27. [М.А. Putyato, N.A. Valisheva, M.O. Petrushkov, V.V. Preobrazhenskii, I.B. Chistokhin, B.R. Semyagin, E.A. Emel'yanov, A.V. Vasev, A.F. Skachkov, G.I. Yurko, I.I. Nesterenko. *Tech. Phys.*, **64**, 1010 (2019). DOI: 10.1134/S106378421907020X]
- [28] Пат. 2787955 С1 Российская Федерация, МПК H01L 31/18, Б.Н. Самсоненко, Н.А. Королева. Заявитель и патентообладатель АО „Сатурн“ (РФ); заявл. 15.09.2021; опубл. 13.01.2023.
- [29] Пат. RU 2703840 С1 Российская Федерация, МПК H01L 31/18, Б.Н. Самсоненко. Заявитель и патентообладатель АО „Сатурн“ (РФ); заявл. 10.01.2019; опубл. 22.10.2019.
- [30] Пат. 2589517 С1 Российская Федерация, МПК H01L 21/306, Б.Н. Самсоненко. Заявитель и патентообладатель АО „Сатурн“ (РФ) и „Ракетнокосмический центр „Прогресс“ (АО „РКЦ „Прогресс“ (РФ); заявл. 23.04.2015; опубл. 10.07.2015.
- [31] Sh. Kagawa, T. Mikawa, T. Kaneda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (11), 1616 (1982). DOI: 10.1143/JJAP.21.1616
- [32] Е.А. Емельянов, А.Г. Настовьяк, М.О. Петрушков, М.Ю. Есин, Т.А. Гаврилова, М.А. Путьято, Н.Л. Шварц, В.А. Швец, А.В. Васев, Б.Р. Семягин, В.В. Преображенский. *Письма в ЖТФ*, **46** (4), 11 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49042.18065. [E.A. Emelyanov, A.G. Nastovjak, M.O. Petrushkov, M.Yu. Esin, T.A. Gavrilova, M.A. Putyato, N.L. Schwartz, V.A. Shvets, A.V. Vasev, B.R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii. *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 161 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020194]
- [33] I. Jiménez, F.J. Palomares, J. Avila, M.T. Cuberes, F. Soria, J.L. Sacedón, K. Horn. *J. Vac. Sci. Technol. A.*, **11**, 1028 (1993). DOI: 10.1116/1.578808
- [34] В.В. Филиппов, А.Н. Власов, Е.Н. Бормонтов. *Конденсированные среды и межфазные границы*, **12** (3), 282 (2010).