

ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ФОТОЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Вторая половина XX века

КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Начиная с 50-х годов и до конца XX века для автономного и централизованного снабжения потребителей экологически чистой электроэнергией, получаемой методом фотоэлектрического преобразования энергии солнечного излучения, в основном использовались солнечные батареи и СФЭУ с ФЭП из монокристаллического кремния.

Это было обусловлено:

во-первых, тем, что именно для монокристаллического кремниевого диода с p-n переходом при его облучении солнечным светом в 1953 году **впервые было достигнуто рекордное на тот момент значение КПД около 4 % (5-кратное превышение предыдущих достижений)**;

во-вторых, наиболее высоким уровнем развития монокристаллической кремниевой технологии, включающей, например, следующие ключевые операции:

-выращивание сравнительно крупных и структурно-совершенных монокристаллических кремниевых слитков требуемого типа проводимости с необходимым удельным сопротивлением и с низкой концентрацией фоновых примесей;

-разделение слитков на пластины толщиной менее 1 мм;

-утонение пластин и доведение их планарных поверхностей до приборного уровня качества;

-создание p-n перехода методами термодиффузии или имплантации в приповерхностный слой пластины толщиной менее 1 мкм атомов донорной или акцепторной примеси со сложным профилем распределения их концентрации по толщине указанного слоя.

Третьим **исключительно важным обстоятельством** явились колоссальные запасы кремния в земной коре, которые уступают только кислороду и в процентном отношении **составляют около 29 % массы** (чаще всего в природе кремний встречается в виде кремнезема – соединений на основе диоксида кремния SiO_2 – который составляет около **12 % массы земной коры** (масса земной коры оценивается в $2,8 \times 10^{19}$ тонн). По проведенным научно-обоснованным оценочным расчетам при КПД Si-ФЭП около 12 % и снижении толщины диодной структуры примерно до 10 мкм таких запасов кремния достаточно для **серийного производства Si-ФЭП с суммарной пиковой мощностью свыше 200 ТВт (200000 ГВт)**. Это более, чем в 10 раз превышает оценочные потребности в электроэнергии всего мирового сообщества по состоянию на 2100 год (в настоящее время соответствующие потребности составляют около 4 ТВт (4000 ГВт)).

В целом, объективно тесно переплелись крайне благоприятные предпосылки для продуктивного интегрирования достигнутых к тому времени фундаментальных знаний в области физики полупроводников и техники изготовления приборов из монокристаллического кремния с целью разработки и обеспечения серийного выпуска высокоэффективных монокристаллических Si-ФЭП космического и наземного применения.

Таблица 1.2 – Хронология накопленных объемов мирового производства Si-ФЭП

МВт-пик	10^{-5}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-1}$	10^1	$2 \cdot 10^1$	10^3
Годы	1955	1965	1977	1982	1983	1999

До середины 80-х годов основу Si-ФЭП составлял монокристаллический кремний. Однако, начиная со второй половины 80-х, все более заметную конкуренцию начал составлять поликристаллический и аморфный кремний, который в случае наземного применения обеспечивает преимущества экономического характера. На Рис. 1.12 показана эволюция соотношений кремния различной степени структурного совершенства как полупроводниковой основы Si-ФЭП в 1989-1993 годах.

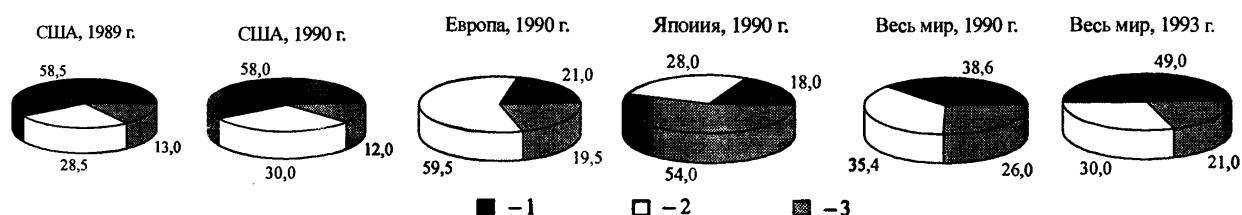


Рисунок 1.12 – Доли моно- (1), поликристаллического (2) и аморфного (3) кремния в производстве Si-ФЭП по странам и годам (в %)

Дальнейшая эволюция рассматриваемого соотношения вплоть до 2000 г. отражена на Рис. 1.13, откуда видно, что доля кремния в мировом производстве Si-ФЭП к концу XX века составляла около 90 %, из которых несколько более 30 % принадлежало монокристаллическому, 50 % - поликристаллическому и 10 % - аморфному кремнию. С ростом объема произведенных Si-ФЭП заметно снижалась стоимость 1 Ватт-пика солнечных батарей – с 40÷50 \$_{США}/Вт-пик в 70-х до 4÷8 \$_{США}/Вт-пик в 90-х (Рис. 1.14).

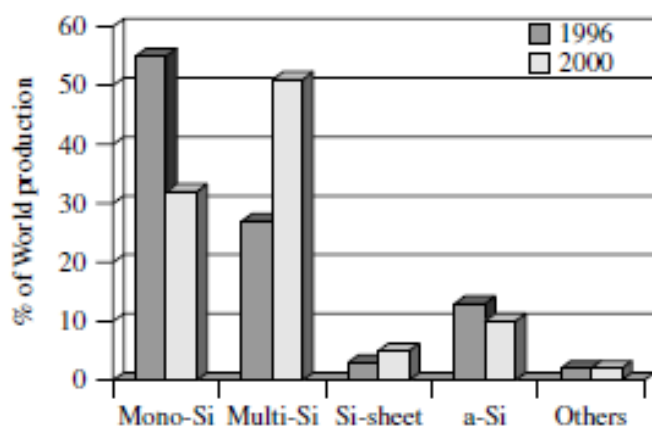


Рисунок 1.13 – Распределение рынка по базовым полупроводниковым материалам серийных ФЭП в 1996-2000 годах

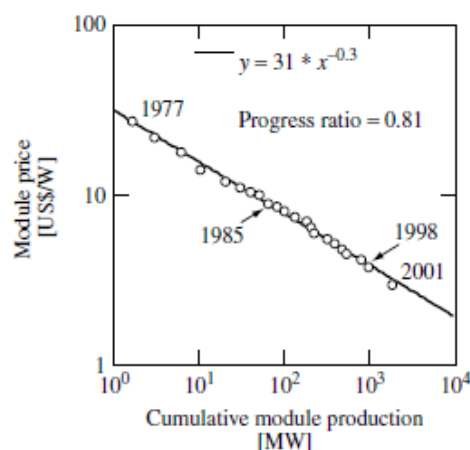


Рисунок 1.14 – Эволюция стоимости 1 Ватт-пика с ростом объема произведенных ФСБ

Рост объема производства фотоэлектрических солнечных батарей (ФСБ) и повышение их КПД существенно снижали стоимость электроэнергии, вырабатываемой различными солнечными фотоэлектрическими установками. Эта тенденция количественно проиллюстрирована в таблице 1.3 применительно к фотоэлектроэнергетическому рынку США на период с 1991 г. по 2000 г. и его задачам на 2010-2030 годы.

Таблица 1.3 – Достижения в 1991-2000 годах и задачи на 2010-2030 годы фотоэнергетического рынка США с учетом СФЭУ, работающих при обычном и концентрированном солнечном излучении

Годы Параметры	1991	1995	2000	2010-2030
Объем произведенных ФЭП, МВт-пик	75	175	400-600	> 10000
Стоимость ФСБ, \$ _{США} /Вт-пик	10-20	7-15	3-7	1-1,5
КПД, %	5-14	7-17	10-20	15-25
Срок службы, лет	5-10	10-20	> 20	> 30
Стоимость электроэнергии, \$ _{США} /кВт·час	0,40-0,75	0,25-0,50	0,12-0,20	менее 0,06

Наземное применение Si-ФЭП

Автономное питание маломощных потребителей: *а* – калькуляторов; *б* - переносных фонарей; *в* - осветителей примитивного жилья; *г* – походной электроаппаратуры; *д* - водяных насосов; *е* – светофоров; *ж* – ночной иллюминации в городах и загородной местности; *з* – телефонов в нежилой местности; *и* – бакенов; *к* – школьной электроники; *л* – медицинских и *м* - гоночных автомобилей (Рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Примеры потребителей солнечной электроэнергии мощностью менее 1 кВт

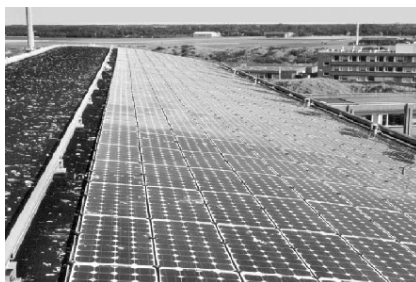
Автономное питание потребителей средней мощности (1-100 кВт):

а – ретрансляторов; *б* – маяков и отдельных коттеджей (остров Монтею на восточном побережье Австралии, соответственно малая и большая ФСБ); *в* - цивилизованного индивидуального жилья; *г* – высокогорных лыжно-туристических баз (Австрия); *д* - крупных административных зданий (ФСБ мощностью 35 кВт-пик на крыше в г. Петтен, Нидерланды); *е* – выставочных, концертных и конференц-залов (ФСБ в качестве кровли одного из конференц-залов в Англии). Эти иллюстрации приведены на Рис. 1.16.





г



д



е

Рисунок 1.16 – Примеры автономных потребителей солнечной электроэнергии мощностью до 100 кВт

Фотоэлектрические солнечные электростанции мощностью свыше 100 кВт для обеспечения сетевых потребителей



а



б

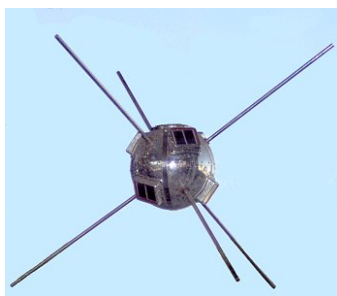


в

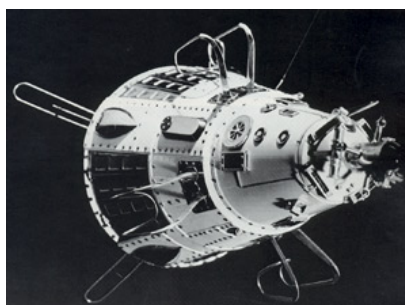
Рисунок 1.17 – Фотоэлектрические солнечные электростанции мощностью: *а* – 350 кВт в Саудовской Аравии (1981 г.); *б* – 2 МВт рядом с бездействующей АЭС в США; *в* - 10 МВт в Испании

Применение Si-ФЭП на космических аппаратах и в авиации

Применение в космосе впервые осуществлено весной 1958 года на первом американском ИСЗ «Авангард-1» (Рис. 1.18,*а*) и третьем советском ИСЗ «Спутник-3» (Рис. 1.18,*б*).



а



б



Рисунок 1.18 – Американский ИСЗ «Авангард-1» (*а*: видны 4 мини-ФСБ) и третий советский ИСЗ «Спутник-3» (*б* и на цветном фото справа: видна одна из четырех мини-ФСБ в верхней части корпуса)

«Авангард-1» имел массу около 1,5 кг и диаметр сферической оболочки 16,3 см. Начальная суммарная мощность его ФСБ составляла около 0,1 Вт, что

обеспечивало бесперебойное электропитание в течение 8 лет радиопередатчика мощностью около 50 мВт.

«Спутник-3» имел массу 1327 кг, диаметр основания 1,73 м и высоту 3,75 м. Начальная суммарная мощность его ФСБ составляла около 5 Вт, что обеспечивало электропитание в течение 2 лет радиопередатчика мощностью 1 Вт и частичную подпитку прибора для изучения характеристик солнечного излучения.

Дальнейшее совершенствование орбитальных космических аппаратов и расширение круга решаемых ими задач потребовало существенного повышения их энерговооруженности. Поэтому суммарная мощность кремниевых ФСБ космического применения в зависимости от назначения космического аппарата составляла от десятков и сотен ватт до десятка киловатт.

На Рис. 1.19 показаны орбитальные космические аппараты СССР и США второй половины XX века различного назначения, обеспечиваемые солнечным электричеством: *а*, *б* – советские ИСЗ с ФСБ мощностью более 100 Вт; *в* – американский «Shuttle» с ФСБ мощностью до 10 кВт; *г* – американская станция «Skylab» с ФСБ мощностью более 10 кВт; *д* – советская станция «Мир» с ФСБ из Si-ФЭП мощностью 30 кВт.

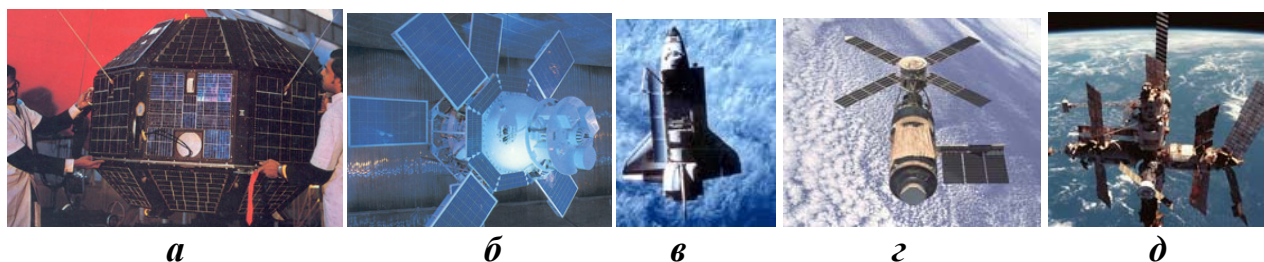


Рисунок 1.19 - Космические аппараты с Si-ФСБ различной мощности

Первый солнечный самолет “Gossamer Penguin” («Паутинный Пингвин») с пилотом взлетел в 1980 году (Рис. 1.20, *а* – левый фрагмент). Он был сконструирован Полом Мак-Криди и построен американской фирмой AeroVironment при участии химической компании Dupont. Аппарат имел собственную массу около 31 кг и размах крыльев 21,7 м. На высоких стойках над фюзеляжем были закреплены солнечные батареи с суммарной мощностью 541 Вт, содержащие 3920 Si-ФЭП. Дальность полета на высоте в несколько метров не превышала 3 км.

Второй вариант солнечного самолета “Solar Challenger” (Рис. 1.20, *а* – два правых фрагмента; *б* – укрупненное изображение) стал первым в истории, пролетев в 1981 году 262 км от Парижа до Мэнстона (графство Кент, Англия) через пролив Ла-Манш исключительно за счет использования солнечной электроэнергии и потратив на это 5 часов 23 минуты. Имел длину 8,8 м, размах крыльев 14,3 м, два электродвигателя, питающихся от фотоэлектрических солнечных батарей с суммарной мощностью 2,6 кВт. Скорость полета составляла 64 км/час при скорости набора высоты 0,76 м/с.

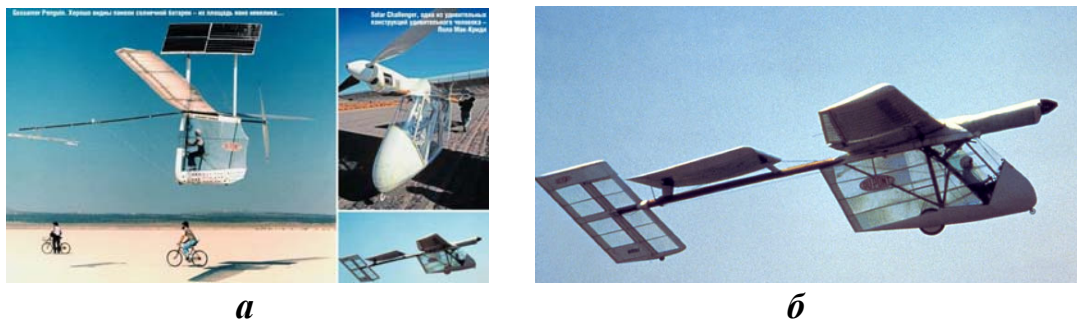


Рисунок 1.20 – Первый солнечный самолет с пилотом “Gossamer Penguin” (*а*, левый фрагмент) и результат его радикального усовершенствования “Solar Challenger” (*а*, два правых фрагмента, *б* - укрупненное изображение)

В 1993-2000 годах в США (NASA) последовательно разрабатывались, изготавливались и испытывались образцы беспилотных солнечных самолетов серии "Pathfinder" («Следопыт», Рис. 1.21).

Первый из них (Рис. 1.21, *а*: 1993-1997 г.г.) имел размах крыльев 30,6 м, 6 электродвигателей с суммарной мощностью около 7,5 кВт, питающихся от ФСБ с КПД около 14 % днем и от аккумуляторов в темное время суток (продолжительностью 2-5 часов). Его скорость полета составляла 24-40 км/час, максимальная высота подъема 21,8 км.

Второй образец "Pathfinder Plus" (Рис. 1.21, *б, в* : 1998-2000 г.г.) имел размах крыльев 37 м, 8 электродвигателей с суммарной мощностью около 12,5 кВт, питающихся от ФСБ с КПД до 19 % днем и от аккумуляторов в темное время суток. Это обеспечило увеличение максимальной высоты его подъема до 24,4 км.

Разработка следующего образца беспилотного солнечного самолета “Helios” началась в США (NASA) в самом конце XX века и завершилась в 2001-2003 годах. Но об этом речь пойдет в следующем разделе.

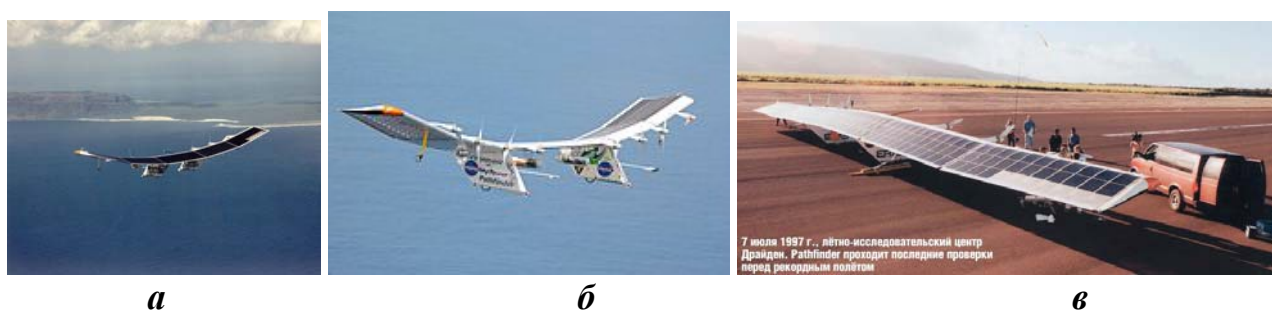


Рисунок 1.21 - Беспилотные солнечные самолеты NASA (США) "Pathfinder" (*а*) и "Pathfinder Plus" (*б, в*) в полете над Гавайями (*а, б*) и на взлетной полосе (*в*)