

Солнечная энергетика: подрастающий игрок

Кандидат физико-математических наук
И.А.Гвоздкова,
доктор физико-математических наук
Д.Ю.Паращук



Сегодня цивилизованная жизнь немыслима без освещения, отопления, бытовой техники и электронных приборов. Кроме того, любое производство требует энергетических затрат. Сколько же энергии необходимо современному человечеству? Глобальная потребность соответствует мощности 10^{13} Вт, каждому человеку в среднем нужно около 1,5 кВт, что равно мощности обычного электрического чайника. Откуда же берется такое количество?

Первичный и основной источник энергии на Земле — Солнце. Оно согревает и освещает нашу планету, способствует движению потоков воздушных масс. Зеленые растения накапливают солнечную энергию в процессе фотосинтеза в химических связях органических веществ. Умершие организмы превращались и сейчас превращаются в уголь, нефть, природный газ, торф. Таким образом, в традиционных энергоносителях накоплена энергия солнца, и мы используем ее, преобразуя в тепло, электричество и другие виды энергии.

Солнце — неиссякаемый, щедрый источник энергии, который будет существовать еще миллиарды лет. Если собрать энергию Солнца, падающую на нашу планету в течение одного часа, то всему человечеству ее хватило бы на целый год. На 1 м^2 земной поверхности в ясный день падает около 1 кВт солнечной мощности, то есть примерно столько, сколько надо в среднем каждому жителю Земли. Около 34% поступающей на Землю солнечной энергии поглощается растениями и утилизируется в процессе фотосинтеза, а остальное рассеивается — вот эту часть и можно было бы использовать для массового производства необходимой человечеству энергии. А поскольку наши энергетические аппетиты растут, то в ближайшие 30–50 лет потребление увеличится еще в два-три раза.

За счет чего можно увеличить производство энергии? Основные известные сегодня способы — наращивать мощности атомной энергетики и развивать нетрадиционные технологии: солнечную, водородную, ветровую энергетику, использовать биомассу (см. «Химию и жизнь», 2007, № 1 и 2).

Надо иметь в виду, что не только прямое сжигание органического топлива, но и преобразование энергии атомных ядер способствует глобальному тепловому загрязнению нашей планеты. Если энергия, полученная этими спо-

собами, достигнет 1% от общего количества, которое приходит на Землю от Солнца, то средняя температура на поверхности увеличится на 1°C , что может привести к глобальным нежелательным последствиям. По оценкам ученых, безопасный предел производства энергии на атомных и тепловых электростанциях суммарно не должен превышать 0,1% мощности достигающей Земли солнечной энергии, то есть 100 млрд. кВт. Сейчас это величина равна примерно 10 млрд. кВт, что всего лишь в десять раз меньше допустимого предела. Поскольку в последние десятилетия ежегодный прирост производства энергии на АЭС и ТЭС равен нескольким процентам, то безопасный предел может быть достигнут уже в этом веке.

Солнечная энергетика, как и большинство возобновляемых источников энергии, экологична и почти не влияет на окружающую среду. С ее помощью можно нагреть бак с водой, получить из воды водород или зарядить аккумулятор — она универсальна. Вот почему солнечная энергетика (гелиоэнергетика) может стать лидирующей в будущей мировой энергетической системе.

История гелиоэнергетики

Согласно легенде, солнечная энергия помогла древнегреческому ученому Архимеду из Сиракуз в III в. до н. э. сжечь римские корабли. По его приказу солдаты, построившись на берегу моря, повернули свои щиты к солнцу и сфокусировали отраженные лучи на парусах вражеских судов, после чего они загорелись.

Первые современные попытки практического использования солнечной энергии относятся к концу XIX — началу XX века. В 1878 году на Всемирной выставке в Париже

Солнечная энергетика сегодня и в будущем

Вид технологии	Мощность по производству энергии	
	2000 г., ГВт (факт)	2010 г., ГВт (прогноз)
Солнечные батареи	0,9	9,2
Солнечные термодинамические электростанции	0,4	10
Солнечные коллекторы	13	55
Итого:	14,3	74,2



РЕСУРСЫ

1
Рюкзак и куртка со встроенными солнечными батареями

французский изобретатель О.Мушо продемонстрировал созданную им паровую машину, в которой солнечная энергия, сфокусированная зеркалами на паровом котле, превращала воду в пар, а он приводил в движение печатную машину. В начале XX века в Калифорнии изобрели солнечные насосы для орошения — насос вращал пар, полученный при нагревании воды сфокусированным солнечным светом. Тогда же появились и эффективные солнечные водонагреватели.

Сегодня люди научились преобразовывать энергию Солнца (см. таблицу) не только в тепло с помощью солнечных коллекторов (обычно зачерненных алюминиевых листов с трубками, по которым течет теплоноситель), но и в электричество, используя солнечные термодинамические электростанции или фотоэлектрические элементы (солнечные батареи).

На солнечных термодинамических электростанциях тепловую энергию Солнца используют для производства пара, вращающего турбогенератор, который вырабатывает электричество. Первые солнечные электростанции (СЭС) появились в 80-х годах XX века и имели мощность несколько мегаватт. В частности, одна такая экспериментальная станция заработала в 1985 году в Крыму (мощность ее составляла около 5 МВт).

Из всех известных способов использования энергии Солнца наиболее эффективный и проверенный — фотоэлектрический, с помощью полупроводниковых солнечных батарей. Впервые фотоэффект (возникновение электрического тока при поглощении света веществом) наблюдал в электролитической ячейке в 1839 году французский физик Э.Беккерель. В 1905 году А.Эйнштейн объяснил законы фотоэффекта, которые сформулировал русский физик А.Г.Столетов, квантовым характером излучения и поглощения света. В 30-х годах XX века в Ленинградском физико-техническом институте были созданы первые в мире фотоэлементы — сернисто-таллиевые батареи с КПД около 1%. Но до практического применения было еще далеко. Кремниевые фотоэлементы с КПД около 5% заработали в 1958 году на советском и американском искусственных спутниках Земли. С тех пор почти шестьдесят лет их испытывают на Земле и в космосе.

Фотоэлектрический эффект, лежащий в основе работы солнечной батареи, состоит в том, что в соответствующем веществе при облучении светом появляются носители тока — электроны и дырки. Их разделяют и собирают на электроды с помощью полупроводниковых *p-n* переходов или гетеропереходов. Первый вариант — классический *p-n* переход реализуют на контакте двух областей полупроводника (например, кремния), в который добавлены различные элементы.

Гетеропереход образуется при контакте двух разных по-

лупроводников — например, арсенида галлия и арсенида алюминия. Первые гетеропереходы, а позже и фотоэлементы на их основе получила группа Ж.И.Алферова в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе в Ленинграде около 40 лет назад, и за это Алферов в 2000 году получил Нобелевскую премию по физике.

Солнечное сегодня

В последнее время развитые страны все больше осознают потенциал гелиоэнергетики. Даже Северная Европа, где солнечных дней меньше, а интенсивность солнечного света невелика по сравнению с южными странами, активно ведет разработки в этой области. Гелиоэнергетические программы развиваются сейчас более чем в 70 странах мира.

Рынок устройств для преобразования солнечной энергии в 2005 году составлял 11,2 млрд. долларов и, по прогнозам специалистов, должен увеличиться к 2015 году до 51,1 млрд. Он включает различные устройства для преобразования энергии Солнца — для транспортных средств, а также аккумуляторы для мобильной электроники, (рис.1). Разработка фотоэлектрических преобразователей превратилась в отдельную область исследований, называемую фотовольтаикой.

Современные коммерческие солнечные фотоэлементы на ярком солнечном свете могут с 1 м² обеспечить выходную мощность 120–150 Вт. Если батареями с эффективностью 10% покрыть небольшой кусок поверхности Земли (квадрат со стороны в несколько сотен километров), то это удовлетворит все мировые потребности в энергии. Для нашей страны такой квадрат должен иметь сторону несколько десятков километров.

Сейчас суммарная установленная мощность солнечных батарей в мире около 5 ГВт, что меньше 0,1% от мощности всей мировой энергетики. Однако темпы развития фотоэлектрического способа производства энергии впечатляют: за последние 10 лет произошел стремительный рост установленных мощностей солнечных батарей. Среднегодовой темп роста потребления фотоэлектричества сейчас один из самых высоких среди всех источников энергии — около 30% в год.

Лидеры по производству энергии из солнечного тепла и света — Германия и Япония. Самая крупная солнечная электростанция запущена в 2004 году в Германии недалеко от Лейпцига. Она состоит из 33,5 тысяч модулей общей мощностью 5 МВт, что позволяет осветить и обогреть 1800 домов. По подсчетам, одна такая станция сокращает выбросы углекислого газа на 3,7 тыс. тонн в год. В Португалии к 2009 году планируется построить солнечную электростанцию, содержащую 350 тысяч солнечных батарей, общей мощностью 62 МВт. Стоимость проекта — 250 млн. евро.

В Швейцарии работают более 700 гелиоустановок мощностью от 1 кВт до 0,5 МВт. Швейцарские ученые разработали и запатентовали прозрачные солнечные батареи, которые могут одновременно служить окнами. Внутри таких интеллектуальных окон помещена специальная плен-

ка-хамелеон — она не только преобразует задержанный свет в электричество, но и регулирует естественное освещение.

Фотоэлектрический способ производства энергии имеет большие преимущества — батареи мобильны и долговечны. Их можно устанавливать на крышах зданий, автомобилях, на крыле самолета. Фотоэлементы можно также встроить в различные устройства и предметы потребления — в сумки, часы, одежду, мобильные телефоны, компьютеры и т. д. В солнечных батареях нет движущихся частей, а использовать их можно в среднем 30 лет.

Классические кремниевые фотоэлементы бывают трех типов: моно-, поликристаллические и аморфные. КПД лучших образцов солнечных кремниевых батарей (из монокристаллического кремния) достигает 22–26%, но они самые дорогие. Наиболее распространенные батареи — из поликристаллического кремния. Их КПД ниже, и они менее стабильны во времени. Однако они и стоят намного дешевле. В аморфном кремнии, в отличие от кристаллического, нет структурированного положения атомов — соответственно хуже полупроводниковые свойства и, следовательно, еще меньше КПД преобразования света (около 6%). Срок службы фотоэлектрического преобразователя на его основе также существенно меньше. Однако для производства таких элементов необходимо гораздо меньше кремния, и он может быть нанесен практически на любую поверхность — стекло, металл или другой материал.

Фотоэлементы на основе арсенида галлия и родственных ему соединений показывают рекордные значения КПД. Он может превышать 30%, а по теоретическим расчетам и 50%! Структура таких солнечных батарей подобна слоеному пирогу из нескольких десятков различных полупроводниковых слоев, в котором каждый слой имеет свой состав и толщину около сотни нанометров. Однако стоимость таких многослойных фотоэлементов слишком высока. Поэтому, чтобы эффективно использовать эти дорогие и технологически сложные фотоэлектрические преобразователи, применяют концентраторы солнечной энергии — большие светособирающие линзы. По-видимому, в космосе такие светопреобразующие устройства вне конкуренции, однако их масштабное применение в земных условиях вряд ли экономически оправдано.

Итак, что же сдерживает развитие гелиоэнергетики? Почему ее удельный вес в общем производстве энергии в мире до сих пор менее 1%? Солнечная энергетика — самый материалоемкий вид производства энергии. Так, традиционная кремниевая технология, на основе которой сегодня в основном изготавливают солнечные батареи, требует значительных материальных затрат. Солнечные батареи из арсенида галлия еще дороже. В результате стоимость электроэнергии, произведенной на термодинамических СЭС, — 8–11 цент/кВт.ч, на фотоэлектрических СЭС — около 20 цент/кВт.ч; среднемировая цена электроэнергии — 7–8 цент/кВт.ч.

Кроме того, наземные солнечные электростанции имеют в среднем небольшую эффективность — чуть больше 10%. К тому же ночью станция не работает, а в пасмурные и облачные дни ее отдача падает. Поэтому появился проект по размещению СЭС в космосе на геостационарной орбите, где поток солнечной энергии практически постоянен и выше в несколько раз, чем в солнечный день на Земле. Передавать энергию с космической СЭС на Землю предлагается с помощью радиоволн сверхвысокой частоты.

Основная задача ученых, инженеров и технологов, занимающихся солнечной энергетикой, — разработать более дешевые солнечные батареи и усовершенствовать технологии их производства. Если удастся снизить стоимость электроэнергии, получаемой от Солнца, может быть, наконец станут рентабельным электролиз воды и получение водорода — одного из самых калорийных топливных ресурсов, с которым многие связывают будущее мировой энергетики.

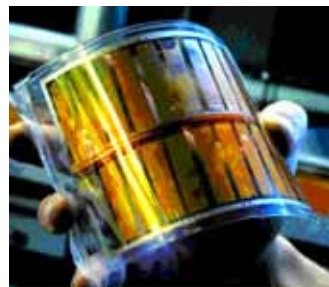
Солнечное завтра

Итак, все опять упирается в необходимость научных разработок и активных исследований. Солнечная энергетика только тогда сможет стать одним из лидеров мировой энергетики, когда удастся создать дешевые, экологически чистые материалы с полупроводниковыми свойствами. В идеале это должна быть пленка не толще одного микрона, эффективно поглощающая солнечный свет и преобразующая его в электрический ток. Кроме того, желательно, чтобы материалы для солнечных фотоэлементов состояли из распространенных на Земле химических элементов, например таких, как кремний.

Еще раз уточним основные недостатки фотоэлементов на основе неорганических полупроводников (кремния, арсенида галлия и др.). Во-первых, это высокая цена современных полупроводниковых технологий, требующих высоких температур и вакуума. Во-вторых, кристаллический кремний, на основе которого производят самые долговечные и эффективные солнечные панели, слабо поглощает солнечный свет. Из-за этого приходится увеличивать толщину рабочего слоя до сотен микрон, а это еще повышает стоимость батареи. Основные усилия в фотовольтаике направлены на поиск дешевых технологий получения кремниевых наноструктур, способных сохранить уникальные фотоэлектрические свойства кристаллического кремния. Производство арсенида галлия не только дорого, но и токсично.

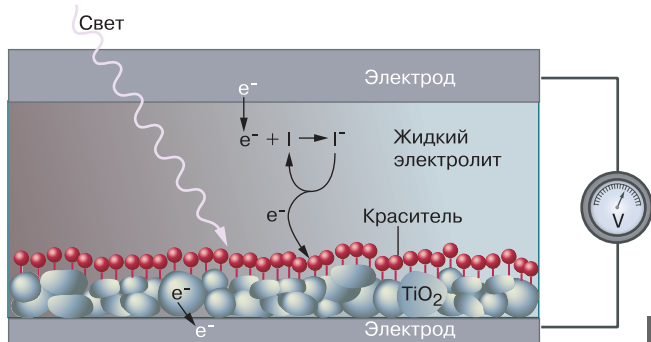
Есть и другие неорганические материалы, которые представляются перспективными для фотовольтаики. Например, тонкие пленки соединений теллурида кадмия (CdTe) и медь-индий-селен (индий можно заменить на галлий, а селен на серу) — такой тип соединений сокращенно на-

2 Полимерные солнечные батареи. Схема фотоэлемента и его лабораторный образец



зывают CIGS. Разработаны методы для нанесения тонких пленок CdTe и CIGS на подложку, которые отлично поглощают солнечный свет и долго служат. КПД лабораторных образцов фотоэлементов CdTe и CIGS приближается к 20%. Две компании уже производят солнечные модули CdTe с КПД до 9%. Производители сумели уменьшить содержание токсичного кадмия в модуле ниже того количества, которое содержится в обычной пальчиковой батарее, и даже планируют принимать на переработку отслужившие модули.

КПД коммерческих модулей CIGS достигает 11%. Помимо основного слоя CIGS, фотоэлемент на основе такого материала содержит несколько дополнительных слоев, среди которых есть тончайший слой из сульфида кадмия (здесь кадмия совсем мало, поэтому вопрос о токсичности CIGS не так серьезен, как для CdTe). Надо ска-



3
Электрохимическая ячейка Грацеля.
Свет поглощается молекулами красителя, закрепленными на поверхности наночастиц TiO_2 . Поглотившие фотон молекулы отдают электрон наночастицам, которые затем передаются во внешнюю электрическую цепь. Электролит с ионами йода восстанавливает окисленные молекулы красителя



РЕСУРСЫ

зять, что фотоэлементы CIGS очень сложны, а потому их свойства сильно зависят от метода и условий нанесения пленок. Кроме того, материалы разных слоев в таких устройствах могут реагировать на границах, и это создает дополнительные проблемы.

Возрастает интерес к органическим материалам для фотовольтаики. Исследователей стимулируют два обстоятельства. Во-первых, природа, создав фотосинтетические органические системы в растениях и бактериях, блестяще справляется с задачей преобразования солнечной энергии. Зеленый лист — настоящая мини-фабрика по производству энергии от солнечного света, где хлоропласты обеспечивают КПД 8–9%. Поэтому ученые надеются создать их искусственные аналоги на основе органических и неорганических материалов. Во-вторых, органические соединения, как правило, не содержат редких химических элементов и весьма технологичны, а значит, могут оказаться намного дешевле неорганических материалов. Остановимся на нескольких наиболее интересных подходах к разработке органических солнечных преобразователей.

В 70-х годах XX века японский химик Х. Ширакава синтезировал первые полимерные пленки с металлическими свойствами (в 2000 году он получил за это Нобелевскую премию). Это открытие дало старт новой области химии. Синтез и исследование проводящих полимеров считают одной из самых перспективных областей междисциплинарных исследований. Предполагается, что многие технологии (в том числе, и энергетические) в будущем станут использовать эти недорогие полимерные пленки. На основе полимеров такого типа уже созданы образцы солнечных батарей, дисплеев, электронных чипов (этим, в частности, занимаются крупные производители электроники «Philips», «Siemens» и др.). Такие устройства делают на гибких полимерных подложках (рис. 2), и стоят они значительно меньше, чем аналогичные устройства из неорганических полупроводников.

В полимерных солнечных батареях предлагают использовать смеси сопряженных полимеров с производными фуллерена (C_{60}). В такой смеси полимер выполняет роль донора, с которого фотовозбужденный электрон переходит на акцептор (фуллерен). Так реализуется разделение зарядов разного знака (электронов и дырок), которые затем перемещаются к электродам: электроны по молекулам акцептора, а дырки по полимерным цепям. Производство такого светопреобразующего пластика обходится недорого и напоминает печать на струйном принтере: необходимые электронные компоненты наносятся специальными «чернилами» — раствором полимера в подходящем растворителе. За несколько часов работы подобная машина может напечатать такую площадь полимерных солнечных батарей, на производство которой завод по производству кремниевой электроники потратит целый год.

Исследователи разрабатывают солнечные батареи и на основе других материалов. Например, напылив в вакуумной камере молекулы фталоцианина и фуллерена на стеклянную подложку, можно сделать фотоэлементы с КПД около 5%. Серьезный недостаток такой технологии — вы-

сокая стоимость. К тому же подобные элементы трудно сделать гибкими — в этом они проигрывают полимерным.

Пока даже лучшие образцы органических солнечных элементов вряд ли могут претендовать на крупномасштабное промышленное тиражирование. Их КПД составляет всего 4–5%, и они, как правило, недолговечны, поскольку их разрушают кислород и пары воды. Для защиты таких устройств от воздействий окружающей среды необходимо наносить на них специальное покрытие (что опять-таки повышает цену) или разрабатывать более устойчивые органические материалы.

Интересные возможности открываются, если попытаться сделать гибридный фотоэлемент — скомбинировать преимущества органических и неорганических полупроводников и при этом минимизировать их недостатки. Наиболее удачное на сегодня решение было предложено в 1991 году швейцарскими исследователями Б.О'Реганом и М.Грацелом. Они продемонстрировали эффективный и технологичный электрохимический солнечный элемент, содержащий нанокристаллический оксид титана TiO_2 , органический краситель на основе рутения и йодный электролит (рис. 3). Сейчас ученые ведут испытания электрохимических ячеек такого типа. Они могут работать более 10 тысяч часов, а их эффективность преобразования энергии достигает 11%. Интересно, что половину цены этих ячеек составляет стоимость прозрачных электродов — стеклянных пластин, покрытых прозрачным проводником. Именно подобные электроды используют в жидкокристаллических дисплеях и телевизорах. Один из основных недостатков электрохимических фотоэлементов — жидкий электролит, который испаряется, поэтому сейчас разрабатывают фотоэлементы на основе твердого электролита. Еще один существенный недостаток таких солнечных батарей состоит в том, что краситель, наиболее эффективно поглощающий солнечный свет, содержит комплекс редкого на Земле элемента платиновой группы — рутения. Подчеркнем, что аналогичную электрохимическую ячейку можно применять для получения водорода из воды с помощью электролиза.

Огромный потенциал Солнца человек почти не использует. Солнце могло бы стать основным энергетическим кормильцем нашей цивилизации, если будут разработаны технологии производства дешевых и эффективных материалов. С подобными проблемами люди сталкивались при разработке любой новой технологии. Так, например, в каменный и бронзовый века проблема была в технике обработки камня и металла, а во второй половине XX века — в получении и обработке кристаллического кремния (основного материала электроники) и управлении его свойствами. Создание новых материалов для гелиоэнергетики — сложная задача, требующая совместных усилий химиков, физиков и технологов. Если ее удастся решить, солнечная энергетика станет одним из лидеров мировой энергетики. Если нет, то она так и останется аутсайдером.

