

УДК 621.315.592

ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ЦИКЛЫ РЫНКА ПОЛИКРЕМНИЯ

Приведен исторический обзор рынка поликремния, начиная с 80–х годов XX в., и предложена периодизация развития рынка. Выделены два этапа развития солнечной энергетики и мирового производства поликремния. Дано описание исторической динамики рынка поликремния, включая технологические оценки, возможности поставки, производственные затраты и тенденции использования. Отмечено, что сложилась новая олигопольная структура рынка поликремния, и новые производители, особенно из Азии, вошли в ограниченное число участников. Это привело к более чем 10–кратному увеличению мировых производственных мощностей, или в абсолютных цифрах к 320 тыс. т/год в период 2005–2015 гг. Длительное и разрушительное воздействие на цены, вызванное избыточной мощностью и конкуренцией, привело в среднем к снижению цен на поликремний на 30 % в год за прошедшие четыре года. Сложившиеся таким образом цены на поликремний являются крайне низкими, что не способствует появлению новых участников рынка. Однако при отсутствии макроэкономического замедления экономики высока вероятность, что перепроизводство поликремния будет сбалансировано растущим потреблением в ближайшие 3–4 года. Тогда сегодняшние низкие цены на поликремний не позволят отрасли перейти в разряд инвестиционно–привлекательных. Инвестиционно–привлекательная ситуация на рынке является необходимым условием перехода к следующему, третьему этапу развития рынка поликремния, поскольку строительство современных предприятий по выпуску поликремния характеризуется значительными финансовыми затратами, и этот фактор будет только возрастать. Предложены оценки уровня инвестиционно–привлекательной цены на поликремний с привлечением понятия внутренней нормы доходности инвестиционного проекта. Очерчена область наиболее вероятных показателей — цена поликремния, объемы производства, удельные капитальные инвестиции и текущие удельные затраты, — которые должны сложиться к наступлению третьего этапа развития рынка поликремния.

Ключевые слова: солнечная энергетика, поликремний, перепроизводство, Сименс–метод, спрос, предложение, баланс, цены и ценообразование, внутренняя норма доходности инвестиционного проекта.

© 2015 г. А. В. Наумов
ОАО «Гиредмет»,

Б. Толмачевский пер., д. 5, стр. 1, Москва, 119017, Россия

Настоящая работа завершает цикл статей, опубликованных в журнале «Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники» с 2005 г. и посвященных развитию мирового производства полупроводникового поликристаллического кремния (поликремния) [1–4]. За последние 10 лет отрасль продемонстрировала уникальные темпы роста, превратясь из сравнительно маленького рынка объемом ~20 тыс. т/год, в рынок, приближающийся в 2015 г. году к 300 тыс. т/год. Однако самым интересным является не абсолютный рост, а те явления, которые сопутствовали этому росту и, как представляется, заслуживают осмысления.

Хронология периодов развития — 3 этапа

Рынок поликремния в период 1980–2000 гг. вырос с ~5 до ~25 тыс. т. Основными драйверами этого роста были рост электронной промышленности и рост солнечной энергетики в начале 2000–х годов, в которой на первых этапах развития использовали в качестве сырья отходы и «скрап» электронной промышленности, но очень скоро — «свое», специально изготовленное сырье. На рис. 1 приведена динамика роста производства поликремния (столбчатая диаграмма), а также динамика изменения числа производителей, включая производителей в СССР (линейная диаграмма). Число производителей

неуклонно сокращалось, так как рынок требовал специализации, происходило укрупнение производителей. Разрушение электронной промышленности СССР также способствовало этой динамике. В 1995 г. было прекращено производство поликремния на Красноярском заводе цветных металлов (ОАО «Красцветмет»). В 1997 г. прекращено производство трихлорсилана (ТХС) и поликремния на Запорожском титано–магниевом комбинате (ГП «ЗТМК»). В 1998 г. прекращено производство поликремния на Донецком химико–металлургическом заводе (ДХМЗ). В 2003 г. было прекращено производство поликремния на Подольском химико–металлургическом заводе (ПХМЗ) (см. рис. 1). Внутри этого отрезка времени в 90–е годы XX в. был период небольшого перепроизводства и падения спроса, но в целом период характеризовался достаточно стабильным уровнем цен и баланса «спрос–предложение». В конце рассматриваемого периода рынок поликремния можно было охарактеризовать как классический олигопольный (принадлежащий небольшому числу участников) и ориентированный исключительно на Сименс–метод производства.

В начале 2000–х годов наступил новый этап развития рынка. Основной движущей силой роста рынка поликремния в этот период являлось стремительное развитие солнечной энергетики. Так, к 2004–2005 гг. сформировался

Наумов Аркадий Валерьевич — старший научный сотрудник, e-mail: naumov_arkadii@mail.ru

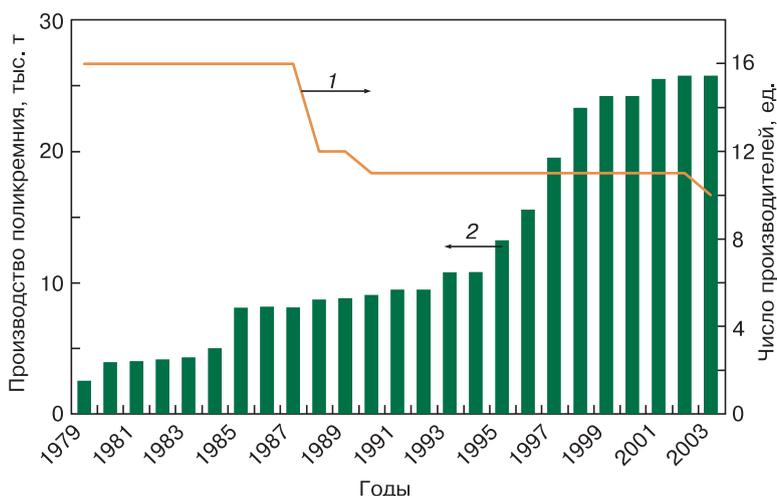


Рис. 1. Динамика роста мощностей по производству поликремния (1) и снижения количества производителей (2) в 1979—2003 гг. (Этап 1)

Fig. 1. Dynamics of Polysilicon Production Capacities Growth and Decrease in the Number of Producers in 1979—2003 (Period 1)

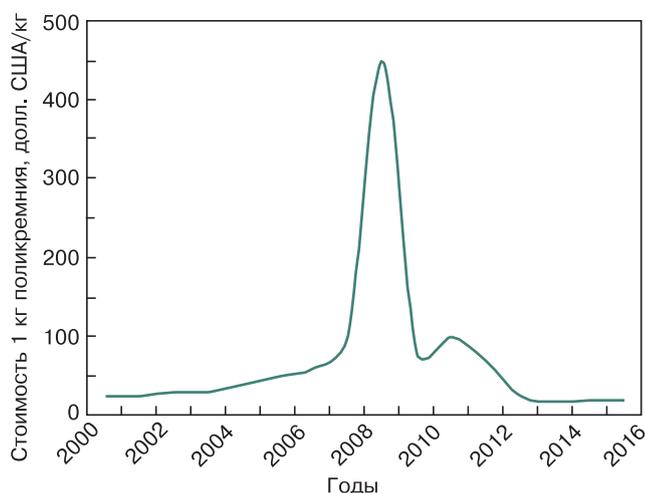


Рис. 2. Динамика изменения цен на поликремний в 2000—2015 гг.

Fig. 2. Dynamics of Polysilicon Prices in 2000—2015

дефицит сырья — поликремния для изготовления солнечных преобразователей, который не могли быстро удовлетворить немногочисленные оставшиеся производители. Всего на тот момент существовало 10 производителей. Причем 5 основных производителей: Hemlock, Wacker, REC, MEMC, Tokuyama, контролировали 85 % рынка. Цена на поликремний подскочила с 30—40 долл. США/кг до невообразимых ранее 400 долл. США/кг (рис. 2). Тем не менее поликремний находил своих покупателей, так как солнечную энергетику в те годы щедро субсидировали правительства различных стран (особенно в Европе).

Ажиотажный спрос вызвал к жизни большое число проектов новых производств поликремния. На пике интереса к этой проблеме в 2006—2007 гг. в мире насчитывалось порядка 180 новых проектов. Достаточно быстро выделились три группы игроков:

– существовавшие компании, наращивающие свои производства;

– новые игроки и инвесторы, сделавшие ставку на развитие традиционных видов производства поликремния — Сименс-процесс и, в меньшей мере, КС или FBR (осаждение моносилана в реакторе «кипящего слоя») с помощью появившихся инжиниринговых компаний;

– венчурные компании, сделавшие ставку на 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 очисткой металлургического (технического), минуя стадию перевода в газовую фазу, который

представлялся основным конкурентом затратному, как тогда казалось, Сименс-методу (высокоочищенный металлургический (UMG) поликремний). Большинство прогнозов предсказывали, что при сохранении доминирования Сименс-метода в технологию производства добавится целый ряд новых промышленных методов получения поликремния.

Впрочем, в 2009 г. к основным производителям, существенно нарастившим свои мощности, добавились только два новых крупных игрока: компания OCI (бывшая DC Chemical, Ю. Корея) и китайская GCL-Poly, выбравшие Сименс-метод. Мир производителей по-прежнему остался замкнутым и ориентированным на один метод. Однако этого оказалось достаточно, чтобы дефицит поликремния исчез, а к 2012 г. сформировался почти двукратный избыток поликремния (рис. 3).

Этот избыток привел к резкому падению цен на поликремний до 20—30 долл. США/кг, что подвело черту под многими проектами, которые к тому

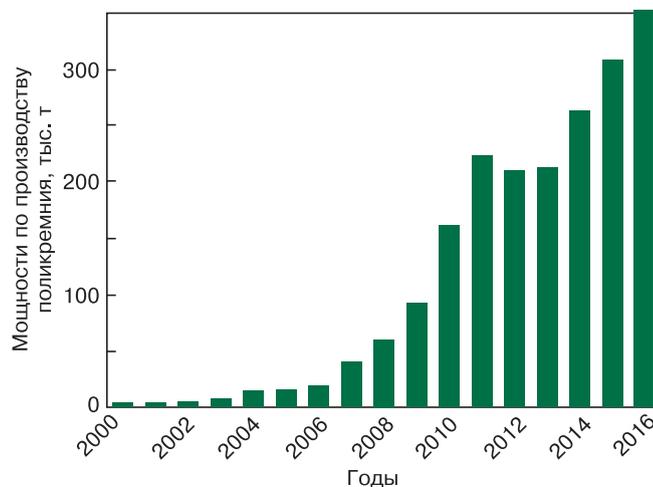


Рис. 3. Динамика роста мощностей по производству поликремния с 2000 г. (Этап 2)

Fig. 3. Dynamics of Polysilicon Capacities Growth Since 2000 (Period 2)

времени не успели состояться. К 2015 г. процесс продолжился — цены упали до 15 долл. США/кг, новые производители либо укрупнялись (особенно в Китае), либо исчезали. По-прежнему 90 % рынка принадлежит ограниченному кругу производителей (рис. 4): OCI (Южная Корея), Wacker (Германия), Hemlock (США), GCL (Китай), REC (Норвегия — США), TBEA (Китай), Tokuyama (Япония), SunEdison (бывшая MEMC Electronic Materials, США) и DAQO (Китай), а 88 % рынка поликремния производят по Сименс-технологии. От парадигмы «Пусть расцветают все цветы» в 2006—2008 гг. мир поликремния вернулся в состояние «Чужие здесь не ходят» к 2015 г. Сложившийся низкий уровень цен обостряет конкуренцию между сохранившимися игроками и не способствует появлению новых.

Существуют несколько причин, почему Сименс-метод продолжил свое доминирование. Во-первых, сильные игроки смогли в полной мере использовать эффект масштабирования производства и снижения издержек. На уровне собственно реактора отрасль перешла от 12-стержневых реакторов производительностью 50—100 т/год к 72-стержневым реакторам производительностью до 500 т/год. А на уровне предприятия — вместо заводов производительностью 300 т/год появились заводы производительностью 15—20 тыс. т/год.

Во-вторых, сам Сименс-метод значительно изменился и усовершенствовался в сфере рекуперации выходящих из реактора газов. Как отмечалось в работе [4], он разделился на две разновидности: «Сименс-DC» и «Сименс-HC».

Прогресс в отрасли шел столь быстро, что вытеснил на обочину все другие методы получения поликремния. Они просто не успели пройти этапы технологического развития от опытной к промышленной стадии. Исключением является метод КС (или FBR), разработчики которого заявляли о возможности достичь операционной себестоимости поликремния (*cash cost*) 10 долл. США/кг. Первый крупный завод по получению поликремния методом КС был построен Ethyl Corporation в 80-х годах XX в., а MEMC Electronic Materials (ныне SunEdison) продолжила этот проект в 90-е годы XX в. Интерес к данной технологии рос, Wacker Chemie создала небольшое производство в 1993 г., а компания REC — крупный проект в 1995 г. После этого ничего не происходило до 2009 г. В 2010 г. начался новый этап развития технологии КС, когда компании SunEdison и Samsung подписали меморандум о намерениях о строительстве завода мощностью 10 тыс. т в год в Южной Корее по технологии, подобной той, которая используется на предприятии MEMC в Техасе. Через 2 года китайская GCL-Poly анонсировала создание производства чистого моносилана, что явилось, по словам компании, первым шагом к строительству завода по производству поликремния методом КС. В 2014 г. REC Silicon анонсировала

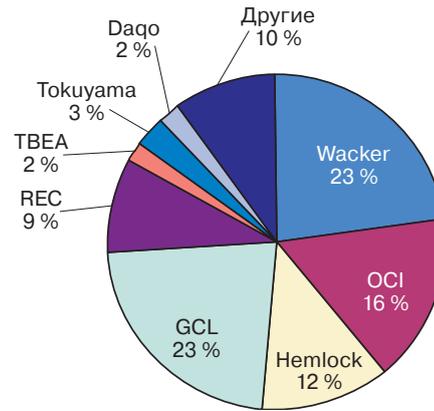


Рис. 4. Распределение долей основных производителей поликремния в 2014 г.

Fig. 4. Distribution of Shares of the Main Producers of Polysilicon in 2014

создание нового совместного производства с китайской компанией Shaanxi Tian Hong. По прогнозу International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV – 2012) доля метода FBR-процесса к 2015 г., как ожидается, вырастет до 20 % в общем объеме, а в 2017 г. составит 30 % [4]. Однако через 3 года оптимизм аналитиков снизился, и в «дорожной карте» International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV – 2015) доля метода FBR-процесса к 2015 г., согласно оценкам, должна была составить уже 13 % в общем объеме, а в 2017 г. — 18 % [5]. Следует отметить, что и эти цифры некоторые аналитики считают завышенными, полагая, что в 2015 г. доля этой технологии составляет ~5 % мирового рынка, и к 2017 г. эта цифра останется однозначной [6]. Действительно, сторонники метода КС говорят о его потенциально низкой себестоимости. Однако сегодня REC Silicon объявляет о достигнутых показателях операционной себестоимости 10,5 долл. США/кг, а китайская Daqo New Energy отчитывается о достигнутых 10,53 долл. США/кг в первом квартале 2015 г. [7].

На сегодня существуют три главные технические проблемы с поликремнием, изготовленным по технологии КС (FBR). Во-первых, все существующие производства являются, скорее, опытно-промышленными. Понятно, насколько трудно будет перейти от экспериментального до коммерческого крупномасштабного производства и как сильно изменится гидрогазодинамика в реакторе при масштабировании. Во-вторых, у стен реактора поликремневые гранулы растут с высоким содержанием металлических примесей. Наконец, КС-процесс попутно порождает много кремниевой пыли (*dust*), которая не может использоваться по назначению.

На сегодня уже очевидно, что процессы, основанные на технологии КС, неизбежно займут свое место в производстве. Это хороший дополнительный материал для компоновки загрузки в тигель с поликремнием по Сименс-процессу, так как улучшается заполнение тигля. Также гранулы КС — «идеальный материал» для непрерывного метода выращивания

монокристаллов по методу Чохральского с дозагрузкой.

Будущая перспектива для технологии КС зависит от успешного выполнения этих трех проектов, в настоящее время находящихся в стадии реализации. Однако, несмотря на все задержки на совместном предприятии SMP, уже 18 мес SunEdison продолжает рассматривать подобные совместные предприятия в Индии, Саудовской Аравии и Китае. Например, подписан меморандум о намерениях с Adani Group по строительству крупнейшего интегрированного предприятия в Индии, включающего производство 27 тыс. т/год поликремния.

В июне 2015 г. немецкая инжиниринговая компания SiTec GmbH представила новый процесс производства моносилана, который, как ожидается, уменьшит энергетические затраты на 30 %. Кроме того, компания работает над новым воплощением процесса КС для поликремния. Новый процесс создает «кипящий слой» механически, вибрацией реактора, в противоположность существующему гидродинамическому механизму создания и поддержания КС. SiTec запустил в 2015 г. крупномасштабный пилотный завод для проверки концепции «механически кипящего слоя», чтобы проверить качество продукта, газодинамику и выход в готовую продукцию, продемонстрированные в ранней испытательной работе. Это технология, которая, как полагают, будет более энергосберегающей: на 37 % по сравнению с традиционным КС и на 70 % по сравнению с усовершенствованным Сименс-ТХС. SiTec также ожидает снижения капитальных затрат на 35 %. Ожидается, что SiTec коммерциализирует эту технологию через два года [7].

Необходимо отметить, что строительство новых мощностей (или увеличение старых) по выпуску поликремния Сименс-методом (в обеих разновидностях) требует значительных инвестиционных затрат. На рис. 5 приведено распределение достигнутых удельных инвестиционных капитальных затрат, из которого видно, что на всех имеющихся на сегодня производствах удельные капитальные вложения лежат в диапазоне от 50 до 150 долл. США/кг и сильно зависят от объема выпускаемой продукции [8].

Текущие же удельные затраты на выпуск поликремния (стоимость сырья, зарплата, стоимость электроэнергии и пр.) на сегодня для большинства предприятий находятся в диапазоне 15–20 долл. США/кг [9, 10].

Третья причина доминирования Сименс-метода — это высокое качество получаемых из него солнечных элементов. Переизбыток мощностей в солнечной энергетике в целом в 2008–2014 гг. привел к снижению цен на солнечные модули, и производители модулей бросились в бой за

повышение КПД модулей и систем. Производители кремниевых модулей (моно и мульти) из Сименс-сырья к 2016–2017 гг., по некоторым прогнозам, в среднем сравняются по удельным экономическим показателям производства (в долл. США/Вт) с тонкопленочными элементами на CdTe и CIGS (рис. 6). Аналогичная ситуация наблюдается с кремниевыми модулями, изготовленными из UMG-поликремния. При этом достигнутый и постоянно растущий (предполагается, что к 2030 г. будет достигнут теоретический предел) в промышленных масштабах высокий КПД Si-модулей, изготовленных из Сименс-поликремния, остается их сильным конкурентным преимуществом, позволяющим им доминировать на рынке. [10, 11]

Конечно, Сименс-метод будет в дальнейшем развиваться. Некоторые аналитики считают, что настало время некоторого изменения парадигмы современной технологии получения поликремния Сименс-методом [8]:

– отказ от энергоемкого производства технического кремния, синтеза трихлорсилана за счет

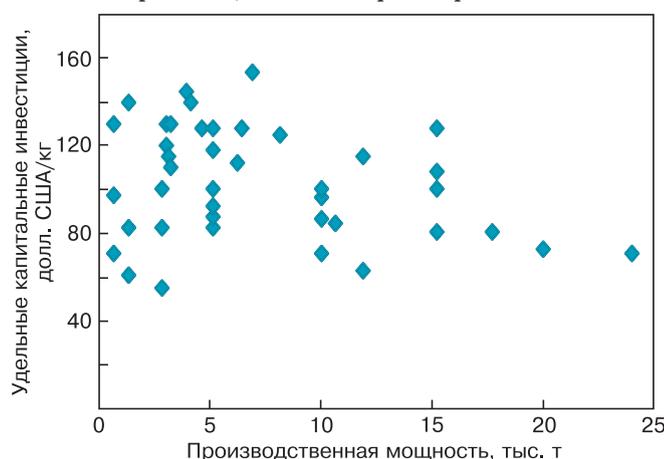


Рис. 5. Распределение удельных инвестиций (долл. США/кг) в существующие производства поликремния в зависимости от объема выпуска [9]

Fig. 5. Scatterplot of Capacity vs Unit Investment in Existing Polysilicon Production Facilities vs Production [9]

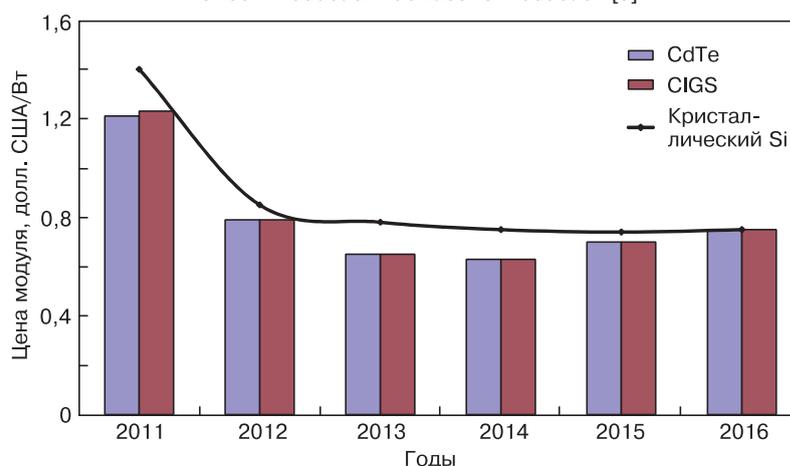


Рис. 6. Сравнительная цена модулей, изготовленных по разным технологиям [11]

Fig. 6. Comparative Price of Modules Manufactured Using Different Technologies [11]

перехода к прямому хлорированию специально подготовленного кремнезема, получению SiCl_4 с последующим низкотемпературным гидрированием до SiHCl_3 ;

– отказ от загрязняющих технологий механического дробления поликристаллических стержней, резки, использование современных «стерильных технологий» (электروهидравлическое дробление, «блистеринг» и др.);

– использование моносилана для подпитки рециркуляционной системы Сименес–процесса.

Следует отметить, что в РФ (после закрытия проекта НИТОЛа и Роснано в г. Усолье–Сибирском) отсутствует производство поликремния. Автор не располагает полной информацией о ходе проекта, но, если не говорить о каких–либо возможных внутренних ошибках, главных причин неудачи, видимо, несколько. В июле 2008 г. Nitol Solar и International Finance Corporation (IFC), объявили о предоставлении 50 млн долл. США инвестиций для Nitol Solar. Участие Роснано в проекте по созданию первого в РФ комплекса по производству 5 тыс. т поликристаллического кремния было одобрено Наблюдательным советом Роснано в феврале 2009 г. Роснано вступает в проект, внося 7,5 млрд руб., и выдает заем Nitol Solar на 4,5 млрд руб. (первый транш получен в апреле 2009 г.) и на 3 млрд руб. предоставляет гарантии Альфа–банку. В 2008–2009 гг. мировая индустрия поликремния уже набрала такой ход (напомним, что через 3 года общее перепроизводство стало почти двукратным), что проект устарел, еще не будучи реализованным. Приходится признать, что были недооценены скорость технического развития Сименс–метода, скорость ввода в строй в мире новых мощных производств, а принятие решений, финансирование и реализация шли слишком медленно. Сегодня же, в свете низких мировых цен на такое сырье (в 2015 г. цены составляют 15 долл. США/кг), перспективы организации нового производства в России кажутся экономически неоправданными [12–15].

Когда начнется новый цикл роста — этап 3?

Сегодня существует и какое–то время будет сохраняться избыток предложения поликремния на рынке, которому сопутствуют низкие цены [3, 6–8]. В работах [3, 6] было показано, что к 2018–2019 гг. с высокой вероятностью существующее перепроизводство поликремния будет «исчерпано» потребностью развивающейся солнечной энергетики (рис. 7).

Интересен вопрос — при каких ценах на поликремний отрасль вновь станет привлекательной для инвестиций, без которых невозможно осуществление капиталоемких проектов строительства новых заводов, и начнется новый, третий этап развития рынка поликремния [6, 7, 16].

Для ответа на этот вопрос необходимо привлечь понятие внутренней нормы доходности [17]. Вну-

тренняя норма доходности (ВНД) — норма прибыли, порожденная инвестицией. Это та граничная норма прибыли (барьерная ставка), при которой чистая текущая стоимость инвестиции равна нулю, или это та ставка дисконта, при которой дисконтированные доходы от проекта равны инвестиционным затратам. В общем случае внутренняя норма прибыли отражает возможный достижимый уровень рентабельности инвестированного капитала. Предложение по реализации инвестиционного проекта можно принимать, если ВНД превышает процентную ставку. ВНД определяет максимально приемлемую ставку дисконта, при которой можно инвестировать средства без каких–либо потерь для собственника. В нашем случае ВНД может использоваться для оценки уровня минимально возможных цен на поликремний, для привлечения инвестора. При расчете ВНД используют следующую формулу:

$$\sum_{i=0}^T \frac{K}{(1 + E_{\text{вн}})^i} = \sum_{i=0}^T \frac{D}{(1 + E_{\text{вн}})^i}, \quad (1)$$

где K — первоначальные затраты; T — последний год использования инвестиционного проекта; D — доход; $E_{\text{вн}}$ — внутренняя норма прибыли; t — год инвестирования.

Левая часть уравнения — это дисконтированная стоимость первоначальных затрат, начиная с года инвестирования и заканчивая последним годом использования инвестиционного проекта. В нашем случае это сумма капитальных и текущих затрат на строительство и работу завода по производству поликремния, о которых шла речь выше. Правая часть уравнения представляет собой стоимость доходов за тот же период, и в нашем случае ее можно выразить через цену поликремния, умноженную на выпуск. Если переписать формулу (1), задавая ВНД как « x », цену на поликремний как « y », переменные

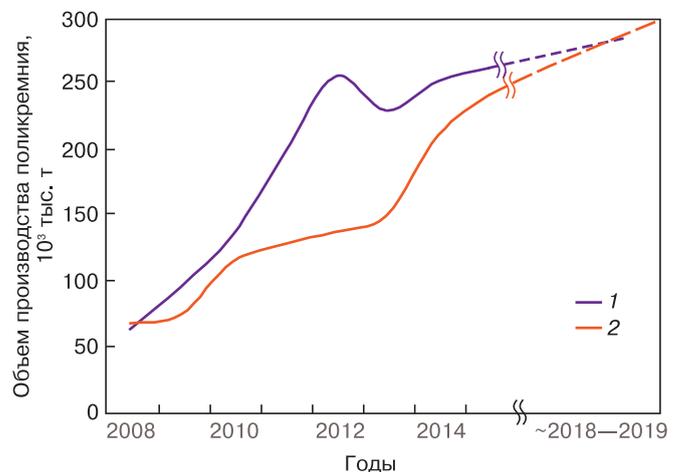


Рис. 7. Качественная динамика баланса «спрос–предложение» (Этап 2) — история и прогноз: 1 — предложение; 2 — потребление

Fig. 7. Qualitative Dynamics of Supply–Demand Balance during Period 2: History and Forecast, (1) Supply and (2) Demand

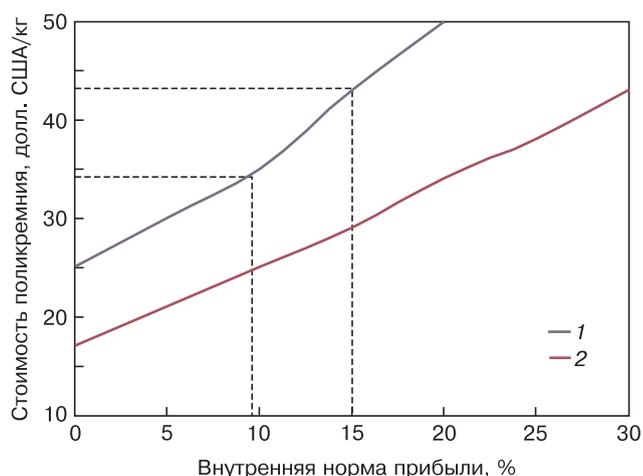


Рис. 8. Зависимость цены на поликремний от ВНД для фиксированных переменных и капитальных затрат:

1 — переменные затраты 15 долл. США/кг, капитальные затраты 60 долл. США/кг; 2 — переменные затраты 20 долл. США/кг, капитальные затраты 100 долл. США/кг

Fig. 8. Dependence of the ASP on Polysilicon vs. IRR for Fixed Constant Cash-Costs and Unit Invests: (1) variable costs 15 USD/kg and capital costs 60 USD/kg; (2) variable costs 20 USD/kg and capital costs 100 USD/kg

и капитальные затраты принимая как константы, то после несложных алгебраических преобразований получим семейство кривых зависимости ВНД от цены на поликремний при фиксированных переменных и капитальных затратах (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что для ВНД 8—15 % (это типичные значения для хорошего инвестпроекта) цена на поликремний должна составлять 35—40 долл. США/кг. Это приблизительно в 2 раза выше, чем сегодняшняя заниженная цена.

Заключение

Показано, что 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. На этом закончится второй цикл развития рынка поликремния.

Для того, чтобы привлечь инвестиции в данную сферу и запустить начало третьего цикла, цены на поликремний должны вырасти против сегодняшних приблизительно в 2 раза и составить 30 долл. США/кг. Следует отметить, что в Российской Федерации (после закрытия проекта НИТОЛа и Роснано в Усолье-Сибирском) отсутствует производство поликремния. Учитывая прогнозы ITRPV-2015, вероятно, необходимо рассмотреть возможность использования задела отечественных разработчиков (ОАО «ВНИИЭСХ», ИТ СО РАН, НПП «КВАНТ» и других) как основу для отечественного экономичного FBR-способа получения поликремния из моносилана в качестве альтернативы Сименс-процессу. Представляется, однако,

что это долгий путь, и сегодня 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 развития, на сегодняшний момент РФ серьезно отстает в области наземной фотоэнергетики, особенно в части производства как поликремния, так и всей дальнейшей технологической цепочки.

Если же наличие собственного производства поликремния гарантированного качества в России будут признано важным по иным соображениям, то экономически целесообразной является организация небольшого интегрированного производства (собственная потребность в поликремнии в России до 2020 г. оценивается в 700—800 т/год с учетом развития электроники и солнечной энергетики) «внутри» крупного кластера кремнийорганических производств, где можно организовать утилизацию избыточного SiCl_4 для производства кремнийорганики без применения дорогих циклов Сименс-DC или Сименс-HC (как, собственно, исторически и рождались первые эффективные производства поликремния, например Wacker в Бургхаузене, Германия, в 60—80-х годах прошлого века).

Библиографический список

1. Наумов, А. В. Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006—2010 гг. / А. В. Наумов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. — 2006. — № 2. — С. 29—35.
2. 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.
3. Наумов, А. В. Рынок солнечной энергетики — кризис и прогнозы // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. — 2009. — № 2. — С. 4—12.
4. Наумов, А. В. Перспективы рынка поликристаллического кремния // А. В. Наумов, А. В. Некрасов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. — 2014. — Т. 17, № 4. — С. 233—239. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-4-233-239
5. International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV) — Results, 2015. URL: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/2015/> (дата обращения 05.10.15).
6. Wacker benefiting from polysilicon demand boom. URL: http://www.pv-tech.org/news/wacker_benefiting_from_polysilicon_demand_boom (дата обращения 05.10.15).
7. The slow grind of FBR polysilicon. URL: <http://www.berneuter.com/en/references/library.html> (дата обращения 05.10.15).
8. 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.
9. Polysilicon reinvestment price levels, a moving target. URL: http://www.pv-tech.org/guest_blog/polysilicon_reinvestment_price_levels_a_moving_target (дата обращения 05.10.15).
10. Ramp-up delays to stabilize polysilicon price. URL: <http://www.berneuter.com/en/shop/polysilicon-market-reports/2014-edition/report-details.html> (дата обращения 05.10.15).
11. Falling PV prices sees a reduction in global renewable investment. URL: <http://www.solar-uk.net/article/79176-Falling-PV-prices-sees-a-reduction-in-global-renewable-investment> (дата обращения 05.10.15).
12. Roselund, Ch. Polysilicon prices collapse amid global supply glut / Ch. Roselund // PV magazine. — 2015. — N 12. — P. 14—15.

13. EPIA Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018. URL: <http://www.epia.org/> (дата обращения 05.10.15).

14. Can PV technology change before 2015? URL: http://www.pv-tech.org/guest_blog/can_pv_technology_change_before_2015 (дата обращения 05.10.15).

15. Polysilicon demand outpacing silicon per-watt reduction strategies. URL: http://www.pv-tech.org/news/polysilicon_demand_outpacing_silicon_per_watt_reduction_strategies (дата обращения 05.10.15).

demand_outpacing_silicon_per_watt_reduction_strategies (дата обращения 05.10.15).

16. FBR polysilicon technology — promise or hype? URL: <http://www.bernreuter.com/en/references/library.html> (дата обращения 05.10.15).

17. Внутренняя норма доходности IRR. URL: <http://investment-analysis.ru/metodIA2/internal-rate-return.html> (дата обращения 05.10.15).

Статья поступила в редакцию 27 августа 2015 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2015, vol. 18, no. 3, pp. 172–178.

The Investment Cycles of the Polysilicon Market

Arkady V. Naumov¹ — Senior Researcher (naumov_arkadii@mail.ru).

¹Federal State Research and Design Institute of Rare Metals Industry, 5 build. 1, B. Tolmachevski per., Moscow 119017, Russia

Abstract. A historical review of the market of polysilicon from the 1980th has been provided and a periodization of market development has been proposed. 2 development stages of solar power and world polysilicon production have been separated. A description of the historical dynamics of the polysilicon market, including technological estimates, possibilities of delivery, production expenses and application tendencies has been given. It is noted that a new oligopolistic structure of polysilicon market has appeared and new producers, especially in Asia, entered the limited scope of participants. This resulted in a greater than 10-fold increase in top-tier manufacturing capacity to an absolute amount of 320.000 MT/year in the period 2005–2015.

A prolonged and detrimental overcapacity-induced price reduction has followed with an average annual price decline of 30% over the past four years. The current average selling prices (ASP) of polysilicon are so low that do not promote the appearance of new participants of the market. However, in the absence of macroeconomic delay of economy, there is a high probability that an overproduction of poly-silicon will be balanced by a growth in its consumption in the next 3–4 years. Then today's low polysilicon prices will not allow polysilicon industry to transfer into the category of investment attractive ones. Investment attractiveness in the market is a necessary condition of the transition to the following third development stage of the polysilicon market because the construction of modern polysilicon production enterprises requires considerable expenses and the role of this factor will ever increase. Estimates of investment attractiveness of polysilicon price using the Internal Rate of Return (IRR) have been offered. The area of the most probable indicators (ASP, IRR, outputs, various unit invests and cash-costs) has been outlined. These indicators have to be reached so that to achieve the 3rd stage of polysilicon market development.

Keywords: photovoltaic, polysilicon, over-supply, Siemens-method, balance, supply, demand, cost and pricing, IRR.

References

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

2. Naumov A. V. Once again about development of solar power and the market of polysilicon in 2007–2010. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2007, no. 1, pp. 15–20. (In Russ.)

3. Naumov A. V. PV-market — Crisis and Prognosis. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2009, no. 2, pp. 4–12. (In Russ.)

4. Naumov A. V. Prospects of the polysilicon market. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2014, vol. 17, no. 4, pp. 233–239. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-4-233-239. (In Russ.)

5. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) — Results, 2015. URL: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/2015/> (accessed: 05.10.15)

6. Wacker benefiting from polysilicon demand boom. URL: http://www.pv-tech.org/news/wacker_benefiting_from_polysilicon_demand_boom (accessed: 05.10.15)

7. The slow grind of FBR polysilicon. URL: <http://www.bernreuter.com/en/references/library.html> (accessed: 05.10.15)

8. Kritskaya T.V., Shvartzman L. Y. Nekotorye aspekty sovremennoy tekhnologii poluprovodnikovogo kremniya [Some aspects of semiconductor silicon technology]. *X Mezhdunarodnaya Konferentsiya po aktual'nyim problemam fiziki, materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya, nanorazmernykh struktur i priborov na ego osnove («Silicon-2014») = X Conference on Critical Issues of Physics, Materials, Technology and Diagnostics of Silicon, Nanosized Structures and Silicon-Based Devices (Silicon 2014)*. Irkutsk, 2014. P. 43. (In Russ.)

9. Polysilicon reinvestment price levels, a moving target. URL: http://www.pv-tech.org/guest_blog/polysilicon_reinvestment_price_levels_a_moving_target (accessed: 05.10.15)

10. Ramp-up Delays to Stabilize Polysilicon Price. URL: www.bernreuter.com/en/shop/polysilicon-market-reports/2014-edition/report-details.html (accessed: 05.10.15)

11. Grossmann M. Falling PV prices sees a reduction in global renewable investment. URL: <http://www.solar-uk.net/article/79176-Falling-PV-prices-sees-a-reduction-in-global-renewable-investment> (accessed: 05.10.15)

12. Roselund Ch. Polysilicon prices collapse amid global supply glut. *PV magazine*. 2015, no. 12, pp. 14–15.

13. EPIA Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018. URL: <http://www.epia.org/> (accessed: 05.10.15)

14. Can PV technology change before 2015? URL: http://www.pv-tech.org/guest_blog/can_pv_technology_change_before_2015 (accessed: 05.10.15)

15. Polysilicon demand outpacing silicon per-watt reduction strategies. URL: http://www.pv-tech.org/news/polysilicon_demand_outpacing_silicon_per_watt_reduction_strategies (accessed: 05.10.15)

16. FBR polysilicon technology — promise or hype? URL: <http://www.bernreuter.com/en/references/library.html> (accessed: 05.10.15)

17. Vnutrennyaya norma dokhodnosti IRR [Internal rate of return IRR]. URL: <http://investment-analysis.ru/metodIA2/internal-rate-return.html> (accessed: 05.10.15) (In Russ.)

Received August 27, 2015