

О РАЗВИТИИ ФОТОЭЛЕКТРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ GaInP/GaAs/Ge

Кандидат физико-математических н. Б. В. ЖАЛНИН,
доктор технических наук М. Б. КАГАН,
А. В. НАУМОВ, С. И. ПЛЕХАНОВ (ОАО НПП “Квант”)

Посвящается 95-летию ОАО НПП “Квант”

Солнечная энергетика сегодня

Фотоэнергетика (прямое преобразование солнечной энергии в электричество) в последние годы является одной из самых быстроразвивающихся отраслей мировой экономики. В 2012 г. во всём мире было подключено к сети около 30 ГВт генерирующих мощностей на базе солнечных батарей. Общее количество установленных мощностей в мире превысило 100 ГВт. Солнечная энергетика развивается как в космическом варианте, так и в наземном¹.

Солнечная энергетика в космосе.

НПП “Квант” сегодня занимает важные позиции в области разработки и изготовления солнечных элементов на основе различных полупроводниковых материалов. Кроме того, “Квант” лидирует в области проектирования, изготовления и испытания солнечных батарей для космических аппаратов. История предприятия в сфере космической солнечной энергетики началась в 1955 г. Все работы по фотоэлектрическому преобразованию велись независимо от аналогичных американских работ. В 1958 г. была подготовлена солнечная батарея мощностью в несколько десятков ватт и установлена на борту искусствен-

ного спутника Земли ИСЗ-3, выведенного на космическую орбиту 15 мая 1958 г. Солнечные батареи, разработанные НПП “Квант”, применялись на орбитальных станциях серии “Салют”, “Мир”, автоматических межпланетных аппаратах и станциях серии “Венера”, “Марс”, “Фобос”, автоматических самодвижущихся аппаратах “Луноход-1”, “Луноход-2”. Предприятие участвовало в космических программах “Восток”, “Космос”, “Энергия-Буран”, “Молния”, “Радуга”, “Горизонт”, “Луна”, “Союз-Аполлон”, “Вега”, “Интербол”, “Бхаскара”, “Ариабата”, “Интеркосмос” и ряде других.

Однако развитие космонавтики не стоит на месте. Традиционно используемые на протяжении 50 лет кремниевые солнечные батареи по эффективности и ресурсным возможностям уже не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к новым космическим аппаратам. Сегодня нужны космические энергоустановки мощностью более 30 кВт с максимальными энергоёмкими характеристиками и сроком активного существования более 15 лет при минимальной деградации за это время. Для решения этой задачи в мире на протяжении последних лет разрабатываются и применяются солнечные батареи нового поколения на основе мультискладных наноструктурных солнечных элементов системы InGaP/InGaAs/Ge (индий-галлий-фосфор/индий-арсенид галлия на германии) с КПД до 30%.

Эти тенденции сохраняются и в среднесрочной перспективе, так как из-за дефицита места дальнейшее наращивание

¹ Кульчицкий Н.А., Наумов А.В. Состояние и перспективы тонкоплёночных технологий в солнечной энергетике // *Альтернативный киловатт. 2013. № 1; .Solar PV markets and Industry Today and Tomorrow, Global Vision//EuDP Research. 2011. Доступно: <http://eupd-research.com/.reports>.*

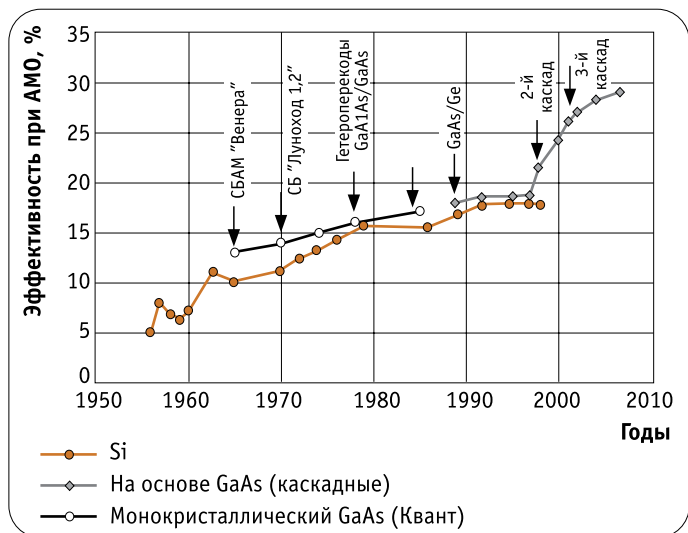


Рис. 1.
Изменение эффективности космических ФЭП разного типа в исторической перспективе.

эффективностью до 30% (рис. 1), использующих арсенид галлия и другие соединения, выращиваемые на германиевой подложке с помощью газофазовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ). На сегодня российские производители космических аппаратов (КА) – ГКНПЦ им. Хруничева, ОАО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва и другие – перешли на каскадные ФЭП на основе GaInP/GaAs/Ge (см. табл.). Доля запускаемых больших энергооборужённых космических аппаратов превысила 20% и постоянно растёт (рис. 2)².

Солнечная энергетика на Земле.
В последние годы проведены разработки по усовершенствованию наземных ФЭП с КПД 33–45% на основе соединений GaInP/

ретрансляционных ресурсов возможно, главным образом, за счёт увеличения мощностей спутников связи. Поэтому на протяжении последних 10 лет интенсивно развивалось новое направление в космической фотоэнергетике: солнечные батареи на основе наноструктурных каскадных фотоэлектропреобразователей (ФЭП) с

² Global Trends in Sustainable Energy Investment 2010 // Bloomberg New Energy Finance, 2010; Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // ФТП. 2004. Т. 38, в. 8; Карлина Л.Б., Власов А.С., Кулагина М.М., Ракова Е.П., Тимошина Н.Х., Андреев В.М. Высокоэффективные фотоэлементы на основе твёрдых растворов $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ с изовалентным легированием // ФТП. 2010. Т. 44, в. 2.

Современные и перспективные типы КА, требования по энергооборужённости

Тип космического аппарата	Назначение	Требования по энерго-вооружённости, кВт	Срок активного существования, лет
Малые КА на низких и промежуточных орбитах	Дистанционное зондирование земли, связь	2–4	5–10
Долговременные орбитальные станции и платформы (типа МКС)	Многоцелевые	100–400	более 15
Платформы для геостационарных орбит	Телекоммуникация, глобальная связь	10–30	10–15
КА для межпланетных проектов	Межпланетные сообщения и исследования	5–10 (беспилотные) до 6000 (пилотируемые)	3–5 10

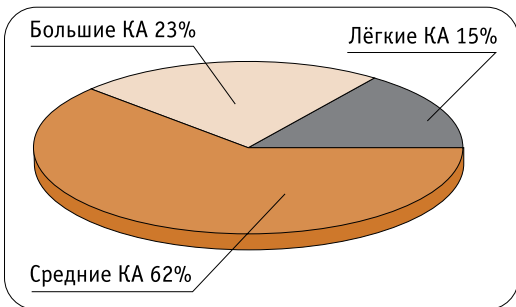


Рис. 2.
Распределение космических аппаратов запущенных в мире с 2001 г. по 2011 г. по критерию мощности бортового электропитания: лёгкие КА – ≤ 4 кВт, средние КА – ≤ 12 кВт, большие КА – ≥ 12 кВт.

GaAs/Ge. Эффективность их применения выглядит очень высокой, поэтому, невзирая на кризисные явления в мировой экономике, после 2010 г. появился заметный рынок наземной солнечной энергетики. Динамика ожидаемого роста производства ФЭП на основе GaInP/GaAs/Ge приведена на рис. 3³.

Такая технология с использованием концентраторов солнечного потока (Concentrated photovoltaic (CPV) technology) в настоящий момент только выходит на рынок и переходит от экспериментальных объектов к их промышленному применению. ФЭП устанавливаются в концентрирующие коллекторы, в которых для фокусировки солнечного света на элементы служат линзы или зеркала. Системы низкого и среднего уровня концентрации (до 100 солнц) могут работать с кремниевыми ФЭП. При концентрациях более 500 солнц используются исключительно ФЭП на основе GaInP/GaAs/Ge. Со-

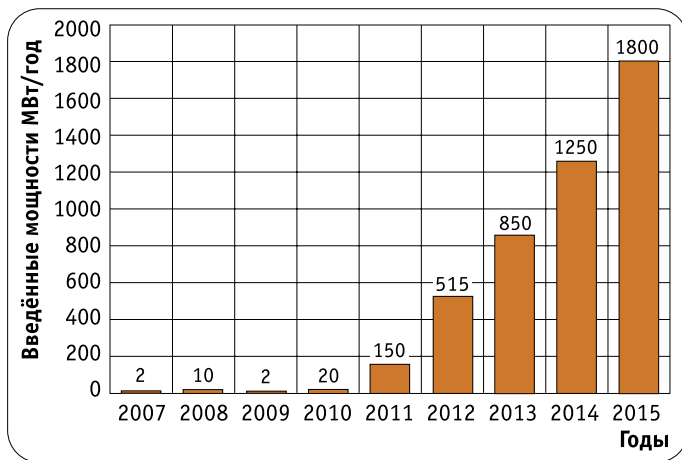
³ Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Каган М.Б. и др. Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{nGaAs}$ // ФТП. 1970. Т. 4. № 12; Thin Film 2012–2016: Technologies, Markets, and Strategies for Survival : Отчет. Доступно: <http://www.greentechmedia.com/>

гласно данным интернет-портала “ENF-Solar Directory” (<http://www.enfsolar.com>) , на начало 2013 г. насчитывалось 64 компании, работающие с такими ФЭП. Распределение этих компаний с разбивкой по странам до 2012 г. представлено на рис. 4.

Особенности гетероструктурных каскадных ФЭП

В гетероструктурных каскадных ФЭП, выполненных на основе нескольких последовательно соединенных $p-n$ -переходов в материалах с различной шириной запрещённой зоны, возможно существенное увеличение КПД до значений более 30% в условиях околоземного космоса (воздушная масса AM0) и более 40% в наземных условиях (воздушная масса AM1.5, работа с концентраторами солнечного света в виде линзы Френеля). Для достижения наивысших значений КПД в таких ФЭП с количеством слоёв более 20 толщины определённых слоёв должны составлять 10–100 нм, что необходимо для снижения рекомбинационных и оптических потерь. Чрезвычайно важным преимуществом гетероструктурных ФЭП на основе соединений GaInP/GaAs/Ge является их способность эффективно преобразовывать высококонцентрированное солнечное излучение. Это позволяет уменьшить расход полупроводниковых

Рис. 3.
Динамика и прогноз развития наземной солнечной энергетики на основе GaInP/GaAs/Ge.



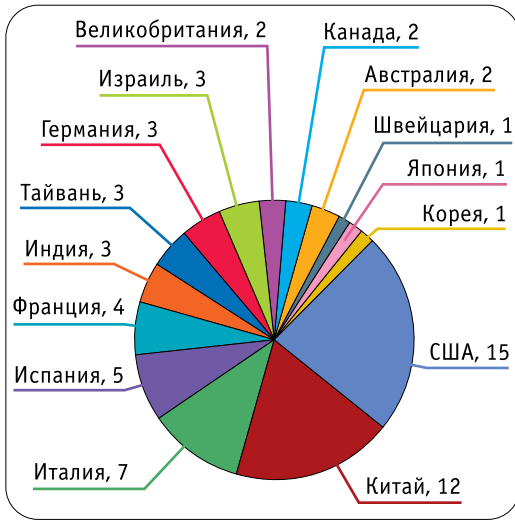


Рис. 4.
Производители солнечных станций, работающие с CPV-модулями, с разбивкой по странам в 2012 г.

материалов пропорционально кратности концентрирования и, как следствие, существенно снизить стоимость вырабатываемой “солнечной” электроэнергии. Большое достоинство гетероструктурных ФЭП – их высокая температурная устойчивость (см. сноски 1, 2).

Германиевые подложки. В основе производства ФЭП лежат подложки (тонкие и сверхтонкие пластины толщиной 80–200 мкм) монокристаллического германия. Германий – более радиационно-стойкий к космическому излучению. По прогнозам Umicore, рынок ФЭП для наземных применений к 2020 г. может составить 6 ГВт, что эквивалентно 10 млн шт. германиевых подложек. Финансовый прогноз до 2015 г. представлен на рис. 5. В настоящее время крупнейшими производителями подложек выступают компании Umicore Corp. (Бельгия), Silarus (Канада) и АХТ Inc. (США). В основном выпускаются подложки диаметром 100 мм. Umicore Corp. и Silarus используют для получения монокристаллов германия метод Чохральского (CZ Czochralski method), а АХТ Inc. – метод VGF (vertical gradient freeze method). Umicore планирует в

ближайшие годы удвоить мощности и выйти на уровень 1000 000 шт./год подложек в пересчёте на диаметр 100 мм, в то время как АХТ намеревается довести производственные мощности до 600 000 шт./год.

В Китае разработкой ФЭП на германиевых подложках занимаются предприятия Yunnan Branch Xin Yuen Crystal Materials Co.Ltd., Yunnan of Xin Lincang germanium semiconductor industry Co., Ltd. и Chinese Academy of Sciences Institute. Компания Beijing Jing-hui Technology строит линию для производства 200 000 шт./год.

В России в течение ряда лет предпринимаются попытки разработки технологии получения кристаллов и подложек германия. В этом направлении работают ОАО “Германий” (г. Красноярск), ООО “Германий и приложения” (проектная компания Роснано), а также ОАО “Гиредмет”, получивший в 2012–2013 гг. грант Минобрнауки с привлечением механизмов государственно-частного партнёрства. Разрабатываемые технологии изготовления монокристаллов и пластин германия позволят выращивать малодислокационные монокристаллы диаметрами 100 и 150 мм, а также делать пластины толщиной от 160 мкм.

Каскадные ФЭП космического назначения. Мировой рынок космических батарей составляет около 1 млрд долл./год и постоянно растёт. В настоящее время на рынке технологий каскадных “космических” ФЭП присутствуют ком-

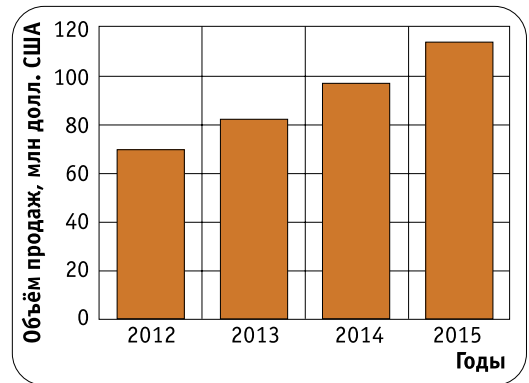


Рис. 5.
Прогноз потребления германиевых подложек.

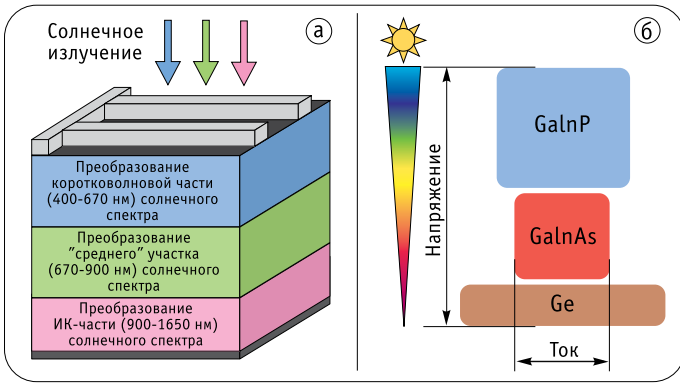


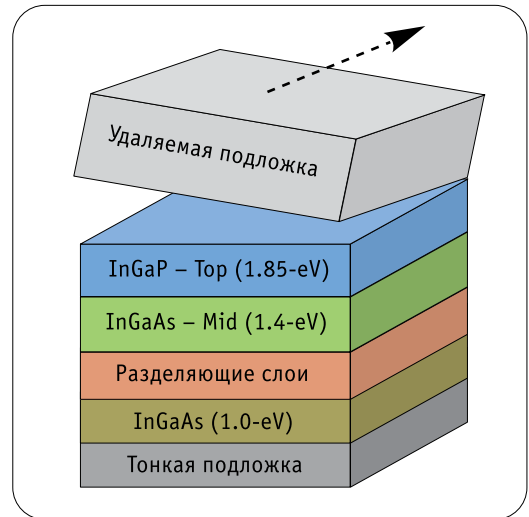
Рис. 6.
Структура трёхкаскадного тонкоплёночного ФЭП на подложке из германия (а) и условная электрическая схема – высота субэлементов пропорциональна генерируемому напряжению, ширина – току (б).

пании: Spectrolab, Emcore (США), AZUR SPACE (Германия), Sharp Solar (Япония), CESI (Италия), ОАО НПП “Квант” и ОАО “Сатурн” (Россия). Солнечное излучение в условиях космоса (атмосферная масса AM0) характеризуется повышенной интенсивностью в коротковолновой области. Трёхпереходная структура ФЭП на базе GaInP/GaInAs/Ge всех компаний имеет электрическую полярность *n*-на-*p* и насчитывает более 20 слоёв различного функционального назначения. Микронные и наноразмерные эпитаксиальные слои являются ключевыми структурными элементами: нижний (узкозонный) субэлемент на базе германия, буферная область, нижняя низкоомная электрическая развязка (туннельный диод), средний субэлемент на базе GaInAs, верхний туннельный диод, верхний субэлемент на базе GaInP (рис. 6). Три фотоактивные области, выполненные из трёх полупроводников GaInP/GaAs/Ge, имеют запрещённую зону, ширина которой уменьшается от фронтальной освещаемой поверхности ФЭП в сторону его тыльной поверхности. Коротковолновая часть солнечного излучения преобразуется в GaInP-области, средневолновая часть – в GaAs-области, а инфракрасная часть – в Ge-области.

Выбор материалов каскадных ФЭП наиболее важен при разработке их структуры. Например, в самой эффективной в настоящее время структуре каскадных ФЭП на основе согласованных по параметру решётки материалов $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ возможности увеличения КПД ограничены ввиду того, что значения ширины запрещённой зоны этих материалов не оптимальны. Один из путей

повышения эффективности трёхпереходного ФЭП состоит в увеличении ширины запрещённой зоны материала верхнего субэлемента. Это позволит поднять напряжение, генерируемое этим субэлементом. Одна из причин, препятствующая достижению максимального КПД многопереходных ФЭП при уровнях освещённости, соответствующих солнечному излучению в условиях околоземного космоса, заключается в том, что по мере увеличения числа фотоактивных *p-n*-переходов падает единый для всех этих *p-n*-переходов согласованный генерируемый фототок. Умень-

Рис. 7.
Схема технологии “lift-off” для получения ультратонких трёхпереходных ФЭП с толщиной Ge менее 20 мкм.



шение влияния этих процессов позволит увеличить КПД фотоэлектрического преобразования солнечной энергии⁴.

Сегодня в ОАО НПП “Квант” создана и работает технологическая линия производства ФЭП космического назначения. Она включает в себя единственную в РФ оригинальную технологическую линию изготовления гетероструктурных однокаскадных ФЭП на основе соединенных GaAs/Ge, а также линию получения трёхкаскадных ФЭП InGaP/InGaAs/Ge. О высоком техническом уровне разработок НПП “Квант” свидетельствует их применение в российском сегменте МКС, на крупных геостационарных платформах “СиСат”, “Экспресс-А”, “Экспресс-АМ” и “КазСат”, в космических аппаратах для дистанционного зондирования Земли и метеорологии “Монитор-Э” и “Метеор-3”.

Основные используемые материалы.

С целью определения возможных ограничений роста производства, рассмотрим основные используемые материалы.

Мышьяк. Получать мышьяк можно из целого ряда источников. К их числу относятся пыль, образующаяся при выплавке меди, золота и свинца; обожжённый арсенопирит (наиболее распространённый рудный минерал свинца), который образуется как попутный продукт при переработке концентратов меди, свинца, кобальта, а также при производстве фосфатов. Мировые ресурсы мышьяка, содержащиеся в медном и свинцовом природном сырье, оцениваются примерно в 11 млн т. Общее производство в 2012 г. составило 44 000 т (в пересчёте на трёхокись мышьяка).

Галлий. Серебристый легкоплавкий металл – типичный представитель редких элементов широкого рассеяния. Содержание галлия составляет 15 ppm от всей массы земной коры, что превышает содержание таких достаточно редких элементов как молибден, вольфрам, сурьма, ртуть, мышьяк, висмут. Галлий сопутствует образованиям, содержащим окиси алюминия и кремния, сульфиды цинка и мышьяка, германия и меди. US Geological Survey (USGS) не даёт общих оценок мировых ресурсов галлия.

В бокситах они превышают 1 млн т и приблизительно такое же их количество и в цинковых месторождениях. Большие ресурсы галлия имеются в угольных месторождениях. Так, в 2005 г. во Внутренней Монголии (Китай) установлено наличие 958 тыс. т галлия в угольном месторождении. Однако, несмотря на широкое распространение, объём добычи галлия распрямлен незначителен – не более 400 т/год. Галлий получают из алюминатных растворов в процессе получения глинозёма из бокситовых или нефелиновых руд. В России действует участок на ОАО “Пикалевский глинозём” (входит в состав ОАО “Базэлцемент-Пикалево”, принадлежит УК “Русал”), мощность участка – 10 т/год. На Украине в ОАО “Николаевский глинозёмный завод” (также принадлежит УК “Русал”) работает участок по производству галлия мощностью до 12 т/год. Имеющегося галлия хватит на огромное количество ФЭП. Эпитаксиальная технология осаждения фотоактивных Ga-содержащих слоёв в сочетании с высоким КПД предполагает крайне малый расход галлия на 1 Вт получаемой мощности. При расходе галлия (в пересчёте на металл) ~1 г Ga на 1 кВт “солнечных” мощностей только 2% сегодняшнего годового производства этого металла хватит для изготовления 30 ГВт генерирующих мощностей. Таким образом, ни галлий, ни мышьяк не будут лимитирующим фактором для развития ФЭП на A_3B_5/Ge .

Германий. В земной коре германия не очень мало – $7 \cdot 10^{-4}\%$ её массы, больше чем свинца, серебра и вольфрама, но германий очень рассеянный элемент и по праву занимает место в ряду редких рассеянных элементов вместе с индием, галлием и пр. Германий присутствует в горных породах, рудах различных типов, каменных углях в виде изоморфной примеси или прорастаний Ge-минералов в минералах-концентраторах. Из сульфидных цинковых или свинцовых руд или углей, где германий содержится в пределах от тысячных до десятых долей процента, последовательно получают: германиевый концентрат (с содержанием германия от 5 до 30%), тетрагидрид германия, оксид германия, поли- и монокристаллы германия. При производстве цинка германий остаётся в отвальных кеках выщелачивания цинковых огарков. При производстве свинца германий извлека-

⁴ Жалнин Б.В., Каган М.Б., Семёнов В.А. и др. Разработка и создание опытного производства наноструктурных каскадных ФЭП в системе A^3B^5 // Автономная энергетика, технический прогресс и экономика. № 29, 2009. № 2; см. также сноску 3.

ют попутно из возгонов при фьюминговании шлаков, а при производстве меди – из пылей шахтной и отражательной плавок, пыли конверторов и возгонов при фьюминговании шлаков. В процессе промышленного сжигания углей их минеральная часть распределяется между шлаком, остающимся в топочном пространстве, и летучей золой, уносимой вместе с газообразными продуктами горения. Общие ресурсы германия в ресурсах цинка оцениваются в 120 тыс. т, а в каменных углях – в 4–5 тыс. т. Последние 15 лет в мире производилось до 100 т германия в год, плюс 30–50 т/год извлечено повторной переработкой. Ежегодное количество германия, в добываемых в мире цинковых рудах составляет ~ 300 т, из которых извлекается только треть. Если принять расход германия равным ~15 г на 1 кВт, то его 500 т (количество, которое весьма вероятно будут получать к 2020–2025 гг.) сможет обеспечить выпуск 33 ГВт солнечных элементов (СЭ) на основе A_3B_5 . И всё же германий остаётся лимитирующим сырьевым фактором, однако для наземной технологии этот лимит исчерпается, видимо, после 2020 г., а для космической он практически неактуален.

Закключение

Основная проблема в “космической” солнечной энергетике – это повышение требований к бортовым системам космических аппаратов, что приводит к необходимости создания технологии солнечных батарей, обладающих улучшенными энергетическими и эксплуатационными характеристиками и увеличенным ресурсом работы. Один из перспективных путей решения этих задач состоит в разработке технологии ультратонких гетероструктурных каскадных фотоэлектрических преобразователей из арсенида галлия на германиевых подложках (рис. 7).

Использование ультратонких гетероструктурных каскадных ФЭП обеспечивает приблизительно двукратное снижение суммарных затрат благодаря увеличению удельного энергосъёма, а также снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту, ориентацию и стабилизацию космического аппарата.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ СЕВЕРА РОССИИ

Кандидат географических наук
**С. Н. ГОЛУБЧИКОВ, В. А. ЗУБИЕВА,
С. Э. ГРЕБЕНЩИКОВ**
(Международный независимый
эколого-политологический
университет)

Грядущая инновационно-технологическая революция, без которой невозможно обеспечить выживание к 2030 г. 9 млрд населения Земли (из которых 5–6 млрд будет составлять средний класс с его резко растущими потребностями – “в век глобализации все хотят жить как американцы”), требует кардинально новых подходов в стратегии энергетического развития. Мы до сих пор живём технологическим укладом, заложенным в конце XIX – начале XX века (ориентация на углеродную металлоёмкую экономику, сырьевая электроэнергетика, средства передвижения на основе сжигания ресурсов, средства связи, вооружение и т.д.) и созданным трудами каких-нибудь 50 инноваторов¹. Прошло более 100 лет, и на рынке энергетических услуг ничего принципиально нового не появилось (атомная энергетика не в счёт – это производное от ядерного оружия).

По мнению экспертов, сегодня будущее мировой энергетики – за автономными и компактными источниками энергоснабжения (приливные и солнечные электростанции, топливные элементы, энергоустановки, работающие на био-

¹ Об этом подробно говорил сопредседатель Института мировых идей Александр Чикунов на открывшемся в Москве 31 октября 2012 г. Международном форуме “Открытые инновации”.