

УДК 537.311.33:669.782

## ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А.П. ДОСТАНКО, В.П. ВАСИЛЕВИЧ, О.Л. КАЙДОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 30 ноября 2004*

В настоящее время одним из наиболее перспективных альтернативных источников энергии является солнечная энергия. В связи с этим проблема получения материалов для солнечной энергетики является весьма актуальной. Более 90% солнечных элементов производится на основе монокристаллических и мультикристаллических кремниевых пластин. В настоящей статье рассмотрены тенденции перспективы развития технологии получения кремния в связи с ситуацией на мировом рынке. Проанализированы наиболее перспективные пути развития технологии производства поликристаллического кремния.

*Ключевые слова* : фотоэлектрические преобразователи, рынок, технология, себестоимость

### **Современный рынок поликристаллического кремния.**

Мировое потребление металлургического кремния составляет приблизительно 750 000 т в год. Около 60% металлургического кремния использует алюминиевая промышленность. Химическая промышленность, выпускающая товарные кремнийсодержащие формы, потребляет 35% металлургического кремния. Полупроводниковая промышленность потребляет 3–5% от общего объема металлургического кремния, используя его для получения поликристаллического кремния электронного качества, служащего сырьем для производства кремниевых интегральных микросхем, а также нитрида кремния, карбида кремния, высокоточной керамики для электроники.

Кроме того, некоторая часть поликристаллического кремния, потребляемого полупроводниковой промышленностью, используется для производства солнечных элементов, являющихся основным функциональным звеном фотоэлектрических преобразователей. Для этих целей в основном используются отходы производства кремниевых слитков и пластин, а также отходы производства интегральных микросхем. В 2003 г. общая электрическая мощность произведенных фотоэлектрических преобразователей на основе солнечных элементов из кремния составила 560 МВт. Данный объем недостаточен для нормального развития солнечной энергетики. Для того чтобы фотоэлектрические преобразователи как источник электрической энергии могли серьезно конкурировать с традиционными источниками электрической энергии, необходим рост производства фотоэлектрических преобразователей не менее чем в 1000 раз в течение ближайших 30–50 лет [1]. По прогнозам ведущих производителей, в производстве солнечных элементов в течение ближайших 10 лет будут доминировать монокристаллические и мультикристаллические кремниевые пластины [2]. В сложившейся ситуации основными факторами, определяющими перспективы развития солнечной энергетики на ближайшие годы, являются уровень научно-технических достижений в области технологии кремния и ситуация на рынке, определяющая интерес потенциальных инвесторов к развитию данной отрасли.

В настоящее время мировой рынок поликристаллического кремния практически полностью представляет собой рынок кремния для производства интегральных микросхем. При этом основным потребителем поликристаллического кремния электронного качества являются производители интегральных микросхем для ПЭВМ. На сегодня мировой рынок поликристаллического кремния характеризуется кризисом сбыта. Данный кризис носит периодический характер, повторяется один раз в 5–10 лет и связан с колебаниями потребительского спроса на современные ПЭВМ. Так, в настоящий момент рынок современных компьютеров в основном насыщен, в связи с чем наблюдается кризис сбыта и, как следствие, падение спроса на поликристаллический кремний. Возможности оборудования, задействованного для производства кремния во всем мире к концу 2001 г., по данным [3], составляли 26 000 т в год. В то же время производство кремния в 2001 г. составило 14 000 т [3]. Таким образом, задействуется лишь около половины мощностей, пригодных для производства кремния электронного качества.

Очевидно, что для повышения спроса на поликристаллический кремний электронного качества для производства интегральных микросхем необходимым условием является качественный скачок в развитии программного обеспечения и технологии производства ЭВМ.

Кризис сбыта на рынке поликристаллического кремния электронного качества имеет место на фоне очевидного роста производства кремниевых фотоэлектрических преобразователей, отраженного на рис. 1, где показан объем производства солнечных элементов из кремния исходя из оптимистического (25%) и пессимистического (15%) прогнозов развития. За основу взята цифра мирового производства кристаллических кремниевых солнечных модулей в 2000 г. — 235 МВт [3].

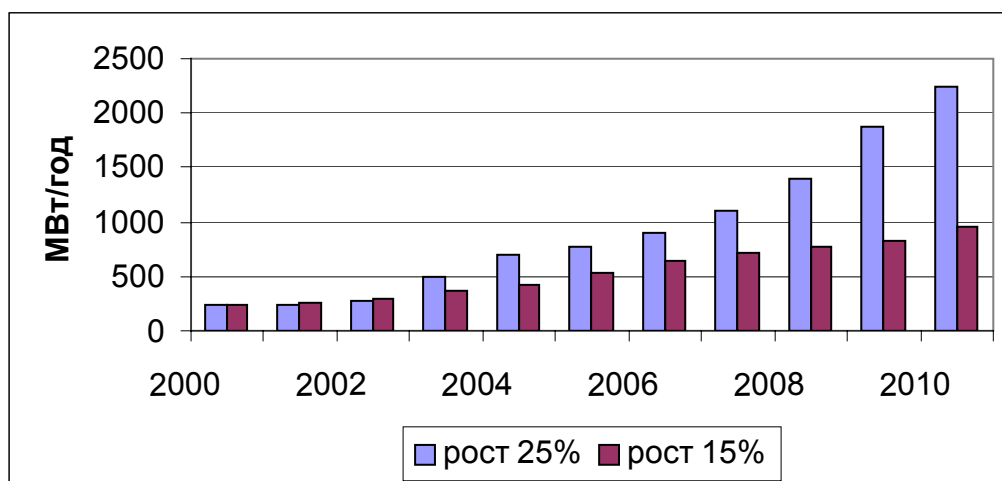


Рис. 1. Мировое производство солнечных элементов из кремния

При таком росте производства фотоэлектрических преобразователей потребность в кремниевом сырье вырастет до размеров, отраженных на рис. 2.

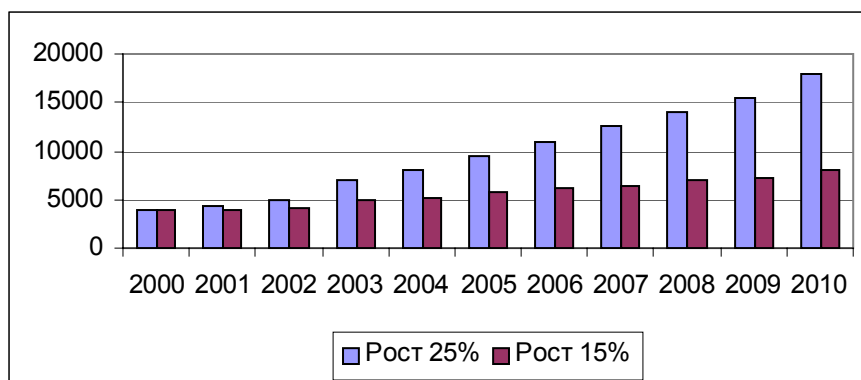


Рис. 2. Мировая потребность в кремнии для солнечных элементов

Согласно рис. 2, следует, что уже к 2010 г. необходимо дополнительно произвести 18 000 т кремния при росте 25% или 8 000 т при росте 15%.

Кремний, используемый для производства фотоэлектрических преобразователей, должен соответствовать определенным требованиям по чистоте и удельному сопротивлению (так называемый "солнечный кремний"): уровень легирования фосфором (P) или бором (B) — без компенсации: удельное сопротивление при температуре 25°C более 1 Ом·см; содержание кислорода и углерода не должно превышать уровень насыщения в расплаве; суммарная концентрация электрически активных примесей в пределах  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  ат.%. Очевидно, что требования по чистоте ниже, чем предъявляемые к поликристаллическому кремнию электронного класса.

В настоящий момент главным поставщиком сырья для производителей фотоэлектрических преобразователей по-прежнему остается индустрия производства интегральных микросхем. Исторически сложилось так, что основным источником сырья для производства фотоэлектрических преобразователей являются отходы производства полупроводниковой промышленности. Это коническая вершина и основание слитка, выращенного методом Чохральского; части монокристалла, не отвечающие требованиям по удельному сопротивлению или содержанию примесей (так называемый "внеспецификационный" кремний); отходы резки слитков на пластины. Кроме того, в последние годы некоторая часть кремния, используемого в производстве солнечных элементов, производится специально для нужд солнечной энергетики. Так, в 2002 г. фирма Wacker Chemie объявила, что будет продавать производителям солнечных элементов ежегодно от 1500 до 2000 т кремния, независимо от состояния производства интегральных микросхем. Wacker гарантирует это количество в случае заключения долгосрочных контрактов [4].

Очевидно, что в поисках путей выхода из кризиса производители кремния электронного качества будут стремиться реализовать производимый ими продукт производителям солнечных элементов, однако электронный кремний, получаемый традиционными путями (термическим разложением моносилана и трихлорсилана), обладает слишком высокой стоимостью для того, чтобы удовлетворять нужды данной отрасли. Загрузка некоторой части мощностей традиционных поставщиков электронного кремния под производство кремния солнечной градации, к которой прибегли в настоящее время ведущие производители кремния, связана, в первую очередь, со сложившимся кризисом сбыта и продиктована стремлением снизить убытки от простоя оборудования. Поэтому с окончанием кризиса в производстве интегральных микросхем данная часть мощностей, по всей видимости, возвратится к производству электронного кремния.

Отходы полупроводникового производства также не стоит рассматривать как постоянный и достаточный для покрытия дефицита источник кремния солнечного качества.

Так, нельзя точно определить количество кремния, получаемого от процесса выращивания слитков, поскольку в последние годы производители предприняли ряд мер по уменьшению отходов на этой стадии: использование загрузок более 100 кг, многоразовые перезагрузки тиглей; стремление к использованию пластин с низким удельным сопротивлением, непригодных для производства солнечных элементов; повторное использование отходов монокристаллических слитков в качестве сырья.

Источником отходов является также процесс резания слитков на пластины. Этот процесс выполняется с выходом годных пластин 90–95%. Остающиеся пластины или сломаны, или повреждены, или не отвечают какому-либо критерию, например, толщине, клину, прогибу. Кроме того, индустрия производства интегральных микросхем продает производителям солнечных элементов тестовые пластины, а также обработанные пластины с различными покрытиями. В [5] оценено, что ежегодно таким образом используется 5–10 млн пластин.

Тем не менее кремний из рассмотренных выше источников не может обеспечить возрастающие потребности производителей фотоэлектрических преобразователей в дешевом кремнии солнечной градации. Так, в [5] оценивается, что к 2010 г. благодаря росту кремниевой промышленности поставка поликристаллического кремния производителям солнечных элементов и традиционных источников составит 4 000 т. В то же время благодаря росту потребления уровень потребления, равный 4 000 т, будет достигнут уже к 2005 г.

Таким образом, ситуация на современном рынке поликристаллического кремния характеризуется возрастающим дефицитом на дешевый (не дороже 25 USD за 1 кг) кремний солнечной

градации. При этом имеющиеся на сегодня источники в виде отходов производства интегральных микросхем и частично специально производимого кремния не способны покрыть данный дефицит.

Очевидно, что сохранение подобной ситуации не позволяет рассчитывать на развитие производства фотоэлектрических преобразователей как самостоятельной отрасли, обеспечивающей динамичное развитие солнечной энергетики. В связи с этим важное значение имеет поиск оптимальной технологии производства кремния солнечной градации.

### Основные методы получения поликристаллического кремния

Сегодня весь поликристаллический кремний получается в результате термического разложения высокочистого трихлорсилана  $\text{SiHCl}_3$  или моносилана  $\text{SiH}_4$ . В настоящее время наиболее широкое применение нашли методы газофазного термического разложения трихлорсилана и моносилана в стержневом реакторе Сименса. Реактор Сименса схематически показан на рис.3.

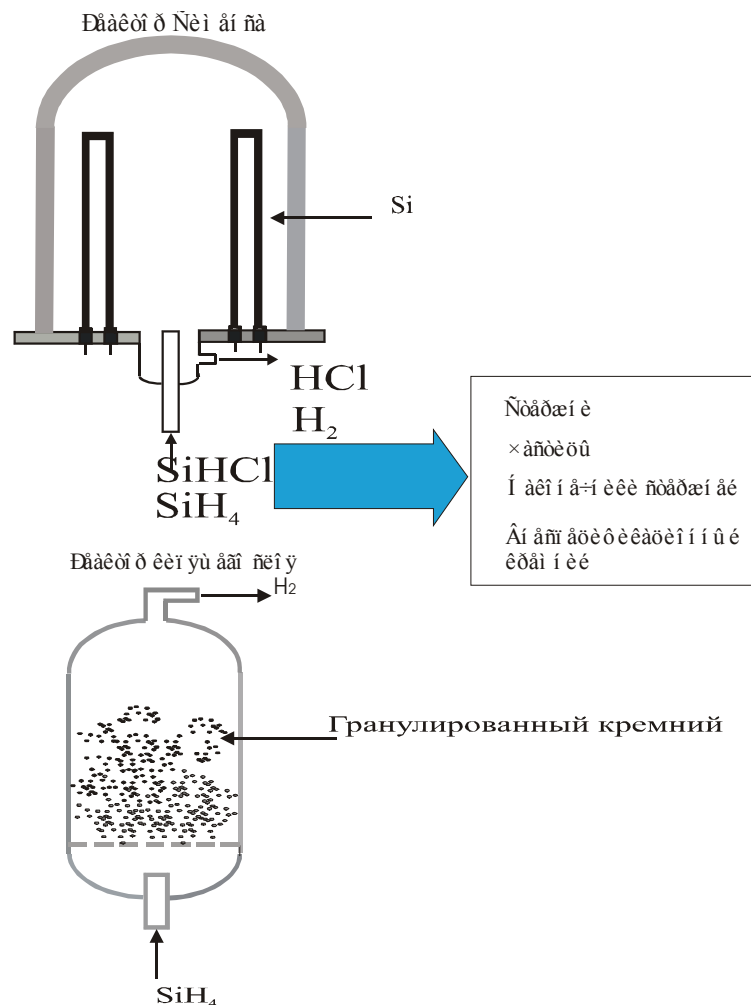


Рис. 3. Основные методы получения поликристаллического кремния

Процесс получения трихлорсилана основан на взаимодействии металлургического кремния с  $\text{HCl}$  с использованием медного катализатора с последующей сепарацией и очисткой. Термическое разложение трихлорсилана проводится на нагретых стержнях при температуре  $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$  и подаче в реактор смеси  $\text{SiHCl}_3$  и  $\text{H}_2$ . Современные реакторы могут производить одновременно до 12 стержней диаметром до 150 мм и длиной до 150 см.

Несмотря на то что на сегодня этим методом производится более 80% получаемого в мире кремния, ему присущи такие недостатки, как относительно высокая температура процесса, что негативно сказывается с учетом низкой термической стойкости силанов (повышение температуры

реакции обуславливает ее гомогенный характер, что приводит к преобладающему выделению продуктов, негативно сказывающихся на качестве конечного продукта), довольно невысокий процент выхода кремния (теоретически возможное максимальное извлечение кремния около 60%, в реальности данный показатель составляет 15-30 %), выделение в качестве побочного продукта коррозионного газа — HCl, что может неблагоприятно сказываться на состоянии оборудования и экологической ситуации. Также серьезным недостатком является необходимость водородного разбавления для предотвращения гомогенного зародышеобразования. Кроме того, не всегда удается добиться высокой степени очистки от гидридов примесей [5].

В связи с этим фирмой ASiMi в США был предложен модифицированный реактор Сименса с использованием моносилана SiH<sub>4</sub> в качестве рабочего газа. В этом случае температура проведения процесса снижается до 800°C.

Помимо более низкой температуры для данного процесса характерно высокое (94–98%) извлечение кремния за один цикл. Кроме того, в процессе получения кремниевых стержней термическим разложением моносилана происходит его дополнительная очистка от гидридов примесей. Вместе с тем термическому разложению моносилана присущи такие серьезные недостатки, как большая продолжительность и связанная с этим высокая энергоемкость процесса, что приводит к повышению стоимости получаемого кремния. Аналогично Сименс-процессу в данном случае для подавления гомогенного зародышеобразования необходимо водородное разбавление подаваемого в реактор моносилана.

Резюмируя сказанное выше, известные процессы получения поликристаллического кремния следует охарактеризовать как высокочрезвычайно затратные (затраты электроэнергии на производство 1 кг товарного кремния составляют не менее 100 кВт·ч/кг), потребляющие ресурсы как непосредственно в производстве кремния, так и в утилизации отходов коррозионно- и взрывоопасных реакций, что определяет высокую цену производимого этими методами кремния (50–60 USD за 1 кг). Вместе с тем, согласно данным маркетинговых исследований [5], для обеспечения конкурентоспособной цены фотоэлектрической энергии цена поликристаллического кремния не должна превышать 25 USD за 1 кг.

В связи с этим особый интерес представляет технология получения гранулированного поликристаллического кремния пиролизическим разложением моносилана в реакторе кипящего слоя, освоенная фирмой MEMC (США) [5]. На рис. 3 показано схемное решение данного процесса. Небольшие частицы кремния в виде гранул размером 100–200 мкм вводятся в реактор, и затем подается газовая смесь моносилана с водородом. Для равномерного распределения газа по сечению применяют специальные газораспределительные решетки с малым свободным сечением (1,5–2,5%). Для поддержания температуры газораспределительной решетки ниже температуры пиролиза моносилана решетка принудительно охлаждается. При температуре свыше 600°C происходит разложение моносилана с образованием кремния, который осаждается на поверхности псевдоожигаемых кремниевых частиц, позволяя частицам-зародышам вырасти в диаметре. По достижении определенного размера частицы опускаются на дно реактора.

Кипящий (псевдоожиганный) слой — специфическое состояние слоя мелкозернистого материала, продуваемого снизу потоком газа со скоростями, обеспечивающими интенсивное движение частиц, но недостаточными для их выноса из аппарата. Мелкозернистые частицы твердого материала в газовом потоке при этом приходят в легкоподвижное состояние, напоминающее кипящую жидкость. Область существования псевдоожиганного слоя ограничивается начальной скоростью псевдоожигания  $u_0$  и критической скоростью уноса частиц из аппарата  $u_{кр}$ .

Кипящий слой обладает рядом преимуществ по сравнению со стационарным слоем: обеспечивается интенсивный теплообмен между твердыми частицами и газовым потоком, а также между слоем и поверхностью теплообмена; резко увеличивается площадь контактирования между реагентами—частицами слоя и газовым потоком; выравниваются характеристики по всему объему слоя [6].

Данные преимущества обуславливают высокую производительность метода и значительное снижение энергозатрат, что дает основания считать этот метод наиболее перспективным для промышленного производства дешевого кремния солнечной градации. С точки зрения промышленного внедрения данной технологии существенную роль играет сравнительная простота обо-

рудования и возможность организации загрузки исходных частиц и выгрузки полученных гранул в автоматическом режиме.

В то же время проведение процессов в кипящем слое имеет некоторые недостатки: например, возникает необходимость тщательной очистки газового потока, выходящего из реактора, возможен унос из аппарата гранул-зародышей; происходит абразивный износ аппаратуры. Данные недостатки, как правило, устранимы с помощью соответствующих конструктивных решений. Вместе с тем химическая реакция пиролиза моносилана характеризуется не только гетерогенным газофазным осаждением кремния на гранулах-зародышах, но и протеканием реакций гомогенного пылеобразования, для подавления которых моносилан разбавляется водородом. По данным [6], оптимальное содержание водорода в смеси составляет 20%.

### **Возможные пути для удовлетворения рыночного спроса на поликристаллический кремний для фотоэлектрических преобразователей**

Предложены следующие основные возможности для удовлетворения потребности производителей фотоэлектрических преобразователей в кремнии [6].

1. Уменьшение потребления кремния в производстве солнечных элементов.
2. Обеспечение кремнием солнечной градации за счет мощностей производителей электронного кремния.
3. Создание технологии производства дешевого кремния солнечного качества.
4. Применение тонкопленочной технологии.

Сокращение потребления кремния в производстве солнечных элементов связано со значительным уменьшением толщины пластин, что требует усложнения технологии и повышения культуры производства. Так, при ежегодном снижении потребления кремния на 11% к 2010 г. удельные затраты кремния не должны будут превышать 5,5 МВт. При этом, исходя из прогноза роста 25% , объем производства составит около 9 000 т в год, и в этом случае потребуется уменьшение толщины пластин до 120 мкм со средним значением КПД 17% и с выходом годных более 90%. Такие показатели, в принципе, достижимы, но сопряжены с высокой степенью риска для изготовителей пластин, солнечных элементов и модулей. В связи с этим данное направление не может рассматриваться как основное.

Обеспечение нужд производителей солнечных элементов за счет производства кремния электронной градации также не представляется возможным, поскольку цены такого кремния будут соответствовать затратам полупроводниковой промышленности, что делает фотоэлектрическую энергию неконкурентоспособной.

Развитие тонкопленочной технологии в ближайшие годы также не способно оказать существенное влияние на ситуацию на рынке. Это связано в первую очередь с тем, что в настоящий момент производители инвестируют средства в производство солнечных элементов на основе имеющейся технологии. Таким образом, наиболее перспективным представляется путь разработки и индустриализации технологии получения дешевого кремния солнечного качества.

Крупнейшие мировые производители (Bayer AG, Siemens, Wacker Chemie и др.) уже с начала 80-х проводят исследования, направленные на получение кремния солнечного качества. На сегодня ни один из процессов не доведен до промышленного применения по двум основным причинам: либо не достигалась необходимая себестоимость производства кремния, либо чистота получаемого продукта была недостаточной для высокоэффективной работы солнечных элементов, что не позволяло добиться достаточно низкой стоимости вырабатываемой солнечными элементами электрической энергии. Несмотря на указанные трудности, в настоящее время крупнейшими поставщиками кремния проводится ряд работ в данной области.

1. Wacker Chemie развивает процесс производства кремния солнечной градации с использованием  $\text{SiHCl}_3$  высокой чистоты и реактор кипящего слоя, чтобы получить гранулированный кремний высокой чистоты для высокоэффективной работы солнечных элементов. В течение 2004 г. планируется начать опытное производство в объеме 200 т в год и к 2006 г. начать промышленное производство в объеме 500 т в год. При таком объеме производства цена реализации, по расчетам производителя, должна составить около 25 USD за 1 кг. Данный материал не сможет использоваться в полупроводниковой промышленности из-за недостаточной чистоты [7].

2. Tokuyama также работает над процессом производства кремния солнечного класса, используя  $\text{SiHCl}_3$  и высокотемпературный высокоскоростной процесс осаждения на подложке. Процесс планируется ввести в производство в 2005–2006 гг., что, по мнению производителя, позволит получить материал, пригодный для производства высокоэффективных солнечных элементов [7].

3. Solar World и Degussa в Германии анонсировали создание совместного предприятия для производства кремния солнечной градации с использованием моносилана с термическим разложением газа на стенках нагретого кремниевого стержня.

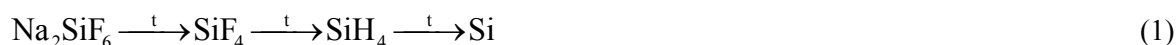
4. REC в Норвегии и *ASiMi* в США объявили о совместном предприятии, в котором существующая технология *ASiMi* по производству кремния солнечной градации с производительностью 2000 т в год, использующая моносилан как рабочий газ и реакторы Сименса, будет упрощаться для процессов, необходимых для производства кремния солнечной градации [7].

5. Kawasaki Steel в Японии развивает производство кремния солнечной градации пурификацией металлургического кремния [7]. Этот процесс находится в экспериментальной стадии, и пока не определено, насколько реализуемо производство кремния данным методом в промышленном масштабе.

На основании данной информации маловероятно, что любой новый процесс производства солнечного кремния даст существенные количества кремния ранее 2006 г. При этом с учетом постоянного роста производства солнечных элементов данный рынок и в дальнейшем будет перспективным для производителей кремния. Поэтому в течение ближайших лет следует рассчитывать на возрастание интереса к данной проблеме со стороны крупнейших производителей. К наиболее вероятным направлениям развития новых технологий получения кремния солнечного качества следует отнести модификацию традиционного процесса в реакторе Сименса, разработку промышленно применимой технологии получения кремния в реакторе кипящего слоя, очистку металлургического кремния. При этом с точки зрения затрат энергии экологической безопасности и простоты реализации наиболее перспективным представляется технология получения гранулированного кремния из моносилана в реакторе кипящего слоя.

В связи со сложившейся ситуацией, в последние годы резко возрос интерес к фторидно-гидридным методам получения поликристаллического кремния, основанным на использовании в качестве исходного сырья побочных продуктов переработки кремнеземов в фосфорные удобрения. Так, в описанном выше МЕМС-процессе исходным продуктом является выделяющаяся в результате процесса получения фосфорных удобрений кремнефтористоводородная кислота  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  [7]. Основными достоинствами данного направления являются дешевизна исходного сырья и возможность рецикла побочных продуктов и их самостоятельного товарного применения. Вместе с тем сообщается [7], что ни одному из зарубежных производителей в настоящий момент не удалось добиться чистоты продукта, удовлетворяющей производителей солнечных элементов. В связи с этим особый интерес представляет фторидно-гидридная технология получения поликристаллического кремния солнечного качества, разработанная коллективом белорусских ученых под научным руководством БГУИР (научный руководитель проекта — акад. А.П. Достанко), и апробированная на РПУП "Завод "Измеритель". В качестве исходного сырья в данном процессе также используется кремнефтористоводородная кислота  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , выделяющаяся в процессе переработки апатитового концентрата  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$  в фосфорные удобрения на Гомельском химическом заводе.

Технологический процесс получения кремния, реализованный коллективом белорусских ученых, состоит из следующих стадий:



Себестоимость поликристаллического кремния, полученного в данном процессе, составила 16,2 USD/кг. Данный показатель является приемлемым для производителей ФЭП. В то же время, исследования примесного состава, проведенные в независимой лаборатории Гиредмет (г.Москва) свидетельствуют о том, что содержание основных электрически активных примесей не превышает  $10^{-3}$  ppm, что является удовлетворительным показателем качества для производства фотоэлектрических преобразователей. Кроме того, дополнительные возможности для снижения цены получаемого в данном процессе поликристаллического кремния связаны с возможностью

реализации побочных продуктов NaF и CaF<sub>2</sub>, обладающих самостоятельной товарной ценностью и применяющихся в целом ряде областей промышленности.

Результаты работ, проведенных белорусскими учеными, подтверждают техническую возможность и экономическую целесообразность организации в Республике Беларусь отечественного производства полупроводникового кремния.

### Заключение

Высокоочищенный поликристаллический кремний, полученный термическим разложением SiHCl<sub>3</sub> и SiH<sub>4</sub> из газовой фазы, на сегодня представляет собой единственный исходный материал для производства монокристаллических и мультикристаллических кремниевых солнечных элементов. В связи с ростом интереса к солнечной энергетике актуальна проблема удовлетворения возрастающего спроса на кремний солнечной градации со стороны производителей фотоэлектрических преобразователей. Имеющиеся на сегодня источники кремния в виде отходов производства интегральных микросхем недостаточны для удовлетворения спроса. Кроме того, даже при условии реализации уменьшения потребления кремния при производстве солнечных элементов с 17 т на 1 МВт до 10 т на 1 МВт нельзя говорить о возможности покрытия дефицита на рынке кремния. Вместе с тем ввод в действие первых производственных мощностей, ориентированных исключительно на производство солнечного кремния, планируется крупнейшими производителями не ранее 2005–2006 гг.

В связи с этим определяющей тенденцией развития технологии производства поликристаллического кремния представляется стремление к разработке новых, высокоэффективных и малозатратных технологий производства кремния по цене не более 25 USD за 1 кг.

В качестве наиболее перспективных направлений следует выделить технологию получения поликристаллического кремния в реакторе кипящего слоя, а также фторидно-гидридные методы получения поликристаллического кремния.

## THE TENDENCIES AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF POLYCRYSTALLINE SILICON FOR THE PHOTVOLTAIC POWER

A.P. DOSTANKO, V.P. VASILEVICH, A.L. KAIDAU

### Abstract

Nowadays the interest to solar energy is become raising, because this is a perspective alternative source of electric energy. In connection with this, the problem of development of the new technologies of problem of development of the new technologies of producing materials for a photoelectric element is very actual. Nowadays more than 90% of work production of solar dements is found on crystalline silicon plates. The tendencies and perspectives of development of the technology of polycrystalline silicon in connection with the modern situation in world market of this product is described in this article. The most perspective ways of development of producing polycrystalline silicon was analyzed.

### Литература

1. *Johannes Bernreuter* // Photon. Das Solarstrom-Magazin. 2004. № 6, S. 66–70.
2. *Aulich H.A., Ossensbrink H.A.* Workshop "Dependable and Economic Silicon Materials Supply for Solar Cell Production" JRC Ispra, Italy, 1998, P. 88–95
3. *Aulich H.A.* // Proceedings of 7th EC Photovoltaic Energy Conference. Seville, Spain, 1996, P. 76–83.
4. *Dietl J.* // Proceedings of 7th EC Photovoltaic Energy Conference. Seville, Spain. 1996, P. 101–106.
5. *George Hsu, Naresh Ronati* // AIChE Journal. 1997. № 5. P. 79–86
6. *Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоний И.Ф. и др.* Технология полупроводникового кремния. М., 1992. С. 253–259
7. *Hesse K.* // Renewable Energy World. 2003. № 4. P. 85–100.