

B. N. МУКАШЕВ, A. A. БЕТЕКБАЕВ

## ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

В обзоре рассмотрены основные полупроводниковые материалы и структуры, используемые для создания солнечных энергетических установок. Отмечается, что несмотря на прогнозируемое до 2030 г. увеличение вклада в производство электроэнергии угля и газа, при одновременном сокращении потребления нефти, в будущем, наряду с ускоренным развитием гидро- и атомных электростанций, необходимо широкомасштабное использование новых источников энергии, среди которых одним из наиболее важных является солнечная энергетика. Основной и наиболее перспективной формой использования солнечной энергии являются фотоэлектрические полупроводниковые системы прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Этот вид использования солнечной энергии получил название фотогенеративной энергетики, ФЭ. Современный мировой рынок ФЭ – это быстроразвивающаяся отрасль мировой экономики с возрастающим темпом роста. Базовыми элементами ФЭ являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), конвертирующие солнечную энергию в электрическую. ФЭП являются элементной базой солнечной энергетики и определяют перспективы её развития.

### 1. Введение

Производство электроэнергии, её межгосударственное и региональное распределение, энергопотребление на душу населения и на единицу произведённого валового продукта (энергоёмкость) определяют уровень экономического развития стран и цивилизации в целом. Важно отметить, что энергоёмкость единицы ВВП является, по-видимому, одним из наиболее важных факторов, характеризующих не только уровень технологического обеспечения и эффективность предпринимаемых мер по энергосбережению, но и объёмы техногенного загрязнения [1-4]. Значения энергоёмкости для высокоразвитых стран, например Германии, Японии и США, составляют 0.19, 0.21 и 0.26, соответственно, а для таких стран, как Китай, Россия и Казахстан этот показатель приблизительно равен 0.6-0.7. Если учесть, что экономические зоны с высокоразвитой экономикой в Китае и России распределены фрагментарно, а также какие промышленные сектора вносят вклад в ВВП, то в целом эти цифры объективно отражают состояние экономики государств, однако необходимо учитывать динамику их изменения.

Энергоресурсы, используемые для производства электроэнергии, разделяются на невозобновляемые и возобновляемые [5]. Примером не возобновляемых источников энергии являются углеводородные, органические энергоносители, такие как нефть, уголь и газ. С их использовани-

ем в 2005 г. производилось 86% электроэнергии, 6% гидроэлектростанциями, ~ столько же вырабатывалось на основе ядерной энергии деления урана и ~ 2% различными видами возобновляемых источников энергии, к которым относятся солнечная, ветровая, гидроэнергетика и в будущем, возможно, энергия термоядерного синтеза. Однако уже в 2010 г. вклад в производство электроэнергии гидро- и атомных электростанций по прогнозам должен составить 15 и 13% соответственно. По данным Центра развития промышленности ООН (UNIDO) на период до 2030 г. потребление нефти в выработке электроэнергии будет сокращаться, а угля и газа возрастать [6]. Эксперты предсказывают существенный рост гидроэнергетики, естественно для стран, обладающих соответствующими ресурсами. Вместе с тем, при планируемых объёмах потребления, известные запасы нефти и газа будут близки к истощению уже к середине текущего века, а угля будущего. Поэтому будут необходимы новые источники энергии, которые должны будут компенсировать уменьшающееся использование углеводородов. До недавнего времени считалось, что доля их использования должна сокращаться только вследствие ограниченного содержания в природе, однако, как это часто бывает, действительность оказалась гораздо сложнее. «Тепловое загрязнение» планеты продуктами переработки органических энергоносителей, в основном двуокисью углерода, может привести уже в ближайшие десятилетия к необратимым, катастрофическим

последствиям, связанными с увеличением температуры мирового океана, таянием ледников и, в целом, с изменением климата. Такое «загрязнение» не знает государственных границ и становится одной из самых неотложных мировых проблем. Несмотря на ряд утверждений о том, что потепление не вызвано техногенными причинами, связь между изменениями в составе атмосферы с увеличением двуокиси углерода и изменением климата считается надёжно установленной. Становится очевидным, что уже в краткосрочной перспективе необходимо существенное увеличение альтернативной и возобновляемой энергетики.

Однако, в первую очередь, следует принять меры по уменьшению выбросов тепловыми электростанциями и увеличению их эффективности. На прошедшем в декабре 2010 года в мексиканском Канкуне очередном 16-ом саммите по изменению климата государства-участники с целью предотвращения столь масштабного техногенного загрязнения нашей планеты и ускоренного перехода к более «чистой» энергетике приняли пакет решений по «климатическому» финансированию, механизмам адаптации и трансфера «зеленых» технологий, а также защиты тропических лесов.

Альтернативные источники получения электроэнергии должны иметь достаточный для удовлетворения всё возрастающего энергопотребления ресурс и экологическую безопасность. Ясно, что можно критически относиться к терминам «альтернативная» и «возобновляемая», однако это не так важно. Ситуация в этой сфере очень динамична и для некоторых развитых стран, например, Франции, атомная энергетика давно превратилась из альтернативной в основной источник энергии, и, безусловно, необходимо сбалансированное развитие и использование всех видов источников энергии. В нашей стране принят закон *«О поддержке использования возобновляемых источников энергии» от 4 июля 2009 года № 165-IV, а в Указе Президента от 19 марта 2010 года № 958 подчёркивается, что в целях реализации Закона № 958 необходимо предусмотреть организацию работ и разработку плана размещения объектов по использованию возобновляемых источников энергии. Среди них одним из наиболее важных видов является солнечная энергетика.*

Солнце является практически неисчерпаемым, абсолютно безопасным, в равной степени всем принадлежащим и доступным источником энергии. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за год, не только во много раз превышает энергию мировых запасов нефти, газа, угля, урана и других энергетических ресурсов, но почти более чем в десять тысяч раз больше современного энергопотребления. Так, солнце излучает огромное количество энергии – приблизительно  $4 \times 10^{20}$  Дж·с. Однако из-за отражения, рассеивания и поглощения ее атмосферными газами и аэрозолями только 47% всей энергии, или приблизительно  $7 \cdot 10^{17}$  кВт·ч, достигает поверхности Земли. Количество солнечной энергии зависит и от географического месторасположения участка: чем ближе к экватору, тем оно больше (см. <http://www.energie-atlas.ch/schools-maps.htm>). Например, среднегодовое суммарное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, составляет: в Центральной Европе, Средней Азии и Канаде за год приблизительно 1000 кВт·ч/м<sup>2</sup>; в Средиземноморье – приблизительно 1700 кВт·ч/м<sup>2</sup>, а в большинстве пустынных регионов Африки, Ближнего Востока и Австралии – приблизительно 2200 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Таким образом, количество солнечной радиации существенно различается в зависимости от времени года и географического положения, что необходимо учитывать особенно при крупномасштабном использовании солнечной энергии, которое планируют всё большее количество стран в своих энергетических программах. Несмотря на то, что Казахстан расположен на широтах между 42 и 55 градусами к северу, потенциал солнечной радиации на территории республики достаточно значителен и составляет 1200-1800 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год (см. <http://www.solar4power.co>).

Наличие такого потенциала солнечной энергии делает её использование в Казахстане экономически выгодным. Солнечная энергетика основана главным образом на двух формах использования солнечной энергии. Одной из форм являются тепловые системы, которыерабатывают низкопотенциальное тепло, т.е. вода в специальных установках разогревается солнечным излучением и используется для коммунально-бытового горячего водоснабжения и теплоснабжения. Преобладающим видом оборудования

здесь являются так называемые плоские солнечные коллекторы. Их общемировое производство по различным оценкам составляет более 2 млн м<sup>2</sup> в год, а выработка тепла достигает до 10<sup>7</sup> миллиардов калорий. Это направление требует отдельного рассмотрения, так как широкое использование таких тепловых систем в южных регионах нашей страны является крайне важным, и необходима специальная программа для широко-масштабного развития этого сектора энергетики.

Однако основной и наиболее перспективной формой использования солнечной энергии являются фотоэлектрические полупроводниковые системы прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Эти системы не содержат каких-либо движущихся механических узлов и не основаны на тепловых процессах, что оказывается на их надежности и долговечности. Другим преимуществом таких полупроводниковых преобразователей солнечной энергии в электрическую является экономичность, бесшумность, экологическая чистота и способность работать в условиях рассеянного света при облачности и даже при дожде. Этот вид использования солнечной энергии получил название фотоэнергетика, ФЭ (PV, photovoltaics) [8].

Современный мировой рынок ФЭ – это быстроразвивающаяся отрасль мировой экономики с возрастающим темпом роста. Так, прирост мощностей ФЭ в 2002-2007 гг. в среднем превысил 50% в год, а в 2008 году их было введено на 85% больше, чем в 2007. В первый, наиболее трудный 2009 год кризисный год рост ФЭ составил 11%. В 2009 г. было введено 9.8 GWp или 1.1% от общего объема электроэнергии. Установленные мощности ФЭ согласно прогнозу должны составить ~ 100 GWp в 2020 г., а её доля в общем объеме энергетики в ведущих экономически развитых странах должна возрасти на 10% [9-17]. Способствовать такому увеличению будет принятие развитыми странами национальных программ с ясно выраженной практической направленностью, таких как: более 100 тысяч солнечных крыш в Германии и 200 тысяч солнечных крыш в Японии, 1 млн солнечных крыш в США и их государственной поддержкой. Например, в ЕС на развитие фотоэнергетики до 2010 г. выделено 3 млрд евро, а в США – 6,3 млрд долларов. При реализации этих проектов значительная часть стоимости установок оплачивается из государ-

ственных бюджетов, причем государство выкупает энергию, производимую солнечными батареями, по цене ~ в 10 раз превышающей рыночную, а также предлагает налоговые льготы и субсидии производителям солнечных батарей, монтируемых на крыши различных сооружений. Осуществление этих программ позволяет создать устойчивый рынок для использования солнечной энергии на сооружениях и выявить как наиболее успешные схемы государственной помощи потребителям и производителям этих систем, так и совершенные фотоэлектрические системы, которые уже стали прототипами промышленных разработок. Все это привело к тому, что в настоящее время в Германии надежные солнечные батареи могут быть установлены где угодно и в течение нескольких дней, а реализация вышеупомянутой программы в США позволит снизить выделение двуокиси углерода в эквиваленте выделений от 850 000 автомобилей. Кроме того, уже существуют проекты домов, обеспечивающих себя электричеством за счет солнечных батарей, теплом – за счет солнечных коллекторов, и оборудованных современными средствами экономии тепла и электричества. Важным является и такой социальный аспект, как создание рабочих мест индустрией ФЭ, число которых должно составить к 2020 г. в ЕС 200 000, а в мире более 2 000 000. *Однако для Казахстана и других мировых регионов наиболее перспективным является строительство крупных PV электростанций, как, например, станция мощностью 23 МВт, введенная в эксплуатацию в 2008 г. на юге Испании в Алмерии, рис. 1.1.* Такие станции, присоединенные к единой энергетической сети, могут в солнечное (дневное) время, в период дефицита электроэнергии, обеспечивать ее поступление в энергосеть.

По оценкам экспертов, шесть PV электростанций площадью 340x340 км<sup>2</sup> каждая, использующие ФЭП с кПД 15% и расположенные в зоне солнечного излучения 1600 кВ·ч в год (рис. 1.2), могут произвести 20·10<sup>12</sup> Вт и обеспечить мировое ежегодное потребление электроэнергии, которое в настоящее время составляет 16·10<sup>12</sup> Вт. *Поэтому это направление для государств с единой энергосистемой является наиболее перспективным. Учитывая благоприятное с точки зрения интенсивности солнечной*



Рис. 1.1. ФЭ станция в Алмерии, Испания (см. текст) [8]

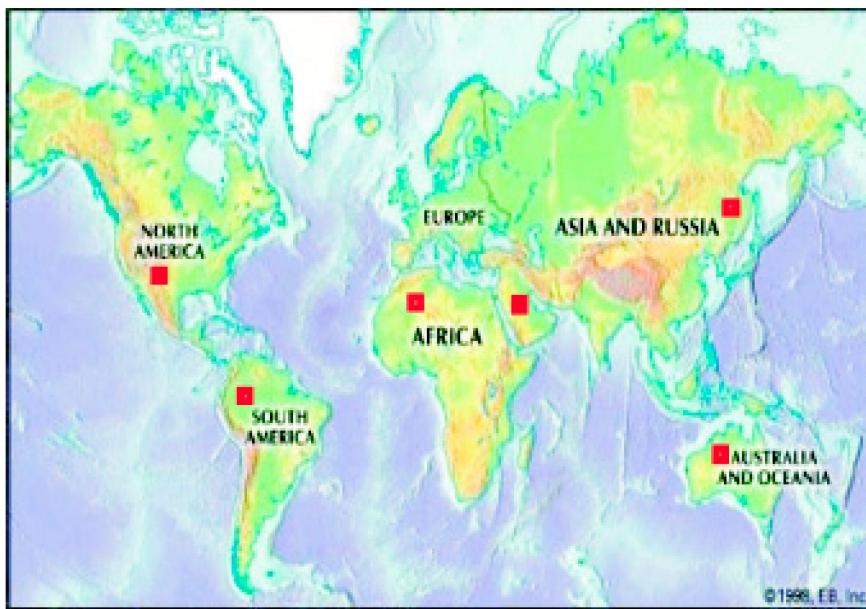


Рис. 1.2. Предположительное размещение шести ФЭ станций для производства  $20 \cdot 10^{12}$  Вт (см. текст) [10]

*энергии и количества солнечных дней расположение Казахстана, одна из таких станций могла быть размещена в нашей стране.*

Другим не менее важным обстоятельством является возможность снабжения электричеством населённых пунктов, не имеющих доступа к централизованному снабжению, т.е. в отдалённых, но расположенных в богатых солнцем

районах Казахстана. В мире же людей, проживающих в таких регионах, насчитывается более двух миллиардов. Солнечная энергия могла бы стать для таких регионов доминирующим децентрализованным источником энергии, тем более, как было отмечено, примеры успешной реализации программ солнечных крыш в высокоразвитых странах уже существуют на уровне прототипов

промышленных разработок. Отметим, что международные финансовые институты выделяют на реализацию таких проектов развивающимся и слаборазвитым странам значительные средства. Примером такой страны является Индия, на протяжении многих лет успешно реализующая проекты по возобновляемой энергетике, финансируемые Международным валютным фондом и Всемирным банком.

## 2. Основные материалы и направления развития элементной базы фотоэнергетики

Базовыми элементами ФЭ являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), конвертирующие солнечную энергию в электрическую. В настоящее время более 90 % ФЭП изготавливаются на основе пластин поликристаллического (*multi c-Si*), монокристаллического кремния (*mono c-Si*) и около 1% ленточного кремния (*ribbon Si*), а оставшуюся часть – менее 10% – составляют тонкопленочные ФЭП на аморфном кремнии (*a-Si, 6%*) и гетероструктуры (*a-Si/c-Si*), а также ФЭП, изготовленные с использованием полупроводниковых соединений, таких как теллурид кадмия (*CdTe*), медь-индий-галий-селен (*CIGS*) и медь-индий-селен (*CIS*). Таким образом, основными материалами для ФЭ являются различные формы кремния и вещества для синтеза полупроводниковых соединений [8-16].

На основе анализа материалов международных конференций по преобразованию солнечной энергии в электрическую, Программы ЕС и Департамента Энергетики США и других источников по развитию ФЭ на ближайшую и долгосрочную перспективу В [8-21] можно выделить следующие основные направления исследований по развитию и разработке новых технологий как для солнечных элементов (СЭ), так и модулей (СМ):

1. Технологии, реализуемые на пластинах кремния (ТПК);
2. Тонко-пленочные технологии (ТПТ);
3. Новые технологии.

В соответствии с программами развития технологий сформулированы следующие общие проблемы для всех типов СЭ, которые должны решаться на временных этапах 2013–2030 гг. Это уменьшение потребления материалов, увеличение эффективности преобразования (к.п.д.), создание высокоэффективных производств для достижения основной цели: снижения стоимости электроэнергии, производимой СЭ до конкурентного уровня.

В 2009 г. более 100 предприятий ФЭ Германии не были обеспечены СЭ, т.е. производство СЭ не удовлетворяет потребностям рынка, что было вызвано недостатком полупроводникового кристаллического кремния. На рис. 2.1 показано мировое потребление кремния ФЭ и микроэлектроникой (МЭ) и его дефицит по данным энергет-

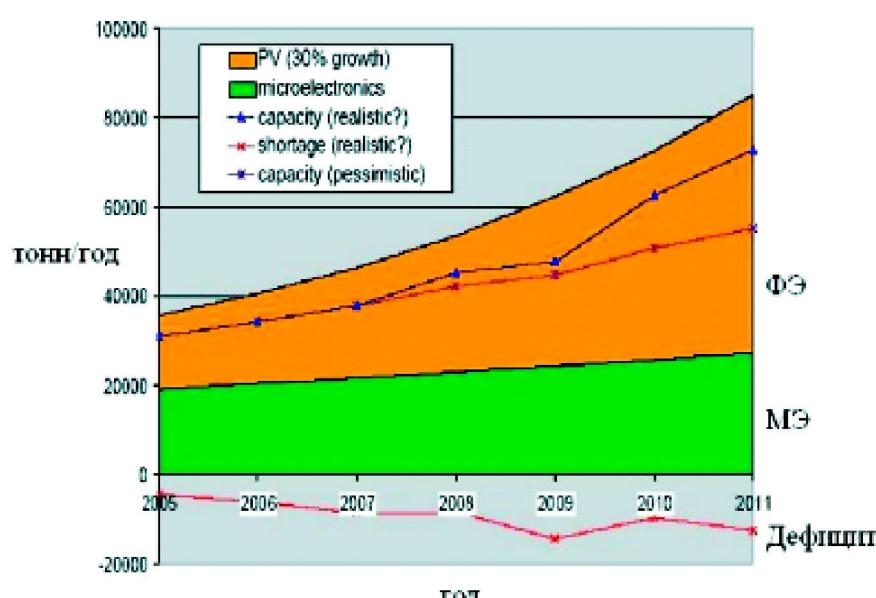


Рис. 2.1. Потребление кремния и его дефицит (тонн в год) по данным ECN [21]

тической компании Голландии (ECN). Очевидно, что необходимо не только увеличение производства кремния, но и разработка новых технологий его получения и изготовления СЭ. Последующие генерации СЭ должны потреблять меньше кремния на единицу вырабатываемой мощности ( $g/W_p$ ) при одновременном увеличении к.п.д., площади и снижении стоимости. Для достижения этих целей разрабатываются новые технологии получения солнечного кремния; улучшаются технологии создания СЭ, что позволило уменьшить толщину СЭ с 400 мк (20 $g/W_p$ ) в 1990 г. до 200 мк в 2006 г. (10 $g/W_p$ ) при увеличении площади СЭ с 100 до 240 см<sup>2</sup> и кпд для модулей с 10 до 13%, а к 2013 г. до 15%, и далее до 20% и 25% к 2020 и 2030 г. соответственно. Потребление кремния к 2020 г. должно выйти на постоянный уровень  $\sim 4g/W_p$ . Это значение соответствует нижнему пределу оптимальной толщины СЭ  $\sim 80$  мкм.

В дальнейшем предстоит промышленное освоение новых методов получения солнечного кремния и резки слитков на пластины для снижения стоимости этого материала к 2013 г. до 20 Евро/кг. (в настоящее время  $\sim 40$ ), а к 2030 г. – до 10-15 Евро/кг; а также совершенствовать технологии получения существующих СЭ и новых структур. Прежде всего, это относится к методам пассивации, гетерирования, диагностики и контроля дефектов, а с освоением новых технологий предстоит создание эпитаксиальных структур на подложках низкой стоимости, создание СЭ, включающих конверторы энергии и/или нанокластерные слои.

Тонкопленочные (ТП) СЭ получаются осаждением на подложках больших размеров, типичные размеры для стеклянных подложек  $\sim m^2$ . Известно, что широкое распространение, особенно в Японии, получили СЭ и модули на основе a-Si с к.п.д. 9.5 и 6.5%, соответственно. В дальнейшем предполагается промышленное освоение создания СЭ и модулей с двумя a-Si/mk-Si и тремя переходами a-Si/mk-Si/SiGe с к.п.д. СЭ 12%, 13% и модулей 8.5%, 9%, соответственно. В период 2015–2020 гг. будут использованы гибкие подложки, разработаны установки для осаждения больших площадей ТП, интегрированы наноструктурированные материалы и конверторы энергии в СЭ на Si ТП, с к.п.д. 11% и 13%. Развитие технологий предполагает использование

концепций для создания новых СЭ. Например, технология создания СЭ на основе поли-кремния использует те же методы осаждения a-Si:H и mk-Si, но при более высоких температурах. Поликристаллический слой наносится при температуре выше 600 °C, что позволяет создавать не p-i-n, а p-n структуры с высоким качеством электронных слоев и к.п.д.  $\sim 15\%$ . Промышленное освоение данной технологии предполагается в ближайшие 5 лет, в течение которых должны быть разработаны подложки, сохраняющие свойства при высоких температурах. В настоящее время в этом направлении проводятся также работы с органическими и другими материалами. Получат дальнейшее развитие ФЭП на основе CdTe, CIS, CIGS [10, 14, 15].

Новые технологии создаются на базе новых идей и концепций по созданию высокоэффективных СЭ в перспективе до 2020-2030 гг. и далее. Практически во всех концепциях предлагается более полно использовать солнечный спектр [8, 10]. Уже созданы многослойные гетеропереходы с эффективностью 35% и 35,2%, использующие концентраторы солнечной энергии, а также на их основе демонстрационные энергоустановки [10, 22]. Для нового поколения одно переходных ФЭП предлагается на основе нанотехнологий повысить эффективность использования активных слоев, без изменения их фундаментальных физических свойств [18-21]. В таких структурах верхний, эмиттерный слой с меньшей шириной запрещенной зоны содержит низкозадиодные нановключения (ямы, проволоки или точки) для генерации больших токов, а базовый остается широкозонным, что обеспечивает высокие напряжения и тем самым оптимальную выходную мощность. В других вариантах промежуточный слой содержит металлические кластеры, уменьшающие концентрацию фононов и предотвращающие процессы термолизации горячих носителей либо технологию создания СЭ на периферийных областях конверторов энергии (up/down), адаптирующих спектр солнечного излучения и т.д. [14, 18, 19] Теоретически ТПК при реализации новых концепций могут создавать СЭ с эффективностью до 50% (расчетный предел для традиционных СЭ 33%) [10]. Анализ других направлений развития технологий изготовления СЭ дан [10-15, 18-22].

### 3. Технологии получения металлургического, «солнечного» и «электронного» кремния

В настоящее время более 90% приборов полупроводниковой электроники и ФЭ, причём во всех основных направлениях, изготавливаются на основе кремния. По существующим прогнозам лидирующая роль этого материала, благодаря уникальным физико-химическим свойствам и высокому уровню развития кремниевых технологий, сохранится, по крайней мере, на 20-25 лет, пока станут конкурентоспособными другие технологии. Обычно металлургический кремний чистотой 98-99% очищают до уровня 99.9999

«солнечный» кремний, чистотой 6N для изготовления СЭ и от 9N to 11N электронный кремний для интегральных микросхем и электронных приборов [23-26]. В табл. 3.1 приведены требования по чистоте к различным видам кремния по общему содержанию примесей (N) и отдельно по переходным металлам (TMI), кроме того указаны возможности приобретения этих материалов. Следует отметить, что по ценам в настоящее время нет определённости. Они могут меняться почти на порядок в зависимости от количественных и временных масштабов поставок. Как правило, в зависимости от области применения существуют ограничения по содержанию бора, фосфора (см. табл. 3.1), а также кислорода и углерода  $<10^{18}$  [23, 26].

Таблица 3.1. Предельное содержание примесей в различном кремнии (см. текст)

Сорт кремния	Содержание, %	TMI <sup>1</sup>	Примечание
EG-Si электронный кремний	99.9999999 % – 9N 99.99999999 % – 11N Бора (B) менее 1 ppb <sup>2</sup> и фосфора (P) менее 5 ppb	1 ppb 1 ppt	Limited Supply Ограничное предложение
SOG-Si «солнечный» кремний	99.999 % – 6N B < 0,3 ppm <sup>3</sup> и P < 0,6 ppm	1 ppm	Limited Supply Ограничное предложение (poly-Si)
UMG - Si			
UMG-Si высокочистый металлургический кремний	99.9 % – 3 N, B<1 ppm и P<5 ppm	1000 ppm	Доступен по цене \$10-15/Kg-?
MG-Si металлургический кремний	98.5-99 %	>10000 ppm	Доступен по цене \$ 6/kg

<sup>1</sup> – TMI – примеси переходных металлов; <sup>2</sup> – ppb – одна часть на миллиард; <sup>3</sup> – ppm – одна часть на миллион.

В настоящее время производится более 30 тыс. т электронного и около 70 тыс. т «солнечного» кремния. Например, если ещё несколько лет назад основным материалом для ФЭ были отходы, производимые полупроводниковой промышленностью электронного кремния, то уже в 2008-2009 гг. были введены заводы, ориентированные на выпуск «солнечного» кремния. Его производство в настоящее время более чем в 2 раза превышает производство электронного кремния. Электронный материал получают двумя химическими процессами: трихлорсилановым и моносилановым, которые производят ~80% и ~20% кремния высшего качества, соответственно. В то время как «солнечный» кремний получают в основном модифицированным трихлорсилановым методом и пока менее 5%, прямым

металлургическим методом. *Производство кремния является одним из наиболее стабильных и перспективных секторов высокотехнологичной экономики [9-11, 16, 21, 23]. Его перспективы определяются многомиллиардной электронной промышленностью и высокими темпами развития индустрии ФЭ.*

**Технология получения металлургического кремния.** Основой для технологий получения полупроводникового («солнечного» и «электронного») кремния является металлургический кремний (МК). Мировое производство МК составляет более 1 миллиона тонн и расходы этого материала для получения полупроводникового кремния возросли за последнее десятилетие с 5 до 8%, а основным потребителем МК является металлургический сектор промышленности

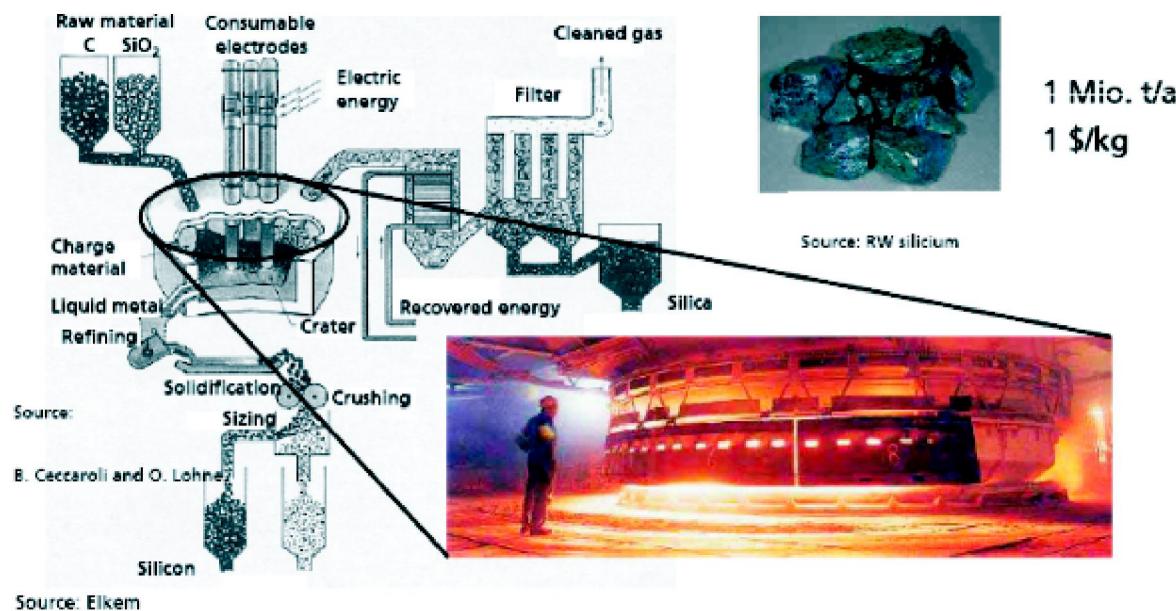


Рис. 3.1. Схема процесса производства МК:  $\text{SiO}_2(s) + 2\text{C}(s) = \text{Si}(l) + 2\text{CO}(g)$  [27]

(производство сталей и сплавов алюминия ~ 87%). Около 5 % МК используется в химической промышленности при производстве силиконов. Этот материал путём обработки в соляной кислоте переводится в ряд хлорсилановых газов, из которых получают более 95% полупроводникового кремния для электронной техники и ФЭ, оставшиеся менее 5% «солнечного» кремния получают методом прямой очистки МК. В настоящее время основным поставщиком этого материала на рынок по цене ~6 USD/kg является Норвегия. Видно, что на рис. 3.1 (2003 г.) цена МК была 1 USD/kg. Стоимость МК за последние ~ 7 лет выросла в 6 раз! Сырьём для получения МК является кварц или кварциты, представляющие собой двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ), и углерод (древесный уголь, сажа, кокс).

Схематически процесс получения МК (реакция карботермического замещения) и печь металлургического завода концерна Элкем (Elkem) показаны на рис. 3.1 [27]. Технологические операции в производстве технического кремния сводятся к подготовке шихты, плавке ее в рудотермической электропечи, разливке кремния и измельчению его для удаления шлаковых включений. Этот процесс проводится в дуговой электрической печи с графитовыми электродами, в которую загружают вышеупомянутую смесь. Пропусканием тока смесь нагревают до темпе-

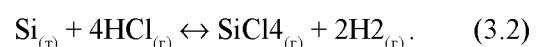
ратуры свыше  $2000^{\circ}\text{C}$ , в результате чего в ней протекает ряд превращений, которые можно представить в виде общей реакции, связывающей исходные компоненты и продукты процесса, и которая приведена в подписи к рис. 3.1. Получаемый таким образом технический кремний содержит 98-99% Si, 1-2% Fe, Al, B, P, Ca, Cu, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti, V, Zr и др. Кварц или кварцит для плавки на технический кремний поступают в виде кусков размером 20–80 мм, которые должны обладать определенной механической прочностью. Механическая прочность зависит от содержания примесей в сырье. Таким образом, сырье для производства кристаллического кремния должно иметь определенный гранулометрический состав и содержать минимальное количество примесей. В нем должно содержаться не менее 98 % кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) и не более 0,4 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0,6 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,25 %  $\text{CaO}$ . Основные кварцевые месторождения в Казахстане полностью соответствуют этим требованиям.

Казахстан обладает громадными запасами двуокиси кремния, недра страны содержат более 265 млн. тонн кварцитов и ~ 65 млн. тонн высокочистого кварца. Ряд компаний «Silicium Kazakhstan», «Kun Renewables» и др. заявили о разработке проектов по производству МК, поликристаллического кремния, а в дальнейшем ФЭП, модулей и фотоэнергетических установок

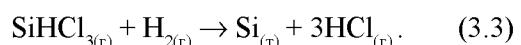
в различных областях Казахстана. Однако ясно, что рассмотрение и выбор проекта должен быть на основе представления разработчиками детальной проработки технического задания, включающего решения вопросов инфраструктуры и энергообеспечения для организации производств металлургического и «солнечного» кремния, а в последующем ФЭП и модулей. Задание должно содержать также решение таких важных вопросов как привлечение инвестиций и сбыта готовой продукции, так как ожидаемый рынок в Казахстане весьма ограничен. Учитывая достижения последних лет, по-видимому, следует отдать предпочтение производству UMG для получения «солнечного» кремния металлургическим путем, исключающего хлорсилановые переделы. С целью ускорения реализации производства, по крайней мере МК, необходимо принять соответствующие законы (как, например, в Германии) по льготному налогообложению, которое сделает привлекательным Казахстан для инвесторов и ведущих производителей ФЭ. **Очевидно, что потребность в МК будет возрастать как для обеспечения предприятий электронной промышленности, так и увеличивающихся потребностей ФЭ, а Казахстан богат сырьевыми ресурсами для производства этого материала.**

**Технология получения «солнечного» кремния.** Несмотря на относительно высокую стоимость электроэнергии, производимой ФЭ, установленные мощности ниже запланированных [9-11, 14-16], что связано с дефицитом и стоимостью «солнечного» кремния, который вследствие более низких требований по содержанию примесей, должен быть значительно дешевле «электронного» кремния [10-11, 23-32]. Поэтому в последнее время уделяется большое внимание совершенствованию существующих и разработке новых методов получения и очистки «солнечного» кремния. Этот элемент по степени распространённости в земной коре занимает второе место после кислорода, составляя 25% по весу, что особенно важно при планировании производства больших объёмов ФЭ. Следует отметить, что предсказываемый рост производства «солнечного» кремния происходит в основном за счёт модифицированных трихлорсилановых технологий. Запланированные мощности по увеличению его

производства с 3% (2007 г.) до 17% (2011 г!) металургическими методами, по-видимому, будут введены не ранее 2012–2014 г. [9]. Эти методы обладают рядом преимуществ, так как полностью исключают использование хлорсиланов и основаны на совершенствовании метода карбонтермического восстановления кремния из диоксида кремния. Достижение необходимой чистоты материала осуществляется путём металлургических переделов и использования высокочистых исходных веществ: кварца и углерода [9, 10, 30-32]. **Однако пока подавляющую часть рынка «солнечного» кремния в настоящее время занимают трихлорсилановые технологии его производства (Сименс-процесс), которые производят более 90% поликристаллического кремния [16].** Технология Сименс-процесса состоит из образования трихлосилана (TXC) и тетрахлорида кремния (TXK) путём хлорирования МК (3.1), (3.2) с последующим водородным восстановлением и рециркуляцией продуктов процесса. Синтез TXC проводят в реакторе «кипящего слоя, fluidized bed reactor» (см. рис. 3.2). Процесс его синтеза одновременно сопровождается реакцией образования TXK и других хлорсиланов, а также галогенидов металлов, например,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  и т. д. Реакции получения хлорсиланов кремния являются обратимыми и экзотермическими



Получаемый TXC очищается от примесей методами дистилляции. Аппаратурное оформление процесса показано на рис. 3.2, а различие в температурах перехода жидкость – газ приведено на рис. 3.3. Восстановление очищенного TXC и осаждение поликристаллического кремния проводят в атмосфере высокочистого водорода на поверхности разогретых кремниевых стержней в Сименс-реакторах.



Материалом для выращивания стержней служит высококачественный поликристаллический кремний. На рис. 3.4 показаны процесс очистки МК до «солнечного» кремния.

## From mg-Si to Ultrapure poly-Si: the Siemens Process

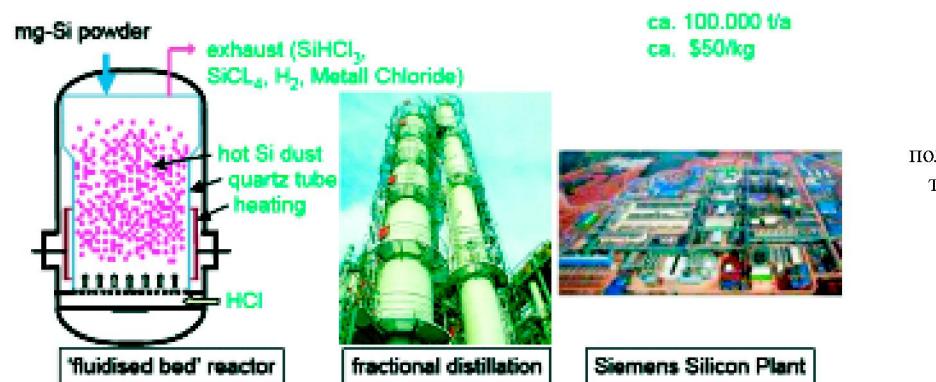


Рис. 3.2. Установки и завод для производства поликристаллического кремния трихлорсилановым методом (Сименс-процесс) [9, 16]

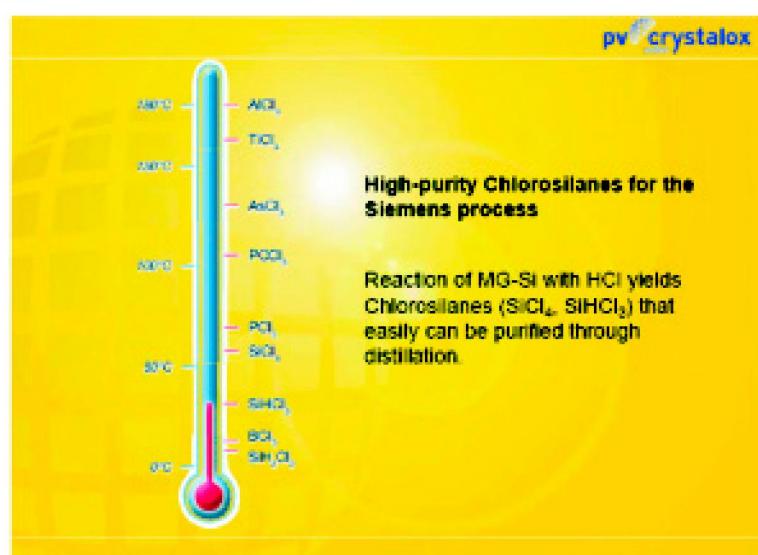


Рис. 3.3. Физико-химические основы процесса дистилляции [8, 16]

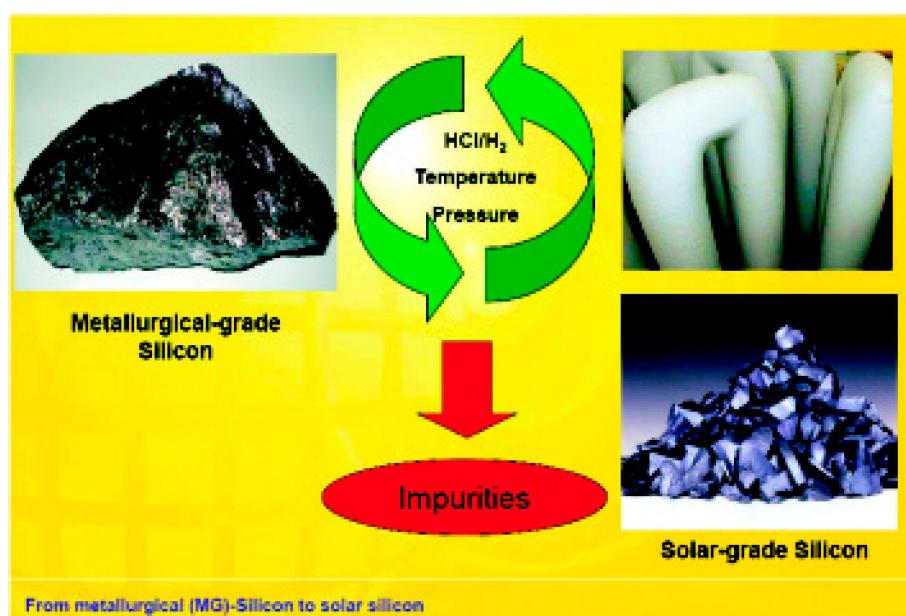


Рис. 3.4. Этапы получения «солнечного» кремния (SOG-Si) по Сименс процессу [8, 16, 28, 29]

Одним из недостатков Сименс-процесса является его энергоёмкость  $\sim 300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , которое в настоящее время в модифицированных процессах снижено до  $\sim 150 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$ . Разработчиками этого процесса сформулированы следующие задачи, решение которых предусмотрено на предстоящее десятилетие [16]:

1. Снижение потребляемой электроэнергии на 1 кг производимого кремния.
2. Модификация процесса (уменьшение циклов очистки) с сохранением электрофизических свойств пластин.
3. Увеличение эффективности процессов водородного восстановления трихлорсилана и осаждения кремния в реакторах.
4. Интегрирование осаждения кремния в непрерывный процесс.

Между тем использование дорогостоящих хлорсилановых технологий является экономически оправданным для микроэлектроники, где вследствие сверхвысокой плотности монтажа (сотни миллионов транзисторов на пластину) микросхем и их многофункциональности, стоимость кремниевой подложки не столь существен-

на в стоимости единицы конечного продукта, то в ФЭ стоимость материала достигает до 40% от стоимости ФЭП [24-31]. Поэтому для повышения конкурентной способности ФЭ важным является разработка технологий, снижающих себестоимость «солнечного» кремния. Именно для этого, с одной стороны, сформулированы 4 задачи, решение которых позволит доминировать модифицированному Сименс-процессу при производстве «солнечного» кремния, с другой, прогнозируется в краткий период существенно увеличить использование металлургических методов получения «солнечного» кремния, а их развитию и широкомасштабному использованию уделяется большое внимание. На основе «солнечного» металлургического кремния уже изготовлены ФЭП с КПД 16,4%. Промышленное освоение этой технологии позволит снизить стоимость вырабатываемой ФЭ электроэнергии за счёт уменьшения стоимости исходного материала и уменьшения количества химических переделов (рис. 3.5) и, тем самым существенно сократить сроки возврата вложенных средств.

### Silicon feedstock for PV – UMG route

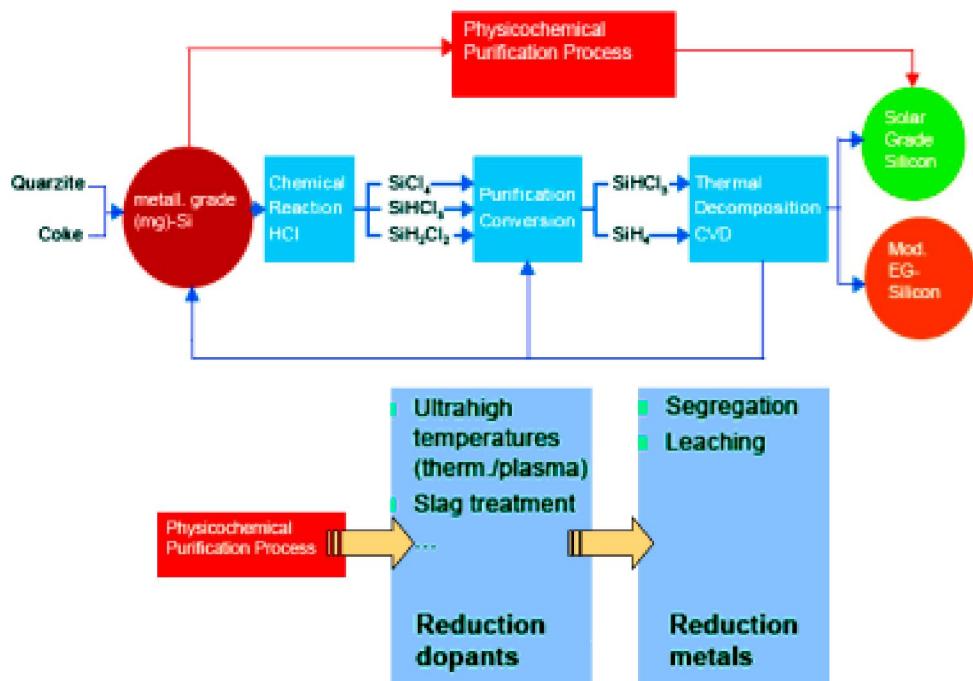
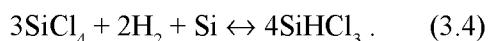


Рис. 3.5. Сравнение этапов получения «солнечного» кремния трихлорсилановым и металлургическим методом (3) [9, 10]

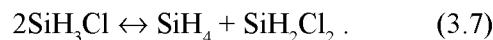
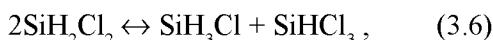
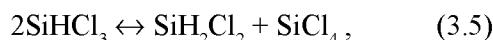
К настоящему времени разработаны четыре металлургических технологии, одна из которых (Elkem) реализована в промышленном масштабе, другие – в виде пилотных линий. В первой (Elkem) – промышленный процесс восстановления сопровождается пирометаллургической (шлаковой) очисткой с последующим гидрометаллургическим (кислотным) рафинированием [27, 30]. Во второй (SOLSiLc) – кремний получают в реакторах специальной конструкции в виде смеси гранул диоксида и карбида кремния. Затем в результате взаимодействия карбида кремния с моноокисью кремния получают высокочистый кремний [21, 31]. В третьей (CaliSolar), которая показана на рис. 3.4, используются сверхвысокотемпературные термообработки для нанокластеризации примесей переходных металлов и перевода их в электрически неактивное состояние [9, 10]. Четвертый (PHOTOSIL) процесс проводит сегрегационную и химическую очистку совместно с плазменной [32]. В ФТИ, Алматы совершенствуется в лабораторном варианте процесс алюмотермического восстановления кремния из диоксида кремния путём применения шлаковой и кислотной очистки [33-35], однако пока этим методом не получены даже образцы «солнечного» кремния. В методах (1-4) на заключительной стадии «солнечное» качество обеспечивается применением физических способов очистки, т.е. расплавлением и направленной кристаллизацией или выращиванием кремния по методу Чохральского и получены СЭ с кпд 16-17%.

**Технологии получения «электронного» кремния.** Основным методом получения этого материала является описанный выше Сименс-процесс. Другим достижением в производстве поликристаллического электронного кремния является технология фирмы Union Carbide. Особенностью метода является диспропорционирование ТХС до силана при одновременной ректификационной очистке промежуточных и конечных продуктов с последующим пиролизом силана. Технологический комплекс фирмы Union Carbide состоит из трех стадий: гидрохлорирование ТХС по реакции (3.4), диспропорционирование и ректификация, пиролиз силана и получение кремния.



Диспропорционирование на первой стадии проходит в соответствии с реакцией (3.5), а на второй

стадии в соответствии с уравнениями (3.6) и (3.7) может происходить в жидкой и в паровой фазах.



В промышленном процессе получение силана осуществляется по замкнутой схеме с рециркуляцией промежуточных продуктов. Кремний из силана получают пиролизом при 800–1000°C либо в реакторе свободного пространства (гомогенный пиролиз), либо в реакторе с псевдоожженным слоем с осаждением на зародышевых частицах кремния. Несмотря на возможность получения высокочистого поликристаллического кремния, аппаратурно-технологическое оснащение этого процесса делает его более дорогостоящим по сравнению с ТХС методом, поэтому моносилановый кремний применяется только для ограниченного числа дорогостоящих электронных приборов.

#### 4. ФЭП на пластинах кремния. Динамика развития технологий и производств

**ФЭП на пластинах кремния.** Поликристаллический и моноクリсталлический кремний являются базовыми материалами в технологии кремниевых ФЭП на пластинах, которые доминируют на рынке ФЭ благодаря высокому уровню развития исследований и технологий в материаловедении кремния и микроэлектронике. Собственно термин «высокие, научные технологии» возник в связи с разработкой технологий изготовления полупроводниковых приборов и, в первую очередь, кремниевой микроэлектроники [25]. Создание модулей на основе ТПК содержит 5 этапов: 1) производство «солнечного» кремния, 2) выращивание слитков, 3) резка слитков на пластины, 4) изготовление СЭ и 5) сборка модулей. В каждом из этих этапов достигнут не только существенный прогресс, но и разработаны дорожные карты их исполнения на долгосрочную перспективу [11, 12, 14, 15].

Кремний для резки на пластины поступает в виде блоков, полученных направленной кристаллизации (рис. 4.1, поликремний), или выращиванием



**Рис. 4.1.** Заготовки поликристаллического кремния, полученные методом направленной кристаллизации 680x840 мм<sup>2</sup>. Из них путём резки получают 16-25 блоков 156x156 мм<sup>2</sup> [8, 16]



**Рис. 4.2.** Макет установки по выращиванию монокристаллов кремния методом Чохральского. Диаметр слитков около 200 мм<sup>2</sup> [16]

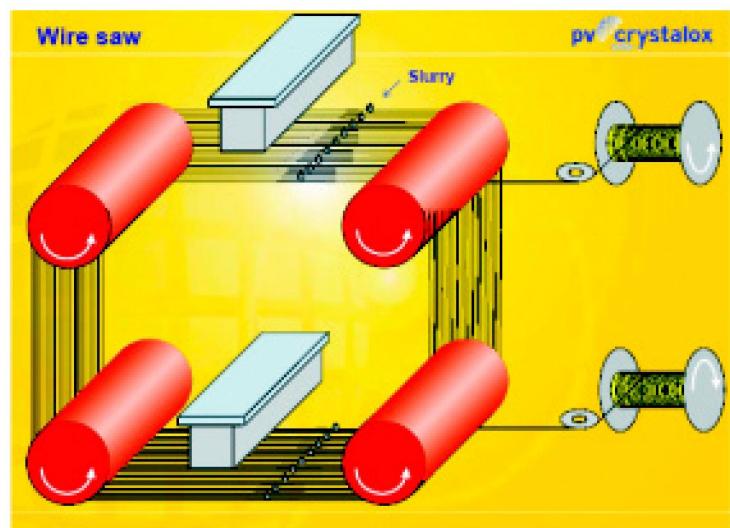
методом Чохральского (рис. 4.2, моно-кремний). Обычно их вес составляет порядка 200 кг.

Выращивание блоков – это заключительный этап переделов, показанных на рис. 3.5, т.е. сегрегационный, физический метод очистки кремния путём кристаллизации из расплава. Следующий этап – резка блоков и слитков па пластины (рис. 4.3). В последние годы в технологии этого процесса произошли, можно сказать, революционные изменения, позволившие существенно уменьшить отходы (лом) кристаллов. В настоящее время в производстве пластины толщиной 180–200 мкм, площадью 156x156 мм<sup>2</sup>. В будущем этим методом планируется освоить производство платин с оптимальной для изготовления СЭ толщиной 80–140 мкм.

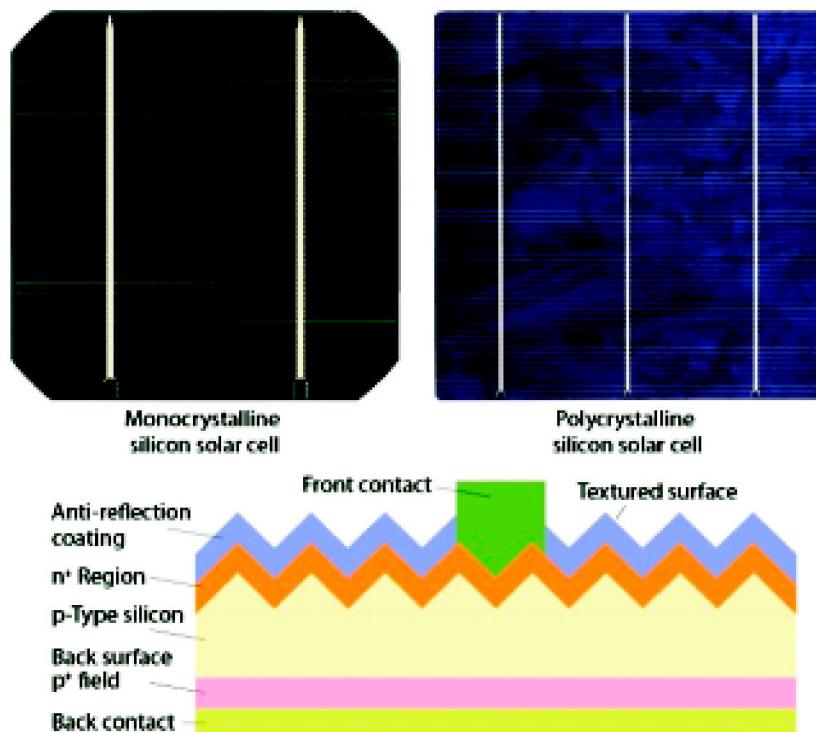
СЭ на пластинах кремния изготавливают на моно- и поликристаллических подложках, как правило, легированных бором (р-типа).

Структура типичных коммерческих ФЭП показана на рис. 4.4.

Фронтальная поверхность СЭ имеет текстурированную поверхность для уменьшения отражения падающего излучения, которая дополнительно покрывается слоем анти-отражающего покрытия из оксидов азота или титана ( $\text{SiN}_x$ ,  $(\text{TiO}_x)$ ). Легированная поверхность  $n^+$ -типа создается на подложках р-типа диффузией фосфора, таким способом формируется р–п переход, который создаёт электрический ток из генерированных светом электронно-дырочных пар. Обратная сторона СЭ для уменьшения рекомбинации



**Рис. 4.3.** Процесс резки кристаллов с использованием проволочной технологии [16]



**Рис. 4.4.** Монокристаллические и поликристаллические ФЭП и их структура [11]

носителей заряда покрывается сплошным алюминиевым контактом. Эффективность таких монокристаллических СЭ находится в пределах 16–18%, а поликристаллических 15–17%. Сборка СЭ в модули производится с использованием специальных технологий на стеклянных панелях. Эффективность преобразования солнечного излучения модулями стандартных СЭ приблизительно на 2 % ниже, чем для отдельных СЭ, и находится в пределах 12–15%.

**Динамика развития технологий и производств.** Для сохранения лидирующих позиций на рынке ФЭ разрабатываются технологии улучшения электрофизических свойств пластин, уменьшения потребления кремния, увеличения их эффективности и снижения стоимости производимой электроэнергии в целом.

Примеси переходных металлов влияют на электрофизические свойства кремния (время жизни носителей заряда) и связанную с этими свойствами эффективность преобразования СЭ [9, 36]. Они могут присутствовать в кристаллах как до изготовления СЭ, так и вводиться на различных стадиях этого процесса. Поэтому необходим контроль за параметрами кристаллов и разработка процессов гетерирования (удаление примесей из рабочих областей СЭ), пассивации (нейтрализации электрической активности

примесей) и нанокластеризации (объединение примесей в электрически неактивные кластеры). Во всех этих направлениях достигнуты определённые успехи: например, оптимизируются известные ранее процессы гетерирования атомов металлов при диффузии фосфора, формировании алюминиевых контактов, методы в водородной пассивации примесей при нанесении антиотражающих покрытий и их нанокластеризации при высокотемпературных обработках. В то же время разрабатываются новые методы гетерирования. Например, на рис. 4.6 показан пример гетерирования атомов железа при обработке пластин в парах соляной кислоты при температурах 800–1000 °C [9, 10, 36].

Из спектров электролюминесценции видно, что при удалении атомов железа существенно улучшаются рекомбинационные параметры пластин, а, следовательно, и эффективность СЭ.

Важным показателем является потребление кремния Si-g на единицу генерированной мощности W<sub>p</sub>. Показатель g/W<sub>p</sub> очень важен, так как может быть оценочным параметром сравнения и определения экономики процессов для СЭ, при условии стандартизации измерений и декларирования производителями потребления материалов. Временная зависимость с 2000 г. до настоящего времени и на период до 2020 г. показана на рис. 4.7

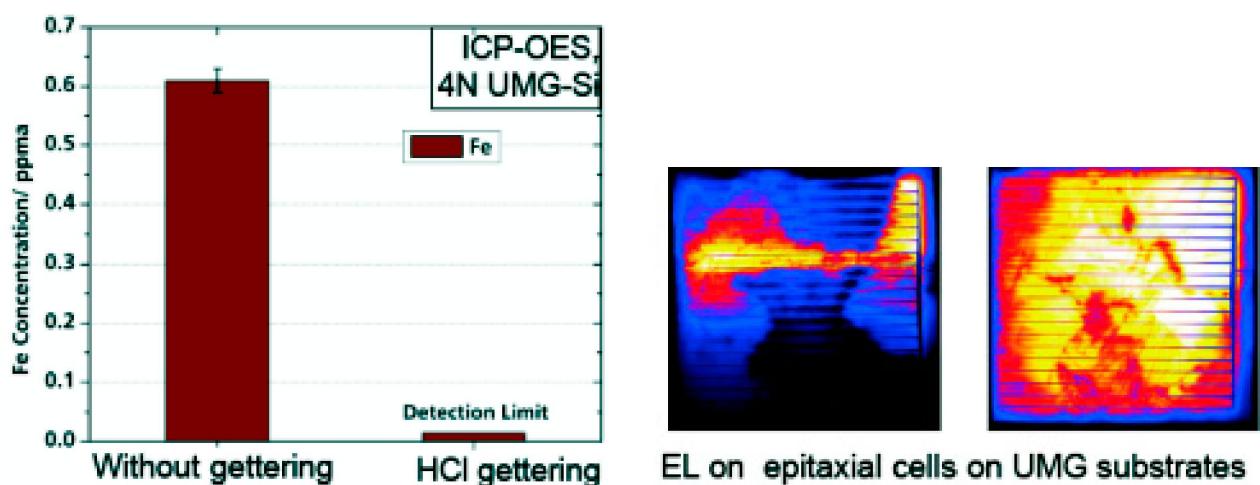
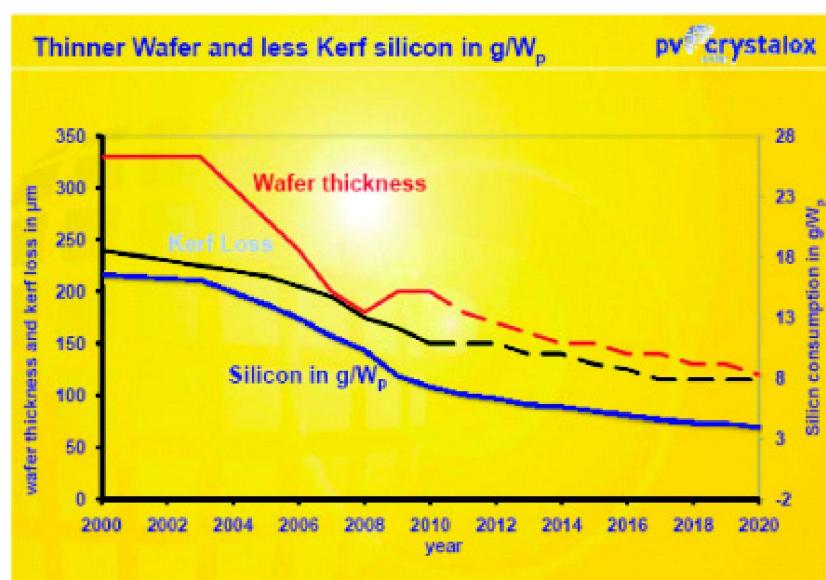


Рис. 4.6. Гетеррирование атомов железа при обработке пластин в парах соляной кислоты

Рис. 4.7. Зависимость потребления Si-g/W<sub>p</sub> на период до 2020 г. [16]



### Maximum efficiency of semiconductor solar cells with one pn-junction

W. Shockley,  
H.-J. Queisser (1961)  
Theoretical limit 33%

J. Zhao, A. Wang,  
M.A. Green (1999)  
Best lab value (c-Si):  
24,7%

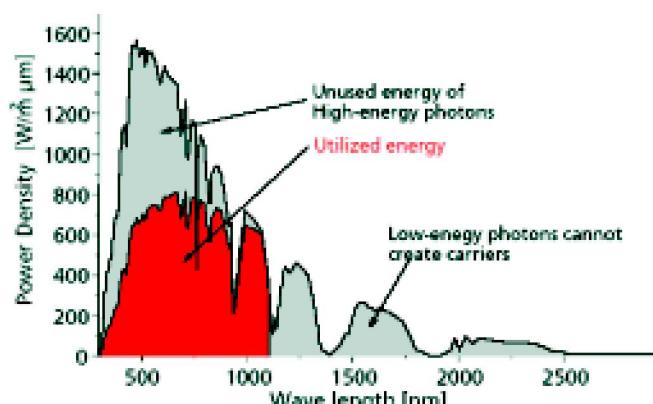


Рис. 4.8. Теоретический предел к.п.д. 33% и лучшее достижение, полученное в лабораторных условиях 24,7% для однопереходных СЭ [8-10]

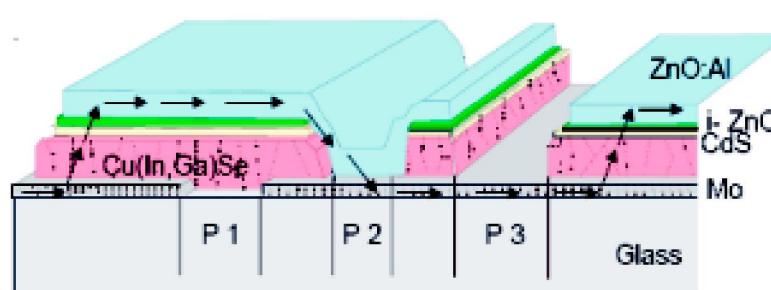
[16]. Видно, что потребление кремния выходит на постоянный уровень  $\sim 4\text{g/Wp}$ . Это значение соответствует нижнему пределу оптимальной толщины СЭ  $\sim 80$  мкм.

**Динамика производства определяется уровнем изученности процессов, их оптимизации и использования в технологии изготовления СЭ.** Например, компании SunPower, Sanyo, Suniva и Suntech объявили о достижении в лабораторных условиях эффективности 23-25% при снижении значении Si-g/Wp до  $\sim 6$  и опубликовали данные об освоении производства высокоеффективных ФЭП с 20 до 22,4% в 2009-2010 г. г. с объёмами до 398 MWp (SunPower) [37]. При увеличении эффективности использовалась также концепции создания совершенных СЭ и улучшения их архитектуры [11,37]. Теоретический предел к.п.д. для СЭ с одним переходом и соответствующим нормированием интенсивности солнечного составляет 33% [9]. Предел однопереходных СЭ рассчитан с физическими параметрами материала, обеспечивающего максимального поглощения определённой части солнечного спектра (рис. 4.8).

#### Epicell: crystalline Si thin film solar cells



#### CIGS Thin Film Solar Cell



## 5. Тонкоплёночные СЭ на кремнии и других материалах

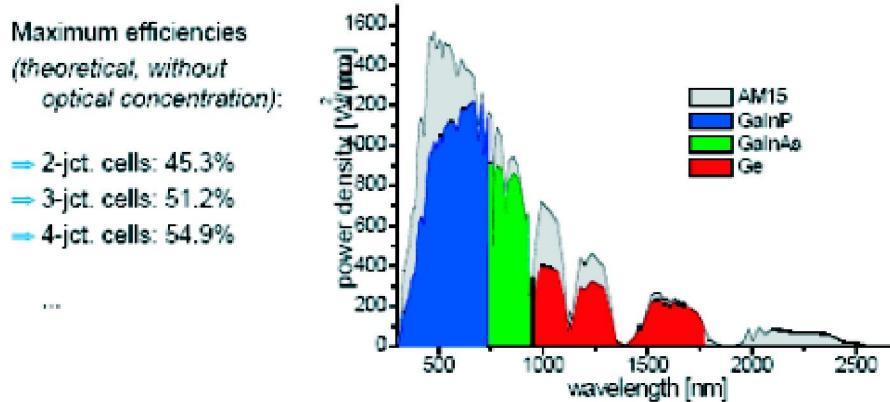
Три тонкоплёночные (ТПТ) технологии реализованы в виде пилотных линий (1-2 MWp) и разрабатываются проекты для производств от 10 MWp до 50 MWp. Это ТПТ с использованием различных модификаций кремния и полупроводниковых соединений (в скобках показаны лучшие значения эффективности, полученные в лабораторных условиях): a-Si (9.5%), a-Si/mk-Si (12%), a-Si/mk-Si/SiGe (13%) рис. 5.1а, CIGSS, Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> (19,5%, CdTe (16,5%), рис. 5.1б [10, 14].

Преимущество этих технологий заключается в чрезвычайно малом расходе материалов и возможности автоматизации процессов. Однако СЭ на ТПТ имеют малую эффективность  $\sim 10\%$  даже при их реализации в пилотном варианте. Кроме того, для их промышленного освоения необходимо стандартизировать подложки, разработать дешёвые гибкие материалы для модулей и соответствующие технологии их сборки, а также высокоскоростные установки для осаждения

Рис. 5.1а. СЭ на основе ТПТ кремниевых технологий [9-11]

Рис. 5.1б, с. СЭ на полупроводниковых соединениях, изготовленные с использованием ТПТ [10, 14]

## Efficiencies beyond the Shockley-Queisser limit



**Рис. 5.2.** Максимальная теоретическая эффективность для многослойных ГСЭ, позволяющих более полно использовать солнечный спектр без концентрирования солнечной энергии [8, 10]

пленок больших площадей. Также следует по возможности найти замену таким материалам как кадмий, галлий, индий, а самое главное – снизить стоимость и увеличить эффективность.

Вместе с тем ТПТ перспективны для использования в будущем и особенно при создании высокоэффективных многослойных структур для более полного использования солнечного спектра (рис. 5.2) [10, 14].

Примером таких структур являются высокоэффективные гетероструктурные элементы (ГСЭ). ГСЭ с эффективностью 35%, изготовленные из различных материалов, позволяют более полно использовать солнечный спектр. Применение линз Френеля обеспечивает коэффициент концентрации солнечного излучения до 1000 «солнц» [22]. Солнечное излучение, падающее, например, на поверхность 40x40 мм, концентрируется на площади менее 3 мм<sup>2</sup>. Элементы при этом не нагреваются из-за малой единичной мощности (~1 Вт) солнечного излучения, собираемого минилинзами. В таких концентраторных фотоэлектрических системах (КФС) стоимость электроэнергии может быть уменьшена более чем в 2 раза благодаря снижению в 1000 раз площади солнечных элементов. При этом удельный энергосъем в КФС увеличивается почти в 3 раза за счет большего КПД и обеспечения постоянной ориентации на Солнце [10, 22].

Другим примером является использование трёх переходных ГСЭ с внешними концентраторами солнечной энергии, на которых получено

значение эффективности (35.2%) при концентрации 500 «солнц» [10, 14]. Теоретическое значение эффективности для таких элементов 51.2%, без концентраторов солнечной энергии, см. рис. 5.3.

*Теоретически показана возможность создания СЭ на квантово-размерных структурах (КРС) [18-21]. КРС – это образования из единиц и десятков атомов. Из этих структур для создания СЭ наибольший интерес представляют квантовые точки (КТ) [38-40]. КТ – нульмерные нанообъекты, в которых движение носителей заряда квантовано во всех трех направлениях, они имеют дискретный энергетический спектр, соответствующий электронному спектру одиночного атома, хотя реальный квантовый объект при этом может состоять из сотен или тысяч атомов. Поэтому квантовые точки называются “искусственными атомами”. Два физических явлений, характерных для КТ, могут привести к значительному увеличению к.п.д. СЭ. Такой фундаментальный параметр, как ширина запрещённой зоны КТ ( $E_g$ ), зависит от количества атомов, поэтому многие их важные свойства, такие как поглощение и люминесценция, определяются размерами КТ. Например, иллюстрацией зависимости частоты люминесценции (цвета) от  $E_g$  или от размера КТ является различная светимость КТ теллурида селена. КТ размером 5 нм светятся красным цветом, 1,5 нм – фиолетовым. Важным свойством КТ является также процесс множественной экситонной генерации, т.е. один поглощённый квант света с*

## High-efficiency ISE triple-junction solar cells

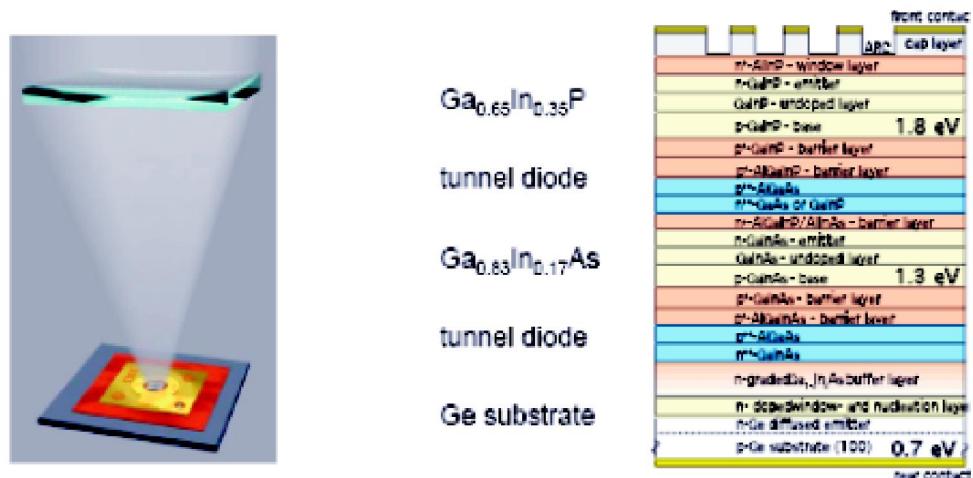


Рис. 5.3. Высокоэффективный гетероструктурный СЭ с внешними концентраторами энергии [10, 14]

энергий  $E$ , значительно превышающей  $E_g$ , рождает количество электронно – дырочных пар, пропорциональное  $E / E_g$ . Это увеличивает количество носителей заряда и приводит к увеличению эффективности СЭ на КТ. Другой физической причиной, вызывающей увеличение к.п.д., является образование зоны разрешённых состояний в СЭ, базовая область которых сформирована из послойного массива квантовых точек различных размеров. В этом случае в середине запрещённой зоны основного полупроводника образуется дополнительная промежуточная зона разрешённых состояний, что существенно увеличивает энергетический спектр квантов, приводящих к образованию электронно-дырочных пар. Несмотря на трудности практической реализации уникальных свойств КТ, несколько лабораторий сообщили о синтезе послойного массива КТ InAs в GaAs, кроме того предложены новые методы создания структур на КТ [39, 40]. Теоретический предел для ФЭП на КТ составляет 63,2% по сравнению с 33% для обычных СЭ [14, 18].

### 6. Заключение. Рекомендации для Казахстана

Технологии изготовления СЭ на пластинках кремния будут доминировать на рынке ФЭ, по – видимому, на период до 2020г. Этот вывод сле-

дует на основе анализа различных источников [8, 9-14, 21-32], и, в первую очередь, производителей СЭ, динамично развивающих элементную базу ФЭ во всех направлениях. Для этого одновременно с увеличением производств, снижается стоимость производимой энергии и увеличивается эффективность СЭ на кремниевых пластинах до 20% и выше. Действительно, на обозримый период соотношение производств СЭ на кремниевых пластинах к СЭ, производимым с использованием тонкоплёночных технологий, должно стабилизироваться на уровне 76-80% к 20-24%, соответственно. Количественные данные по значениям установленных мощностей в MWp в 2007–2009 г. и на период до 2014 г. для стандартных СЭ на поли- и монокристаллическом кремнии, на монокристаллах высокого качества, которые используются для достижения рекордных кпд, и для ТП СЭ (см. рис. 5.1а,б,с) приведены в табл. 6.1 [41]

Несмотря на то, что это соотношение в 2007 г. было равно 0.89, в 2009 г. – 0,8, последние анализы экспертов [9-11, 14] показывают, что производство СЭ на пластинах кремния будет расти, а ограничения в будущем могут быть связаны только производственными мощностями кремния. Основой для этого является последние достижения по эффективности СЭ на кремниевых пластинах выше 20% и, соответственно, снижение стоимости вырабатываемой ими электро-

Таблица 6.1 (см. текст)

	2007	2008	2009	2010E	2011E	2012E	2013E
Standard Crystalline Si	4,556	6,109	9,577	13,395	18,052	21,041	24,595
Super Monocrystalline Si	386	609	857	1,114	1,404	1,867	2,454
CIGS	225	566	1,092	1,413	1,944	2,455	2,680
a-Si	70	139	302	613	912	1,230	1,866
Total	252	515	1,201	2,078	2,876	3,601	4,163
	5,469	7,936	13,028	18,614	25,188	30,193	35,558

энергии. Это приведёт к уменьшению сроков окупаемости затрат на установление солнечных станций. Стоимость «солнечной» электроэнергии, постоянно снижается. Так если в 1976 г. она составляла около \$2 за кВт·ч, то сегодня, в среднем – \$0,25 за кВт·ч. По прогнозам, при текущих темпах технологических инноваций, снижения цен на материалы и роста объемов установленных мощностей, стоимость «солнечного» электричества может существенно снизиться уже во второй декаде текущего века. Так, по данным Европейской Ассоциации Производителей Фотовoltaики (EPIA) [42], к 2020 году она должна быть менее 0,10 € / за кВт·ч – для промышленных установок и менее 0,15 € / за кВт·ч для потребительской сети. Для обеспечения столь беспрецедентного роста кремниевой ФЭ, необходимо существенно увеличить промышленный выпуск этого материала, а Казахстан богат сырьевыми ресурсами для производства металлургического кремния и его более совершенных разновидностей «солнечного» и электронного. Различные производства кремния и его производители показаны на рис. 6.1.

Как было предложено в разделе 3, для нашей страны достаточно строительство одного комплексного завода с детальной проработкой технического задания на его проектирование, включая решение вопросов инфраструктуры и энергообеспечения. Первая часть задания должна включать организацию производств металлургического и «солнечного» кремния. Для этого представляется целесообразным выбрать один из металлургических методов производства кремния, исключая хлорсилановые переделы. Вторая часть должна содержать производство СЭ, модулей, установок и решение вопросов сбыта готовой продукции («солнечного» кремния, СЭ, модулей и установок). С целью ускорения реализации производств, по крайней мере МК, необходимо принять соответствующие законы (как, например, в Германии) по льготному налогообложению, которое сделает привлекательным Казахстан для инвесторов и производителей.

Солнечные энергетические установки являются модульными, что позволяет создавать генерирующие мощности практически любого размера

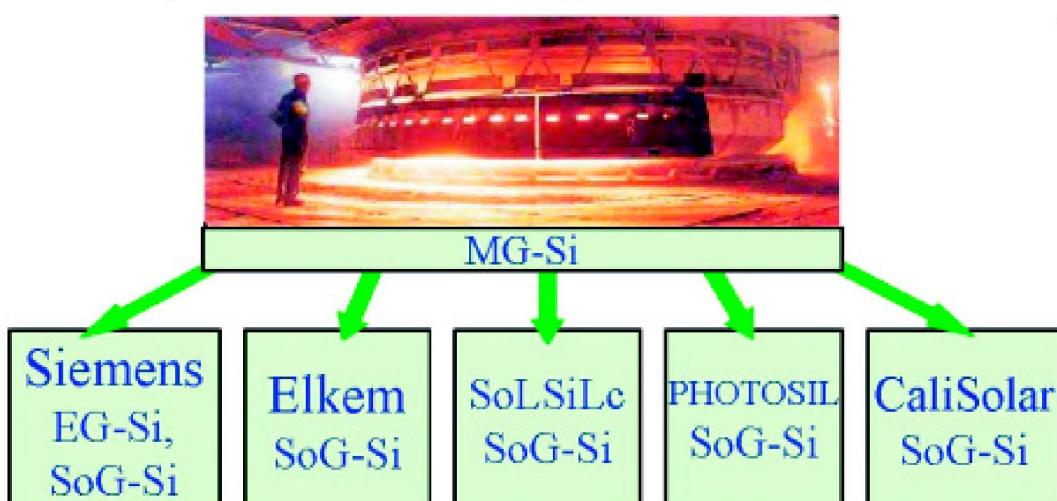
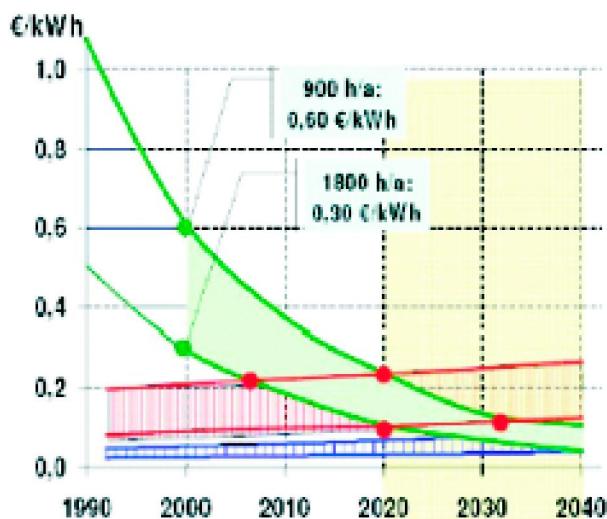


Рис. 6.1. Различные производства кремния и его производители

(см. рис. 1.6, 1.7). Они могут быть подключёнными как к единой энергосистеме (on-grid или grid-connected), так и работать автономно (off-grid) [8, 9-15]. Рынок ФЭ к 2013г должен составить 14-26 GWp, а к 2020 г. 100 GWp (см. раздел 1). Автономные, off-grid системы для отдаленных районов уже конкурентоспособны с дизельными генераторами или системами, подключёнными к энергосети, так как стоимость дизельного топлива достаточно высока, а подключение к общей сети требует существенных капиталовложений. Рис. 6.2, который в последнее время показывают практически во всех презентациях и обзорах [9-14], демонстрирует это снижение стоимости электроэнергии.



**Рис. 6.2.** Иллюстрация снижения стоимости «солнечной» электроэнергии (достижения сетевого паритета) для Германии и Италии, 900 и 1800 солнечных часов в году, соответственно [43]

Согласно [43] сетевой паритет (рис. 6.2), т.е. когда стоимость «солнечного» электричества сравняется со стоимостью электричества, генерируемого тепловыми электростанциями, может быть достигнут в южных регионах Европы уже в 2010 г., а к концу 2020 г. – в 76% европейского рынка электроэнергетики. Казахстан относится к регионам ускоренного достижения сетевого паритета и имеет все возможности для организации и последующего развития работ по солнечной кремниевой энергетике и производству кремния.

**Рекомендации для Казахстана.** В исполнение закона «*О поддержке использования возобновляемых источников энергии*» от 4 июля

2009 года № 165-IV, и Указа Президента от 19 марта 2010 года № 958 следует ускорить организацию работ по разработке плана размещения объектов и использованию возобновляемых источников энергии. Для нашей страны одним из наиболее важных видов является солнечная энергетика. В первую очередь, необходимо начать работы по организации конкурса проектов на строительство комплексного завода по производству металлургического кремния объёмом 1000 тонн (менее 1000 тонн экономически нерентабельно) до выпуска «солнечного кремния». Следует отметить, что некоторые технологии предусматривают непрерывную цепь процессов от производства кремния до СЭ. На рис. 6.1 приведены известные к сегодняшнему дню технологии производства кремния. По неофициальным данным завод по Сименс-технологии оценивается в 95-100 млн дол. США, по информации одного из руководителей компании CaliSolar стоимость завода по технологии CaliSolar будет стоить порядка 25 млн. долл. США. По стоимости заводов, использующих другие три технологии можно лишь сделать приблизённые оценки, исходя из сравнения количества переделов. Elkem оценивается в 30-35 млн. долл. США, а SoLSiLc и PHOTOSIL в 40-45 млн. долл. США. Однако эти оценки могут быть завышенными. Оборудование по изготовлению СЭ, панелей и установок должно поставляться и монтироваться совместно со строительством завода, т.к. каждая технология гарантирует эффективность СЭ, панелей и установок. Для Казахстана, как для государства с единой энергосистемой и располагающего большими площадями, является перспективным строительство крупных фотоэлектрических станций, поставляющих её днём в сеть в период дефицита электроэнергии. Однако и автономные off-grid системы для отдаленных районов являются также крайне необходимыми и их размещение будет, безусловно, иметь большое социальное значение. Тем более, что они уже конкурентоспособны с дизельными станциями.

Кремниевые СЭ на пластинах вследствие высокого развития кремниевой электроники будут доминировать на рынке ФЭ. Динамика производств, высокая степень понимания процессов и их оптимизации позволяют добиваться производителям высокой эффективности СЭ и показать,

что другие технологии не являются пока конкурентоспособными. Например, как было отмечено, компании SunPower, Sanyo, Suniva и Suntech объявили о достижении в лабораторных условиях эффективности 23-25% при снижении значений Si-g/W<sub>p</sub> до ~6 и опубликовали данные об освоении производства высокоеффективных ФЭП с 20 до 22,4% в 2009–2010 г. с объемами до 398 MW<sub>p</sub> (SunPower) [37]. Производство кремния само по себе является одним из наиболее стабильных и перспективных секторов высокотехнологичной экономики. Его перспективы определяются многомиллиардной электронной промышленностью и высокими темпами развития индустрии ФЭ. В связи с этим представляется актуальным проведение анализа технологий, представленных на рис. 6.1. Казахстан обладает громадными природными ресурсами для производства кремния и развития ФЭ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. The World FACTBOOK, <http://www.cia.gov/library/publication>
2. World Energy Resources and Consumption, <http://en.wikipedia.org>
3. Данилов И., Щёлков Я. Основы энергосбережения. 2009. <http://www.axioma.org>
4. Факторы производства в мировом хозяйстве. Ресурсный потенциал современной цивилизации, Курс лекций по экономике. КГУ. <http://www.efaculty.kiev.ua>
5. Структура энергетики, 5 классификация источников энергии. <http://webcache.googleusercontent.com>
6. Electricity generation by energy source, prepared by UNIDO. [www.unido.org](http://www.unido.org)
7. Advisory Council to the German Government on Global Change. <http://www.wbgu.de>
8. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / Ed's A. Luque and S. Hederus. Wiley, 2003. P. 1168.
9. Weber E. "20 Years of Progress in Understanding the Role of Defects in PV Silicon, Including Recent Applications to UMG Silicon" Proceedings of 20<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, 2010, August 1-4, Breckenridge, Colorado, USA.
10. Weber E. "Climate Change and Solar Energy" Lecture at University of Manchester, Nov. 2, 2007; "Where are we heading?" // Semiconductor technology. Singapore, 2008.
11. Saga T. Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Application // NPG Asia Mater. 2010. 2. P. 96.
12. Neuhaus D-H., Munzer A. Industrial Silicon Wafer Solar Cells // Advances in Optoelectronics. 2007. doi:10.1155/2007/24521.
13. PNOTON International, "Science & technology, cell production 2008 survey", 2009, March. P. 170-206.
14. A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology. Photovoltaic Technology Platform, European Communities, 2007.
15. Implementation Plan for the Strategic Research Agenda of the European Photovoltaic Technology Platform, European Communities, 2009.
16. Aulich H. "Solar-grade Silicon Production and Processing Technology" Proceedings of 20<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, 2010, August 1-4, Breckenridge, Colorado, USA.
17. Le M. DoE's Role in the Future of PV // Proceedings of 20<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, 2010, August 1-4, Breckenridge, Colorado, USA.
18. Luque A. et al. // Proceedings 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009. Hamburg, Germany, 21-24 September, plenary paper.
19. Barnham K. et al. "Quantum Well Solar Cells and Quantum Dot Concentrators in Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion". 2006. P. 517.
20. Adams J. et al. // Proceedings 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009. Hamburg, Germany, 21-24 September, plenary paper.
21. Wyers P. "PV Road Map and Prospects for Silicon Technology", presentation at 22<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2007, Milan, Italy, 3-7 September, plenary paper.
22. Андреев В. Нанотехнологии для солнечной фотоэнергетики // Междунар. науч. журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2007. АЭЭ 2(46).
23. Lynn H., Bradford T. "Polysilicon: Supply, Demand and Implication for the PV Industry 2006. Report of Prometheus Institute for Sustainable Development" (<http://www.prometheus.org>)
24. Pizzini S., Acciari M., Binetti S. From Electronic Grade to Solar Grade Silicon: Chances and Challenges in Photovoltaics // Physica Status Solidi (a). 2005. **202**. P. 2928-2942
25. Siffert P., Krimmel E., Silicon. Evolution and Future of a Technology. Springer, 2004. P. 549.
26. Present Situation and Prospect of Solar Grade Silicon in China, presentation of Solar Energy Research Institute, GT Technologies, 2005.
27. Ceccaroli B., Lohne B. Solar Grade Silicon Feedstock // In [8], see also Elkem Solar, Metallurgical Solar Silicon, Third Silicon Conference, Munich, 2006.
28. Hesse K., Schindlbeck E., Freihert H. "An Overview on Silicon Feedstock", in Proceedings 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September, 2007, Milan, Italy. P. 806-810.
29. Hesse K., Dornberger E., Schindlbeck E. "Silicon Feedstock-Factors for Differentiation", in Proceedings 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September, 2008, Valencia, Spain. P. 1062-1065.
30. Peter K., Kopecek R., Soiland A., Enebakk E. "Future Potential for SoG-Si Feedstock from Metallurgical Process Route", in Proceedings 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September, 2008, Valencia, Spain. P. 947-950.
31. Worms A., Ovrelied E., Raanes O., Greevlings B., Santeen S., Wiersma B., Talhgar H. "Direct Route for the Production of Solar-Grade Silicon from Metallurgical-Grade Silicon", in Proceedings 16<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules. Materials and Processes 2006. P. 42-49.
32. Kraem J., Einhaus R., Drevel B., et. al. "Solar-grade Silicon Production and Processing Technology", in: Proceedings

of 20<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, 2010, August 1-4, Breckenridge, Colorado, USA.

33. Dietl J. Refining of Metallurgical-Grade Silicon // Silicon for Photovoltaics. 1987. V. 2. P. 285-352.

34. Mukashev B., Abdullin Kh., Tamendarov M., Turmaganbetov T., Beketov B., Page M., Kline D. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2009. oi:10.1016/j.solmat.2009.06.011.

35. Tamendarov M., Mukashev B., Abdullin Kh., Beketov B., et al. Method of Obtaining Pure Silicon // Kazakhstan Patent N 17865, 2004, October 12.

36. Istratov A., Buonassisi T., Weber E. "Structural, Elemental, and Chemical Complex Defects in Silicon and Their Impact on Silicon Devices". P. 79-112 // "Into the Nano Era: Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS", 2009, Springer. V. 106. 345 p.

37. DeCeuster D. High Efficiency Solar Cells: Promise and Realization // Proceedings of 20<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, 2010, August 1-4, Breckenridge, Colorado, USA.

38. Saleh B., Teich M. Fundamentals of Photonics. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons. Inc. 2007.

39. "Quantum Dots Explained", Evident Technologies. 2008. <http://www.evidenttech.com/quantum-dots-explained.html>.

40. Arthur J. Nozik. Multiple exciton generation in semiconductor quantum dots // Chemical Physics Letters. 457. 2008. P. 3-11.

41. NREL. Annual Report. 2009.

42. PV Outlook 2013. EPIA, 2009; PV Outlook 20014, EPIA, 2010.

43. Hoffmann W. // EPIA. 2007.

## Резюме

Шолуда Күн энергиялық қондырғыларды құрастыруға арналған негізгі шалаөткізгіш материалдар мен құрылымдар қарастырылған. 2030 жылға дейінгі болжаулар

бойынша, мұнайдың маңызы азайып, көмір мен газдың электр қуаты өндірге қосатын үлесі ұлғаймақ болса да, болашақта, гидро- және атом электрстанцияларды үдептамытумен қатар, жаңа энергия көздерін пайдалану абыз екені айтылады. Соның қатарында ең маңыздысы – Күн энергиясы. Күн энергиясын пайдаланудың негізгі және болашағы мол түрі, Күн сәулелерін электр қуатына тікелей аударатын фотоэлектрлік шалаөткізгіш жүйелері болып табылады. Бұл Күн қуатының пайдалану түрі – фотоэнергетика, ФЭ деп аталады. Бүгінгі жаһандық ФЭ нарығы – дүниежүзілек экономиканың ең үдемелі карынмен дамып келе жатқан салаларының бірі. ФЭ-ның, Күн сәулелерін электр қуатына аударатын негізгі элементтері – электрлік түрлендіргіштер (ФЭТ) деп табылады. ФЭТ, Күн энергетикасының элементтік базасы болып, оның даму болашағының негізін құрайды.

## Summary

Basic semiconductor materials and structures used for building solar power systems are considered. It is noted that in spite of the predicted up to 2030 increase of coal and gas contribution to the production of electric energy with simultaneous reduction of oil consumption in the future along with the accelerated development of hydro-electric and atomic power stations it is necessary a large-scale utilization of new sources of energy, among them solar power engineering is one of the most important. The one of the main and perspective forms of solar energy use are photoelectric semiconductor systems for the direct conversion of solar radiation to electric energy. This kind of utilization of solar energy has been named photovoltaics, PVs. The present PVs world market is a fast-developing branch of world economy with increasing rate of growth. The base elements of PVs are photoelectric transducers (solar cells, SC), which convert solar energy to the electricity. SC is an elemental base of solar power engineering and determine prospects of its development.