

МЕЖИНСТИТУТСКИЙ СЕМИНАР
«ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ОПТИКИ
И СПЕКТРОСКОПИИ»

УДК 621.472 : 537.311.33

В. М. ПАЦКЕВИЧ, Л. С. СМИРНОВ
(Москва — Новосибирск)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ НА ЗЕМЛЕ

Человек всегда использовал энергию Солнца, аккумулированную на Земле в ходе различных процессов. По мере истощения удобных для добычи источников топлива проблема производства энергии привела к сложным научно-техническим задачам. В то же время исключительно заманчивой является идея непосредственного использования поступающей ежесекундно энергии солнечного излучения. Доля энергии, вырабатываемой человечеством на всех искусственных установках на Земле, составляет сегодня только около 0,01% поступающей на планету солнечной энергии. Именно поэтому интерес, в частности, к способам прямого превращения энергии солнечного излучения в электроэнергию растет. В 50-х годах был большой всплеск научно-технических разработок, связанный с бурным развитием полупроводников. Теперь снова подъем, стимулированный как наступившим в ряде стран энергетическим кризисом, так и успехами развития полупроводниковой технологии.

Данная работа представляет собой краткое изложение доклада, прочитанного на межинститутском семинаре СО АН СССР и НГУ. Она не является обзором проблемы в полном смысле: так много разнородного материала в настоящее время, задача ее более скромная — познакомить научную общественность с успехами в области прямого преобразования солнечного излучения в электроэнергию полупроводниковыми преобразователями и привлечь молодежь к этой теме.

Статья по стилю получилась во многом научно-популярной; мы думаем, что это соответствует поставленной задаче, тем более, что проблема в целом требует большего внимания.

Энергетическая проблема. Некоторые прогнозы. Быстрый рост населения нашей планеты, рост потребления энергии, истощение источников природного топлива заставляют внимательно изучать и сравнивать все возможные способы получения энергии, вплоть до самых фантастических. Относительный вклад тех или иных источников меняется чрезвычайно быстро. Так, если еще в 1850 г. в США 90% всей энергии получалось за счет сжигания древесины, то теперь (спустя всего 120 лет) во всем мире меньше 15% энергии производится за счет сжигания леса и торфа, а почти 85% — за счет угля, нефти и газа. Современные масштабы разведки, добычи и транспортировки топлива, число занятых в этих сферах людей поражают воображение.

Выработка энергии и ее потребление распределены по странам неравномерно, например, на каждого жителя Америки и Западной Европы приходится в 20—50 раз больше энергии, чем на жителя Азии или

Африки (данные приведены без учета СССР), но, по-видимому, с развитием промышленности это различие будет уменьшаться. Вопрос об источниках энергии станет еще более острым, поэтому взвешиваются потенциальные возможности буквально всего: ветра, приливов, тепла недр и т. д. В этом ряду видное место занимает сжигание отходов, которое может дать до 10% производства энергии на сегодняшний день, и специальное выращивание растительной массы. В некоторых странах заметная доля энергии получается в виде электроэнергии на гидро- и атомных станциях. Например, в СССР доля электроэнергии, полученная на гидростанциях, составляла в 1977 г. 12,7%. Но возможности получения гидроэнергии ограничены, а потребление растет сверхбыстрыми темпами. Довольно осторожные оценки приводят к выводу о необходимости увеличения выработки и потребления энергии на планете в 10—15 раз, если разница энергообеспеченности жителей разных стран не останется на прежнем уровне.

В рамках данной работы трудно даже кратко охарактеризовать все идеи, все проекты получения энергии: так их много (см. библиографию). Но среди них атомные станции, управляемый термоядерный синтез и возможность непосредственного использования энергии Солнца занимают особое место. Каждый из этих способов дает в принципе тепло и электроэнергию. На обогревание помещений в развитых странах с умеренным климатом тратится до 20% всей получаемой энергии, в будущем эта доля, видимо, несколько снизится, так что наибольший интерес представляет получение электроэнергии, хотя и отопление за счет солнечного излучения сулит немалую экономию. Есть сообщение, что в США к 1980 г. будет свыше 500 000 жилых домов площадью 100—150 м² с солнечным отоплением. Интересно, что даже на БАМе (г. Тынды) строители приступили к сооружению первого экспериментального дома с солнечным подогревом. Подсчитано, что здесь солнечных дней весной и осенью не меньше, чем в районах Средней Азии.

Атомные электростанции имеют высокий КПД при больших установочных мощностях. По-видимому, это же будет справедливо и для термоядерных реакторов. Таким образом, проблема передачи энергии на значительное расстояние остается и здесь. Стоимость электроэнергии даже при передаче ее наиболее экономичным способом возрастает в 2 раза на 500 км (примерно такие же цифры и для транспортировки угля). Отсюда еще одна проблема — энергия нужна повсюду, поэтому понятен интерес человечества к солнечной энергии, так как использование этого источника доступно повсеместно и может удовлетворить потребности многих местных производств.

Есть еще один фактор, с которым со временем приходится считаться все больше и больше. Любой способ получения энергии в конечном счете ведет к выделению тепла. В настоящее время человечество вырабатывает всего 0,01% энергии дополнительно к той, которая поступает к нам от Солнца. Выработка энергии в значительно больших масштабах приводит к изменению теплового баланса планеты — теплового загрязнения среды, что породит новые неожиданные проблемы. Атомная и термоядерная энергетика не спасает от теплового загрязнения, и только использование методов прямого превращения энергии Солнца в электроэнергию свободно от этого недостатка.

Солнечная энергия и краткая характеристика возможности ее использования. Низкая плотность потока солнечной энергии является основным фактором, препятствующим ее широкому использованию, но положение не столь безнадежно, как кажется на первый взгляд. Величина 1 кВт/м² на площадку, расположенную перпендикулярно к лучу света в безоблачный день, может быть взята для оценок, а цифра 10 кВт/ч — в качестве средней меры потребления на одного человека

(что несколько выше современного усредненного по земному шару потребления).

Если это так, то на одного человека нужно всего 10 м^2 площади солнечного преобразователя при КПД=10%! Это совсем немного. На миллионный город $\sim 10 \text{ км}^2$, на Новосибирск $\sim 15 \text{ км}^2$, тогда как только площадь Новосибирского водохранилища $\sim 1000 \text{ км}^2$. На все 4 млрд. жителей Земли нужен преобразователь общей площадью $200 \times 200 \text{ км}^2$ (это малая доля многих залитых солнцем пустынь). Крыши одноэтажного дома вполне достаточно для сбора энергии на семью с учетом ночи и облачных дней! Это очень обнадеживающая оценка, но практическая реализация данной схемы встречает несколько серьезных трудностей, порождающих пессимизм:

- 1) неравномерность распределения солнечной энергии по странам;
- 2) суточная цикличность и необходимость аккумуляции энергии;
- 3) изменчивость погодных условий;
- 4) КПД преобразователей, стоимость изготовления и их эксплуатации.

Для характеристики энергии солнечного излучения приведем таблицу из книги Бринкворта (с. 59):

Энергия солнечного излучения на горизонтальную площадку в чистой атмосфере

Район	Энергия E , кВт·ч/м ²		
	E_{max} (за день)	E_{min} (за день)	Годовое значение
Экватор	6,5 (7,5)	5,8 (6,8)	2200 (2300)
Тропики	7,1 (8,3)	3,4 (4,2)	1900 (2300)
Средние широты	7,2 (8,5)	1,2 (1,7)	1500 (1900)
Центральная Англия	7,0 (8,4)	0,5 (0,8)	1400 (1700)
Полярный круг	6,5 (7,9)	0 (0)	1200 (1400)

Примечание. Цифры в скобках дают полную энергию с учетом рассеянной составляющей. Облачность значительно меняет условия: так, для района Англии годовое значение энергии всего 900 кВт·ч/м², т. е. почти вдвое ниже ожидаемого.

Таким образом, взятая нами для оценки средняя величина $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в сутки несколько завышена. На самом деле она колеблется от 3 до $6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, если коллектор расположен горизонтально, но может быть значительно выше, если приемные панели следят за Солнцем или расположены оптимально.

Таким образом, неравномерность излучения в общем-то невелика, чтобы можно было говорить о непригодности солнечных источников в каких-либо районах.

Однако колебания интенсивности во времени, а главное суточные циклы, ставят проблему аккумуляции энергии. Этот вопрос может решаться разными путями: сохранением тепла в водяных или каменных накопителях, использованием энергии для производства горючего, например водорода, зарядкой электрических батарей и т. д. Здесь интересно привести еще одно соображение в пользу солнечной энергии. Активность человека, работа многих производств, особенно мелких, также циклична, и она повторяет световой день. Можно надеяться, что учет этого обстоятельства во многом упростит проблему.

Вопрос о КПД очень сложен. Нужно и просто тепло, нужна электроэнергия, нужно топливо (например, горючий газ — метан или водород). Каждая программа решается по-своему, но возможны коллективные решения, и, конечно, нет никаких сомнений, что основное внимание должно быть уделено получению электроэнергии.

КПД нагревателей может достигать 60—70% (а то и выше), если применять зачерненные панели и простейшие ловушки тепла с воздуш-

ной изоляцией. Именно по такому пути идут, устраивая солнечное отопление зданий. Но вот КПД других способов обычно невелик; по-видимому, некоторым пределом, ниже которого нельзя обсуждать всерьез устройства как преобразователи солнечной энергии, будет $\text{КПД} < 3-5\%$. Этот предел можно обосновать сравнением с естественными методами. Подсчитано, что в природе КПД использования солнечной энергии растениями — около 1%. В искусственных условиях (идеальных) удается поднять КПД фотосинтеза до 11%. Но при этом конечный КПД, если далее использовать обычные тепловые машины, резко падает, так что фотосинтез вне конкуренции только при непосредственном производстве продуктов питания.

Интересны оценки специального выращивания растений для получения твердого топлива или горючего газа, проведенные в США. Согласно им, метанол, добываемый из древесины, смог бы конкурировать с бензином уже через 10 лет, а ферма морских водорослей, расположенная между Сан-Диего и Сан-Франциско, даст горючий газ в количествах, достаточных для удовлетворения всех потребностей страны в газе. Это обнадеживающие прогнозы, но нужно заметить, что такие способы становятся эффективными только при естественной сушке (солнце, ветер) растений, т. е. при добавочном потреблении энергии.

Крупным недостатком фотобиологических и фотохимических способов является то, что солнечная энергия усваивается объемными устройствами. Это связано с малыми коэффициентами поглощения света и с необходимостью подводить к активным участкам нужные газы или жидкость (строительные материалы— CO_2 , N_2 , H_2 , воду и т. д.). Необходимость сбора растений, их сушки, хранения, транспортировки также является большим неудобством и ведет к затратам дополнительного труда.

В ряду всех рассматриваемых способов использования солнечной энергии получение электроэнергии с помощью полупроводниковых преобразователей занимает особое место. Это обусловлено, по крайней мере, тремя факторами:

1. Высокий КПД. Серийные кремниевые батареи имеют КПД выше 10%, а рекордные величины для кремния и арсенида галлия превышают 20%.

2. Малые толщины активной среды. Полупроводниковые преобразователи требуют толщин активной среды, больших или равных глубинам поглощения солнечного света, т. е. толщин от долей микрона до нескольких микрон. Это тонкие пленки.

3. Удобная форма преобразования энергии. В этом методе энергия сразу получается в очень удобной форме в виде электроэнергии и устройства не требуют никакой дополнительной работы (кроме ремонта и чистки поверхностей, что есть и в любом другом методе).

Такие достоинства, как чистота, возможность получения электроэнергии практически в любом месте, возможность изготовления солнечных преобразователей на заводах в серийных масштабах, наличие ненаселенных солнечных районов, делают данный способ заслуживающим самого большого внимания и для наземных целей (в космосе для питания космических кораблей и орбитальных станций он уже себя зарекомендовал).

Успешная работа солнечных полупроводниковых батарей в космосе и развитие космической техники позволили рассматривать совсем фантастические проекты: солнечная полупроводниковая электростанция на орбите, а энергия от нее с помощью микроволновых генераторов передается на наземную приемную станцию. Оказалось, что в этой схеме есть большие достоинства, которые нужно учитывать уже сейчас. Ниже мы вернемся к этому вопросу.

Солнечные полупроводниковые преобразователи. Принцип работы солнечного полупроводникового преобразователя достаточно прост. Это

полупроводниковый диод, освещаемый светом. Возбужденные светом электронно-дырочные пары разделяются полем $p-n$ -перехода диода, и в результате одна его обкладка заряжается отрицательно, а другая — положительно. Если их соединить на внешнюю нагрузку, то в ней пойдет ток электронов. Соединяя диоды последовательно или параллельно, можно получить источник с требуемыми параметрами.

Точно так же будет работать и устройство с гетеропереходом, здесь в контакт приведены не две части одного и того же полупроводникового материала, а два различных полупроводника с отличными величинами энергии связи валентных электронов.

Для получения высокой эффективности преобразователя важно использовать как возбужденные неравновесные электроны (электроны, вырванные светом из валентных связей), так и дырки (оставшиеся места в зоне валентных связей, которые способны двигаться, перенося заряд). Это накладывает определенные требования на свойства полупроводниковых слоев вблизи границы раздела: длины диффузии неравновесных носителей заряда не должны быть меньше глубины поглощения света. Иногда это сложная технологическая проблема.

Необходимость иметь определенную разность потенциала перехода, малые обратные токи диодов задают требования на легирование полупроводников. КПД преобразователя в большой мере будет зависеть от того, сколько света поглотилось в активной области и как мало энергии потрачено на внутренние потери источника. Отсюда целый комплекс технических условий: резкий переход; большие открытые поверхности, максимально приближенные к области внутреннего электрического поля; малые площади верхних проводящих дорожек; малые сопротивления «растекания» (сопротивления вдоль полупроводниковых слоев); малые паразитные шунты. Именно всем этим обусловлена необходимость глубоких физических исследований в сочетании с широким технологическим поиском для разработки того или иного конкретного варианта.

Теоретический КПД полупроводниковых устройств может быть оценен по следующей схеме. Падающая солнечная энергия — 100%. Часть ее отражается от приемника или поглощается неактивно, в лучшем случае это 30% (остается $\sim 70\%$). Далее, поскольку наш преобразователь — это источник постоянного тока, то он, как известно, отдаст во внешнюю цепь максимальную энергию при равенстве внутреннего и внешнего сопротивлений (КПД уже только $\sim 35\%$). И наконец, существует еще мощный канал потери энергии. Энергия Солнца доходит до Земли в широком спектральном диапазоне, тогда как энергии связи электронов строго фиксированы, поэтому трудно подобрать полупроводник (или систему полупроводниковых слоев) так, чтобы большая часть энергии даже активно поглощенного света не пропадала вхолостую (избыток энергии неравновесные электроны отдают тепловым колебаниям), не говоря уже о том, что часть энергии излучения поступает в виде квантов с энергиями, недостаточными для разрыва валентных связей. Отсюда ожидаемый КПД еще ниже и составляет только 20—25%, а реально он дополнительно снижается за счет схемных потерь (шунты, последовательные сопротивления, экранировки). Таким образом, получаемые в настоящее время солнечные панели элементов на основе кремния или арсенида галлия имеют почти теоретические значения КПД.

Стоимость панелей, однако, такова, что их применение оправдано только для космоса и редких наземных станций или буев в труднодоступных районах. Нужно снизить цену установочной мощности (цену оборудования для получения, например, киловатт-часа энергии) примерно в 50—100 раз, чтобы этот способ стал конкурентоспособным по сравнению с традиционными. Если учесть, что стоимость единицы энер-

гии в среднем постоянно повышается и есть заметные успехи в деле снижения стоимости панелей солнечных батарей, то их массовое применение можно ожидать уже в довольно близком будущем. Проблема комплексная, и здесь многое будет зависеть от решения как основных, так и сопутствующих проблем. Главное — как снизить стоимость? В настоящее время основной путь создания солнечных батарей идет через выращивание совершенных монокристаллов, затем их резки, обработки в особо чистых условиях, диффузии примесей или нанесения тонкого слоя монокристаллов кремния поликристаллов такой же степени чистоты снижает стоимость единицы площади преобразователей в 2—3 раза, но при этом КПД падает до 4%; таким образом, стоимость одного киловатта полезной мощности оказывается неизменной. Однако переход на пленочные преобразователи — один или несколько полупроводниковых слоев, получаемых напылением, осаждением, напылением или любым другим способом, дает снижение стоимости на порядки величины, хотя и здесь КПД, как правило, не превышает нескольких процентов. Много работают сейчас в области создания таких преобразователей на основе металлических пленок и покрытий из сульфида кадмия, хотя этот полупроводник не является оптимальным с точки зрения использования энергии солнечного спектра.

Исключительно интересные результаты были получены в последние годы, когда удалось легировать не кристаллический, а аморфный кремний, осажденный в виде пленок из газовой среды. Этого удалось достичь, насытив аморфный кремний водородом, который компенсировал большую часть активных неупорядоченных связей кремния (уменьшил плотность состояний), что позволило проявиться обычным примесным эффектам. Несмотря на то, что достигнутые КПД на таких слоях — 4—6% (можно надеяться, что это не предел), возможность автоматизации процесса, получения гибких панелей и т. д. делают работу по использованию аморфного кремния заманчивой. Появились также в последнее время сообщения об успехах использования полупроводниковых свойств некоторых халькогенидных стекол.

Таким образом, путь снижения стоимости установочной мощности вполне реален. Управление исследований и разработок в области энергетики США объявило программу, цель которой снижение стоимости установочной мощности с 17—20 долларов/Вт до 5 долларов/Вт в 1979 г. и в 1980 г. — демонстрация возможности снижения ее до 50 центов.

Есть и другие способы повышения КПД и снижения стоимости. Например, применение концентраторов солнечного излучения. КПД устройств на кремнии и арсениде галлия практически не меняется при увеличении интенсивности излучения в 10 раз, а пластмассовый концентратор намного дешевле, чем батарея этой площади. Или, как это делается в Калифорнийском технологическом институте, за счет применения люминесцентных красителей в пластмассе можно трансформировать часть спектра солнечного излучения в активно поглощаемый полупроводником свет. Если хотя бы часть оптимистических прогнозов оправдается, мы вправе ожидать разительных перемен в энергетике. А пока — время сравнений, обсуждения проектов, проведения фундаментальных исследований.

Мы уже упоминали о проекте космической электростанции (США). Ее мощность 5 млн. кВт при весе 18 000 тонн (это кремниевые панели).

Диаметр приемной антенны на земле 5—7 км. Подсчитано, что создание станции при современных методах изготовления панелей и транспортировки грузов на орбиту могло бы окупиться через 15 лет работы. Достоинства налицо, но есть и сомнения. Главное из них — плотность потока энергии, поступающей со станции, оказывается лишь немного большей плотности солнечной энергии на Земле, таким образом, стабильность поступления энергии дается ценой преодоления больших технических трудностей. По-видимому, более реален путь от создания небольших автономных источников и уникальных станций в особых условиях, начиная с элементов питания карманных калькуляторов, к более сложным — на основе накопления опыта. Человечество никогда не пользовалось только одним источником энергии; источники всегда дополняли друг друга с учетом реальных условий.

В заключение нужно сказать, что обсуждаемой проблеме во всем мире уделяется большое внимание. Капиталовложения в исследования и разработки в таких странах, как США, Япония и ФРГ, в сумме исчисляются миллиардами долларов.

В СССР большие территории залиты солнцем. Это не только районы Средней Азии, но и Сибирь, Алтай, Казахстан. Солнечных дней здесь зачастую в 1,5 раза больше, чем в Центральных областях нашей страны.

Именно в этих районах с их просторами и относительно редко расположенными городами и поселками обеспечение электроэнергией удаленных объектов обычными способами оказывается дорогим, так как для этого требуется либо сложная линия электропередачи, либо подвоз топлива, что не всегда просто.

В этих же районах экстремально чист воздух из-за отдаленности от океанов и пыльных пустынь.

Конечно, при разработке проблемы прямого преобразования солнечной энергии в электроэнергию полупроводниковыми устройствами встает масса технических вопросов, вплоть до защиты панелей от ветровых нагрузок и обледенения, но, по-видимому, их не меньше и в любом новом деле.

Постоянный поиск, сравнение вариантов, разработка и использование новых технологий должны ответить на вопрос, какой источник энергии выгоднее в том или ином случае, и способ получения электроэнергии полупроводниковыми преобразователями должен быть постоянно в зоне внимания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полупроводниковые преобразователи энергии излучений. Сб. статей под ред. Ю. М. Маслаковца и В. К. Субашиева. М., ИЛ, 1959.
2. Лидоренко Н. С.— «Гелиотехника», 1969, № 6.
3. Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые преобразователи. М., «Сов. радио», 1971.
4. Семенов Н. Н. Об энергетике будущего.— «Наука и жизнь», 1972, № 10, 11.
5. Кириллин В. А. Энергетика — проблемы и перспективы.— «Коммунист», 1975, № 1.
6. Бринкворт Б. Дж. Солнечная энергия для человека. М., «Мир», 1976.
7. Федеральная программа разработки солнечных батарей.— «Электроника», 1975, № 5.
8. Получение водорода фотоэлектролизом.— «Электроника», 1975, № 22.
9. Развертывание работ в области вентиляльных фотоэлементов.— «Электроника», 1975, № 23.

Поступила в редакцию 18 января 1978 г.