

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

Б.Жалнин, к.ф.-м.н., М.Каган, д.т.н., А.Наумов
АО "НПП "Квант"

Первый в мире космический аппарат (КА) был запущен на орбиту Земли 4 октября 1957 года с 5-го научно-исследовательского полигона Министерства обороны СССР "Тюра-Там" (впоследствии ставшего известным как космодром Байконур). Сегодня только специалисты помнят, что емкие серебряно-цинковые аккумуляторы, установленные на первом спутнике (для лампового радиопередатчика конструкции М.С.Рязанского из НИИ-885), были изготовлены во Всесоюзном научно-исследовательском институте источников тока (ВНИИТ), причем раньше, чем за океаном. Благодаря их высокому качеству сигналы "Спутника" (знаменитые "бип-бип") слышались намного дольше, чем планировалось. Директором ВНИИТ (ныне АО "НПП "Квант") многие годы был Николай Степанович Лидоренко, которого по праву называют родоначальником космической энергетики. 100-летию со дня его рождения и посвящена эта статья.

На протяжении 1950–1987 годов Н.С.Лидоренко в рамках российской космической программы возглавлял работы по созданию систем и технологий для производства энергии в космических аппаратах – на основе фотоэффекта, эффектов Гальвани, Пельтье, Зеебека. Под его руководством конструировались источники энергии для всех классов ракет, искусственных спутников Земли, изготавливались солнечные электростанции космического и наземного использования и др. В 1958 году были разработаны первые космические солнечные батареи; в 1970-м – электрохимические генераторы космического и морского применения; в 1972-м – опытные водородно-воздушные генераторы тока для электромобилей; в 1974-м – первые молекулярные конденсаторы.

НАЧАЛО

С середины 1950-х годов ВНИИТ был подключен к космическим программам. Н.С.Лидоренко прекрасно понимал, что прогресс в космонавтике неразрывно связан с состоянием бортовых систем электропитания. Действительно, на протяжении всей истории развития космонавтики не прекращаются поиски новых источников электроэнергии, совершенствование технологических и конструктивных решений, чтобы обеспечить возрастающие требования к коэффициенту полезного действия (КПД), сроку службы и удельной мощности систем электропитания.

Кремниевыми солнечными батареями ВНИИТ начал заниматься в 1956 году. Через два года появилась солнечная батарея, которая и была установлена на борту искусственного спутника Земли ИСЗ-3, выведенного на космическую орбиту 15 мая 1958 года. С тех пор

солнечная батарея стала обязательным атрибутом космических аппаратов (рис.1). Первые фотопреобразователи изготавливались из слитков монокристаллического р-кремния с удельным сопротивлением $\sim 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, наибольший размер пластин составлял 12–15 мм. Первые монокристаллы кремния были выращены в полупроводниковой лаборатории Гиредмета (Москва) и на Подольском химико-металлургическом заводе.

Как известно, у границы n- и p-слоев в результате перераспределения зарядов образуются обедненные зоны с нескомпенсированным положительным зарядом в n-области и объемным отрицательным зарядом в p-области. Эти зоны и формируют p-n-переход. Когда элемент освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электронно-дырочные пары. Фотоэлектрический отклик такого однопереходного элемента определен той частью солнечного спектра, энергия которого выше ширины запрещенной зоны. Солнечное излучение в условиях космоса (так называемая атмосферная масса АМО) характеризуется повышенной интенсивностью излучения в коротковолновой области.

Для первых кремниевых фотоэлементов использовалась планарная структура с мелким p-n-переходом, получаемым методом диффузии фосфора в базовый кремний p-типа. С обратной стороны легированный фосфором p⁺-слой сошлифовывался, посредством распыления серебра в вакууме через трафаретную маску на p⁺-р-области заготовки напылялись контактные



Рис.1. Современная МКС

площадки, которые затем покрывались медью путем электрохимического осаждения. Первый лабораторный фотопреобразователь был получен летом 1957 года. Он представлял собой маленькую пластинку площадью 0,4–0,5 см². Готовые фотопреобразователи покрывали прозрачным лаком, освещали лампой накаливания и получали фотоЭДС 0,55 В и ток 10–12 мА. Удельная мощность образца при освещении солнечным светом в полдень на широте Москвы составляла около 3 мВт/см².

Результаты, полученные на этой солнечной батарее, свидетельствовали о длительной работоспособности и надежности батареи. Напрасными оказались опасения разработчиков относительно быстрой деградации ее характеристик из-за воздействия микрометеоритов. С третьего искусственного спутника Земли на многие десятилетия магистральным направлением развития космической энергетики стало использование солнечных батарей (СБ).

Последующие разработки на лабораторных фотопреобразователях позволили улучшить конструкцию, придав батареям прямоугольную форму с базовым стандартизованным размером по ширине 10 мм, а по длине – 10, 15 и 20 мм. Во второй половине 1950-х годов при проведении диффузии легирующих примесей в пластины кремния с целью создания p-n-перехода наличие вакуума считалось неперемennым условием. Когда одна из ампул оказалась треснутой, в нее попал воздух, это не сказалось на характеристиках образцов. Стало ясно, что диффузию фосфора можно существенно упростить, если проводить ее на воздухе. Обнаружился и положительный эффект диффузии на воздухе. Образующийся при высокой температуре и наличии кислорода воздуха на поверхности пластин кремния слой фосфоросиликатного стекла, обладающий геттерными свойствами, очищал объем солнечных элементов от проникших в него загрязняющих примесей. По такой технологии с июля 1958 года начался серийный выпуск кремниевых фотопреобразователей (рис.2).

Глубина залегания p-n-перехода составляла 3,2–4,0 мкм, габаритные размеры – 10×10, 10×15 и 10×20,

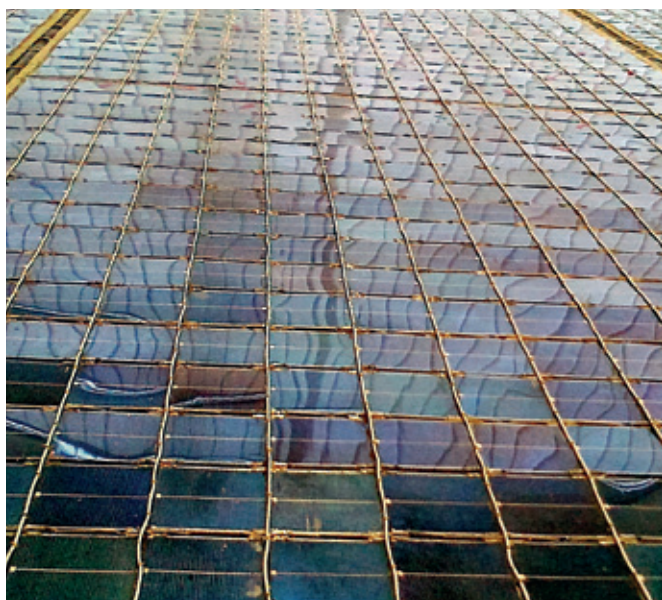


Рис.2. Кремниевые солнечные батареи

толщина – 0,5–0,75 мм. Через полгода выпуск серийных фотопреобразователей уже составлял 2,5–3,0 м² солнечных батарей в месяц. Средний КПД фотопреобразователей – около 8%, средняя удельная мощность солнечных батарей – 55–60 Вт/м² при облучении

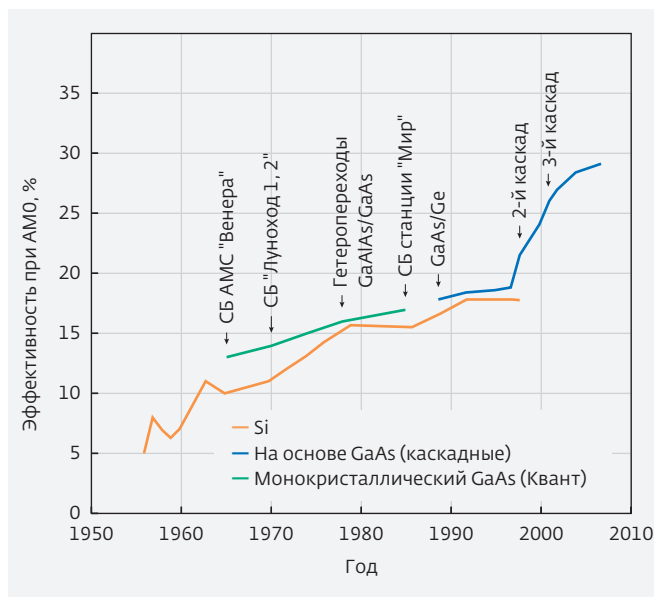


Рис.3. История развития элементной базы космической фотоэнергетики в 1950–2010 годы

внеатмосферным солнцем и температуре 25°С. Данная технология использовалась до января 1964 года. За это время удельная мощность солнечных батарей увеличилась до 65 Вт/м², а КПД был на уровне 8%.

Таблица 1. Основные этапы эволюции солнечных элементов и батарей НПП "Квант"

| № | Этапы и события | Дата | Примечание |
|----|--|-----------|------------------------------------|
| 1 | Первый солнечный элемент на основе кремния | 1957 | - |
| 2 | Первая солнечная батарея (СБ) на "Спутнике" ИСЗ-3 | 1958 | - |
| 3 | Первая промышленная технология производства Si СБ | 1959–1963 | -- |
| 4 | Первые российские солнечные элементы на GaAs | 1964 | -- |
| 5 | Первые в мире СБ из GaAs на АМС "Венера" | 1967 | - |
| 6 | Первые в мире СБ из GaAs для "Лунохода-1" и "Лунохода-2" | 1970–1972 | - |
| 7 | Si СБ для долговременных орбитальных станций "Салют" программы "Союз – Апполон" | 1974–1976 | - |
| 8 | Первая в мире СБ на основе гетеропереходов на GaAs для долговременной орбитальной станции "Мир" | 1986 | Мощность 10 кВт |
| 9 | Комбинированная электронно-диффузионная технология производства двухсторонних Si элементов | 1988 | КПД 16% |
| 10 | СБ для российского сегмента МКС | 1997–2000 | - |
| 11 | Первая в России СБ на основе GaAs мультикаскадных солнечных элементов | 2005 | Космический аппарат "Казсат" |
| 12 | Первая в Европе СБ на основе GaAs мультикаскадных солнечных элементов мощностью 24 кВт в рабочей точке | 2013 | Космический аппарат "Экспресс АМ5" |

За 40 с лишним лет совершенствование технологии позволило повысить КПД кремниевых СБ до 15% при теоретически возможном его значении 22–24% (желтая кривая на рис.3). По мере увеличения КПД повышалась стойкость СБ к космической радиации, что позволило довести срок активного существования спутника до десяти лет. Основные этапы эволюции солнечных элементов и батарей, изготовленных в АО "НПП "Квант", приведены в табл. 1 и на рис.3.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

В середине 60-х годов прошлого века наступил этап разработки однокаскадных СБ на основе арсенида галлия (зеленая кривая на рис.3). Основными преимуществами солнечных панелей, изготавливаемых на основе арсенида галлия, по сравнению с кремниевыми являются:

- большой начальный КПД (до 20%);
- вдвое меньшие потери при возрастании рабочей температуры;
- существенно более высокие радиационная стойкость и работоспособность до температуры 150°C.

В совокупности эти факторы и обеспечили предпочтительное использование арсенид-галлиевых солнечных панелей на космических аппаратах, находящихся в широком диапазоне орбит, особенно на аппаратах с большим сроком активного существования. По таким основным удельным характеристикам панели, как мощность с 1 м² панели, мощность с 1 кг веса панели, стоимость 1 Вт, арсенид-галлиевые солнечные панели обеспечивают выигрыш на протяжении длительного срока действия.

Впервые в мире солнечная панель из арсенида галлия площадью 1 м² была разработана во ВНИИТ в 1967 году и применена на космическом аппарате "Венера-4", запущенном 12 июня того же года к планете Венера. Данный аппарат осуществил первые прямые измерения температуры, плотности, давления и химического состава атмосферы этой планеты. Солнечная батарея обеспечивала при температуре 120°C заряд блока химических батарей спускаемого аппарата, непосредственно перед началом его спуска на поверхность планеты.

Такие же солнечные панели снабжали энергией знаменитые "Луноходы". Площадь солнечной батареи составляла 3,5 м², а средняя вырабатываемая мощность – 180 Вт. В рабочем положении панель солнечной батареи могла располагаться под разными углами, чтобы оптимально использовать энергию Солнца при его различной высоте над лунным горизонтом. В экстремальных условиях на поверхности Луны при рабочих температурах до 150°C в течение нескольких лунных месяцев солнечная батарея полностью

удовлетворяла энергетическим требованиям, необходимым для выполнения программы исследований. При этом был получен наивысший результат того времени по удельной мощности – 100 Вт/м² при температурах 140–150°C.

Наиболее крупной разработкой в области арсенид-галлиевых панелей стала солнечная батарея для орбитальной станции "Мир". В процессе космического полета арсенид-галлиевые панели, имевшие начальную выходную мощность около 10 кВт, продемонстрировали высокую стабильность характеристик – суммарная средняя деградация не превышала 3,5% в год.

Для изготовления фотоэлементов на основе арсенида галлия (AlGaAs), помимо метода диффузии, применялся метод жидкофазной эпитаксии для получения слоя p-AlGaAs, в то время как p-p-переход фотоэлемента формировался за счет диффузии примеси p-типа в базовый материал n-GaAs.

До середины 1980-х годов совершенствование солнечных фотоэлементов на основе как кремния, так и арсенида галлия осуществлялось на базе относительно простых структур и технологий первого

Таблица 2. Энерговооруженность космических аппаратов различных типов

| Тип космического аппарата | Назначение | Требования по энерго- вооруженности, кВт | Срок активного существования, лет |
|--|---|--|---|
| Малые ИСЗ на низких и промежуточных орбитах | Дистанционное зондирование Земли, связь | 2-4 | 5-10 |
| Средние ИСЗ на различных орбитах | Метеорология, навигация | 5-15 | 10-15 |
| Долговременные орбитальные станции и платформы (МКС) | Многоцелевые | 100-400 | Более 15 |
| Платформы для геостационарных орбит | Телекоммуникации, связь | 15-30 | Более 15 |
| Космические аппараты для межпланетных исследований | Межпланетные исследования и сообщения | До 6000 (пилотируемые) | 10 |
| Энергия из космоса для наземных применений | Передача энергии из космоса на Землю | Более 1000 | Более 15 |

поколения. Со второй половины 1980-х годов началось проникновение следующего поколения высоких технологий в сферу полупроводниковой солнечной фотоэлектронетики. Были предложены усложненные структуры фотоэлементов на основе кремния, которые позволили снизить в них оптические и рекомбинационные потери. Были также предприняты усилия по повышению качества базового материала – монокристаллического кремния, выращенного методом Чохральского. Реализация таких структур оказалась возможной благодаря применению многостадийных технологических приемов, отработанных к тому времени при изготовлении кремниевых интегральных схем. Результатом этих усилий стал резкий скачок эффективности фотоэлектрического преобразования кремниевых фотоэлементов. Эффективность, демонстрируемая лабораторными образцами, приблизилась к теоретическому пределу.

На протяжении всей истории развития космических аппаратов не прекращались поиски и внедрение новых источников энергии при постоянно возрастающих требованиях к сроку службы. Достаточно сказать, что для разработок 1980–1990 годов (аппараты "Молния", "Горизонт") показатель энерговооруженности составлял менее 1 кВт на 1 т массы спутника, для разработок 2000 года ("Экспресс-АМ") он превысил 2 кВт/т, а в аппаратах "Экспресс-2000", запускаемых с 2013 года, приблизился к значению 5 кВт/т, при этом срок службы увеличился с трех до 12–15 лет. Солнечные батареи, разработанные НПП "Квант", применялись на орбитальных станциях серий "Салют", "Мир", автоматических межпланетных аппаратах и станциях

серий "Венера", "Марс", "Фобос", автоматических самодвижущихся аппаратах "Луноход-1", "Луноход-2". Предприятие участвовало в реализации космических программ "Восток", "Космос", "Энергия-Буран", "Молния", "Радуга", "Горизонт", "Луна", "Союз – Аполлон", "Интеркосмос" и ряда других. Энерговооруженность космических аппаратов различных типов и срок активного их существования приводятся в табл. 2.

ОЧЕРЕДНОЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ

В конце прошлого столетия традиционно используемые на протяжении полувека кремниевые солнечные батареи перестали удовлетворять требованиям разработчиков космических аппаратов. В это время ведущие мировые производители КА совершили феноменальный рывок – уровни мощности бортовых энергоустановок увеличились с 3–5 до 15–20 кВт. Это стало возможным благодаря использованию арсенид-галлиевых каскадных солнечных элементов на германиевой подложке. Применение таких СБ теоретически позволяет получить КПД выше 30%. В основу их производства положен метод создания гетероструктур с микронными слоями InGaP/InGaAs/Ge на германиевой подложке. Фотоэлектрический отклик однопереходного элемента ограничен частью солнечного спектра, энергия которого выше ширины запрещенной зоны, а фотоны меньшей энергии не используются. Преодолеть это ограничение позволяют многослойные структуры из двух и более солнечных элементов с различной шириной запрещенной зоны. Такие элементы называются многопереходными, каскадными или тандемными. Поскольку они работают

с большей частью солнечного спектра, эффективность фотоэлектрического преобразования у них выше. В многопереходном солнечном элементе одиночные фотоэлементы расположены один за другим таким образом, что солнечный свет сначала попадает на элемент с наибольшей шириной запрещенной зоны, при этом поглощаются фотоны с наибольшей энергией. Пропущенные верхним слоем фотоны проникают в следующий элемент с меньшей шириной запрещенной зоны и т.д.

Идея каскадных фотоэлементов обсуждалась с начала 1960-х годов и рассматривалась как очевидная, но далекая перспектива повышения КПД. Ситуация стала меняться в конце 1980-х годов, когда многие исследовательские группы мира сконцентрировали свои усилия на разработке двухкаскадных солнечных элементов разных типов. На первом этапе были получены механически соединенные солнечные элементы, хотя было очевидно, что перспективными являются фотоэлементы с монокристаллической структурой. Такие структуры первыми разработали сотрудники лаборатории NREL (США). Используя германиевые подложки, они вырастили методом эпитаксии металлоорганических соединений из газовой фазы (МОС ГФЭ) многослойные согласованные по периоду решетки структуры, в которых верхний фотоэлемент имел р-п-переход в твердом растворе $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, а нижний фотоэлемент – в GaAs. Последовательное соединение фотоэлементов осуществлялось туннельным р-п-переходом, специально формируемым между каскадами. В дальнейшем к процессу фотоэлектрического преобразования был подключен и третий каскад с р-п-переходом в германиевой подложке. Фактически это открыло "второе дыхание" технологии германия, ставшего когда-то первым материалов в полупроводниковой технике. Стоимость германия как материала подложки ниже, чем арсенида галлия, он механически более прочен и устойчив к различным воздействиям, может быть включен в процесс фотоэлектрического преобразования в каскадной



Рис.4. Современные солнечные элементы

структуре. Внешний вид современного фотоэлемента показан на рис.4.

СБ нового поколения, разработанные в НПП "Квант", обеспечили энергообеспеченность космических аппаратов требуемого уровня. Свидетельством высокого технического уровня разработок НПП "Квант" является их применение на крупных геостационарных платформах "СиСат", "Экспресс" и "КазСат"; космических аппаратах для дистанционного зондирования Земли и метеорологии "Монитор-Э" и "Метеор-3" (синяя кривая на рис.3). Процесс сборки современной солнечной батареи показан на рис.5.

В настоящее время на рынке технологий каскадных космических фотоэлектрических преобразователей представлены компании Spectrolab, Emcore (США), AZUR SPACE (Германия), Sharp Solar (Япония), CESI (Италия), ОАО "НПП "Квант" и ОАО "Сатурн" (Россия). Структура солнечного элемента с тремя переходами на базе GaInP/GaInAs/Ge всех компаний имеет электрическую полярность п-на-р и состоит из более 20 слоев различного функционального назначения. Наноразмерные эпитаксиальные слои являются



Рис.5. Сборка современной солнечной батареи

ключевыми структурными элементами: нижний (узкозонный) каскад на базе германия, буферная область, нижняя низкоомная электрическая развязка (туннельный диод), средний каскад на базе GaInAs, верхний туннельный диод, верхний каскад на базе GaInP (рис.6). Три фотоактивные области, выполненные на основе структуры GaInP/GaAs/Ge, имеют ширину запрещенной зоны, которая уменьшается в направлении от фронтальной освещаемой поверхности солнечного элемента к его оборотной поверхности. Коротковолновая часть солнечного излучения преобразуется в GaInP-области, средневолновая – в GaAs-области, а инфракрасная – в Ge-области.

Выбор материалов каскадных солнечных элементов – самый ответственный этап при разработке их структуры. Например, в наиболее эффективной на данный

Николай Степанович Лидоренко (1916–2009 годы) родился 15 апреля 1916 года в Курске. В 1920-е годы семья из-за голода переехала в Краснодар. Любопытно, что по одной из версий, фамилия Лидоренко происходит от имени Лиодор, что по-гречески означает "дар солнца". После школы он поступил в Новочеркасский политехнический институт по комсомольскому призыву на авиационный факультет и защитил диплом по электрохимическому получению алюминия (1940 год).

После окончания института Н.С.Лидоренко отправился на Дальний Восток, в Комсомольск-на-Амуре на завод № 364, выпускавший энергоустановки и аккумуляторы для подводных лодок. К концу войны он стал главным инженером завода. Был награжден орденом Трудового Красного Знамени. В 1947 году поступил в МХТИ им. Д.И.Менделеева, где защитил кандидатскую диссертацию. В 1950 году возглавил Всесоюзный научно-исследовательский элементно-электрогольный институт при заводе "Мосэлемент", выпускавшем батареи для радиоприемников. В штате института в то время насчитывалось 213 сотрудников (а в 1987 году в НИИ "Квант" трудилось уже 25 тыс. работников).

Интенсивное развитие радиосвязи в первой половине XX века потребовало создания новых автономных источников электропитания. Одним из них стал автономный переносной термоэлектрический источник питания для партизанских радиостанций, получивший известность как партизанский котелок. Устройство было разработано в годы Великой Отечественной войны

сотрудниками Ленинградского физико-технического института во главе с А.Ф.Иоффе.

Академик А.Ф.Иоффе, предвидевший большие перспективы практического использования термогенераторов в народном хозяйстве, и Н.С.Лидоренко, которому было поручено заниматься производственными вопросами, стояли у истоков организации промышленности полупроводниковых термоэлементов. В 1951 году в подмосковном поселке Правдинский, где находилась мастерская по выпуску керосиновых ламп, в течение месяца был налажен выпуск термоэлектрических генераторов с нагревом от керосиновой лампы. Их мощности хватало для питания радиоприемников и радиостанций в тех районах огромной страны, где отсутствовала электрификация.

И только впоследствии стало ясно, что это был пролог грандиозной эпопеи – энергетического обеспечения космической программы.

Н.С.Лидоренко входил в первую "королевскую десятку" наряду с С.П.Королевым, М.В.Келдышем, В.П.Глушко, В.П.Барминым, Н.А.Пилугиным и еще несколькими людьми. Он принадлежал к той плеяде генеральных конструкторов, которые были не только выдающимися организаторами, но и большими учеными. Николай Степанович – автор двух открытий, 219 изобретений, четырех патентов, ряда научных статей и книг. Он лауреат Ленинской и Государственных премий, Герой Социалистического Труда, награжден орденами и медалями СССР, почетными медалями В.И.Вернадского, К.Э.Циолковского, Ю.А.Гагарина, С.П.Королева, В.П.Глушко и др.

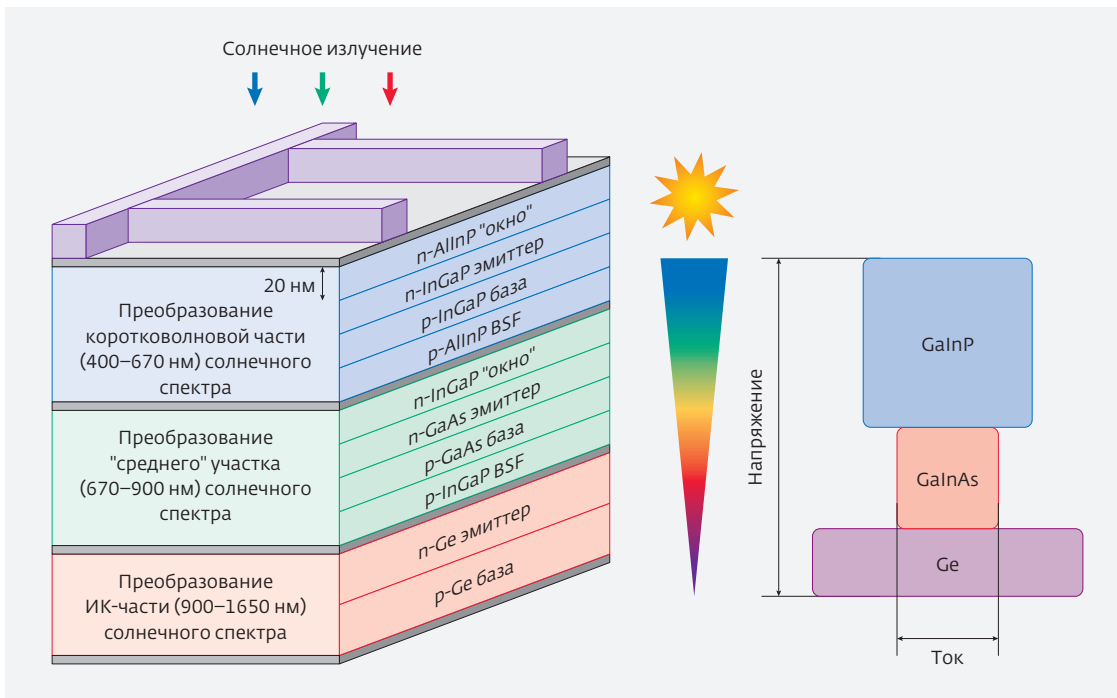


Рис.6. Структура трехкаскадного солнечного элемента на основе GaAs на подложке из германия

момент структуре на основе согласованных по параметру решетки материалов $Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ возможности увеличения КПД ограничены, поскольку значения ширины запрещенной зоны этих материалов неоптимальны. Один из путей повышения эффективности трехпереходного солнечного элемента – увеличение ширины запрещенной зоны материала верхнего

каскада. Это позволит повысить напряжение, генерируемое каскадом. Одно из препятствий в достижении максимального КПД при уровнях освещенности, соответствующих солнечному излучению в условиях околоземного космоса, состоит в том, что по мере увеличения числа фотоактивных p-n-переходов уменьшается единый для всех p-n-переходов согласованный

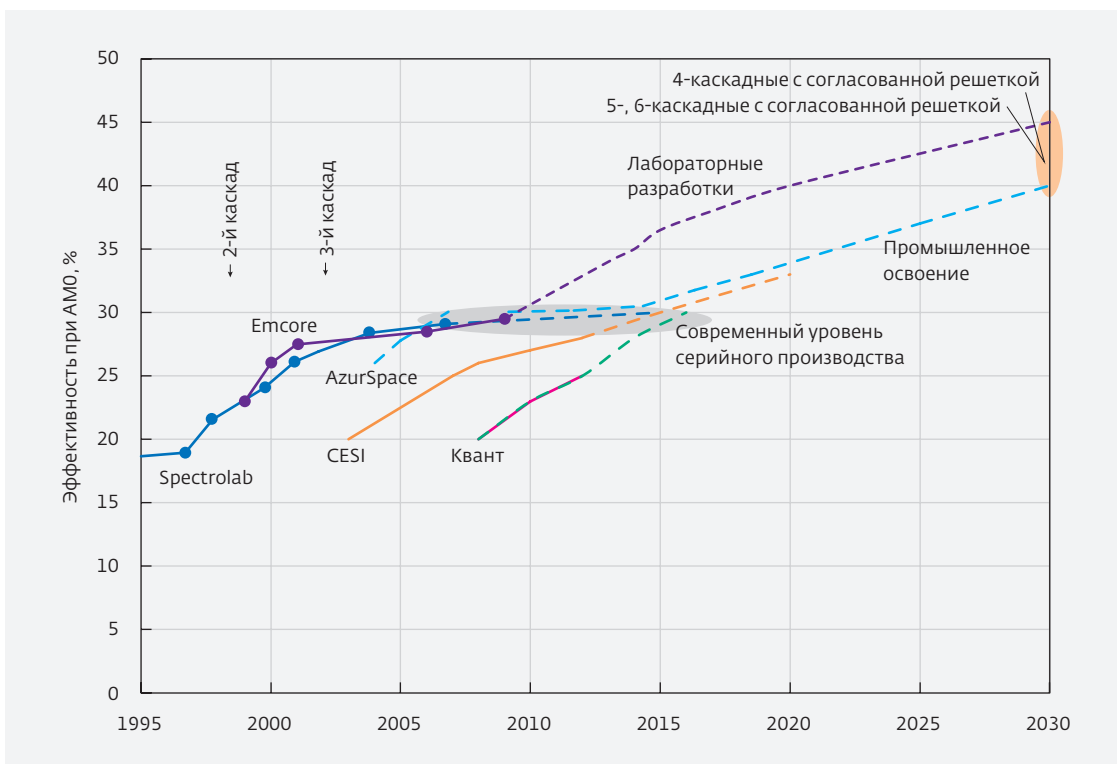


Рис.7. Перспективы развития элементной базы космической фотоэнергетики до 2025 года

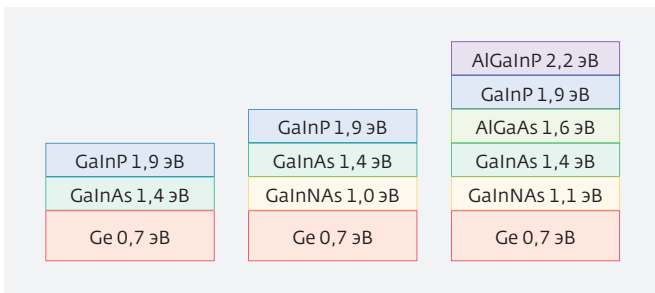


Рис.8. Эволюция каскадных солнечных элементов – возможный путь перехода к многокаскадным (пяти-шести) переходам

генерируемый фототок. Снижение плотности фототока приводит к тому, что повышается роль области пространственного заряда р-п-переходов, так что прохождение носителей через фотоактивные р-п-переходы все в большей мере определяется рекомбинационными и туннельно-рекомбинационными процессами. Уменьшение влияния этих процессов позволит увеличить КПД фотоэлектрического преобразования солнечной энергии.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Рассмотрим перспективы повышения КПД в многокаскадных фотоэлементах (рис.7 и 8). Опыт разработки трехкаскадных фотоэлементов позволяет надеяться на практическую реализацию повышенных значений КПД в четырех-, пяти-, а может быть, и в еще более многокаскадных структурах. Надежды оправдаются, если будут найдены подходящие материалы надлежащего качества для промежуточных каскадов.

Один из перспективных параллельных путей решения этих задач – разработка технологии ультратонких гетероструктурных каскадных солнечных элементов из арсенида галлия на германиевых подложках (рис.9).

Использование ультратонких гетероструктурных каскадных солнечных элементов обеспечивает примерно двукратное снижение суммарных затрат благодаря увеличению удельного энергосъема, а также снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту, процедуры ориентации и стабилизации космического аппарата.

ПРЕДЕЛОВ НЕТ

Использование солнечной энергии в космосе все больше привлекает внимание ученых развитых стран. Существует потребность в большом количестве мощных телекоммуникационных спутников. В отчете

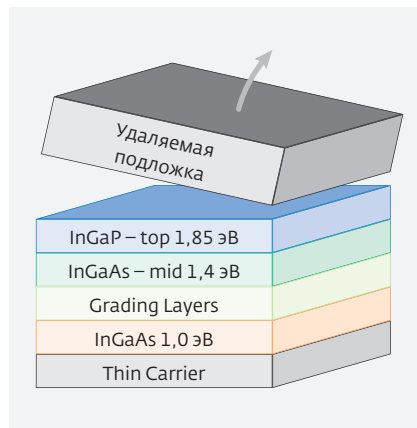


Рис.9. Схема технологии lift-off для получения ультратонких трех-переходных солнечных элементов (толщина Ge – менее 20 мкм)

Euroconsult составлен прогноз на ближайшее десятилетие относительно численности спутников на околоземной орбите. К 2024 году их количество предположительно достигнет 1400, то есть по 140 спутников будут запускать ежегодно. Повышаются требования к энергетическому обеспечению обитаемых орбитальных станций, становится необходимым создание специализированных энергетических спутников, которые могли бы подпитывать космические транспортные средства. В частности, на энергетических спутниках солнечная энергия преобразовывается в электрическую, а электрическая – в лучевую для трансляции энергии с помощью лазерного или СВЧ-луча.

В последние годы в мире возрос интерес к большим космическим солнечным электрическим станциям (КСЭС) как для подпитки других космических аппаратов, так и для передачи энергии на Землю. Это стало возможным благодаря успехам в разработке инфракрасных полупроводниковых лазеров и волоконных световодов: КПД преобразования электроэнергии в инфракрасный лазерный сигнал 70–80%, маленькая расходимость (10^{-5} – 10^{-6} рад) лазерного луча, миниатюризация элементной базы (по световоду диаметром 250 мкм передается световая мощность 50 кВт). Недавно Российское космическое агентство объявило, что проведет эксперимент по беспроводной передаче электрической энергии на земной орбите. Планируется, что электричество посредством лазера с российского сегмента МКС будет передано на транспортный корабль "Прогресс", удаленный от МКС на расстояние полтора километра. Данная система необходима, чтобы в перспективе осуществлять дозаправку космических аппаратов.

Энергоснабжение перспективных станций и производств на Луне и Марсе от КСЭС, находящихся на орбитах вокруг этих космических тел, представляется значительно более реалистичным и эффективным. В более отдаленной перспективе энергию в значительных количествах можно было бы транслировать на Землю. ●