

РЫНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Наумов, ОАО "НПП КВАНТ"

Наш журнал уже обращался к теме получения полупроводникового поликристаллического кремния (далее – поликремния) в статье "Нужен ли России собственный кремний?" в 2001 году. В предлагаемом обзоре подводятся некоторые итоги бурного периода развития рынка поликремния в 2000–2015 годах. На основе International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) – 2015 анализируются тенденции развития производства поликремния в мире. За минувшее десятилетие отрасль продемонстрировала уникальные темпы роста – объем рынка поликремния увеличился с 20 тыс. тонн до почти 300 тыс. тонн.

Большая часть (почти 80%) технического (металлургического) кремния в мире применяется как лигатура при производстве специальных сталей (электротехнических, жаростойких) и различных сплавов цветных металлов. Кремний используется и в производстве абразивных и твердосплавных изделий, в химической промышленности развиваются технологии выпуска силиконовых кремнийорганических материалов, необходимых для производства пластмасс, лакокрасочной продукции, смазок и т.п. В последние годы объем мирового производства технического (металлургического) кремния составлял около 2260 тыс. тонн в год (рис.1). Первое место среди производителей металлургического кремния занял Китай, доля которого на мировом рынке составила 55%.

На сегменты электронной промышленности и солнечной энергетики приходится примерно 12–15% мирового производства металлургического кремния, используемого в качестве сырья.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРЕМНИЯ

Металлургический кремний Si_{MG} имеет значительный объем примесей – как правило, в пределах 1–2%. В нем представлены, в частности, металлы, например, железо, титан, медь, хром; легкие элементы – углерод, кислород и азот; легирующие примеси – фосфор и бор. Для получения поликремния, качество которого соответствует требованиям, предъявляемым электронной и фотоэлектрической промышленностью (так называемое "электронное"

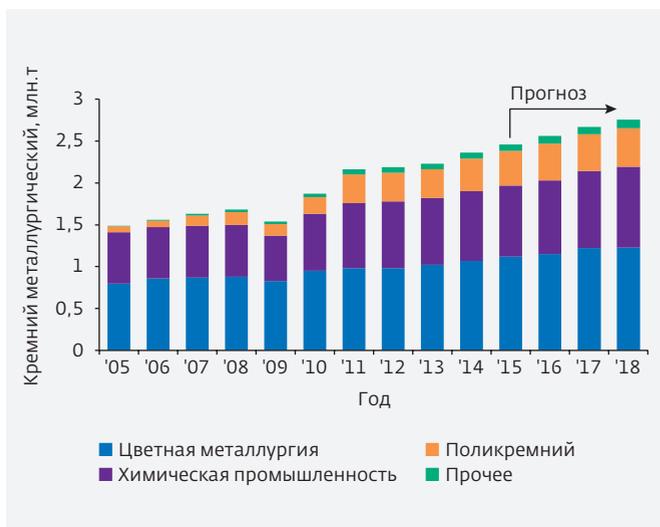
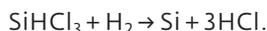


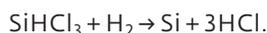
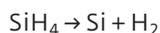
Рис.1. Динамика и прогноз производства металлургического кремния по секторам применения

или "солнечное" качество), необходимо обеспечить его глубокую очистку. Промышленно применяемые технологии представлены на рис.2.

Метод "Сименс". Вариант 1. Применяется реактор водородного восстановления SiHCl₃ (ТХС) либо пиролиза SiH₄ (МС) (далее – Сименс-ТХС или Сименс-МС соответственно). Поликремний осаждается на затравочные прутки (рис.2а):



Метод "Реактор кипящего слоя" (КС или FBR). Вариант 2. Реактор разложения МС либо водородного восстановления ТХС в "кипящем" слое (КС) (далее – КС-МС или КС-ТХС соответственно). Поликремний получается в виде гранул в соответствии с реакциями (рис.2б):



В свою очередь, метод "Сименс-ТХС" подразделяется на две разновидности: "Сименс-DC" и "Сименс-HC". Выходящая из реактора парогазовая смесь содержит в больших количествах непрореагировавший H₂, ТХС, тетрахлорид (SiCl₄), HCl, полисиланхлориды. Это связано с тем, что только 20–25% кремния из ТХС осаждается на затравочных стрежнях за один цикл, при этом в реакции участвует около 10% подаваемого в реактор H₂. Отводимые из реактора продукты процесса водородного восстановления необходимо регенерировать в процессах

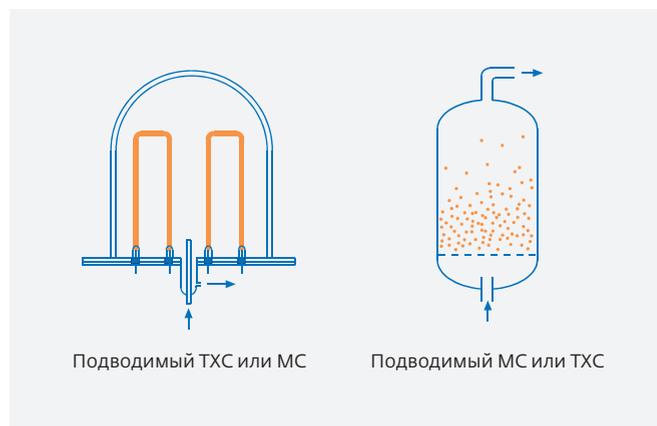


Рис.2. Промышленные типы реакторов для получения поликремния

конденсации и разделения смеси (SiHCl₃+SiCl₄). Преобразование SiCl₄, который попутно образуется после водородного восстановления ТХС, осуществляется двумя способами:

- путем конверсии избыточного SiCl₄ в ТХС в специальных реакторах-конверторах (метод "Сименс-DC"): SiCl₄ + H₂ → SiHCl₃;
- подачей обратного SiCl₄ в реактор исходного синтеза ТХС (метод "Сименс-HC"): Si_{MG} + 2H₂ + SiCl₄ → 4SiHCl₃. Впервые эту реакцию исследовали в 1905 году немецкие химики O.Ruff и C.Albert, но промышленное освоение процесса произошло только в последнее десятилетие, что стало значимым фактором развития технологии, так как за счет снижения концентрации HCl в продуктах реакции оказалось возможным уменьшить энергозатраты и повысить экологическую безопасность.

Одну из разновидностей метода "Сименс-ТХС" использует компания Hemlock (США). Подача в реактор осаждения дихлорсилана (SiH₂Cl₂) позволяет

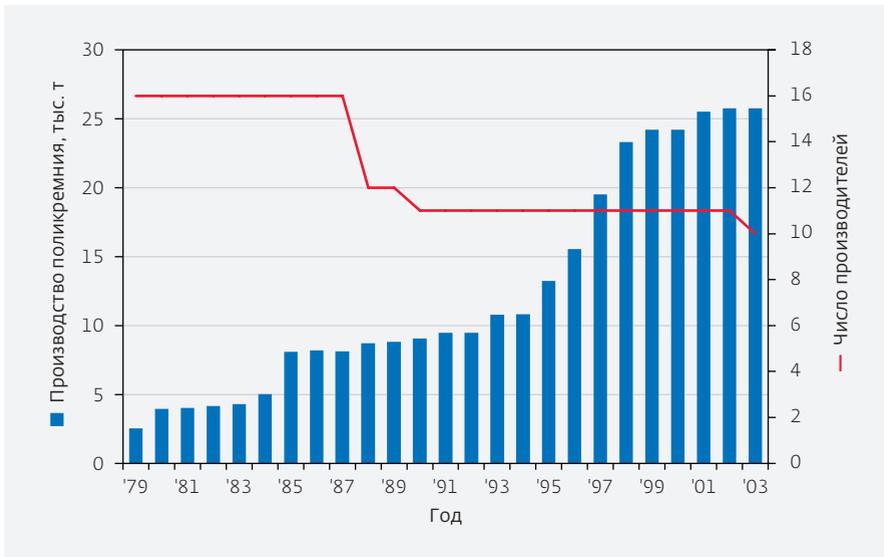


Рис.3. Динамика увеличения мощностей по производству поликремния и снижения числа производителей в 1979–2003 годах (период 1)

уменьшить температуру осаждения и снизить уровень вносимых загрязнений.

ПЕРИОДЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА ПОЛИКРЕМНИЯ

Объем рынка поликремния за 1980–2000 годы увеличился с ~5 тыс. тонн до ~25 тыс. тонн. Основными драйверами послужили развитие электронной промышленности и начавшийся в начале 2000-х годов рост сегмента солнечной энергетики, которая в качестве сырья поначалу использовала отходы и "скрап" электронной промышленности, но очень скоро стала требовать специально изготовленного сырья. Динамика роста производства поликремния, как и динамика изменения количества производителей (включая производителей в СССР), приведены на рис.3. Количество производителей неуклонно

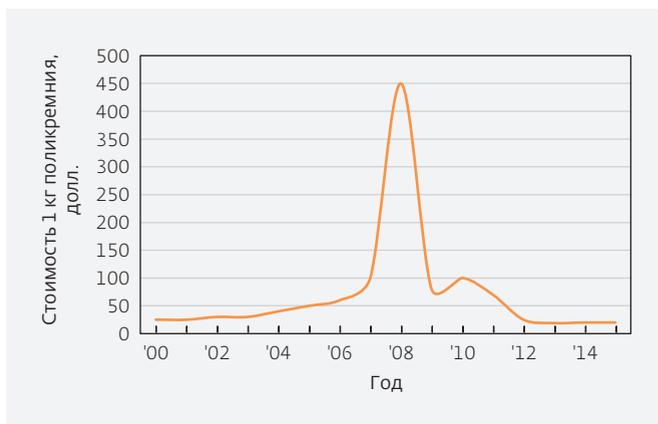


Рис.4. Динамика цен на поликремний в 2000–2015 годах

уменьшалось, так как рынок требовал специализации, предприятия укрупнялись. Разрушение электронной промышленности СССР также способствовало этой динамике. В 1995 году было прекращено производство поликремния на Красноярском ЗЦМ, в 1997-м – производство трихлорсилана (ТХС) и поликремния на Запорожском ТМК, в 1998-м – производство поликремния на Донецком ХМЗ, а в 2003-м – производство поликремния на Подольском ХМЗ (см. рис.3). В 1990-е годы, правда, был период небольшого перепроизводства и падения спроса, но в целом период характеризовался достаточно стабильным уровнем цен и балансом между спросом

и предложением.

В начале 2000-х годов наступил новый этап развития рынка поликремния. Основной движущей силой его роста в этот период стало развитие солнечной энергетики, причем такими темпами, что к 2004–2005 годам сформировался дефицит сырья – поликремния для изготовления солнечных преобразователей, который не могли быстро удовлетворить немногочисленные производители (к тому времени их осталось десять и пять из них (Hemlock, Wacker, REC, MEMC, Tokuyama) контролировали 85% рынка). Цена на поликремний подскочила с 30–40 долл./кг до невообразимых ранее 400 долл./кг, и даже это

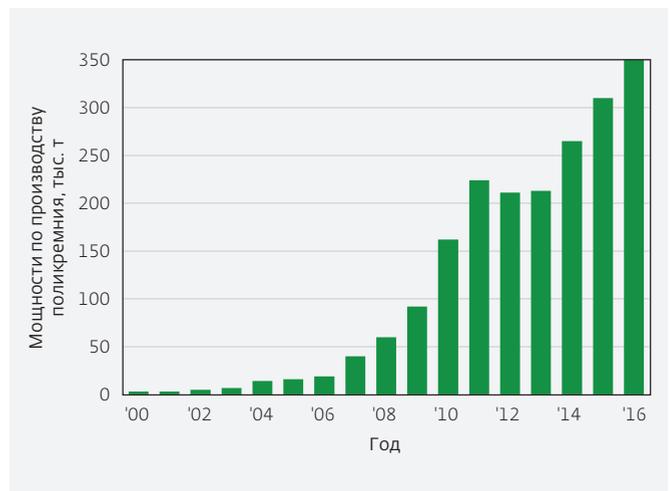


Рис.5. Динамика увеличения мощностей по производству ППК в 2000–2015 годах и прогноз на 2016-й (период 2)

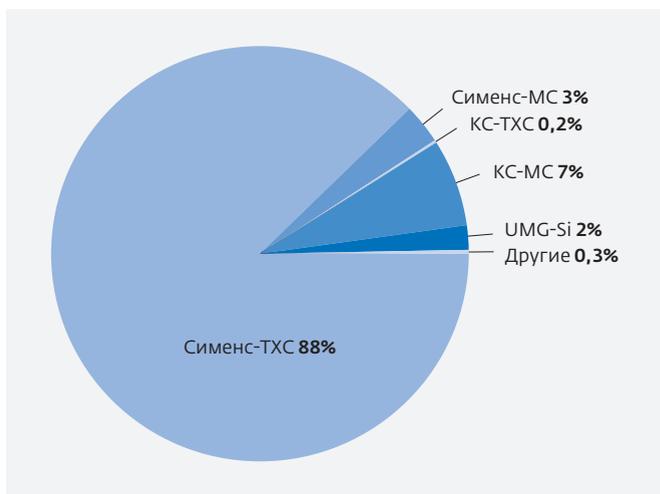


Рис.6. Доли различных технологий по производству поликремния

не останавливало покупателей (рис.4). Благо, что солнечная энергетика в те годы щедро субсидировалась правительствами различных стран, особенно европейских.

Ажиотажный спрос положил начало реализации большого количества проектов новых производств поликремния – на пике интереса к этой проблеме в 2006–2007 годах в мире их насчитывалось около 180. Достаточно быстро выделились три группы игроков:

- существовавшие компании, которые наращивали производство;
- новые игроки и инвесторы, сделавшие ставку на развитие традиционных видов производства поликремния – Сименс-процесс и в меньшей мере



Рис.7. Распределение удельных инвестиций в действующие производства поликремния в зависимости от объема выпуска

на "кипящий слой" или FBR (осаждение моносилана в реакторе "кипящего слоя");

- венчурные компании, инвестировавшие в развитие новых подходов к получению поликремния.

Кажется, не было ни одного возможного способа получения поликремния, который не стал бы основой соответствующего венчурного проекта – от исторически первого Бекетов-процесса (цинкотермии четыреххлористого кремния) до получения поликремния непосредственно из металлургического (технического), минуя стадию перевода в газовую фазу, который представлялся основным конкурентом затратному, как тогда казалось, Сименс-методу (UMG-поликремний). В большинстве прогнозов указывалось, что при сохранении доминирования Сименс-метода в палитру производств добавится целый ряд новых промышленных методов получения поликремния.

Впрочем, в 2009 году к основным производителям, существенно нарастившим мощности, добавились лишь два новых крупных игрока – ОСИ (бывший DC Chemical из Южной Кореи) и китайская GCL-Poly, выбравшие Сименс-метод. Мир производителей остался замкнутым и ориентированным на один метод. Однако этого было достаточно для преодоления дефицита поликремния и создания предпосылок к почти двукратному избытку поликремния в 2012 году (рис.5).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Доли технологий в общем производстве поликремния на рынке по состоянию на 2013–2014 годы представлены на рис.6. Преобладает метод "Сименс-ТХС" (обе разновидности), за ним со значительным отрывом следует метод КС–МС.

Если сравнивать операционные затраты на производство 1 кг поликремния по различным технологиям

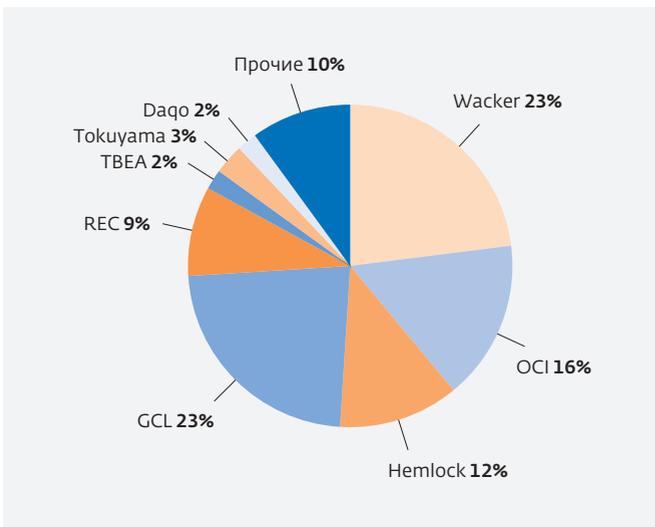


Рис.8. Производство поликремния компаниями (данные из различных источников могут незначительно различаться)

(сырье, электроэнергия, труд, но без учета накладных расходов, амортизация, проценты за кредиты и прочее), то наиболее эффективной является технология КС–МС. Но, учитывая ее малую распространенность, многие эксперты сомневаются в достоверности подобных оценок. На второй позиции технология Сименс-НС, за ней Сименс-ДС. Технология UMG остается затратной, несмотря на прогнозы, но самое главное – она ограничивается опытно-промышленной стадией.

Следует подчеркнуть, что полная себестоимость производства 1 кг поликремния с учетом накладных расходов, амортизации, выплаты процентов по кредитам может отличаться от указанной и зависит от конкретной ситуации производителя. Так, например, с учетом выплаты процентов по кредиту и амортизации себестоимость поликремния по технологии Сименс-НС будет выше, чем по технологии Сименс-ДС для производителя, взявшего кредит на приобретение более капиталоемкого оборудования Сименс-НС.

Строительство или наращивание мощностей по выпуску поликремния Сименс-методом (двумя его разновидностями) требует значительных инвестиционных затрат. Распределение удельных инвестиционных капитальных затрат приведено на рис.7. Как видно, все действующие производства имеют удельные капвложения в диапазоне от 50 долл./кг до 150 долл./кг, что сильно зависит от объема выпускаемой продукции.

Текущие удельные затраты на выпуск поликремния (стоимость сырья, электроэнергии, зарплата и прочее) для большинства предприятий составляют 15–20 долл./кг.

Учитывая заявленную производителями высокую эффективность технологии КС–МС, эксперты International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) – 2015 полагают, что доля КС–МС-процесса к 2022 году увеличится до 37% в общем объеме, а доля Сименс–ТХС-процесса (обеих разновидностей) снизится до 55%. На долю прочих методов

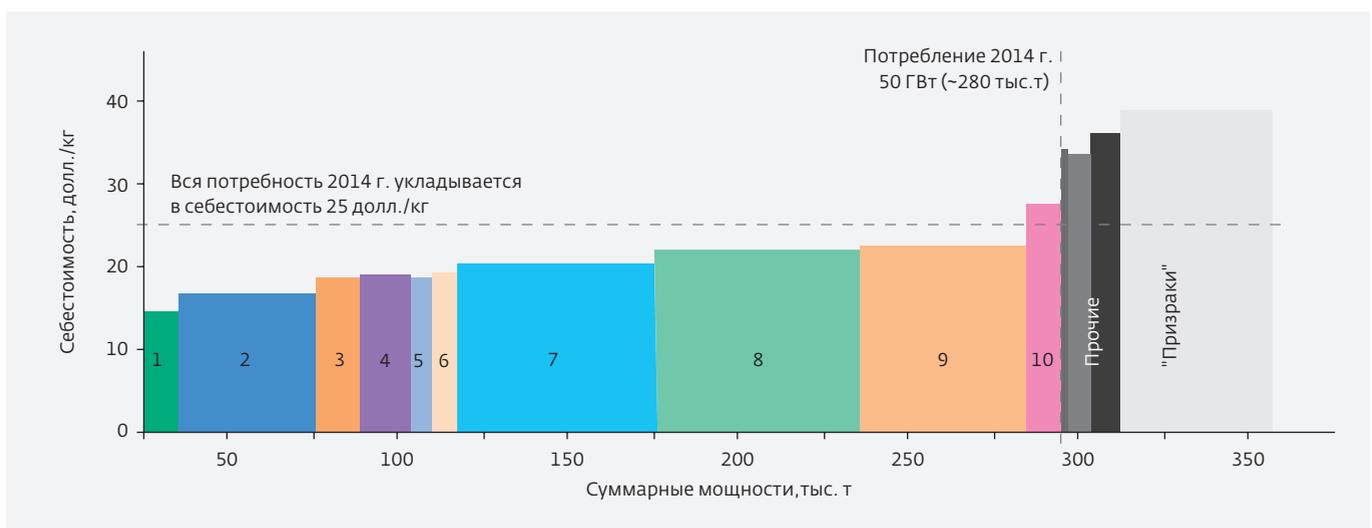


Рис.9. Себестоимость производства и мощности производителей поликремния: 1 – REC (США) – Сименс+КС–МС; 2 – GCL-Poly (Китай) – Сименс+КС; 3 – SunEdison (США) – Сименс+КС; 4 – Daqo (Китай) – Сименс; 5 – Renesola (Китай) – Сименс; 6 – TBEA (Китай) – Сименс; 7 – OCI (Южная Корея) – Сименс; 8 – Wacker (Германия) – Сименс; 9 – Hemlock (США) – Сименс; 10 – Токуяма (Япония) – Сименс, VLD (vapor-to liquid deposition)

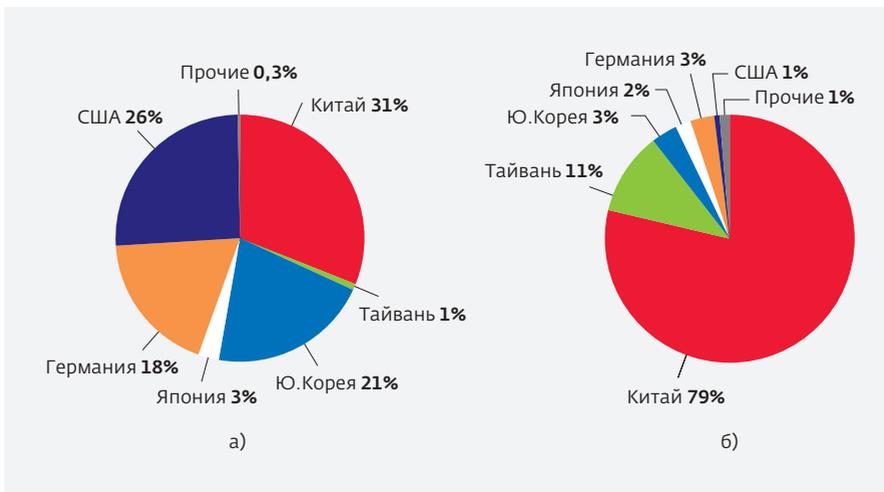


Рис.10. Производство (а) и потребление (б) поликремния в мире

придутся оставшиеся 8% (в первую очередь – на UMG-поликремний). Необходимо отметить, что пока гранулированный поликремний, полученный методом КС-МС, содержит больше загрязняющих примесей (в первую очередь, из-за развитой поверхности) и используется только для "солнечных" применений, причем загрузка комплектуется сочетанием материала Сименс-стержней и КС-гранул.

ОБЪЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ КОМПАНИИ-ПРОИЗВОДИТЕЛИ

По имеющимся оценкам, объем производства поликремния достиг 230–260 тыс. тонн, при этом почти 200 тыс. тонн составила продукция компаний, которые входят в первую десятку производителей: ОСИ

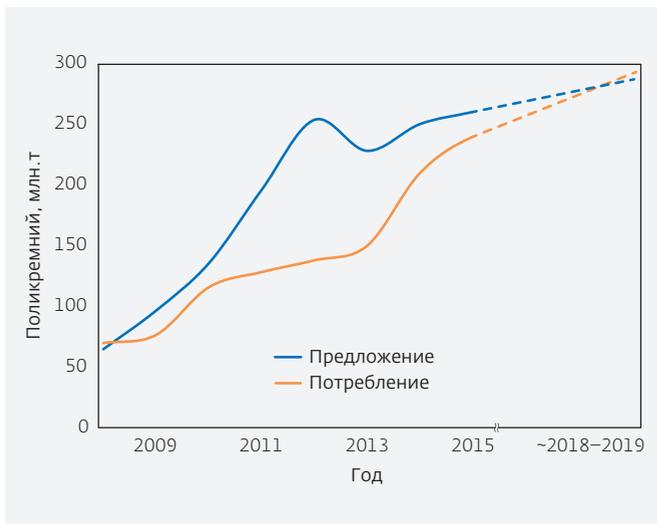


Рис.11. Качественная динамика баланса между спросом и предложением в период 2 – история и прогноз

(Южная Корея), Wacker (Германия), Hemlock (США), GCL (Китай), REC (Норвегия-США), TBEA (Китай), Tokuyama (Япония), SunEdison (бывшая MEMC Electronic Materials, США) и DAQO (Китай). Следует отметить, что в прошлом году внутри первой пятерки традиционных лидеров произошли изменения. В число крупнейших мировых компаний наряду с традиционным лидером Wacker ворвались сравнительно новые китайская GCL-Poly и южнокорейская OCI, а многолетний лидер Hemlock (США) занял четвертое место. Рыночные доли производителей представлены на рис.8.

Изменения произошли и в списке наиболее эффективных компаний (рис.9) – многолетние лидеры Wacker и Hemlock уступили первые места (правда, эти компании наряду с Tokuyama и Mitsubishi – основные производители более затратного поликремния "электронного" качества).

Объем производства в Китае составил около 70 тыс. тонн, или 30% всемирного рынка. Китай также ввозит поликремний, импортируя около 65 тыс. тонн для фотоэлектрической промышленности – в Поднебесной производится 79% всех кремниевых солнечных модулей в мире (рис.10).

В Соединенных Штатах Америки поликремний производят три компании: Hemlock Semiconductor Group, SunEdison (MEMC Electronics) and Renewable Energy Corp. Суммарный объем выпуска составляет около 60 тыс. тонн.

В Европе Германия как основная страна-производитель изготовила около 45 тыс. тонн, при этом основной вклад внесла компания Wacker Chemie.

Значительная доля в поставках поликремния приходится также на Южную Корею, которая ежегодно производит около 48 тыс. тонн. Среди южнокорейских компаний-производителей лидирующее положение занимает OCI. Кроме Китая и Южной Кореи ведущей страной-производителем в Азии является Япония. В Стране восходящего солнца поликремний производят четыре компании: Tokuyama, Mitsubishi, OSAKA Titanium Technologies и M. SETEK.

Что касается нашей страны, то после закрытия проекта НИТОЛа и Роснано в Усолье-Сибирском в России нет производства поликремния. Автор не располагает полной информацией о проекте, но главных причин неудачи, если не принимать во внимание возможные внутренние ошибки, видимо,

несколько. В июле 2008-го Nitel Solar и International Finance Corporation (IFC) объявили о предоставлении 50 млн. долл. инвестиций для Nitel Solar. Участие корпорации "Роснано" в проекте по созданию первого в РФ комплекса по производству 5 тыс. тонн поликристаллического кремния было одобрено наблюдательным советом госкорпорации в феврале 2009 года. ГК "Роснано" вошла в проект, внося 7,5 млрд. руб., выдав заем Nitel Solar на 4,5 млрд. руб. (первый транш получен в апреле 2009 года) и предоставив на 3 млрд. руб. гарантии "Альфа-банку". В 2008–2009 годах мировая индустрия поликремния уже набрала такие темпы (напомним, что через три года общее перепроизводство увеличилось вдвое), что проект устарел еще до реализации. Приходится признать, что недооценили темпы технического развития Сименс-метода, скорость ввода в строй в мире новых мощных производств, а принятие решений, финансирование и реализация шли слишком медленно. Сегодня в условиях низких мировых цен на сырье (в 2015 году 15 долл./кг) перспективы организации нового производства в России кажутся экономически неоправданными.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИКРЕМНИЯ

В среднесрочной перспективе цена, вероятно, будет определяться крупными игроками, а "спотовая" (разовая) цена в зависимости от баланса производства и спроса будет находиться в пределах 15–20 долл./кг. Большинство аналитиков считают, что к 2018–2019 годам с высокой вероятностью перепроизводство поликремния будет "исчерпано" потребностью развивающейся солнечной энергетики (рис.11). Любопытно, при каких ценах на поликремний отрасль вновь станет привлекательной для инвестиций (без этого невозможна реализация капиталоемких проектов по строительству новых заводов), и начнется очередной – третий – этап развития рынка поликремния? Из формулы, связывающей внутреннюю норму доходности проекта (ВНД или IRR) и цену продукта, можно определить, что для ВНД 8–15% (типичные значения для хорошего инвестпроекта) цена на поликремний должна быть 35–40 долл./кг, что приблизительно вдвое выше сегодняшней заниженной цены.

* * *

Если макроэкономического замедления мировой экономики удастся избежать, высока вероятность того, что перепроизводство поликремния будет преодолено растущим спросом, и потребность в новых мощностях по производству поликремния восстановится

в ближайшие три-четыре года. На этом закончится второй цикл развития рынка поликремния. Для привлечения инвестиций и запуска третьего этапа цена на поликремний должна увеличиться по сравнению с текущей приблизительно вдвое до 30 долл./кг. Поскольку в Российской Федерации нет производства поликремния, с учетом прогнозов ITRPV-2015 представляется необходимым рассмотреть возможность использования задела отечественных разработчиков (ОАО "ВНИИЭСХ", ИТ СО РАН, НПП "КВАНТ" и др.) как основы для экономичного FBR-способа получения поликремния из моносилана в качестве альтернативы Сименс-процессу. Однако это достаточно долгий путь и не видно крупных и дальновидных организаций, которые могут выбрать такую стезю. Вызывает озабоченность тот факт, что, несмотря на целый ряд проектов, реализованных с участием РАН, Минобрнауки, Роснано, Фонда "Сколково" и других отечественных институтов в сфере развития солнечной энергетики, Российская Федерация серьезно отстает в области наземной фотоэнергетики, особенно в производстве поликремния и дальнейшей технологической цепочки.

Если наличие собственного производства поликремния гарантированного качества в России будет признано важным по иным соображениям, то экономически целесообразным является организация небольшого интегрированного производства внутри крупного кластера кремнийорганических производств, где можно организовать утилизацию избыточного SiCl_4 для производства кремнийорганики без применения дорогостоящих циклов Сименс-DC или Сименс-HC (как, собственно, и зарождались первые эффективные производства поликремния, например Wacker в немецком Бургхаузене в 60–80-х годах прошлого века). Ежегодная потребность России в поликремнии до 2020 года оценивается в 700–800 тонн с учетом развития электроники и солнечной энергетики. ●