

УДК 621.315.592

ПЕРСПЕКТИВЫ РЫНКА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

© 2014 г. А. В. Некрасов, А. В. Наумов

ОАО «НПП КВАНТ»

3-я Мытищинская ул., д. 16, Москва, 129626, Россия

Исследован баланс «спрос—предложение» на полупроводниковый поликристаллический кремний (поликремний) и дана попытка прогноза развития рынка до 2018 г. Приведена оценка состояния солнечной энергетики и мирового производства поликремния на 2014 г. В настоящее время признано, что мощность предприятий по производству поликремния в мире превышает спрос на него, но единой точки зрения на то, каким будет потребление в ближайшие годы и когда перепроизводство будет «исчерпано», нет. Сегодня доминируют крупные производители, которые производят поликремний с низкой себестоимостью. Первые 10 производителей — Hemlock, REC, OCI, Wacker, GCL, TBEA XinJiang Silicon, LDK, Daqo New Energy, Tokuyama и SunEdison (бывш. MEMC) — имеют суммарную мощность производства ~250 тыс. т поликремния. Есть также область неопределенности, в которой находятся порядка 80—90 производителей с разной степенью готовности производства, различной достигнутой эффективностью и производительностью. Дано описание современного рынка поликремния, включая технологические оценки, возможности поставки, производственные затраты, тенденции использования, а также оценку и перспективу до 2018 г. Рассмотрены три возможных сценария, выбранных таким образом, чтобы очертить область наиболее вероятных вариантов развития. Установлено, что при отсутствии замедления экономики высока вероятность решения проблемы перепроизводства поликремния за счет растущего потребления, и спрос на новые мощности по производству поликремния вернется в ближайшие 3—4 года.

Ключевые слова: солнечная энергетика, поликремний, перепроизводство, Сименс-метод, спрос, предложение, баланс, цены и ценообразование.

Большая часть области применения технического (металлургического) кремния в мире (почти 80 %) — это лигатура при производстве специальных сталей (электротехнических, жаростойких) и различных сплавов цветных металлов. Кремний также находит применение в виде карбида кремния в производстве абразивных и твердосплавных изделий. В последние десятилетия в химической промышленности получили развитие технологии производства силиконовых кремний-органических материалов, применяемых в производстве пластмасс, лакокрасочной продукции, смазок и т. п. Оборудование для современных электронных и оптоэлектронных технологий, а также для солнечных электростанций более чем на 90 % базируется на полупроводниковом кремнии. Солнечная энергетика, невзирая на проблемы мировой экономики, продолжает бурно развиваться. В 2014 г., по предварительным оценкам, во всем мире было подключено к сети 40—50 ГВт генерирующих мощностей на базе солнечных батарей. Ниже представлена работа, которая является продолжением работ [1—4] и посвящена попытке прогноза развития рынка поликристаллического кремния (поликремния) в период 2015—2018 гг. Также рассмотрены тенденции развития производства поликремния в мире, согласно

International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)—2012 [5].

Металлургический кремний

В последние годы объем мирового производства технического (металлургического) кремния составил около 2260 тыс. т/год. Первое место среди производителей металлургического кремния занял Китай, доля которого на рынке — 55 %, за ним следуют Америка — 20 % и Западная Европа — 17 %. Основным потребителем металлургического кремния является производство алюминиевых сплавов (47 %), на втором месте находится химическая промышленность (41 %), в основном производство силиконов (рис. 1). На электронную промышленность и солнечную энергетику приходится ~12—15 % мирового производства металлургического кремния, используемого в качестве сырья (~340 тыс. т/год).

Промышленные технологии получения поликремния

Металлургический кремний (Si_{MC}) имеет значительный объем примесей: как правило, в пределах 1—2 %. В нем, в частности, присутствуют металлы (железо, титан, медь, хром), легкие элементы (углерод, кислород и азот), а также легирующие примеси (фосфор и бор). Для получения поликрем-

Наумов Аркадий Валерьевич — старший научный сотрудник, e-mail: naumov_arkadii@mail.ru; **Некрасов Анатолий Валентинович** — генеральный директор, кандидат экономических наук, e-mail: info@npp-kvant.ru

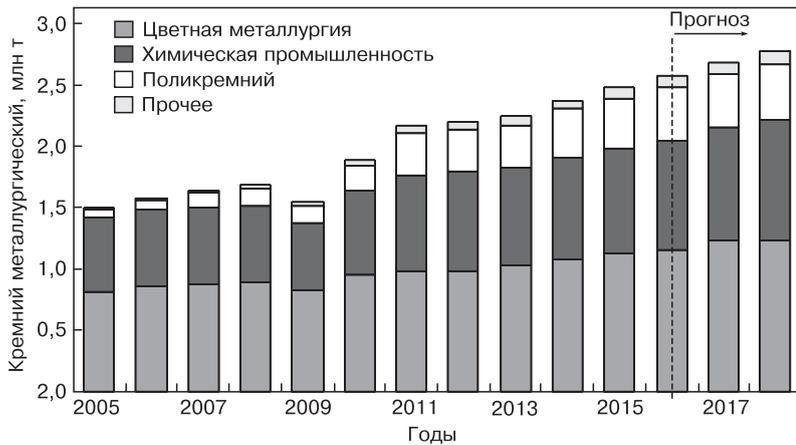
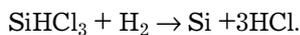


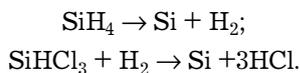
Рис. 1. Динамика и прогноз производства металлургического кремния по секторам применения
Fig. 1. Dynamics and forecast of production of metallurgical silicon for applications sectors

ния, качество которого соответствует требованиям, предъявляемым к применению в электронной и фотоэлектрической промышленности (электронного или «солнечного» качества), необходим процесс его глубокой очистки. Схемы реакторов для промышленного получения поликремния представлены на рис. 2:

– Сименс–реактор водородного восстановления SiHCl_3 (ТХС) либо пиролиза SiH_4 (МС). Далее обозначается как Сименс–ТХС или Сименс–МС соответственно. Поликремний осаждается на затравочные прутки:



– Реактор разложения МС, либо водородного восстановления ТХС в «кипящем» слое (КС). Далее обозначается как КС–МС или КС–ТХС соответственно. Поликремний получается в виде гранул:



В свою очередь, метод Сименс–ТХС подразделяется на 2 разновидности: Сименс–DC и Сименс–HC. Выходящая из реактора парогазовая смесь содержит

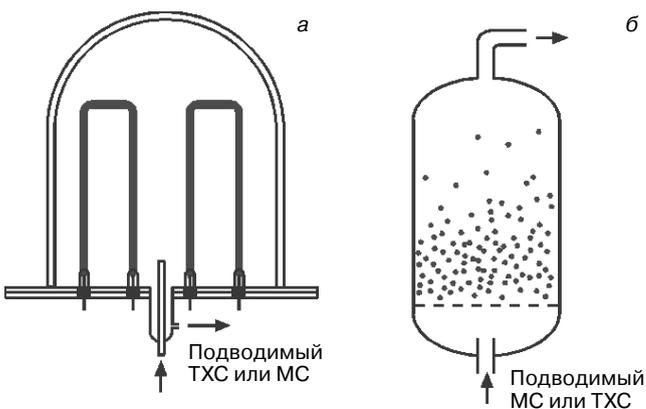
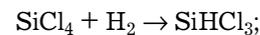


Рис. 2. Промышленные типы реакторов для получения поликремния:
а – Сименс–реактор; б – реактор разложения МС
Fig. 2. Industrial types of reactors for polysilicon:
(a) Siemens reactor; (b) decomposition reactor MS

в больших количествах непрореагировавший H_2 , ТХС, тетрахлорид (SiCl_4), 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 ~10 % подаваемого в реактор H_2 . Отводимые из реактора продукты процесса водородного восстановления необходимо регенерировать в процессах конденсации и разделения смеси ($\text{SiHCl}_3 + \text{SiCl}_4$). Реализуются два подхода к работе со значительными количествами SiCl_4 , попутно образующимся после водородного восстановления ТХС (на 1 кг поликремния образуется ~12,5 кг SiCl_4) [6, 7]:

– конверсия избыточного SiCl_4 в ТХС в специальных реакторах–конвертерах (так называемый метод Сименс–DC):



– подача оборотного SiCl_4 в реактор исходного синтеза ТХС (так называемый метод Сименс–HC):



Реакция была впервые исследована в 1905 г. немецкими химиками О. Ruff и С. Albert [8], но промышленное освоение этого процесса произошло в последнее десятилетие, что стало весьма значимым фактором в развитии технологии, так как за счет снижения концентрации HCl в продуктах реакции оказалась возможным снижение энергозатрат и повышение экологической безопасности.

Существует разновидность метода Сименс–ТХС, которую использует компания Hemlock (США). В реактор осаждения подается дихлорсилан (SiH_2Cl_2), что позволяет снизить температуру осаждения и уровень вносимых загрязнений [7].

Сравнительный анализ технологий и перспективы их развития

На рис. 3 (см. вторую стр. обложки) представлена доля различных технологий в общем объеме производства поликремния на рынке по состоянию на 2012–2013 гг. Из рис. 3 (см. вторую стр. обложки) видно, что доминирующим является метод Сименс–ТХС (в обеих разновидностях), за ним со значительным отрывом следует метод КС–МС [3, 6–10].

На рис. 4 приведены усредненные данные по состоянию за 2011 г. первичных затрат на производство 1 кг поликремния различными технологиями (сырье, электрическая энергия, труд, но без учета накладных расходов, амортизации, % за кредиты и пр.) для условного завода мощностью 6500 т/год. Наиболее эффективной является технология КС–МС, хотя, учитывая ее малую распространенность, многие эксперты выражают сомнения в достоверности подобных оценок. В настоящее время, по–видимому,

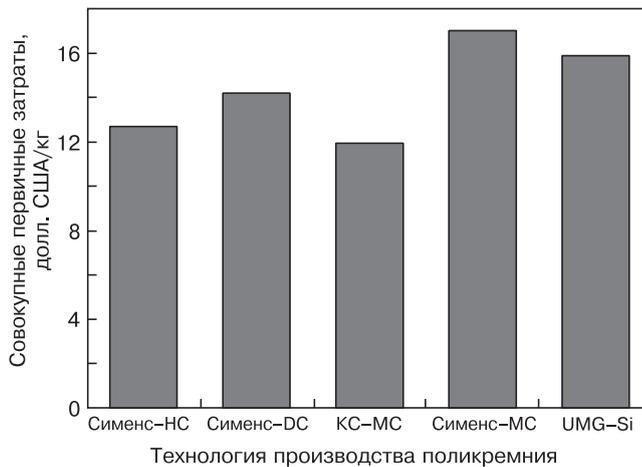


Рис. 4. Первичные затраты на производство 1 кг поликремния по различным технологиям для условного завода мощностью 6500 т/год по данным 2011 г.

Fig. 4. Primary production cost of 1 kg of polysilicon with different technologies for conditional 6500 ton/year capacity plant according to the 2011

общий уровень всех затрат снизился еще больше [6, 8, 11—13].

Следует подчеркнуть, что полная себестоимость производства 1 кг поликремния с учетом накладных расходов, амортизации, выплаты процентов за кредиты (при их использовании) может отличаться от картины, приведенной на рис. 4, и будет зависеть от конкретной ситуации производителя. Так, например, учет выплат процентов за кредит и амортизацию приводит к тому, что себестоимость поликремния по технологии Сименс-НС станет выше, чем по технологии Сименс-DC для производителя, взявшего кредит для приобретения более капиталоемкого оборудования Сименс-НС. Поэтому те или иные публикуемые цифры себестоимости следует анализировать очень аккуратно.

Учитывая заявленную производителями высокую эффективность технологии КС-МС, эксперты International Technology Roadmap for Photovoltaic

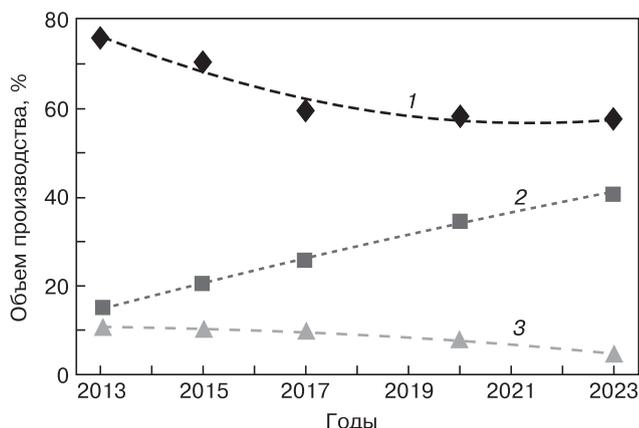


Рис. 5. Динамики изменения объемов производства поликремния до 2023 г. различными методами [5]:

1 — Сименс-ТХС-процесс; 2 — КС-МС-процесс; 3 — прочие методы

Fig. 5. Dynamics of production of polysilicon to 2023 in various ways [5]:

(1) Siemens TCS process; (2) CS-MS process; (3) Other Methods

(ITRPV)—2012 [5, 14] ожидают, что доля КС-МС-процесса к 2023 г. вырастет до 40 % в общем объеме производства, а доля Сименс-ТХС-процесса (в обеих разновидностях) снизится до 55 % (рис. 5). Необходимо отметить, что пока гранулированный поликремний, полученный методом КС-МС, содержит больше загрязняющих примесей (в первую очередь из-за развитой поверхности), и его используют только для «солнечных» применений, причем загрузка комплектуется сочетанием материала Сименс-стержней и КС-гранул.

Объемы производства и основные компании-производители

В 2013 г. производство поликремния достигло объема 228 тыс. т (из них 199,5 тыс. т — поликремний для «солнечной» энергетики, 28,5 тыс. т — для электроники). При этом почти 200 тыс. т составила продукция первой десятки компаний-производителей (рис. 6, см. вторую стр. обложки): ОСИ (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, начиная с 2012 г., внутри первой пятерки многолетних лидеров произошли изменения: крупнейшей компанией мира, наряду с традиционным лидером Wacker, стала сравнительно новая китайская компания GCL-Poly, следом идет также относительно новая корейская компания ОСИ, а многолетний лидер Hemlock (США) занял четвертое место. Также произошли изменения в ряду наиболее эффективных производителей (см. рис. 10, вторая стр. обложки): многолетние лидеры эффективности Wacker и Hemlock покинули первые места. Правда, следует учесть, что эти компании, а также японские Tokuyama и Mitsubishi — основные производители более затратного поликремния «электронного» качества.

Производство поликремния в 2014 г. по различным предварительным оценкам составило от 230 до 265 тыс. т.

Обзор ведущих стран-производителей

Объем производства в Китае в течение 2013 г. достиг ~68,4 тыс. т, что составляет 30 % объема производства всемирного рынка. Китай также ввозит поликремний, импортируя порядка 65 тыс. т, в основном для фотоэлектрической промышленности, так как Китай производит 79 % всех кремниевых солнечных модулей в мире (рис. 7, см. вторую стр. обложки). Вместе с тем в 2012—2013 гг. в Китае многие производители поликремния сократили объемы производства, остановили производство или обанкротились. Это объясняется прежде всего большим количеством избыточных проектов, которые начали реализовываться в 2008—2009 гг., а также

некоторым сохраняющимся разрывом эффективности производства на отдельных производствах поликремния в Китае по сравнению с уровнем технологий «старых производителей» США, Германии и других стран. Этот разрыв сокращается благодаря развитию в стране технологий рекуперации отходящих из реактора газов, построению производства с низким уровнем энергопотребления.

В США поликремний производят три компании: Hemlock Semiconductor Group, SunEdison (MEMC Electronics) and Renewable Energy Corp. Суммарный объем производства поликремния этими компаниями в 2013 г. составил 59,2 тыс. т.

В странах Европы Германия, основная страна–производитель, изготовила 43,32 тыс. т, при этом основной вклад в производство внесла компания Wacker Chemie.

Значительная доля в поставках поликремния приходится также на Южную Корею, которая ежегодно производит ~47,8 тыс. т. Среди корейских компаний–производителей лидирующее положение занимает компания OCI (бывшая DC Chemical).

Наконец, кроме Китая и Южной Кореи, ведущей страной–производителем в Азии является Япония. Поликремний в Японии производят четыре компании: Tokuyama, Mitsubishi, OSAKA Titanium Technologies и M. SETEK [8–10, 12, 15, 16].

Прогноз на среднесрочную перспективу (2015–2018 гг.)

В настоящее время мощности предприятий по производству поликремния превышают спрос на него, но что это за мощности и, главное, какая динамика изменения этих мощностей — единой точки зрения на эти вопросы нет. Большинство аналитиков считают, что существующие мощности используются на ~45–50%. Однако, несмотря на существующий избыток мощностей, в печати появляются сообщения о новых или расширении действующих производств поликремния (таблица).

Чтобы понять, что движет инвесторами, необходимо оценить баланс спроса и предложения на поликремний в мире на ближайшие 5 лет.

В работах [3, 7, 11, 12, 15, 16] была оценена мощность всех действующих производителей по состоянию на 2013–2014 гг., которая составила 280 тыс. т, а мощность всех заявленных с 2008 г. проектов (в том числе несостоявшихся, не доведенных до конца, обанкротившихся и пр.) — 400–500 тыс. т. В качестве примера различия взглядов можно привести прогноз 2011 г. пяти аналитических агентств на изменение общемировых мощностей производ-

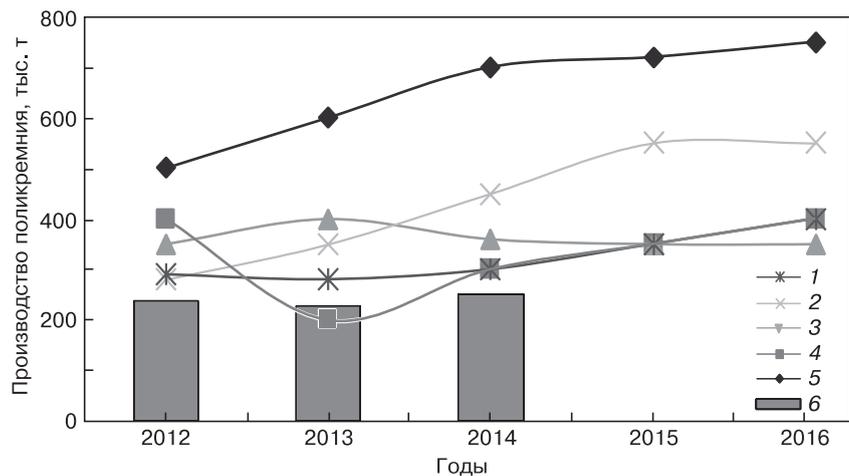


Рис. 8. Прогноз 2011 г. пяти различных агентств по динамике изменения мощностей производства поликремния в 2012–2016 гг. (1–5) и фактическое изменение объемов производства (6):

1 — SiTech GmbH; 2 — Bernreuter research; 3 — IHS; 4 — Photon Consulting; 5 — GTM Research; 6 — фактический объем производства

Fig. 8. 2011 forecast of five different agencies for dynamics of polysilicon production capacity in 2012–2016 (1–5) and actual change in production (6): (1) SiTech GmbH; (2) Bernreuter research; (3) IHS; (4) Photon Consulting; (5) GTM Research; (6) Actual

ства поликремния до 2016 г. и фактическую динамику (рис. 8).

Производственные мощности, согласно данным компании GTM Research (США), в 2012 г. должны были составить ~500 тыс. т и расти в дальнейшем. Этот прогноз явно превышает оценки мощности, проведенные консультационной фирмой Photon Consulting (Германия) — 400 тыс. т, а также исследовательскими компаниями IHS (США), Bernreuther Research и SiTech GmbH (Германия) ~ 300–350 тыс. т. По-видимому, результаты исследования GTM не критично учитывают ранее заявленные мощности как фактически достигнутые (в то время как период 2011–2013 гг. привел к тому, что многие компании прекращают функционирование, а остальные не могут приступить к выполнению запланированных мероприятий). Цифры Bernreuter Research, Sitech GmbH и компании IHS представляются более реалистичными, но отличаются между собой по прогнозам дальнейшего поведения рынка до 2016 г. (см. рис. 8).

Для выполнения самостоятельного прогноза необходима информация по двум ключевым параметрам: мировая общая достигнутая в отрасли мощность производства поликремния и уровень спроса на него.

Для оценки уровня спроса воспользуемся прогнозом EPIA [7], составленным для двух сценариев:

- «политически стимулированного» сценария, или сценария ускоренного развития солнечной энергетики, продиктованного политическими соображениями («ускоренный» сценарий);
- «умеренного» сценария, для которого темпы государственной поддержки отрасли, характерные для периода 2000–2010 гг., сокращаются (рис. 9).

В соответствии с расчетами, выполненными в работах [1, 3, 11], прогнозируемая доля технологий на

Новые проекты производства поликремния (неполный перечень)
[New polysilicon production projects (non-exhaustive list)]

Название проекта/компании	Страна	Проектная мощность, тыс. т	Год завершения проекта	Технология	Примечание
Quatar Solar Technologies	Катар	45	2013 (I этап)	Сименс	Перенесен
Cosmos Petroleum&Mining	Малайзия	25	2016	Сименс-НС	—
IDEA Polysilicon	Саудовская Аравия	20	2014 (I этап)	Сименс	—
Uz-Kor Silicon	Узбекистан	17	2016	—	—
Silicor Materials	США	16	—	UMG Si — очистка расплава алюминием	—
Polysilicon Technology Company	Саудовская Аравия	12	2017	—	—
Hanwha Chemical Corp.	Ю. Корея	10	2013	Сименс	Перенесен
Samsung Fine Chemicals&MEMC	Ю. Корея	10	2013	Сименс	Перенесен
Lanco Solar Holding	Индия	1,5	2016	Сименс	—
Lancaster Group	Казахстан	—	—	—	—

UMG — высокочистый металлургический кремний.

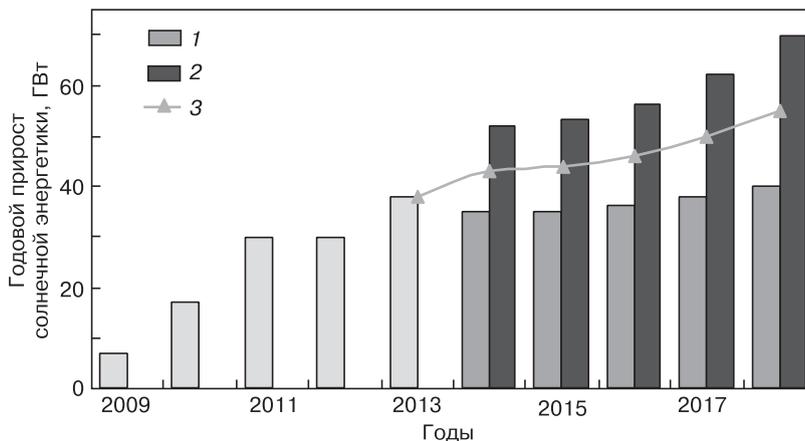


Рис. 9. Прогноз развития солнечной энергетики по «политически стимулированному» и «умеренному» сценариям EPIA:

1 — инерционный сценарий; 2 — оптимистический; 3 — усредненный
Fig. 9. Forecast of solar energy development for a «politically stimulated» and «moderate» scenarios of EPIA:
(1) inertial scenario; (2) optimistic; (3) average

основе пластин кремния на рынке составит в 2018 г. 92 %. (Динамика снижения удельных норм расхода поликремния на получение 1 Вт солнечного модуля взята из работы [16].)

Ситуация по производителям поликремния по состоянию на конец 2014 г. сложилась следующая [17, 18]:

— **крупные состоявшиеся производители**, которые производят в настоящее время с высокой эффективностью весь потребляемый в мире поликремний. Первые по объему производства 5 производителей (Hemlock, REC, OCI, Wacker и GCL) имеют суммарные мощности ~200 тыс. т поликремния и себестоимость производства 15—20 долл. США/кг. У первых 10 производителей суммарная мощность производства приближается к 280 тыс. т поликремния, что достаточно для производства 50 ГВт солнечных моду-

лей. Предельная себестоимость в этом ряду составляет ~25 долл. США/кг. А 90 % всех действующих производителей укладываются в себестоимость 30 долл. США/кг, и их мощностей достаточно для производства >56 ГВт;

— **«серая» область неопределенности**, в которой находятся ~80—90 производителей, в различной степени готовности производства, различной достигнутой эффективности и производительности. Получить достоверную информацию об их намерениях не представляется возможным, так как часть из них находится на консервации или в стадии банкротства, а оставшиеся зачастую сами не представляют своих реальных возможностей и выжидают.

На рис. 10 (см. вторую стр. обложки) и 11 эта гипотетическая мощность обозначена как область «все призраки».

Рассмотрим три сценария развития, выбранных таким образом, чтобы очертить область наиболее вероятных вариантов развития. При описании различных сценариев изменения суммарной мощности производства были использованы следующие термины.

1. Сценарий мощности «Все действующие игроки» предполагает присутствие всех существующих активных производителей при условии, что достигнутая ими по состоянию на 2014 г. мощность будет оставаться неизменной в течение последующих лет. (см. рис. 11, кривая 1).

2. Сценарий «Большая десятка» — Hemlock, REC, OCI, Wacker, GCL, TBEA, LDK, Daqo-New Energy, Tokuyama и SunEdison (MEMC). Этот сценарий

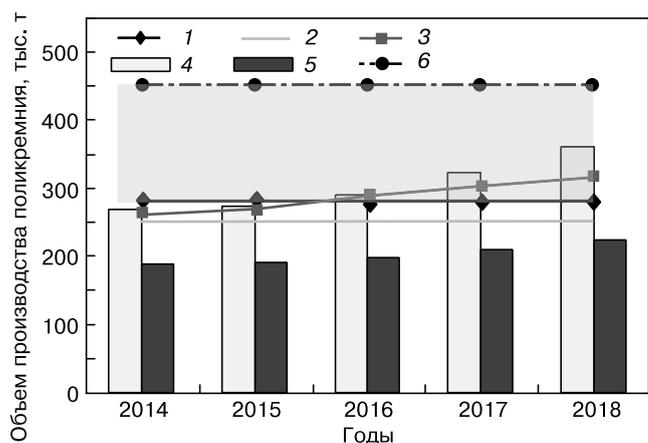


Рис. 11. Общий прогноз мощности производства по 3 сценариям (1–3) и прогноз спроса на период 2015–2018 гг. (4–6):
 1 — сценарий 1 — «Все игроки»; 2 — сценарий 2 — «Топ-10»; 3 — сценарий 3 — смешанный; 4 — спрос оптимистический; 5 — спрос умеренный; 6 — «все призраки» металлургического кремния по секторам применения
 Fig. 11. Total production capacity forecast (3 scenarios (1–3)) and demand forecast for the 2015–2018 period (4–6):
 (1) Scenario 1 — «All players»; (2) Scenario 2 — «Top-10»; (3) Scenario 3 — Mixed; (4) optimistic demand; (5) moderate demand; (6) all phantoms

не учитывает возможность появления дополнительных количеств поликремния в рассматриваемый период от «новых» производителей (см. рис. 11, кривая 2).

3. Сценарий «Большая десятка Плюс», предлагаемый авторами, рассматривает развитие в соответствии со сценарием «Большая десятка» с поступлением дополнительных 40 тыс. т продукции, произведенной другими «новыми» игроками (см. рис. 11, кривая 3).

Перечисленные 3 сценария очерчивают область «наиболее вероятных вариантов развития событий». На рис. 11 представлены общий прогноз мощности производства поликремния (кривые 1–3), область неопределенности (6) и общий прогноз спроса (столбчатые диаграммы 4, 5) по ЕРІА.

При рассмотрении сценария «Все игроки» «оптимистичный» спрос уже в 2015 г. превысит предложение, но «пессимистичный» спрос будет удовлетворяться весь рассматриваемый период. С другой стороны, сценарий «Топ-10» удовлетворит спрос («умеренный») до 2018 г., но перестанет удовлетворять спрос «оптимистичный» уже в текущем году. По-видимому, вероятность развития ситуации в соответствии с этими сценариями достаточно невысока.

При реалистическом сценарии уровень спроса на поликремний, вероятно, будет располагаться между средним значением двух сценариев спроса на основании данных ЕРІА (столбчатой диаграммы), а уровень предложения, видимо, будет близок к «смешанному» — «Топ-10 Плюс». Напомним, что это означает появление дополнительных 40 тыс. т поликремния на рынке к 2018 г. от «новых» мощностей. В этом случае практическое соответствие спроса предложению на поликремний произойдет уже в 2016 или 2017 г. Подобными соображениями, видимо, объясняется по-

явление новых проектов производства поликремния: производители и инвесторы видят, что существующее перепроизводство достаточно скоро с высокой вероятностью будет «исчерпано».

При сценарии «Топ-10 Плюс» до 2016–2017 гг. сегодняшняя низкая неравновесная цена на поликремний будет оставаться практически неизменной или слабо расти до более равновесного уровня. В 2016 г. уровень спроса приблизится к уровню мощности, а цена будет демонстрировать тенденцию к росту. Заметим, что при сценарии «Топ-10 Плюс» цена на поликремний после 2015 г. может демонстрировать тенденцию к повышению, что обусловлено предусмотренным данным сценарием большим равновесием между спросом и предложением.

В среднесрочной перспективе формирование цены, вероятно, будет определяться крупными игроками, а «спотовая» (разовая) цена, в зависимости от степени сближения между уровнем производства и спросом, будет располагаться в пределах 20–25 долл. США/кг.

Заключение

При отсутствии макроэкономического замедления мировой экономики высока вероятность того, что перепроизводство поликремния будет ликвидировано растущим потреблением и потребность в новых мощностях по производству поликремния вернется в ближайшие 3–4 года. Следует отметить, что в Российской Федерации (после закрытия проекта НИТОЛа и Роснано в Усолье-Сибирском) отсутствует производство поликремния. В свете низких мировых цен на поликремний (в 2014 г. средние цены составляли ~25 долл. США/кг, в 2015 г. — ~15 долл. США/кг) перспективы организации его в России в рамках существующей парадигмы развития Сименс-метода кажутся экономически неоправданными. Учитывая прогнозы ITRPV-2012, возможно, следует вспомнить задел, созданный в 80–90-х годах прошлого века отечественными разработчиками (ОАО ВНИИЭСХ, ИТ СО РАН, НПП КВАНТ и др.) как основу для отечественного способа получения поликремния из моносилана (КС-МС) в качестве альтернативы Сименс-процессу. Следует отметить, что точность предложенных прогнозов, по-видимому, невелика и составляет ~20%. Однако общие закономерности и перспективы отмечены достаточно точно, что имеет непосредственное значение для планирования развития производства поликремния в России.

Библиографический список

1. Наумов, А. В. О сырьевых ограничениях развития солнечной энергетики в 2012–2020 гг. / А. В. Наумов, С. И. Плеханов // IX Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («Кремний-2012»). — СПб, 2012. — С. 120–121.
2. Наумов, А. В. Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006–2010 гг. / А. В. Наумов // Изв. вузов. Материалы электр. техники. — 2006. — № 2. — С. 29–35.

3. Наумов, А. В. Еще раз о развитии солнечной энергетики и рынке кремниевого сырья в 2007—2010 гг. / А. В. Наумов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2007. – № 1. – С. 15—20.

4. Наумов, А. В. О перепроизводстве поликристаллического кремния (или когда окончится «поликремниевый Апокалипсис»?) / А. В. Наумов, С. И. Плеханов // Цветная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 70—76.

5. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) – Results, 2012 // www.semi.org

6. Пархоменко, Ю. Н. Поликристаллический кремний — технологические проблемы и перспективы / Ю. Н. Пархоменко // Материалы V Междунар. конф. и IV Школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам материаловедения, технологии и диагностики кремния и приборов на его основе («Кремний–2008»). – Черноголовка, 2008. – С. 71.

7. Критская, Т. В. Некоторые аспекты современной технологии полупроводникового кремния / Т. В. Критская, Л. Я. Шварцман // X Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («Кремний–2014»). – Иркутск, 2013. – С. 43.

8. Андрианов, О. Кремнийорганические соединения / О. Андрианов // <http://www.ximicat.com/ebook.php?file=andrianov1955.djvu&page=16>

9. Global polysilicon market on course for 15% increase // http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/global-polysilicon-market-on-course-for-15-increase_100014966/

10. Ramp-up Delays to Stabilize Polysilicon Price // <http://www.bernreuter.com/en/shop/polysilicon-market-reports/2014-edition/report-details.html>

11. Falling PV prices sees a reduction in global renewable investment // <http://www.solar-uk.net/article/79176-Falling-PV-prices-sees-a-reduction-in-global-renewable-investment>

12. Liu, T. When Will Global PV Supply and Demand / T. Liu // SEMI China // <http://www.pvgroup.org/node/2766>

13. «EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014–2018» // <http://www.epia.org/>

14. «Can PV technology change before 2015?» // http://www.pv-tech.org/guest_blog/can_pv_technology_change_before_2015

15. Презентация «REC Silicon ASA», 2013 // <http://www.recsilicon.com>

16. Polysilicon demand outpacing silicon per-watt reduction strategies // http://www.pv-tech.org/news/polysilicon_demand_outpacing_silicon_per_watt_reduction_strategies

17. Wacker benefiting from polysilicon demand boom // http://www.pv-tech.org/news/wacker_benefiting_from_polysilicon_demand_boom

18. Bernreuter, J. Who is Who in Solar polysilicon / J. Bernreuter // www.bernreuter.com/reports/23556

Статья поступила в редакцию 28 августа 2014 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronic Technics*. 2014, vol. 17, no. 4, pp. 233–239.

Prospects of the Polysilicon Market

Arkady Valerievich Naumov — Senior Researcher (naumov_arkadii@mail.ru); **Anatoly Valentinovich Nekrasov** — General Director, Cand. Sci. (Econ.) (info@npp-kvant.ru)

JSC NPP KVANT,

16 3-ya Mytishchinskaya, Moscow 129626, Russia

Abstract. In this article the balance of polysilicon «supply–demand» has been investigated and an attempt of its forecast through 2018 is made. An assessment of the condition of the solar power industry and world production of polysilicon for 2014 is given. Now it is recognized that the capacities of polysilicon producers worldwide exceed the demand but what will be consumption the next years and when overproduction «will be settled» — there is no concerned point of view. Large vendors who make polysilicon with low manufacturing cost are dominating. The first top 10 vendors — Hemlock, REC, OCI, Wacker, GCL, TBEA XinJiang Silicon, LDK, Daqo New Energy, Tokuyama and SunEdison (ex–MEMC) — have a total production capacity of about 250 KMT. There is also an area of uncertainty in which there are about 80—90 producers with various degree of readiness of production, various reached efficiency and productivity. The description of today's global polysilicon market is given, including technology assessments, supply capabilities, manufacturing costs, and silicon utilization trends, as well as pricing and supply–demand outlook through 2018. We considered 3 potential scenarios so that to outline area of the most probable development options. It is established that, in the absence of macroeconomic delay of world economy, the probability is high that overproduction of polysilicon will be offset by the growing consumption and demand for new polysilicon production capacities will return in the next 3—4 years.

Key words: photovoltaic, polysilicon, oversupply, Siemens method, balance, supply, demand, cost and pricing.

References

1. Naumov A. V., Plekhanov S. I. O syr'evykh ogranicheniyakh razvitiya solnechnoi energetiki v 2012—2020 gg. [About raw restrictions of development of solar power in 2012—2020]. IX *Mezhdunarodnaya Konferentsiya po aktual'nykh problemam fiziki, materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya, nanorazmernykh struktur i priborov na ego osnove* («Silicon–2012»). St–Peterburg, 2012. P. 120—121. (In Russ.)

2. Naumov A. V. The production of PV–cells and the market of silicon raw materials in 2006—2010. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2006, no. 2, pp. 29—35. (In Russ.)

3. Naumov A. V. Once again about development of solar power and the market of polysilicon in 2007—2010. *Izvestiya vuzov. Mate-*

rialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2007, no. 1, pp. 15—20 (In Russ.)

4. Naumov A. V., Plekhanov S. I. Once again about overproduction of polysilicon (or when will «the polysilicon Apocalypse» terminates?). *Tsvetnaya metallurgiya*. 2013, no. 6, pp. 70—76. (In Russ.)

5. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) – Results, 2012 // www.semi.org

6. Parkhomenko Y. V. Polikristallicheskiy kremnii — tekhnologicheskie problemy i perspektivy [Polycrystalline silicon — technological problems and prospects]. *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii i IV shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov po aktual'nykh problemam materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya i priborov na ego osnove* («Kremnii–2008»). Chernogolovka, 2008. P. 71. (In Russ.)

7. Kritskaya T. V., Shvartzman L. Y. Nekotorye aspekty sovremennoi tekhnologii poluprovodnikovogo kremniya [Some aspects of semiconductor silicon technology]. X *Mezhdunarodnaya Konferentsiya po aktual'nykh problemam fiziki, materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya, nanorazmernykh struktur i priborov na ego osnove* («Silicon–2014»). Irkutsk, 2014. P. 43. (In Russ.)

8. Andrianov O. Kremniorganicheskie soedineniya. <http://www.ximicat.com/ebook.php?file=andrianov1955.djvu&page=16>

9. Global polysilicon market on course for 15% increase // http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/global-polysilicon-market-on-course-for-15-increase_100014966/

10. Ramp-up Delays to Stabilize Polysilicon Price // www.bernreuter.com/en/shop/polysilicon-market-reports/2014-edition/report-details.html

11. «Global PV Module Pricing Stabilizes As Some Suppliers Return to Profit» // <http://www.solar-international.net/article/77843-Global-PV-Module-Pricing-Stabilizes-As-Some-Suppliers-Return-to-Profit.php>

12. Toby Liu. When Will Global PV Supply and Demand // SEMI China // <http://www.pvgroup.org/node/2766>

13. «EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014–2018» // <http://www.epia.org/>

14. «Can PV technology change before 2015?» // http://www.pv-tech.org/guest_blog/can_pv_technology_change_before_2015

15. REC Silicon ASA. Presentation, 2013. <http://www.recsilicon.com>

16. Polysilicon demand outpacing silicon per-watt reduction strategies // http://www.pv-tech.org/news/polysilicon_demand_outpacing_silicon_per_watt_reduction_strategies

17. Wacker benefiting from polysilicon demand boom // http://www.pv-tech.org/news/wacker_benefiting_from_polysilicon_demand_boom

18. Bernreuter J. Who is Who in Solar polysilicon. <http://www.bernreuter.com/reports/23556>

Received August 28, 2014