МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20, № 2. С. 99—106. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-99-106

УДК 621.315.592

Развитие рынка и технологии производства поликристаллического кремния

© 2017 г. В. В. Митин§, А. А. Кох

ООО «**Кремнийтехнопром**» ул. Академика Пилюгина, д. 24, Москва, 117393, Россия

Аннотация. Рассмотрено текущее состояние и перспективы развития производства основного материала — поликристаллического кремния (поликремния), используемого в производстве изделий микро- и силовой электроники и фотоэнергетики. Выполнен анализ динамики рынка поликристаллического кремния. Отмечено, что рост объемов выпуска поликремния связан, прежде всего, с возрастающими потребностями фотоэнергетики, с общемировой тенденцией перехода на возобнавляемую, альтернативную энергетику. Сделано предположение, что ежегодный прирост объемов выпуска поликремния достигнет в ближайшее время уровня 10—15 % и выше. Для интенсивного развития фотоэнергетики существенную роль играет уровень технологии поликристаллического кремния и доступность этого материала для широкомасштабного производства высокоэффективных солнечных элементов. По прогнозам основная применяемая в промышленности технология на базе «Сименс-процесса» останется доминирующей в обозримый период времени. ООО «Кремнийтехнопром» осуществляет разработку современного проекта производства поликремния на основе оригинальных разработок и модернизации «Сименс-процесса», которое планируется создать в России с привлечением ведущих специалистов и предприятий Германии (SPSC GmbH, GEC GmbH). На создаваемом предприятии предусматривается максимально полная безопасность производства, несмотря на потенциальные риски, заложенные в технологии. Это обеспечивается, прежде всего, гарантиями работы современных аппаратурно-технологических схем, надежностью применяемого оборудования и проектных решений в целом, комплексом противоаварийных защит. Токсичные отходы производства будут перерабатываться в безопасные вещества — целевые продукты для реализации. На предприятии будет достигнута оптимизация основных показателей для конкурентоспособного производства: цены поликремния, объемов производства, удельных капитальных инвестиций и текущих удельных затрат.

Ключевые слова: фотоэнергетика, микро- и силовая электроника, поликремний, Сименс-процесс, трихлорсилан, водородное восстановление, гидрирование, утилизация отходов, безопасное производство

Введение

Поликристаллический кремний полупроводникового качества является основным сырьевым материалом для производства перспективных изделий микро— и силовой электроники и фотоэнергетики. Спрос на поликристаллический кремний растет гигантскими темпами в первую очередь в связи с развитием фотоэнергетики, отражающей обще-

Митин Владимир Васильевич§ — канд. техн. наук, главный инженер, e-mail: vmitin@sitecprom.ru; Кох Александр Аркадьевич — канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог, e-mail: akoch@sitecprom.ru

§ Автор для переписки

мировую тенденцию перехода на альтернативные, возобновляемые, экологически безопасные источники электроэнергии. Для интенсивного развития фотоэнергетики необходимо совершенствование технологии производства поликристаллического кремния, что обеспечивает конкурентоспособность производства и доступность этого материала для широкомасштабного производства высокоэффективных солнечных элементов. ООО «Кремнийтехнопром» выполнил ряд проектных разработок, позволяющих достичь технико—экономических показателей производства, отвечающих современному мировому уровню и перспективным потребностям вводимых производственных мощностей. Ниже дан

анализ актуальных проблем развития рынка и технологий поликристаллического кремния полупроводникового качества.

Развитие рынка поликристаллического кремния

Поликристаллический кремний (поликремний) является сегодня основным материалом для производства изделий микроэлектроники, силовой электроники, фотоэнергетики, и альтернатива этому материалу в обозримом будущем не просматривается.

В период почти 60 лет развития промышленное производство поликремния в мире претерпело существенные изменения как в части технологии, так и по объемам выпуска продукции. Объем производства поликристаллического кремния за это время возрос более чем в 100 раз и составил в 2016 г. порядка 400 тыс. т/год [1]. Основными потребителями поликремния являются производители компонентов для солнечной энергетики (чистота 6—9 N* и выше), а также для микро— и силовой электроники (чистота 9—11 N и выше). Объемы производства для этих групп в 2016 г. составили 345 и 55 тыс. т/год соответственно [1—3]. Поликремний с чистотой 9—11 N применяется в последние годы и в производстве высокоэффективных фотопреобразователей.

Увеличение производства и потребления поликремния связано в первую очередь с развитием фотоэнергетики — одного из самых быстроразвивающихся сегментов возобновляемых источников энергии. Активность рынка продаж поликремния для фотоэнергетики иллюстрируется данными, представленными в табл. 1 [4].

В табл. 2 представлены данные по динамике развития отрасли фотоэнергетики и объемам производства поликремния для использования в солнечных элементах на основе кремния [6, 7].

Установленная в мире общая (кумулятивная) мощность солнечных электростанций составит в 2017 г. 365 ГВт [7]. С 2017 г. для обеспечения вводимых новых мощностей в фотоэнергетике необходим ежегодный прирост объемов выпуска поликремния на уровне 10-15% (до 45-50 т/год).

Ожидается, что установленные мощности солнечных электростанций составят к 2021 г. от 625 до 935 ГВт [8], а до 2030 г. достигнут 1760 ГВт [9] (23,7 % установленных мощностей в мире от всех источников). Последняя цифра представляется несколько оптимистичной и завышенной, однако фактическая интенсивность развития фотоэнергетики за последние 10 лет часто превышала самые смелые ожидания.

Представленная информация позволяет сделать вывод о том, что наращивание объемов выпуска

Таблица 1

Динамика импорта поликремния (в тыс. т) странами — крупнейшими мировыми импортерами [Polysilicon import dynamics by countries, which are world's largest importers, thousand tons]

Страны	Годы							
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Китай	23,6	48,4	65,3	83,3	81,5	102,6	117,6	
Япония	18,0	19,9	25,2	21,0	20,6	24,8	21,8	
Тайвань, Китай	9,0	17,8	22,6	27,0	39,0	42,1	43,8	
Корея	4,2	6,7	7,8	9,0	10,5	9,9	10,8	
Великобритания	2,7	3,3	3,6	2,6	13,0	37,5	26,5	
Сингапур	0,9	3,0	3,1	4,0	4,6	4,1	5,5	
Малайзия	0,4	0,3	1,3	4,0	1,7	10,1	5,6	
Германия	7,3	8,6	10,5	4,5	1,2	8,1	3,7	
Индия	15,4	29,3	31,2	34,4	33,2	42,2	45,6	
США	2,9	4,9	4,4	2,6	1,9	1,4	2,8	
Мир в целом	105,3	168,6	204,7	236,4	234,1	319,0	335,7	

Примечания:

¹⁾ Из-за жесткой конкуренции на высокотехнологичных рынках многие страны не дают достоверной информации об объемах торговли поликремнием для электронной промышленности, поэтому приведенные данные характеризуют только рынок поликремния для фотоэнергетики. На основе анализа данных UN Comtrade, объем мировой торговли поликремнием электронного качества может достигать 55—65 тыс. т/год [4].

²⁾ В ряде случаев увеличение импорта поликремния связано с конкурентной ситуацией на рынке, в частности, с падением цен на поликремний с 60 долл./кг в 2009 г. до 16,5 долл./кг в 2015 г. [5].

^{*} Принятые обозначения в «N» — количество девяток, характеризующих содержание основного вещества. Например, содержание кремния — 99,9999 % (мас.) — 6 N, остальное микропримеси.

Динамика развития фотоэнергетики и производства поликремния для солнечных батарей [Dynamics of development of photovoltaics and PS production for solar cells]

Поможото	Годы								
Параметр	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Вводимые в мире мощности фотоэнергетики, ГВт/год	0,2	1,5	17,2	50,5	75	78	95	107	116
Объем мирового производства поликремния для фотоэнергетики, тыс. т/год	<2	16	137	330	345	380	427	480	522

Примечание: Объем производства поликремния в 2018—2020 гг. рассчитан с учетом норматива расхода 4,5 кг поликремния на 1 кВт генерируемой мощности в солнечных модулях.

поликремния в мире является необходимым условием для развития фотоэнергетики, которая уже сегодня составляет конкуренцию традиционным источникам энергии.

В России сегодня нет промышленного производства поликремния. Этим обусловлена полная зависимость существования и развития российской микроэлектроники и фотоэнергетики от поставок поликремния зарубежными производителями. Современные реалии диктуют необходимость предпринять срочные меры по изменению этой ситуации, и определенный шаг в этом направлении сделал ООО «Кремнийтехнопром», который разрабатывает проект создания собственного производства поликремния объемом 6 тыс. т/ год в комплексе с выпуском изделий конечного спроса (монокристаллический кремний, пластины, солнечные элементы, солнечные модули).

Развитие технологии

Для интенсивного развития фотоэнергетики существенную роль играет совершенствование технологии производства поликристаллического кремния и доступность этого материала для широкомасштабного производства высокоэффективных солнечных элементов. Специалистами во всем мире ведется поиск технологических схем получения поликремния, обеспечивающих при высоких показателях качества существенное снижение себестоимости продукции. Модернизированы традиционные технологии и разработаны новые перспективные процессы.

Основные технологии, которые получили распространение в промышленности поликремния или использовались даже в незначительных масштабах, следующие.

1. Классический Сименс-процесс, в котором получение поликремния осуществляется в реакторах осаждения кремния из газовой фазы на стержни — основы (chemical vapor deposition — CVD) [10, 11]. Процесс проходит по суммарной реакции

$$SiHCl_3 + H_2 \rightarrow Si + 3HCl.$$

Получение трихлорсилана осуществляется методом прямого гидрохлорирования технического кремния по реакции

$$Si + 3HCl \rightarrow SiHCl_3 +H_2$$
.

Технология позволяет получать поликремний с чистотой (9—11 N) и выше. Она применяется в промышленном масштабе десятки лет и имеет перспективы усовершенствования. К недостаткам этой технологии можно отнести необходимость включения в технологическую схему процесса высокотемпературной конверсии получаемого в реакторах осаждения побочного продукта — тетрахлорида кремния — в трихлорсилан, что существенно увеличивает производственные энергозатраты.

2. Модифицированный Сименс-процесс, отличающийся способом получения трихлорсилана [12]. Применяется совмещенный процесс синтеза трихлорсилана гидрохлорированием и гидрирование тетрахлорида кремния в кипящем слое, проходящий по реакции

$$3\mathrm{SiCl_4} + 2\mathrm{Si} + \mathrm{H_2} + 3\mathrm{HCl} \rightarrow 5\;\mathrm{SiHCl_3}.$$

Технология характеризуется лучшими показателями энергопотребления — до 75 кВтч/кг поликремния, в том числе и за счет исключения из технологической схемы процесса высокотемпературной конверсии тетрахлорида кремния. К недостаткам технологии можно отнести присущую и классическому Сименс-процессу длительность технологического цикла.

3. Моносилановый метод, основанный на получении гранулированного поликремния пиролизом моносилана (SiH $_4 \rightarrow 2$ H $_2 +$ Si) на кремниевых затравках в реакторе кипящего слоя (Fluidized Bed Reactor — **FBR**—метод) [13]. Метод имеет недостатки, в частности, повышенный фон металлических примесей и

длительность технологического цикла. Гранулированный поликремний при получении монокристаллов по методу Чохральского целесообразно использовать только как подсыпку в тигель для расплава с массивными кусками поликремния.

- 4. Моносилановый метод, в котором используется процесс пиролиза моносилана в газовой фазе с осаждением поликремния на кремниевых прутках основах [14]. Процесс протекает по реакции $\mathrm{SiH_4} \to 2\mathrm{H_2} + \mathrm{Si}$. При этом получают поликремний высокого качества как по чистоте, так и по структурному совершенству материала. Недостатки технологии заключаются в необходимости применения затратного процесса получения моносилана, повышенном энергопотреблении, сложном аппаратурном оформлении процесса, жестких требованиях к режимным параметрам во избежание срыва процесса в сторону гомогенного образования кремния в газовой фазе.
- 5. Алкоксилановая технология [15]. Эта технология основана на взаимодействии технического кремния с этиловым спиртом с получением триэтоксисилана, далее моносилана и мелкодисперсного кремния полупроводникового качества. Основные реакции процессов следущие:

$$Si + 3C_2H_5OH \rightarrow SiH(OC_2H_5)_3 + H_2;$$

 $4SiH(OC_2H_5)_3 \rightarrow SiH_4 + 3Si(OC_2H_5)_4;$
 $SiH_4 \rightarrow Si + 2H_2$

Эта технология представлялась очень перспективной; она отличается простотой химических процессов и низким энергопотреблением. Однако боль-

шое количество побочных продуктов, недостаточная чистота кремния и другие факторы оказались серьезным препятствием для внедрения технологии в промышленность.

По данным немецкой ассоциации VDMA Photovoltaic Equipment, которая объединяет немецкие компании, работающие в сфере солнечной энергетики, в 2015 г. доля Сименс-процесса в производстве поликремния в используемых технологиях составляла 85 %. Еще 10 % приходилось на получение поликремния с помощью FBR-метода, а 5 % — на другие технологии. Согласно прогнозам экспертов ассоциации, в ближайшее десятилетие Сименс-процесс останется ведущей технологией производства поликремния [17].

Особенности современного проекта производства поликремния ООО «Кремнийтехнопром», которое планируется создать в России с привлечением ведущих специалистов и предприятий Германии (EPC GmbH, GEC GmbH) заключаются в следуюшем.

- 1. Применение модернизированной аппаратурно-технологической схемы производства, основанной, прежде всего на изменении традиционной технологии получения трихлорсилана [18, 19]. В реакторе для получения трихлорсилана осуществляется совмещенный процесс синтеза трихлорсилана гидрохлорированием и гидрирование тетрахлорида кремния в кипящем слое. Для аппаратурного оформления процесса разработан ряд оригинальных технических решений. Процесс реализуется при температуре > 500 °C и давлении 2,0 МПа.
- 2. Источники тетрахлорида кремния (из оборотного контура) и хлористого водорода (из оборотного контура)

Таблица 3

Сравнительные характеристики оборудования для производства поликремния (Сименс-процесс) [Comparative characteristics of polysilicon production equipment (Siemens process)]

Характеристики оборудования	SiTec GmbH (Германия)	GEC (Германия)	GT AT (CIIIA)	Morimatsu (Япония)
Модель установки	24 Pair CVD	CVD-R 54	SDR-600	SM
Внутренний размер колпака реактора (высота × диаметр), мм ²	3900×2160	3480×2200	~4500 × 3500	4200×2400
Количество электродных пар (U–прутки)	24	27	_	_
Расчетное давление, бар	10	10	_	10
Рабочее давление, бар	6	6	6	6
Температура процесса, °С	~1050	1080—1100	_	1080
Время одного цикла, ч	130—150	96	80	85—100
Вес поликремния, получаемого за цикл, т	7—9	7,5	8	4,6—8,5
Годовая производительность, т	450	500	600	_
Потребление электроэнергии, кВтч/кг поликремния	45	40—45	40	45

Примечание: Для оснащения предприятия ООО «Кремнийтехнопром» будут использованы установки CVD-R 54. Выбор такого оборудования связан с пониженным энергопотреблением и лучшими эксплуатационными характеристиками.

ротного и подпиточного контура) формируются на самом предприятии; не требуется дополнительная закупка исходных веществ. При этом исключается традиционный энергозатратный, высокотемпературный (1300 °C) процесс конверсии тетрахлорида кремния в трихлорсилан после водородного восстановления кремния [20, 21].

- 3. Оснащение предприятия оборудованием нового поколения, в частности, для операции водородного восстановления кремния из трихлорсилана. В табл. 3 представлены основные характеристики применяемого оборудования в сравнении с ведущими компаниями-производителями [22].
- 4. Снижение расходных норм сырья и энергоносителей. Этот фактор напрямую связан с модернизацией аппаратурно-технологических схем и выбором эффективного оборудования нового поколения. В этом направлении постоянно работали ведущие организации по разработке технологии поликремния, включая российские. Так, в ОАО «Гиредмет» в период 2002—2010 гг. разработаны проекты, показатели которых были достаточно эффективны для рассматриваемого периода [23]. Но для текущего времени с целью обеспечения конкурентоспособности предприятий по производству поликремния необходимо улучшение расходных норм сырья и энергоносителей до уровня, предлагаемого в проекте ООО «Кремнийтехнопром».

Динамика основных показателей производства представлена в табл. 4 (с использованием данных работы [23]).

Следует отметить, что возможности совершенствования Сименс-процесса еще не исчерпаны. В частности, есть резерв модернизации оборудования для водородного восстановления кремния, оптимизации процессов тепло- и массообмена в реакторах, снижения их энергоемкости, а также увеличения степени извлечения кремния из трихлорсилана в технологическом цикле [24].

Сравнительные показатели (расходные нормы на 1 кг поликремния) производства поликремния [Comparative indicators of polysilicon production (consumption rates per kg of polysilicon)]

Показатели	Проекты 2002 г.	Проекты 2005 г.	Проекты 2010 г.	Проекты 2016 — 2017 гг.
Расход измельченного технического кремния, кг	≤2,84	≤1,91	≤1,41	1,05—1,13
Расход хлора, нм ³ /кг по- ликремния	≤2,4	≤1,25	≤0,44	0,22
Расход водорода, нм ³	4,5	≤3,5	≤1,2	0,36
Расход электроэнергии, кВтч/кг поликремния	≤325	≤250	≤150	70

Примечание: Проекты 2002—2010 гг. — данные источника [23]. Проекты 2016—2017 гг. — разработка ООО «Кремнийтехнопром».

Представленные в табл. 4 данные показывают, что в области технологии поликремния за последние 15 лет сделан очередной технологический рывок, позволивший в разы улучшить основные показатели производства и обеспечить его эффективное применение в фотовольтаике, микро- и силовой электронике. Таким образом, наступил этап оптимизации основных показателей рынка: цены поликремния, объемов производства, удельных капитальных инвестиций и текущих удельных затрат [25, 26].

Отходы и безопасность производства

Для обеспечения требований по качеству получаемого поликремния в производстве необходима очистка исходного сырья (технического кремния) с содержанием кремния ~3 N до уровня 9—11 N в товарном продукте. Применяемые современные многостадийные методы очистки позволяют успешно решать эту задачу. Но при этом в технологическом обороте присутствуют такие пожароопасные и токсичные вещества, как трихлорсилан (SiHCl₃), хлор (Cl₂), тетрахлорид кремния (SiCl₄), хлористый водород (HCl), водород (H₂). С другой стороны, из технологической цепочки должны выводиться в значительных количествах отходы с примесями, которые также содержат не безопасные компоненты. Поэтому в производстве поликремния необходимо применение специальных мер безопасности, предотвращающих возникновение аварийных ситуаций и негативное воздействие различных факторов на производственный персонал и окружающую среду. Кроме того, по периметру предприятия по производству поликремния создают санитарно-защитную зону (СЗЗ), за пределами которой не допускается наличие опасных веществ. Ширина этой зоны зависит как от особенностей используемой на предприятии технологии, так и от природно-климатических условий места расположения предприятия. Для при-

Таблица 4 мера приведем данные детальных исследований параметров СЗЗ для завода полупроводникового кремния (объем выпуска до 4000 т поликремния в год, Сименс-процесс), построенного в г. Железногорске в 2008 г. В проекте рассматривалось влияние деятельности завода на состояние атмосферного воздуха, загрязнение водного бассейна, шумовое загрязнение, энергетическое загрязнение с целью определения границы СЗЗ. Было установлено, что по совокупности расчетных физических факторов и химическому воздействию на окружающую среду и население расчетная СЗЗ должна составлять 300 м от границы предприятия. В пределах этой зоны, содержание опасных компонентов (определенное по 26 возможным веществам) в атмосфере не превышало десятых долей ПДК, что полностью отвечает требованиям экологической безопасности.

Особенностью проекта ООО «Кремнийтехнопром» в отношении безопасности производства является следующее.

Прежде всего, проектирование объектов выполняется в строгом соответствии с нормативными документами, определяющими правила проектирования и эксплуатации опасных производств [27, 28]. Но это только необходимый минимум. Производство будет отличаться дополнительными мерами безопасности, основанными на оптимизации технологических схем и уровня автоматизации производственных процессов.

Кроме того, используется совершенная технология утилизации отходов, суть которой заключается в полной переработке отходов производства в виде хлорсиланов различного состава. Применяются два метода: сжигание парогазовых смесей в пламени смеси кислород — метан и нейтрализация жидких отходов с применением гидроксида натрия в качестве нейтрализующего агента. Первый метод реализуется по принципиальной схеме:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_n\mathbf{H}_{2n+2} + \mathbf{O}_2 &\to \mathbf{CO}_2 + \mathbf{H}_2\mathbf{O}; \\ \mathbf{Si}_x\mathbf{H}_y\mathbf{Cl}_z + \mathbf{H}_2\mathbf{O} &\to \mathbf{SiO}_2 + \mathbf{HCl} + \mathbf{H}_2. \end{aligned}$$

Второй метод реализуется по принципиальной схеме:

$$\begin{aligned} \operatorname{Si}_x & \operatorname{H}_y \operatorname{Cl}_z + \operatorname{NaOH} \to \operatorname{Na}_2 \operatorname{SiO}_3 + \operatorname{NaCl} + \operatorname{H}_2 + \operatorname{H}_2 \operatorname{O}; \\ & \operatorname{Na}_2 \operatorname{SiO}_3 + \operatorname{HCl} + \operatorname{H}_2 \operatorname{O} \to \operatorname{NaCl} + \operatorname{Si}(\operatorname{OH})_4. \end{aligned}$$

В результате использования этих методов образуются безопасные вещества на основе оксида кремния, а также очищенная поваренная соль. Эти вещества вывозятся с предприятия и реализуются как товарная продукция. Образующиеся в небольшом количестве промышленные стоки подвергаются очистке стандартными методами, что позволяет использовать их для сброса даже в водоемы, отвечающие жестким требованиям рыборазведения.

Таким образом, обеспечиваются дополнительные природоохранные мероприятия, исключающие воздействие токсичных веществ на близлежащие территории.

Следует также отметить, что в проекте используется технология XXI века (разработки 2016—2017 гг.), которая ушла далеко вперед за последние два десятилетия. Проектируемое производство поликремния имеет мало аналогов по степени безопасности для предприятия и окружающей

среды в ряду других пожароопасных и токсичных производств, которыми насыщена современная промышленность.

Заключение

Ключевая роль полупроводникового кремния особой чистоты в производстве продукции микроэлектроники, силовой электроники, фотоэнергетики, оптоэлектроники, специальных областей техники, сегодня очевидна и альтернативы этому материалу для широкомасштабного промышленного применения в обозримом будущем не предвидится.

Производство поликремния в мире ежегодно наращивается примерно на $10-15\,\%$, что обусловлено, прежде всего, динамикой развития альтернативной энергетики и ее важнейшего сегмента — фотоэнергетики на основе кремниевых материалов.

Общий объем выпуска поликремния в мире приблизился к 400 тыс. т в год. Предприятия сосредоточены в развитых в технологическом отношении странах: США, Китае, Германии, Японии, Корее. В России в области выпуска важнейшего стратегического сырья — поликремния сложилась критическая ситуация. В настоящее время у нас, к сожалению, его промышленное производство отсутствует. Хотя в 80-х годах ХХ в. такое производство существовало и находилось на уровне показателей ведущих зарубежных стран.

ООО «Кремнийтехнопром» проектирует первое крупномасштабное производство поликремния на территории России с объемом выпуска 6 тыс. т/год для изготовления солнечных батарей и изделий микро— и силовой электроники. Таким образом, обеспечивается участие в важнейших для России мероприятиях по созданию информационно— энергетических систем нового поколения, экономии углеводородных ресурсов, по улучшению экологической обстановки в стране.

Применение модернизированных аппаратурнотехнологических схем Сименс-процесса с рециркуляцией реагентов, а также нового оборудования позволит снизить критический показатель производства — удельный расход электроэнергии — до уровня менее 70 кВтч на 1 кг поликремния, в несколько раз снизить расходы исходных веществ, а также повысить безопасность производства. Это отражает технологический рывок при создании современных предприятий по сравнению с периодом 2000—2010 гг.

В дискуссиях по развитию производства поликристаллического кремния и обоснованности применения различных технологий, по-нашему мнению, пора подвести итог. На сегодня усовершенствованный Сименс-процесс обеспечивает лучшие показатели производства: высокое качество продукции, пониженное энергопотребление, практическое отсутствие рисков воздействия применяемых веществ на персонал предприятия и окружающую среду, в совокупности лучшие технико—экономические по-казатели. Эта технология имеет возможности совершенствования и в ближайшей перспективе, вероятно, не будет иметь конкурентных аналогов.

Библиографический список

- 1. Tore Torvund, President & CEO. Swedbank Energy Summit, Oslo, March 16, 2017. URL: http://hugin.info/136555/R/2088247/788237.pdf (дата обращения: 15.03.2017).
- 2. Solar Grade Polysilicon. Recsilicon. URL: https://www.recsilicon.com/products/solar-grade-polysilicon (дата обращения: 25.04.2017).
- 3. Electronic Grade Polysilicon. URL: https://www.recsilicon.com/products/electronic-grade-polysilicon (дата обращения: 17.03.2017).
- 4. UN Comtrade. URL: https://comtrade.un.org/ (дата обращения: 17.03. 2017).
- 5. Global Trends in Renewable Energy Investment 2016. Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF. 2016. URL: http://fs-unepcentre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2016 (дата обращения: 15.03.2017).
- $6.\,$ International Energy Outlook 2016. U.S. Energy Information Administration, 2016.
- 7. SNEC 2017 PV Power Expo (Shanghai), 2017. Becquerer Institute. Global costs to installation. PV market Alliance. URL: http://www.snec.org.cn/website/index.aspx?url=Conference/Login&lang=en (дата обращения: 12.05.2017).
- 8. Westermeier C. Global Market Outlook, President, Solar Power Europe Intersolar, Munich, 30 May 2017. URL: https://www.intersolar.de/en/program/proceedings.html (дата обращения: 05.05.2017).
- 9. IRENA (2017), REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. URL: http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/ 2017/01/IRENA_REthinking_Energy_2017.pdf (дата обращения: 23.05.2017).
- 10. O'Mara R. B., Herring L. P. Handbook of Semiconductor Silicon Technology. Park Ridge (New Jersey): Noyes Publications, 1990. P. 5—15.
- 11. Фалькевич Э. С., Пульнер Э. О., Червоный И. Ф., Шварцман Л. Я, Яркин В. Н., Салли И. В. Технология полупроводникового кремния. М.: Металлургия, 1992. 408 с.
- 12. Elyousfi A. Investment in Polysilicon Production. URL: https://ru.scribd.com/document/245610342/Alan-Elyousfi-Investment-in-Polysilicon-Production (дата обращения: 09.01.2017).
- 13. SVP Jon André Lokke Copenhagen, January 8, 2010. URL: http://www.huginonline.no/REC/files/20100108a.pdf (дата обращения: 02.06.2017).

- 14. Белов Е. П. Лебедев Е. Н., Григораш Ю. П., Горюнов А. Н., Литвиненко И. Н. Моносилан в технологии полупроводниковых материалов. М.: НИИТЭХИМ, 1989. 66 с.
- 15. Pat. 6103942 A (US). Method of high purity silane preparation / Y. S. Tsuo, E. P. Belov, V. G. Gerlivanov, V. V. Zadde, S. I. Kleschevnikova, N. N. Korneev, E. N. Lebedev, A. B. Pinov, E. A. Ryabenko, D. S. Strebkov, E. A. Chernyshev, 15.08.2000
- 16. Киселев А. Д. Процессы получения кремния с низким содержанием примесей с использованием магниетермического восстановления диоксида кремния в аппаратах стесненного падения. URL: http://portal.tpu.ru/portal/pls/portal/!app_ds.ds_view_bknd. download doc?fileid=987 (дата обращения: 10.06.2017).
- 17. International Technology Roadmap for Photovoltaic, 2015. VDMA Photovoltaic Equipment. URL: http://www.itrpv.net/.cm4all/iproc.php/ITRPV%20Seventh%20Edition%20including %20maturity%20report%2020161026.pdf?cdp=a (дата обращения: 10.03.2017).
- 18. Пат. RU № 2280010 С1 (РФ). Способ получения трихлорсилана / А. В. Елютин, Ю. Н. Назаров, А. М. Чапыгин, А. А. Кох, А. А. Аркадьев, В. В. Апанасенко, 20.07.2006.
- 19. Пат. № 011971 (Евразийский). Способ получения поликристаллического кремния / А. А. Аркадьев, А. В. Елютин, Л. С. Иванов, А. А. Кох, В. Г. Левин, В. В. Митин, Ю. Н. Назаров, Ю. Н. Пархоменко, В. А. Пекелис, И. Ю. Петрова, Т. В. Симонова, А. М. Чапыгин, 30.06.2009.
- 20. Пат. RU № 2278076 С2 (РФ). Устройство гидрирования тетрахлорида кремния / Л. С. Иванов, В. Г. Левин, В. В. Митин, Д. В. Назаркин, 20.06.2006.
- 21. Пат. RU № 2274602 С1 (РФ). Способ получения трихлорсилана. МПК: C01B33/107 / Л. С. Иванов, В. Г. Левин, В. В. Митин, Д. В. Назаркин, 20.04.2006.
- 22. Shravan Kumar Chunduri. Detailed product descriptions of Siemens-type CVD reactors // Photon International. 2013. P. 120—126.
- 23. ОАО «Гиредмет». URL: http://giredmet.ru/ru/products/polysilicon/pulisilicontechnology/; http://giredmet.ru/ru/products/polysilicon/polysiliconequipment/ (дата обращения: 05.06.2017).
- 24. Пат. RU № 2475451 С1 (РФ). Способ получения поликристаллического кремния / А. Б. Пинов, С. А. Муравицкий, Т. Р. Тимербулатов, П. М. Гаврилов, А. П. Прочанкин, М. В. Болгов, О. Г. Войнов, 20.02.2013.
- 25. Пархоменко Ю. Н., Наумов А. В. Когда закончится перепроизводство поликремния // XI Конф. и X Школа молодых ученых и специалистов (Кремний–2016). Тезисы докладов. Новосибирск, 2016. С. 23.
- 26. Наумов А. В. Инвестиционные циклы рынка поликремния // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 3. С. 172—178. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-3-172-178
- $27.\ \Gamma OCT\ 12.1.010-76.\ 1999.\ Взрывобезопасность. Общие требования.$
- 28. ГОСТ 12.1.007–76. 1999. Вредные вещества. Классификация. Общие требования безопасности.

Статья поступила в редакцию 19 июня 2017 г.

 $\label{eq:loss_energy} \emph{Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki} = \emph{Materials of Electronics Engineering}.~2017, vol.~20, no.~2, pp.~99-106. \\ DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-99-106$

The development of the market and the production technology of polycrystalline silicon

V. V. Mitin1,8, A. A. Kokh1

¹LLC Kremniytehnoprom, 24 Academica Pilyugina Str., Moscow 117393, Russia

Abstract. The article is devoted to the current state and prospects of production development of main material — polycrystalline silicon (polysilicon) which is used in the manufacture of products for micro and power electronics and photovoltaics. The article includes polycrystalline silicon market dynamics analysis. It is noted that the increase in polysilicon output is primarily connected to the growing needs of photovoltaics and the global trend of transition to renewable, alternative energy. It is assumed that the annual increase in the output of polysilicon will reach a level of 10–15 % or more. There are several facts

Information about authors:

Vladimir V. Mitin^{1,§}: Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer, vmitin@sitecprom.ru; Alexander A. Kokh¹: Cand. Sci. (Eng.), Leading Process Engineer (akoch@sitecprom.ru)

[§] Corresponding author

that are important for the intensive development of photovoltaics. They include level of polycrystalline silicon technology and the availability of this material for large–scale production of highly efficient solar cells. According to forecasts, the main technology used in the industry based on «Siemens Process» will remain dominant in the foreseeable period of time. LLC «Kremniytehnoprom» is developing a modern polysilicon production project based on the original designs and mod-

ernization of «Siemens Process». It is planned to be created in Russia with the involvement of leading German specialists and enterprises (SPSC GmbH, GEC GmbH).

The project provides maximum safety of production, despite the potential risks inherent in technology. First of all it is ensured by guarantees of hardware—technological schemes performance, reliability of the equipment and design solutions in general, as well as by a set of emergency protections. Toxic production waste will be processed into safe substances — targeted products for sale. The created enterprise will ensure the optimization of key indicators for competitive production: the price of polysilicon, production volumes, specific capital investments and current unit costs.

Keywords: photoenergy, micro and power electronics, polysilicon, Siemens Process, trichlorosilane, hydrogen reduction, hydrogenation, waste utilization, safe production

References

- 1. Tore Torvund, President & CEO. Swedbank Energy Summit, Oslo, March 16, 2017. http://hugin.info/136555/R/2088247/788237.pdf (accessed: March 15, 2017).
- 2. Solar Grade Polysilicon. Recsilicon. www.recsilicon.com/products/solar-grade-polysilicon (accessed: April 25, 2017).
- 3. Electronic Grade Polysilicon. www.ressilicon.com/products/electronic-grade-polysilicon. (accessed: March 17, 2017).
- $4.\ UN$ Comtrade. https://comtrade.un.org/ (accessed: March 17, 2017).
- 5. Global Trends in Renewable Energy Investment 2016. Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF. http://fs-unepcentre.org/publications/global-trends-renewable-energyinvestment-2016 (accessed: March 15, 2017).
- $6.\,$ International Energy Outlook 2016, U.S. Energy Information Administration, 2016.
- 7. SNEC 2017 PV Power Expo (Shanghai), 2017. Becquerer Institute. Global costs to installation. PV market Alliance. www. snec.org.cn/website/index.aspx?url=Conference/Login&lang=en (accessed: May 12, 2017).
- 8. Westermeier Ch. Global Market Outlook, President, Solar Power Europe Intersolar, Munich, 30 May 2017. www.intersolar.de/en/program/proceedings.html (accessed: May 5, 2017).
- 9. IRENA (2017), REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/01/IRENA_REthinking_Energy_2017.pdf (accessed: May 23, 2017).
- 10. O'Mara R. B., Herring L.P., Handbook of Semiconductor Silicon Technology. Park Ridge (NJ): Noyes, 1990, pp. 5—15.
- 11. Fal'kevich E. S., Pul'ner E. O., Chervonyi I. F., Shvartsman L. Ya, Yarkin V. N., Salli I. V. *Tekhnologiya poluprovodnikovogo kremniya* [Technology of Semiconductor Silicon]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 408 p. (In Russ.)
- 12. Elyousfi A. Investment in Polysilicon Production. https://ru.scribd.com/document/245610342/Alan-Elyousfi-Investment-in-Polysilicon-Production (accessed: January 9, 2017)
- 13. SVP Jon Andre Lokke Copenhagen. http://www.huginon-line.no/REC/files/20100108a.pdf (accessed: June 2, 2017).
- 14. Belov E. P., Lebedev E. N., Grigorash Yu. P., Goryunov A. N., Litvinenko I. N. *Monosilan v tekhnologii poluprovodnikovykh materialov* [Monosilane in Semiconductor Material Technology]. Moscow: NIITEKhIM, 1989. 65p. (In Russ.)
- 15. Patent 6103942 A (US). Method of high purity silane preparation. Y. S. Tsuo, E. P. Belov, V. G. Gerlivanov, V. V. Zadde, S. I. Kleschevnikova, N. N. Korneev, E. N. Lebedev, A. B. Pinov, E. A. Ryabenko, D. S. Strebkov, E. A. Chernyshev, 2000.

- 16. Kiselev A. D. Processes for the production of silicon with a low content of impurities using magnesium—thermal reduction of silicon dioxide in devices of cramped incidence. http://portal.tpu.ru/portal/pls/portal/!app_ds.ds_view_bknd.download_doc?fileid=987 (In Russ.). (accessed: June 10, 2017).
- 17. International Technology Roadmap for Photovoltaic, 2015. VDMA Photovoltaic Equipment. http://www.itrpv.net/.cm4all/iproc.php/ITRPV%20Seventh%20Edition%20including%20maturity%20 report%2020161026.pdf?cdp=a (accessed: March 10,2017).
- 18. Patent 2280010 (RF). Sposob polucheniya trikhlorsilana [Method for producing trichlorosilane]. A. V. Elyutin, Yu. N. Nazarov, A. M. Chapygin, A. A. Kokh, A. A. Arkad'ev, V. V. Apanasenko, 2006. (In Russ.)
- 19. Patent 011971 (Euras). Sposob polucheniya polikristallicheskogo kremniya [Method for producing polycrystalline silicon]. A. A. Arkad'ev, A. V. Elyutin, L. S. Ivanov, A. A. Kokh, V. G. Levin, V. V. Mitin, Yu. N. Nazarov, Yu. N. Parkhomenko, V. A. Pekelis, I. Yu. Petrova, T. V. Simonova, A. M. Chapygin, 2009. (In Russ.)
- 20. Patent 2278076C2 (RF). *Ustroistvo gidrirovaniya tetra-khlorida kremniya* [Device for hydrogenation of silicon tetrachloride]. L. S. Ivanov, V. G. Levin, V. V. Mitin, D. V. Nazarkin, 2006. (In Russ.)
- 21. Patent 2274602C1 (RF). Sposob polucheniya trikhlorsilana. MPK: C01B33/107 [Method for producing trichlorosilane]. L.S. Ivanov, V. G. Levin, V. V. Mitin, D. V. Nazarkin, 2006. (In Russ.)
- 22. Chunduri Sh. K. Detailed product descriptions of Siemenstype CVD reactors. *Photon Int.*, 2013, April, pp. 120—126.
- 23. Giredmet Ltd. http://giredmet.ru/ru/products/polysilicon/pulisilicontechnology/; http://giredmet.ru/ru/products/polysilicon/polysiliconequipment/ (accessed: June 5, 2017).
- 24. Patent 2475451C1 (RF). Sposob polucheniya polikristallicheskogo kremniya [Method for producing polycrystalline silicon]. A. B. Pinov, S. A. Muravitskii, T. R. Timerbulatov, P. M. Gavrilov, A. P. Prochankin, M. V. Bolgov, O. G. Voinov, 2013. (In Russ.)
- 25. Parkhomenko Yu. N., Naumov A. V. When will finished overproduction of polysilicon. In: $Tr.\ XI$ Konferentsii i X Shkoly molodykh uchenykh i spesialistov Kremnii–2016 = Proceedings of the 11th Conference and 10th School of Young Scientists and Specialists on Silicon–2016. Novosibirsk, 2016, p. 23.
- 26. Naumov A. V. The investment cycles of the polysilicon market. Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 172—178. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2015-3-172-178
- $27.\ \, {\rm GOST}$ (State Standard) No. 12.1.010–76, Explosion proof. General requirements, 1999.
- $28.\ \ GOST (State \ Standard) \ No.\ 12.1.007-76, Harmful \ substances. \ Classification. \ General \ safety \ requirements, 1999.$