

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25, № 1. С. 23—38.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2022-1-23-38

УДК 621.315.592

## Новый этап развития рынка поликристаллического кремния

© 2022 г. А. В. Наумов<sup>1</sup>, Д. Л. Орехов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «ОКБ «Астрон»,  
ул. Парковая, д. 1, Лыткарино, Московская область, 140080, Россия

<sup>2</sup> ООО «НТЦ «Тонкопленочных технологий в энергетике»,  
Политехническая ул., д. 28, Санкт–Петербург, 194021, Россия

✉ Автор для переписки: [naumov\\_arkadii@mail.ru](mailto:naumov_arkadii@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено текущее состояние и перспективы развития мирового рынка полупроводникового поликристаллического кремния (ПКК). Отмечено, что после долгого периода низких цен на ПКК, что препятствовало росту инвестиций в отрасль, наступает период выравнивания цен до уровня инвестиционной привлекательности. Приведены оценки баланса спроса и предложения до 2024 г. и в долгосрочной перспективе. Проанализированы основные технологические схемы получения ПКК в современных условиях. Отмечено, что некоторый профицит рынка ПКК сохранится в ближайшей и среднесрочной перспективе. Однако провозглашенный всеми правительствами «зеленый поворот» в энергетике, развитие локальных рынков и восстановление цен до инвестиционно–привлекательного уровня, способствовали появлению новых проектов заводов по производству ПКК. Важным для России является вопрос выбора технологических особенностей реализации метода Сименс–ТХС. Особенность ситуации в России — это наличие нескольких крайне важных рынков (солнечной энергетики, микроэлектроники, силовой электроники, фотоники, волоконной оптики), которые являются по мировым меркам незначительными и в равной мере испытывающими нехватку собственного сырья. Для России, по–видимому, особую ценность могут представлять комплексные проекты, которые позволят одновременно решить несколько проблем сырьевого обеспечения.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, поликремний, перепроизводство, Сименс–метод, метод «кипящего слоя», спрос, предложение, баланс, цены и ценообразование

**Благодарность:** Авторы выражают благодарность Рязанцеву В.В. за помощь при описании технологии получения синтетического кварца.

**Для цитирования:** Наумов А.В., Орехов Д.Л. Новый этап развития рынка поликристаллического кремния. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2022; 25(1): 23—38. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-1-23-38>

# The modern phase of the polysilicon market

A. V. Naumov<sup>1,✉</sup>, D. L. Orehov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Astrohn Technology Ltd., 1 Parkovaya Str., Lytkarino, Moscow Region 140080, Russia*

<sup>2</sup> *Research and Development Center for Thin-Film Technologies in Energetics,  
28 Politekhnikeskaya Str., St. Petersburg, 194021, Russia*

✉ *Corresponding author: naumov\_arkadii@mail.ru*

**Abstract.** The current condition and outlooks of the world semiconductor and polycrystalline silicon (poly-Si) markets have been analyzed. A long period of low PS prices which hindered the growth of investments into the industry has now changed for price recovery to an investment attractive level. Demand and offer balance for the period until 2024 and for the long term has been analyzed, and the main currently used PS processes have been reviewed. The current poly-Si market proficiency is expected to remain in the near and medium terms. However the “green turn” of the energy industry announced by all the governments, the development of local markets and the price recovery to an investment attractive level have promoted the development of new PS fab projects. Of special importance for Russia is the choice of Siemens trichlorosilane process parameters. A specific feature of the Russian market is the presence of several very important fields (solar energy, microelectronics, high-power electronics, photonics and fiber optics) which are small by international standards and equally face raw material shortage. It appears that Russia will greatly benefit from integral projects delivering solutions of multiple raw materials supply problems.

**Keywords:** solar energy, polycrystalline silicon, overproduction, Siemens process, fluidized bed process, demand, offer, balance, price, pricing

**Acknowledgment:** The Authors are grateful to V.V. Ryazantsev for help in synthetic quartz technology description.

**For citation:** Naumov A.V., Orehov D.L. The modern phase of the polysilicon market. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(1): 23–38. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-1-23-38>

## Введение

Настоящая работа является продолжением работы [1] и посвящена развитию мирового производства полупроводникового поликристаллического кремния (ПКК). За последние 15 лет отрасль продемонстрировала уникальные темпы роста, превратясь из рынка объемом ~20 тыс. т/год, в рынок, превысивший 500 тыс. т/год. При этом в последние 5—7 лет предложение ПКК устойчиво превышало спрос, что привело к периоду господства крайне низких цен на ПКК. В работе [1] выдвинуто предположение, что этот период должен подойти к завершению, когда цены поднимутся настолько, чтобы сделать вновь привлекательными инвестиции в отрасль, и, кроме того, сделаны соответствующие оценки, базируясь на «внутренней норме доходности проекта». Как всегда, жизнь

оказалась богаче прогнозов. Тем не менее, нам представляется, что рынок ПКК близок к переходу в новую фазу развития, что особенно важно для локальных рынков, в частности российского.

## Исходное сырье — технический кремний

Технический (металлургический) кремний производится в количестве более 3 млн т/год и применяется в качестве лигатуры алюминиевых (силумины) и магниевых сплавов. В химической промышленности развиваются технологии производства силиконовых (кремнийорганических) материалов, применяемых в производстве пластмасс, лакокрасочной продукции, смазок и т. п. Первое место среди производителей металлургического кремния занял Китай, доля которого на рынке составила 64 %, за ним следуют Соединенные Штаты

Таблица 1

**Динамика и прогноз мирового производства металлургического кремния**  
Dynamics and prediction of the world's metallurgical grade silicon production

Страна/Регион	Объем производства, тыс. т						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
США	185,0	130,0	140,0	175,0	210,0	220,0	240,0
Бразилия	218,0	202,0	198,0	220,0	235,0	245,0	250,0
Другие страны (Северная и Южная Америка)	42,0	35,0	30,0	40,0	44,0	45,0	45,0
Европейский союз	193,4	156,3	142,0	170,0	195,0	205,0	205,0
Другие страны (Европа)	225,5	231,0	251,0	258,5	281,8	320,9	336,5
Африка/Ближний Восток	38,0	20,5	0	0	0	0	15,0
Азия и Океания	89,8	87,0	80,5	107,5	135,0	150,0	160,0
СНГ	71,8	64,1	52,0	66,0	75,0	77,5	80,0
Китай	1980,0	1895,0	1837,5	2015,0	2125,0	2217,5	2315,0
Общее количество	3043,4	2820,9	2731,0	3052,0	3300,8	3480,9	3646,5

Америки и Западная Европа. Основным потребителем металлургического кремния является производство сплавов (47 %), на втором месте находится химическая промышленность (41 %). Производство металлургического кремния в целом, начиная с 2018 г., стало нерентабельно во многих странах. Как следствие закрываются заводы, производство сокращается. В перспективе просматривается тенденция к 4—5-летнему медленному восстановлению. Согласно текущим прогнозам, ожидается, что в 2022 г. и далее рост производства ускорится за счет восстановления базового потребления и роста потребности в сырье для полупроводниковой отрасли. В последнее десятилетие спрос на ме-

таллургический кремний поддерживался за счет развития «солнечной» энергетики. На электронную промышленность и солнечную энергетику приходится ~12—15 % мирового производства металлургического кремния, используемого в качестве сырья (табл. 1) [2].

#### Цены на металлургический кремний

Спад цен в период 2018—2020 гг. был вызван обсуждавшимся выше профицитом (рис. 1). Начиная с 2020 г., спрос увеличился, и цены пошли вверх. Ожидалось, что рост цен будет до некоторой степени смягчен большим избытком накопленных

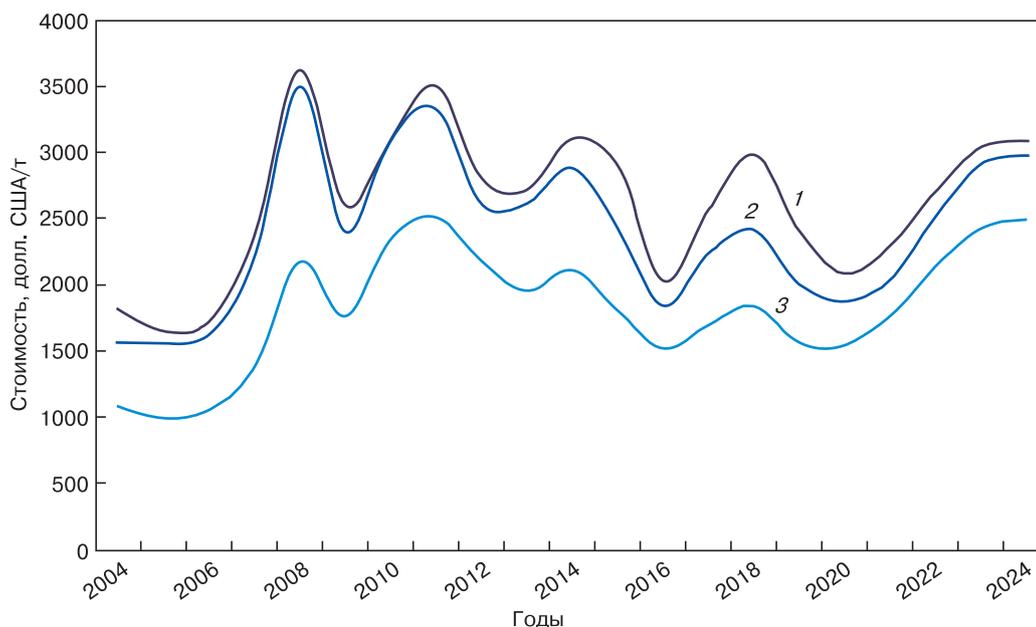


Рис. 1. Динамика и прогноз цен на металлургический кремний, тыс. долл. США/т:  
1 — США; 2 — ЕС; 3 — Китай, Япония

Fig. 1. Dynamics and prediction of metallurgical grade silicon prices, \$/t: (1) US, (2) EU and (3) China & Japan

мощностей, которые не будут полностью задействованы в течение нескольких лет. Однако в 2021 г. произошел скачок цен на металлургический кремний из-за сокращения его производства в Китае. В сентябре–октябре 2021 г. цены подскочили на 300 %. Сокращение производства обусловлено энергетическим кризисом в Китае, коснувшимся почти половины китайских предприятий. Дефицит энергии вызван новой политикой Китая по сокращению вредных выбросов в атмосферу. Известно о планах правительства КНР по нейтрализации выбросов углерода к 2060 г. и курсе на переход к экологически чистому и низкоуглеродному развитию. В Китае 56 % потребляемой энергии зависит от добычи угля, при этом правительство страны установило жесткие экологические ограничения на его добычу и внедрило пиковые показатели по затратам электроэнергии для каждого региона. Недостаток энергии задел, по меньшей мере, 44 % китайских предприятий, что привело к приостановке работы на многих заводах, в том числе производящих металлургический кремний. Влияние на рост цен оказала также санкционная политика США — значительные объемы производства металлургического кремния приходится на Сицзян–Уйгурский автономный район, действия китайских властей в котором подвергаются критике. Также приостановила продажи норвежская компания Elkem ASA, производящая силиконы, кремний и другие кремнийсодержащие материалы. В результате стоимость тонны металлургического кремния с 1,2–2,6 тыс. долл. США выросла в пиковом значении до 10,4 тыс. долл. США и в настоящее время колеблется на уровне 3–4 тыс. долл. США.

### Промышленные технологии получения поликристаллического кремния

Металлургический кремний имеет значительный объем примесей. Для получения ПКК желательно использовать более чистый металлургический кремний, так называемых «высоких марок» (табл. 2).

Для получения ПКК электронного или «солнечного» качества необходим процесс глубокой очистки металлургического кремния. Промышленно применяемые технологии такого процесса представлены на рис. 2.

На рис. 2, а представлена схема «Сименс»–реактора водородного восстановления  $\text{SiHCl}_3$  (ТХС) или пиролиза  $\text{SiH}_4$  (МС): «Сименс–ТХС» или «Сименс–МС» соответственно. В этом случае ПКК осаждается на затравочные прутки:

– для «Сименс–ТХС»

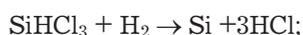


Таблица 2

### Характеристики «высоких марок» металлургического кремния, пригодных для получения «солнечного» и «электронного» ПКК Notation and guaranteed parameters of metallurgical grade silicon for solar and electronic grade poly-Si

Марка	Гарантированное содержание примеси				
	Si, % (min)	Fe, % (max)	Al, % (max)	Ca, % (max)	P, ppm (max)
1101	99,79	0,1	0,1	0,01	30
1501	99,69	0,15	0,15	0,01	30
1503	99,67	0,15	0,15	0,03	30
2202	99,58	0,2	0,2	0,02	30
2502	99,48	0,25	0,25	0,02	30

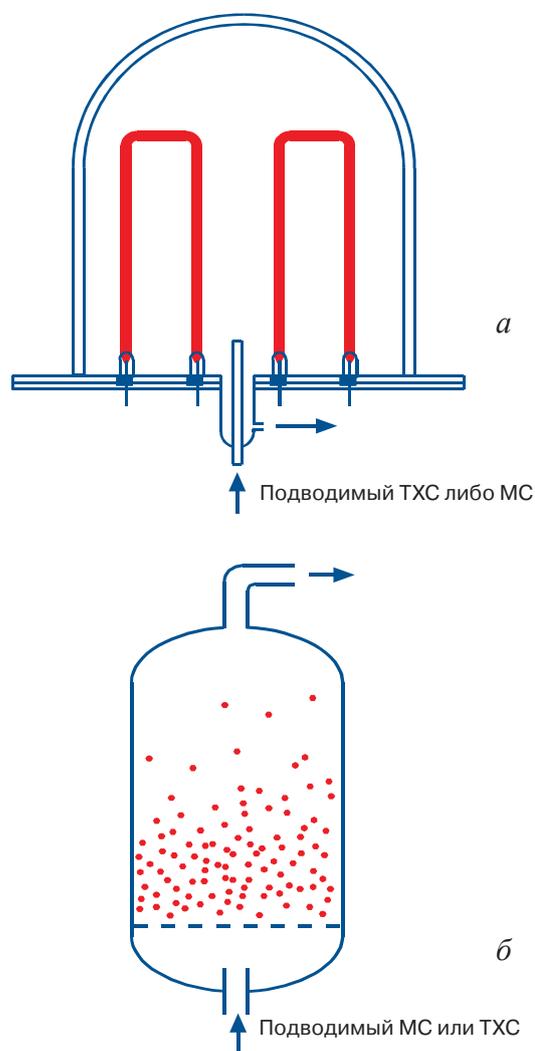
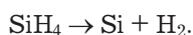


Рис. 2. Промышленные типы реакторов для получения ПКК: а — «Сименс»–реактор водородного восстановления  $\text{SiHCl}_3$  (ТХС) или пиролиза  $\text{SiH}_4$  (МС); б — «Сименс»–реактор разложения МС или водородного восстановления ТХС в «кипящем» слое (КС)

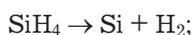
Fig. 2. Industrial polysilicon reactor types: (a) Siemens  $\text{SiHCl}_3$  (TCS) hydrogen reduction or  $\text{SiH}_4$  (MS) pyrolysis reactor, (b) MS decomposition or TCS hydrogen reduction fluidized bed reactor

- для «Сименс–МС»

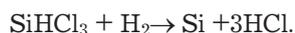


На рис. 2, б представлена схема «Сименс»–реактора разложения МС или водородного восстановления ТХС в «кипящем» слое (**КС**): «КС–МС» или «КС–ТХС» соответственно. В этом случае ПКК получается в виде гранул:

- для «Сименс–КС–МС»



- для «Сименс–КС–ТХС»



Технология «Сименс–ТХС» сегодня является абсолютно доминирующей. Однако выходящая из реактора парогазовая смесь содержит в больших количествах не прореагировавший  $\text{H}_2$ , ТХС, тетрахлорид ( $\text{SiCl}_4$ , или **ЧХК**),  $\text{HCl}$ , полисиланхлориды. Это связано с тем, что только 20—25 % кремния из ТХС осаждаются на затравочных стрежнях за один цикл, при этом в реакции участвует ~ 10 % подаваемого в реактор  $\text{H}_2$ . На 1 кг ПКК образуется примерно 12,5 кг  $\text{SiCl}_4$ .

Исторически первым «классическим» подходом к этой проблеме является использование избыточного ЧХК для производства другой продукции – пирогенного  $\text{SiO}_2$  (аэросил), кремнийорганических соединений и пр. [1, 3, 4].

Аэросил часто получают методом высокотемпературного гидролиза тетрахлорида кремния. Некоторые компании, выпускающие ПКК (например Wacker Chemie GmbH и Tokuyama Soda) используют побочный тетрахлорид именно в производстве аэросила. Метод высокотемпературного газофазного гидролиза  $\text{SiCl}_4$  базируется на реакциях, протекающих в водород–кислородном факеле при подаче паров тетрахлорида кремния:



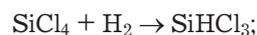
После отделения аэросила от пылегазовой смеси обычными методами сухой пылеочистки отходящие газы подвергают водоабсорбционной обработке с получением соляной кислоты. Весь процесс можно организовать таким образом, что оба продукта (аэросил и соляная кислота) будут иметь высокую степень чистоты. Из отработанной парогазовой смеси, отходящей из аппаратов водородного восстановления, на первом этапе переработки конденсацией выделяются хлорсиланы. После разделения конденсата хлорсиланов один из них — трихлорсилан — возвращают в производство кремния, а тетрахлорид кремния направ-

ляют на производство аэросила. Для этого пары тетрахлорида кремния смешивают с воздухом и неконденсирующимися газами, выходящими из системы конденсации хлорсиланов. Эти газы состоят из водорода (~90 % (об.)) и хлористого водорода. Горелкой формируется факел, в котором происходит высокотемпературный гидролиз тетрахлорида кремния. Отходящие из камеры термогидролиза газы промывают солянокислыми растворами и водой. Полученную соляную кислоту или реализуют как товарную продукцию, или перерабатывают на безводный хлористый водород. Описанный метод позволяет одновременно утилизировать водородсодержащий газ, тетрахлорид кремния и хлористый водород, а получаемые при этом продукты могут быть выделены в чистом виде. В соответствии с этой технологией возможно получение диоксида кремния высокой чистоты и регулируемым размером зерна (1—20 мкм для волоконной оптики и 1—100 мкм для полупроводниковой электроники). Регулирование размера частиц осуществляют разбавлением инертным газом паров тетрахлорида кремния, контактирующих с водосодержащим абсорбентом.

Однако с начала 2000–х гг. объемы производства ПКК для каждого конкретного производителя по методу «Сименс–ТХС» выросли настолько, что утилизировать таким образом «избыточный» ЧХК стало технически и экономически невозможно.

Встала задача использования «избыточного» ЧХК в производстве ПКК. Тогда «Сименс–ТХС»–метод разделился на две разновидности: «Сименс DC» и «Сименс HC». Отводимые из реактора продукты процесса водородного восстановления необходимо было полностью регенерировать в процессах конденсации и разделения смеси ( $\text{SiHCl}_3 + \text{SiCl}_4$ ). Таким образом, реализуются 2 подхода к работе со значительными количествами  $\text{SiCl}_4$ , попутно образующимися после водородного восстановления ТХС:

- конверсия избыточного  $\text{SiCl}_4$  в ТХС в специальных реакторах–конверторах (так называемый метод «Сименс–DC», иногда используют термин «*clean–recycling*»):



- подача оборотного  $\text{SiCl}_4$  в реактор исходного синтеза ТХС (т.н. метод «Сименс–HC» или «*dirty–recycling*»):



Оба эти подхода в настоящее время в равной степени используются ведущими производителями. Экономические показатели каждого подхода, видимо, приблизительно равны. Принято считать, что метод Сименс–HC более капиталоемкий [1, 5].

### Современное состояние рынка поликристаллического кремния

С целью оптимизации производственных затрат производители ПКК резко разграничили качество производимого ими материала для разных целей. Так, появились следующие определения типов производимой продукции:

– ПКК для производства мультикристаллического кремния методом «литья» или *solar grade for multicrystalline cells (multi grade)* с чистотой 99,99999% (7N) — 99,999999% (8N);

– ПКК для производства монокристаллического кремния для солнечной энергетики методом Чохральского или *solar grade for monocrystalline cells (mono grade)* с чистотой 9N до 11N;

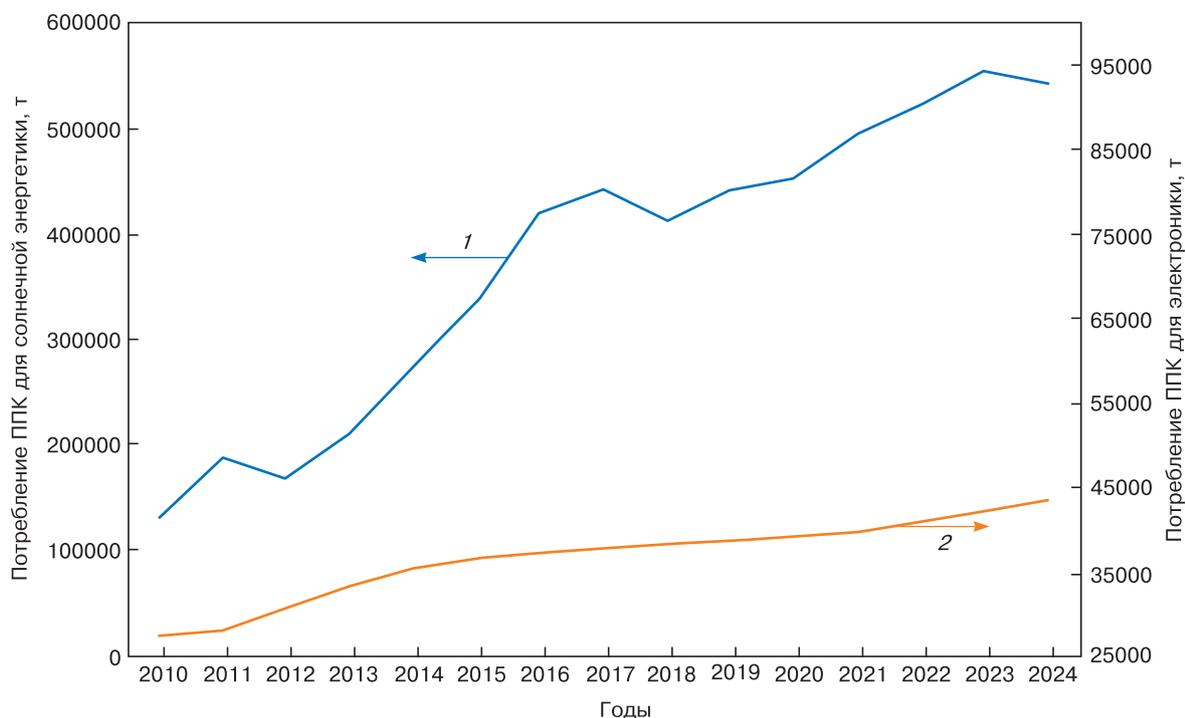


Рис. 3. Потребление ПКК для солнечной энергетики (1) и электроники (2), история и прогноз (Источник: <https://www.bloomberg.com>)

Fig. 3. Solar (1) and electronic (2) grade poly-Si consumption: history and prediction. Source: <https://www.bloomberg.com>

Таблица 3

### Параметры поликристаллического кремния для солнечной энергетики и электроники Solar and electronic grade poly-Si parameters

Параметр	Поликристаллический кремний	
	Электроника	Солнечная энергетика (mono-grade)
Доля основного вещества	>99,999999999 (>11N)	99,999999 – 99,999 999999 (8—11N)
Назначение	Производство микроэлектронных и силовых приборов на основе монокристаллов Si	Производство фотоэлектрических преобразователей на основе монокристаллов Si
Доноры	(P, As, Sb) (n-тип, $\rho \geq 1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ); $\leq 0,05 \text{ ppba}$	(P, As, Sb) (n-тип, $\rho \geq 500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ); $\leq 0,1 \text{ ppba}$
Акцепторы	(B, Al) (p-тип, $\rho \geq 9000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ); $\leq 0,03 \text{ ppba}$	(B, Al) (p-тип, $\rho \geq 5000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ); $\leq 0,05 \text{ ppba}$
Углерод (C);	$\leq 0,1 \text{ ppma}$	$\leq 0,2 \text{ ppma}$
Металлы: – в объеме (Fe, Cu, Ni, Cr, Zn, Na) – на поверхности (Fe, Cu, Ni, Cr, Zn, Na)	$\leq 0,5 \text{ ppbw}$ $\leq 1 \text{ ppbw}$	$\leq 0,5 \text{ ppbw}$ $\leq 1 \text{ ppbw}$
Время жизни основных носителей заряда	> 250 мс	$\geq 400 \text{ мкс}$

– ПКК «электронного» качества или *electronic grade for semiconductors* с чистотой от 11N и более.

ПКК электронного качества производится и потребляется ~35—40 тыс. т/год. Потребление ПКК «солнечного» качества превысило 500 тыс. т/год (рис. 3).

Качество ПКК для электроники и самого чистого ПКК для солнечной энергетики, также предназначенного для получения монокристаллов методом Чохральского, тем не менее заметно отличается (табл. 3).

Производственные мощности по производству ПКК за последние два десятилетия выросли в несколько раз. Период бурного роста часто приводил к значительному переизбытку мощностей, что сопровождалось падением цен (рис. 4).

В настоящее время рынок характеризуется некоторым снижением избыточных мощностей и ростом цен после долгого периода их падения (7—8 долл. США/кг; рис. 5).

Но в целом ожидается, что предложение будет превышать спрос еще несколько лет [5, 6].

### Основные производители ПКК

За последние 3—4 года ландшафт мира производителей ПКК кардинально изменился. Традиционные лидеры производства ПКК — компании ОСИ (Южная Корея), Wacker (Германия), Hemlock (США), REC (Норвегия—США), Токуяма (Япония),

SunEdison (бывшая MEMC Electronic Materials, США) — ушли с первых строчек рейтинга как по объемам выпускаемой продукции, так и по показателям эффективности. Многолетние лидеры, демонстрирующие высокую эффективность, Wacker и Hemlock покинули первые места еще в 2018 г. (К тому же Hemlock стал жертвой китайских контрсанкций, и был вынужден резко сократить объем выпускаемой продукции). Правда, следует учесть, что эти компании, а также японские Tokuyama и Mitsubishi — основные производители более затратного и более дорогого ПКК «электронного» качества (рис. 6).

В 2019—2021 гг. ситуация еще более изменилась. По различным оценкам, в 2020 г. мировое производство ПКК достигло объема 521—545 тыс. т. При этом ~440 тыс. т. составила продукция предприятий Китая. В 2021 г., согласно предварительным оценкам, мировое производство ПКК вышло на уровень 546—575 тыс. т., из них Китай — 470 тыс. т., т. е. более 80 % (рис. 7).

Следует ожидать, что после 2021 г. доминирование китайских производителей на рынке ПКК для солнечной энергетики только усилится.

В 2019 г. доля Китая в мировом производстве солнечных панелей составляла 71 %, полупроводниковых пластин — 97 %, элементов — 79 %, ПКК — 79 %. В 2020 г. Китай обладал уже 80 % производственных мощностей по производству ПКК. Планы по расширению производства имеют все китайские производители ПКК (табл. 4).

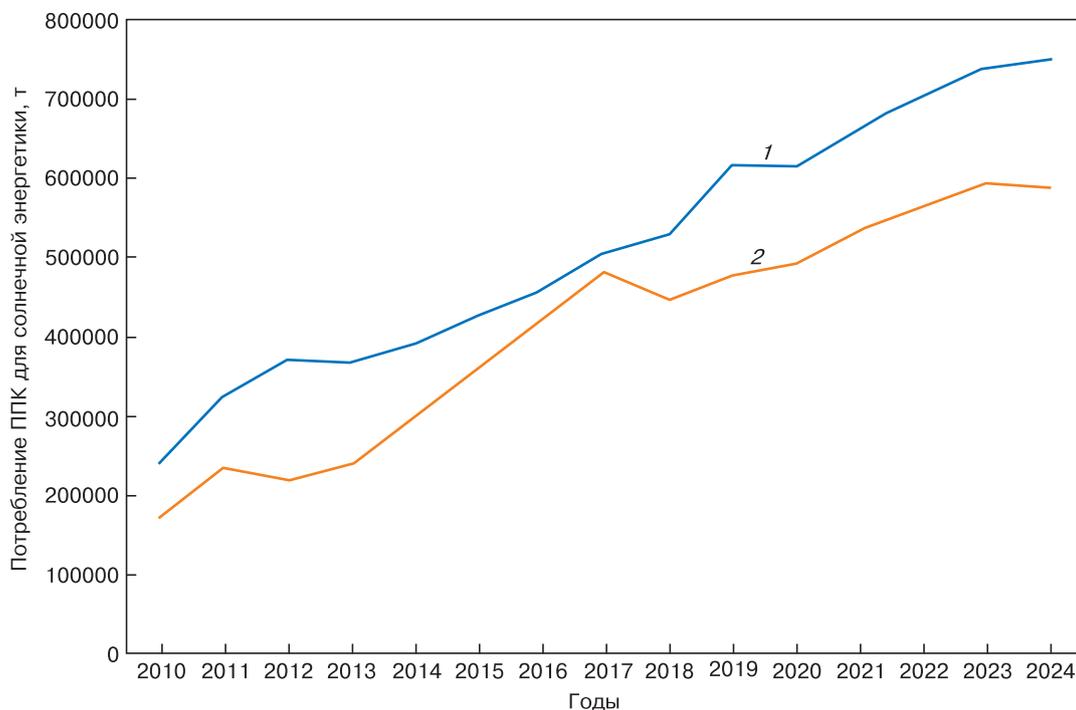


Рис. 4. Рост производственных мощностей по выпуску (1) и фактическое производство ПКК (2) (солнечного+ электронного качества) на 2004—2024 гг. (Источник: <https://www.bloomberg.com>)

Fig. 4. Growth of the number of poly-Si production facilities and actual output (solar + electronic grade) in 2004–2024. Source: <https://www.bloomberg.com>

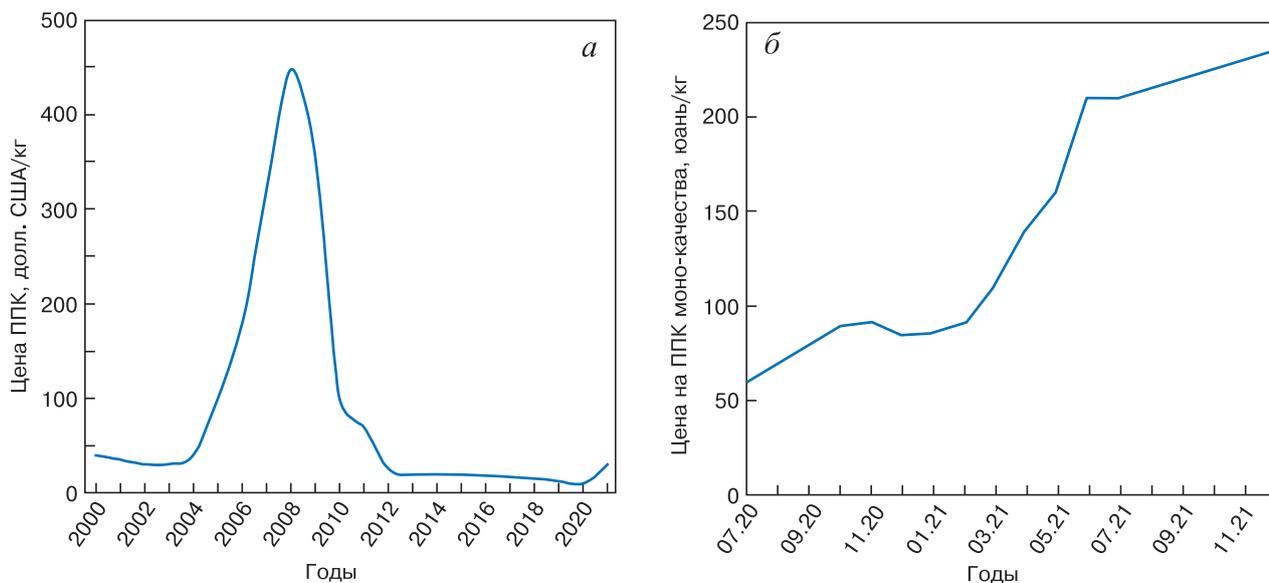


Рис. 5. Динамика цен на кремний для солнечной энергетики: а — 2002—2021 гг. ; б — июль 2020 г. — декабрь 2021 г. (Источник: <https://www.bernreuter.com>)

Fig. 5. Solar grade silicon price dynamics: (a) 2002–2021 (\$/kg), (б) July 2020 – December 2021 (¥/kg). Source: <https://www.bernreuter.com>

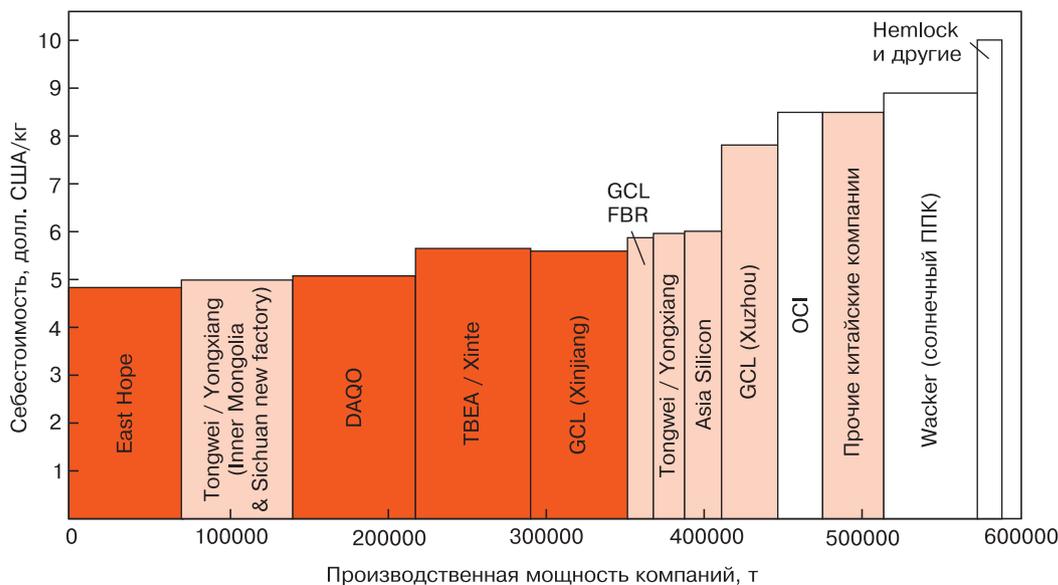


Рис. 6. Эффективность и производственная мощность основных производителей ППК в 2021 г. (Источник: <https://www.bloomberg.com>)

Fig. 6. Efficiency and product output of major poly-Si producers in 2021. Source: <https://www.bloomberg.com>

Еще в 2012—2013 гг. в Китае многие производители ППК сократили объемы производства, остановили его или обанкротились, что объясняли сохраняющимся разрывом эффективности производства на отдельных предприятиях по выпуску ППК в Китае по сравнению с уровнем технологий «старых производителей» США, Германии и пр. Этот разрыв в последние годы кардинально сократился благодаря развитию в стране технологий рекуперации отходящих из реактора газов и построению производства с низким уровнем энергопотребления. Так, компания Daqo New Energy Corp. еще в 2017 г. одной из первых объявила о сокращении операционной себестоимости (*Cash Cost*)

производства ППК до 8,95 долл. США/кг. Daqo New Energy Corp. профинансирует в 2022 г. строительство четырех новых заводов. Компания намерена инвестировать в проекты 33,3 млрд юаней (5,2 млрд долл. США). Более 70 % этих средств должно пойти на открытие двух предприятий в городе Баотоу (автономный район Внутренняя Монголия). На одном будет производиться 200 тыс. т. ППК в год. На другом — 21 тыс. т. ППК в год. Строительство обоих проектов начнется в первом квартале 2022 г. Их первые очереди должны быть готовы ко второму кварталу 2023 г. Оставшаяся часть инвестиций в размере 9 млрд юаней (\$1,4 млрд) должна пойти на два других проекта в Баотоу. Производственные

Рис. 7 Производители ПКК в 2020 г.  
Источник: <https://www.bloomberg.com>

Fig. 7. Poly-Si production in 2021.  
Source: <https://www.bloomberg.com>

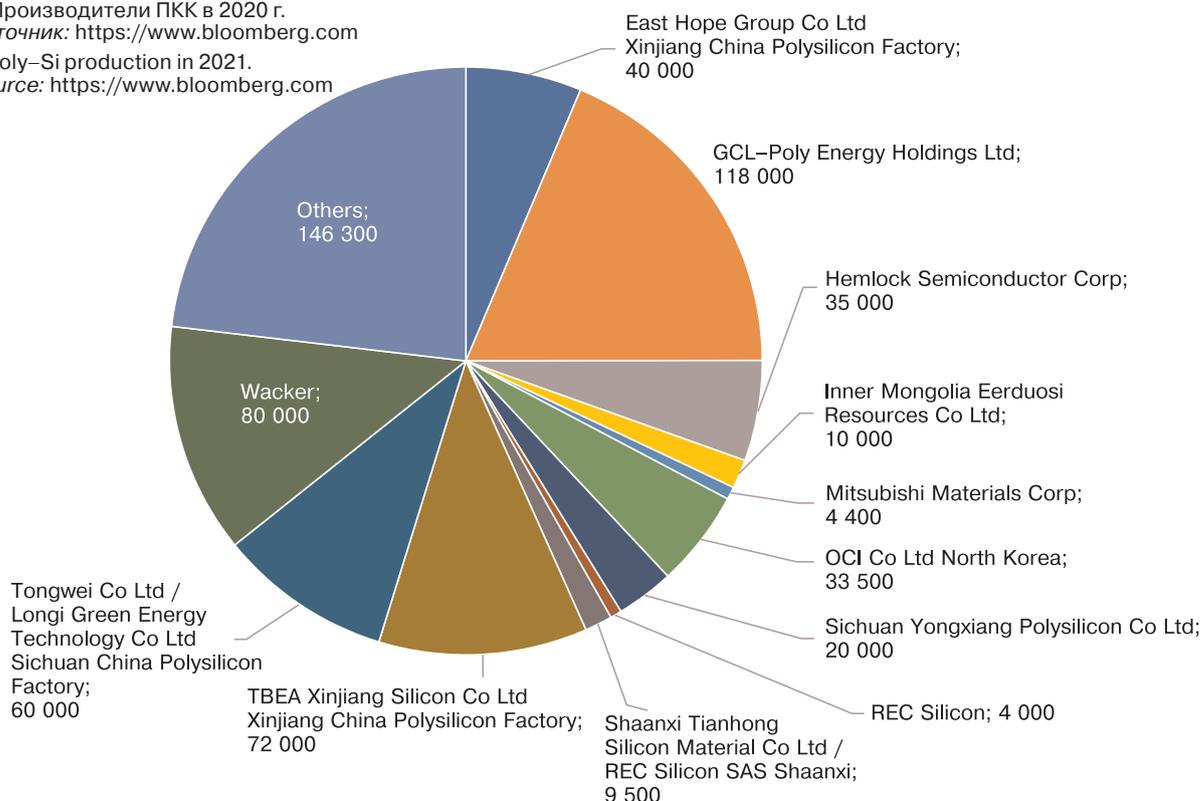


Таблица 4

**Планы по расширению производства некоторых производителей поликристаллического кремния**  
Production build-up plans of some poly-Si producers

Компания	Расположение	Планируемая мощность, тыс. т.	Сроки	Примечания
GCL-Poly	Синцзянь	20	Начало в 2021 г.	Традиционный Сименс-процесс
	Лэшань	100	Начало в 2022 г.	Гранулированный кремний
	Сюйчжоу	100	1 очередь в 2021 г.	— " —
	Баотоу	300	Планируется 1 очередь в 60 тыс. т.	— " —
Xinte	Баотоу	200	Планируется 1 очередь в 100 тыс. т.	Традиционный Сименс-процесс
Tongwei	Лэшань	35	Начало в 2021 г., 3 квартал	— " —
	Баотоу	45	Начало в 2022 г.	— " —
	Баошань	40	Начало в 2021 г., 4 квартал	— " —
Tongwei TRW	Баотоу	40	Начало в 2022 г.	— " —
Tongwei Jinko	Лэшань	45	Начало в 2022 г.	— " —
Dazhi New Energy	Синцзянь	35	Начало в 2021 г.	— " —
Asia Silicon Industry	Синин	60	30 тыс. т. в начале 2022 г.	— " —
OCI	Малайзия	5	Начало в 2022 г.	— " —
Jiangsu	Шиминшан	100	—	— " —
TBEA JinkoSolar JA Technology	Баотоу	100	Не позднее июня 2023 г.	— " —
Tongwei shares	Лэшань	200	Начало в декабре 2022 г.	— " —
Xinjiang Jingnuo	Хуг	100	—	— " —

мощности рассчитаны на выпуск 300 тыс. т. ПКК и 200 тыс. т./год кремнийорганических соединений [7—9].

Часть аналитиков ожидают, что после 2024 г. профицит рынка ПКК останется. Несмотря на это, большинство китайских производителей создают новые мощности. Представляется, что это связано с провозглашенным «зеленым поворотом» в мире, а также продолжающимся разделением мирового рынка на политико-экономические блоки, внутри которых каждый участник ставит задачу обеспечить свое развитие. Кроме того, Китай много инвестирует в зеленую энергетику и разработку экологически чистых способов получения энергии, так что внутренний рынок становится для китайских производителей основным драйвером развития.

В Соединенных Штатах Америки из трех производителей ПКК — Hemlock Semiconductor Group, SunEdison (MEMC Electronics) and Renewable Energy Corp. — остался только Hemlock. Суммарные мощности компании для ПКК «солнечного» качества составили 18 тыс. т. Hemlock является единственным производителем ПКК для электроники методом Сименс-МС, используемого для получения высокоомного монокристаллического кремния для силовой электроники методом бесцветной зонной плавки.

В Германии компания Wacker Chemie нарастила мощности до 84 тыс. т. Среди корейских компаний-производителей осталась только компания OCI (бывшая DC Chemical) с мощностями 27 тыс. т.

В Японии ПКК производили четыре компании: Tokuyama, Mitsubishi, OSAKA Titanium Technologies и M. SETEK. Последняя выпускала ПКК только «солнечного» качества, причем все ее производственные мощности также расположены в Китае.

Среди японских производителей кремния осталась компания Mitsubishi. Данных о сегодняшнем состоянии других компаний нет. Представляется, что сохранились только производители ПКК «электронного» качества [12—14].

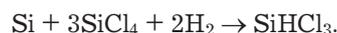
Стоит заметить, что в последние годы резко проявилась тенденция «вертикализации» китайских компаний, что ведет к немалой вероятности появления больших проблем с приобретением ПКК на рынке по приемлемой цене, так как большую часть новых мощностей китайские компании планируют «под себя».

### **Замечания о технологии «реактор кипящего слоя»**

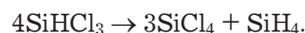
Использование моносилановой технологии (см. рис. 2, б) теоретически имеет ряд преимуществ [3, 10]:

- разложение  $\text{SiH}_4$  происходит при сравнительно низкой температуре и с меньшим расходом энергии;
- в продуктах реакции отсутствуют агрессивные агенты (хлористый водород, хлорсиланы и др.), снижающие чистоту получаемого ПКК;
- очистка  $\text{SiH}_4$  от большинства примесей является более эффективной из-за различия свойств  $\text{SiH}_4$  и других соединений.

Поэтому моносилановая технология имела много сторонников среди исследователей. Для получения  $\text{SiH}_4$  сегодня в мире шире всего используется Union Carbide-процесс, который начинается с гидрохлорирования кремния:



Далее проводится диспропорционирование:



$\text{SiH}_4$  очищают и направляют в реактор для пиролиза и получения ПКК:



Однако прогресс в технологии производства ПКК методом Сименс-ТХС шел столь быстро, что вытеснил на обочину все другие методы его получения: они просто не успели пройти этапы технологического развития от опытной к промышленной стадии. Исключением является метод КС-МС или FBR, разработчики которого заявляли о возможности достичь операционной себестоимости ПКК (Cash Cost) ниже 10 долл. США/кг. Первый крупный завод по получению ПКК методом КС был построен Ethyl Corporation в 80-х годах XX в., а MEMC Electronic Materials (ныне SunEdison) продолжило этот проект в 90-е гг. XX в.

Интерес к данной технологии рос, Wacker Chemie создало небольшое производство КС-ТХС в 1993 г., а компания REC создала крупный проект КС-МС в 1995 г. В 2010 г. компании SunEdison и Samsung подписали меморандум о намерениях о строительстве завода мощностью 10 тыс. т/год в Южной Корее по технологии, подобной той, которая используется на предприятии MEMC в Техасе. В 2012 г. китайская GCL-Poly анонсировала создание производства чистого моносилана, что явилось первым шагом к строительству завода по производству ПКК методом КС-МС. В 2016 г. GCL-Poly приобрела активы и технологии, связанные с процессом КС-МС, у SunEdison. Таким образом, компания имела значительное количество времени и выделила ресурсы для продвижения этого метода производства ПКК. В 2021 г. компания GCL-Poly объявила, что совершила

значительные прорывы в развитии своего процесса КС–МС. В этом году компания GCL–Poly построила производственную линию специально для выпуска гранулированного ПКК методом КС–МС мощностью 10 тыс. т, а качество получаемого гранулированного ПКК было проверено клиентами. Компания GCL–Poly заявила, что в ключевых показателях стандарта качества есть заметные улучшения.

До сих пор поликремневые гранулы у стен реактора вырастали с высоким содержанием металлических примесей. Наконец, КС–процесс попутно порождает много кремниевой пыли (*dust*), которая не может использоваться по назначению.

В 2021 г. GCL–Poly заявила, что ее процесс КС–МС теперь соответствует процессу «Сименс–ТХС» с точки зрения качества. Компания выполнила долгосрочные НИОКР, включая материал облицовки для внутренней стенки реактора. Компания способна удерживать низкие производственные затраты при повышении качества продукции. В частности, количество загрязняющих веществ значительно уменьшилось. На текущей стадии развития полное содержание металлических примесей в ПКК находится на уровне 10 ppbw, содержание углерода — под 0,4 ppma, и водорода — под 20 ppma.

Содержание водорода на выходе производственной линии мощностью 10 тыс. т почти на 30 % меньше по сравнению с другой производственной линией на 6 тыс. т, которая была построена GCL–Poly ранее. Кроме того, содержание тонкодисперсного порошка снижено до 0,1 %. Что касается выхода ПКК, то GCL–Poly утверждает, что ее КС–МС–процесс достиг выхода 99 % для гранулированного ПКК в целом и 90 % для гранулированного ПКК, который может быть использован для получения слитков монокристаллического кремния.

По сравнению с Сименс–процессом процесс КС–МС потребляет меньше электроэнергии. Однако до сих пор это преимущество сводилось на нет высокой долей ультратонкого порошка кремния в выходном продукте. Гранулы ПКК, полученные GCL–Poly с помощью процесса КС–МС, имеют сферическую форму и диаметр ~ 2 мм. Они не только соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к материалам для производства монокристаллических слитков, но и совместимы с автоматизированной системой подачи загрузки в тигель (простота загрузки и транспортировки). Кроме того, создание производственной линии на основе этой технологии потребовало от компании инвестиций в размере не более 700 млн юаней, а потребление электроэнергии на производственной линии в процессе эксплуатации не превышает 20 кВт × ч/кг. В целом, GCL–Poly утверждает, что гранулированный ПКК из его процесса является

подходящим сырьем для производства монокристаллического кремния. В 2020 г. демонстрационный проект применения технологии гранулированного кремния GCL–Poly был официально запущен в г. Суйчжоу, что стало еще одним шагом приближения к массовому производству гранулированного кремния. В настоящее время GCL–Poly имеет мощности по выпуску гранулированного кремния в Суйчжоу, и к концу 2021 г., по предварительным оценкам, компания выпустила ~ 30 тыс. т. Для удовлетворения растущего спроса компания продолжит расширять производство в будущем. GCL–Poly планирует производить в Лешане 100 тыс. т гранулированного кремния с начала 2022 г., кроме того, она подписала намерения производить 300 тыс. т гранулированного кремния для исследований и разработок в Shangshu Machine Control. Первый этап производственной мощности составляет 60 тыс. т. Планируется, что он будет запущен в производство в Баотоу (см. табл. 4) [10].

Большие инвестиции GCL–Poly в гранулированный кремний демонстрируют широкие перспективы рынка этого материала. Гранулированный кремний имеет целый ряд преимуществ: низкое энергопотребление, низкая стоимость и непрерывность производства. Он компенсирует слабые стороны метода Сименс–ТХС. Благодаря широкомасштабному производству и использованию гранулированный кремний будет дополнять метод Сименс–ТХС как хороший дополнительный материал для компоновки загрузки в тигель с ПКК по процессу Сименс–ТХС, потому что улучшается заполнение тигля. Также гранулы КС — это «идеальный материал» для реализации непрерывного метода выращивания монокристаллов по Чохральскому с дозагрузкой. Ниже приведены объемы производства ПКК (в тыс. т) методами Сименс–ТХС и КС–МС за 2020 и 2021 гг. [15–18].

### Производство сопутствующих продуктов

Как отмечалось выше, для экономики метода Сименс–ТХС необычайно важным является вопрос выбора схемы утилизации или использования избыточного тетрахлорида кремния. Можно сказать, что от решения этого вопроса зависят успех или неуспех проектов по созданию новых производств [3]. Основные области применения тетрахлорида кремния и некоторых его производных приведены в табл. 5.

### Ситуация в России

В табл. 6 приведены сведения о состоянии производства металлургического кремния на всех заводах России и стран СНГ по состоянию на 2021 г. [2].

Таблица 5

**Основные области применения тетрахлорида кремния и некоторых его производных [4]**  
**Main application domains of silicon tetrachloride and its derivatives**

Материал	Область применения
Тетрахлорид кремния	Эпитаксия кремния, полупроводниковый кремний, солнечный кремний, волоконные световоды, силикагель, органохлорсиланы, кремнийорганические полимеры, кремниевая кислота, силицирование стали
Этилсиликат	Выплавляемые модели для точного литья, коррозионнозащитные покрытия, термостойкие краски, материалы для гелиоэнергетических панелей, производство силиконов, используемых в качестве смазки, специальные трансформаторные масла, высокотемпературные теплообменные жидкости, масла для диффузионных насосов, модифицированные смолы, термостойкие клеи, пленки из оксида кремния для маскирования поверхности полупроводников, пластмассы, полимеры
Аэрозольный диоксид кремния (аэросил)	Наполнитель для смол и клеев, аэрозоли, косметика, лекарства, смазки, полирующие материалы, химикаты, кварц, тиксотропный агент в лаках и красках, наполнитель для пластмасс и резины
Кварц, в том числе высокочистый	Тигли, лодочки и другие контейнеры для получения, переработки и хранения высокочистых веществ, лабораторная аппаратура и посуда, трубы, арматура, приборы, иллюминаторы, смотровые стекла, оптические приборы, светотехнические детали, оптика
Нитрид кремния	Узлы и детали, работающие при высоких температурах: сопла реактивных двигателей, облицовка и другие детали ракет; различные контейнеры для плавки, кристаллизации и диффузионных процессов (высокочистых материалов), чехлы термопар, основа для нанесения поглотителя нейтронов (гафния)
Карбид кремния	Защитные покрытия (например, покрытие графита в эпитаксиальных установках), электроника
Тетраэтоксисилан	Оптическое стекло, аэросил, кварц, изолирующие слои диоксида кремния в полупроводниковых приборах, кремнийполимеры

Таблица 6

**Производство металлургического кремния в России и СНГ [2]**  
**CIS total premises as by 2021**

Страна	Завод	Год пуска	Производственная мощность, тыс. т	Примечания
Украина	ЗалК, Цех кремния	1938	25	Разрушен
Россия	УАЗ, Цех кремния	1942	26	2019 г. остановлен
Россия	ИркАЗ, Цех кремния С 1988 г. ЗАО «Кремний»Русал	1981	34	2 <sup>ая</sup> очередь остановлена в 2020 г., работает 4 печи из 6
Россия	БрАЗ, Цех кремния	1987	40	С 2000 г. переведен на производство FeSi
Казахстан	ТОО «Тау Кен Темир»	2009	24	2019 г. остановлен

Из табл. 6 следует, что развитие российского производства ПКК в первую очередь требует решения вопроса устойчивого снабжения сырьем.

Но основная проблема состояла в том, что до 2021 г. решение вопроса развития производства ПКК в России упиралось в низкую внутреннюю потребность (700—800 т./год) и в низкие мировые цены, которые делали нереалистичным создание производства, ориентированного на экспорт. Нам представляется, что общая ситуация стала медленно меняться:

– в России принято решение о дальнейшем развитии солнечной энергетики и строитель-

стве 1 ГВт фабрики в Калининградской области по производству солнечных элементов (Энкор). Это потребует кремниевых пластин в объемах, которые делают проблематичным устойчивое снабжение производства по сторонним контрактам с зарубежными производителями, причем следует помнить, что речь идет о высококачественных пластинах *n*-типа проводимости. Кроме того, компания Соллар Системз также имеет производство монокристаллического кремния в Подольске, и заявляет об увеличении производственных мощностей. Это означает, что потребность в ПКК только для целей производства монокристаллов составит по-

рядка 7 тыс. т/год, что очень близко к рекомендуемой специалистами мощности производства ПКК (10 тыс. т/год), обеспечивающей конкурентную себестоимость этого продукта. При этом производство и ПКК, и монокристаллов и пластин должны быть локализованы в России.

Реализация независимого собственного полного цикла производства микроэлектроники – задача стратегическая для России. Стратегия развития электронной промышленности России предусматривает рост применения отечественной электроники в 2,7 раза к 2030 г. По всему ощущается твердое намерение властей «дожать» давно наболевший вопрос с микроэлектроникой. И анализируя подходы, сравнивая с тем, что было ранее, мы полагаем, что вероятность решения в той или иной мере этого вопроса достаточно высока. Если будущий проект производства ПКК будет предусматривать производство ПКК электронного качества, то это, помимо улучшения экономических показателей проекта, будет давать возможность рассчитывать на государственную поддержку.

Мировые цены на солнечный ПКК стали расти. Это открывает некоторое «окно возможностей». Понимая, что рынок будет достаточно волатильным и снижение цен более чем вероятно, будущий проект производства ПКК должен быть составлен так, чтобы операционная себестоимость соответствовала лучшим практикам сегодняшнего мирового уровня производства солнечного ПКК (менее 10 долл. США/кг).

Сегодня в России существует еще одна область электроники и фотоники, которая испытывает крайнюю необходимость в развитии собственной сырьевой базы — это производство обособленного кварца и стекла. Выбор метода утилизации избыточного четыреххлористого кремния в производстве ПКК позволит не только улучшить экономические показатели проекта, но и решить важную проблему в смежных областях. Метод высокотемпературного гидролиза тетрахлорида кремния применяется в производстве изделий из высокочистого синтетического кварца: тиглей, лодочек, труб, оптических изделий [4]. Отличительной особенностью синтетического кварца, полученного из тетрахлорида кремния, является его предельно высокая чистота. Сумма примесей (алюминий, железо, кальций, бор и др.) в горном хрустале максимальной чистоты значительно превышает сумму этих примесей в синтетическом кварце.

Разработанная в Советском Союзе (Подольский ХМЗ) технология получения синтетического кварца, базирующаяся на высокотемпературном гидролизе тетрахлорида кремния, очищенного до суммарного содержания примесей  $1 \cdot 10^{-4}$  —  $1 \cdot 10^{-7}$  % (мас.), позволяет получать этот материал с уровнем суммарного содержания примесей не бо-

лее  $1 \cdot 10^{-4}$  —  $1 \cdot 10^{-5}$  % (мас.). Такой кварц примерно на один–два порядка чище кварца, полученного из природного сырья. В соответствии с технологией высокотемпературного гидролиза, высокочистый дисперсный диоксид кремния с размером частиц 0,1—100 мкм образуется в гидролизующем факеле, как и при производстве аэросила. Этот диоксид напыляется на формообразующую оправку из инертного материала. Сформированную таким образом пористую заготовку изделия подвергают затем уплотняющему спеканию при 1400—1500 °С с одновременной корректировкой формы изделия. Сходным образом получают заготовки, из которых после их спекания вытягивают светопроводящее волокно для волоконно–оптических линий связи. При использовании кварца для волоконной оптики особое значение имеет содержание в нем гидроксильной группы, существенно снижающей светопроводимость кварцевого волокна. Содержание гидроксила в синтетическом кварце, полученном в факеле водородсодержащего газа (водород, метан и др.) составляет  $(1—5) \cdot 10^{-2}$  % (мас.) [4].

Конечно, это не отменяет необходимости совершенствования собственно Сименс–процесса. Некоторые авторы считают, что настало время корректировки парадигмы современной технологии получения ПКК Сименс–методом [2, 20, 21]:

- отказ от энергоемкого производства технического кремния и синтеза трихлорсилана за счет перехода к прямому хлорированию специально подготовленного кремнезема, получению  $\text{SiCl}_4$  с последующим низкотемпературным гидрированием до  $\text{SiHCl}_3$ ;
- отказ от загрязняющих технологий механического дробления поликристаллических стержней, резки, использование современных «стерильных технологий» (электрогидравлическое дробление, «блистеринг» и др.);
- использование моносилана для подпитки рециркуляционной системы Сименс–процесса.

## Заключение

Нам представляется, что рынок ПКК входит в новую фазу развития. При сохраняющемся некотором профиците рынка в целом, провозглашенный всеми правительствами «зеленый поворот» в энергетике, развитие локальных рынков и восстановление цен до инвестиционного оптимума, способствовало появлению новых проектов заводов по производству ПКК. Однако новые проекты теперь должны соответствовать лучшим практикам, выработанным в период низких цен.

Отечественная солнечная энергетика, наконец, приблизилась к порогу, который делает рентабельным реализацию всей технологической цепочки производства фотовольтаической про-

дукции. В свою очередь, реализация производства ФЭП и ФЭМ в таких объемах позволит дать импульс по смежным направлениям (производство комплектующих и расходных материалов: изделия из композитов и изостатического графита, ламинирующих пленок, технологических газов, магнетронных мишеней и многое другое). Кроме того, обоснованным будет и производство оборудования для этих задач, поставки которого или затруднены, в связи с последствиями эпидемии, или проблематичны из-за санкционных ограничений и опасений. Краеугольной задачей, безусловно, будет являться создание производства ПКК-продукта, выпуск которого прекратился с распадом СССР и так и не возобновился в последующие годы, несмотря на ряд попыток, закончившихся абсолютными

неудачами. В настоящее время в России, наконец, сформировались условия для осуществления этого амбициозного и наиважнейшего для полупроводниковой индустрии проекта.

Важным является вопрос выбора технологических особенностей реализации метода Сименс-ТХС. Особенностью ситуации в России является наличие нескольких крайне важных рынков (солнечная энергетика, микроэлектроника, силовая электроника, фотоника, волоконная оптика), которые являются по мировым меркам незначительными и в равной мере испытывающими нехватку собственного сырья. По-видимому, для России особую ценность могут представлять комплексные проекты, которые позволят одновременно решить несколько проблем сырьевого обеспечения.

### Библиографический список

1. Наумов А.В., Пархоменко Ю.Н. Новая реальность рынка поликремния. В сб.: *XI Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («Кремний-2018»)*. Черноголовка, 22—26 октября 2018 г. С. 11.
2. Ерёмин В.П., Елисеев И.А. Состояние производства кремния в России и мире, его рафинирование до высоких марок и «солнечного» качества. В сб.: *XIII Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе (Кремний — 2020)*. Ялта, 21—25 сентября 2020 г. Под ред. Е.С. Горнева. М.: МАКС Пресс; 2020. 402 с. (С. 44). <https://doi.org/10.29003/m1554.Silicon-2020>
3. 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.
4. Сивошинская Т.И., Гранков И.В., Шабалин Ю.П., Иванов Л.С. Переработка тетраоксида кремния, образующегося в производстве полупроводникового кремния. М.: ЦНИИцветмет экономики и информ.; 1989. 44 с.
5. Митин В.В., Кох А.А. Развитие рынка и технологии производства поликристаллического кремния. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2017; 20(2): 99—106. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2017-2-99-106>
6. Photovoltaic Industry Price Trend: Polysilicon Sustains Minor Price Reduction While Large-Scale Products Remain Robust in Prices. <https://www.energytrend.com/pricereports/20201014-19600.html> (дата обращения: 27.12.2021).
7. Polysilicon the key factor in 2020 PV industry supply as value-chain production forecast at 140GW. <https://www.pv-tech.org/editors-blog/polysilicon-the-key-factor-in-2020-pv-industry-supply-as-value-chain-production-forecast-at-140gw> (дата обращения: 27.12.2021).
8. What's behind solar's polysilicon shortage — and why it's not getting better anytime soon. <https://www.bernreuter.com/newsroom/pdf-articles/> (дата обращения: 27.12.2021).
9. TrendForce: Prices of Polysilicon Expected to Remain Sturdy on High Levels in 2021 under Balanced Supply and Demand. <https://www.energytrend.com/research/20210107-20605.html>
10. Xinyi Solar to enter polysilicon production with launch of new entity and Yunnan-based facility. <https://www.pv-tech.org/xinyi-solar-to-enter-polysilicon-production-with-launch-of-new-entity-and-yunnan-based-facility/> (дата обращения: 27.12.21).
11. FBR polysilicon technology — promise or hype? <http://www.bernreuter.com/en/references/library.html> (дата обращения: 27.12.2021).
12. Daqo polysilicon demand hit by 'dramatic rise' in ASPs. <https://www.pv-tech.org/news/daqos-polysilicon-demand-hit-by-dramatic-rise-in-asps> Share (дата обращения: 27.12.2021).
13. Daqo begins pilot production at new polysilicon facility, targets 105,000MT of capacity by start of next year. <https://www.pv-tech.org/daqo-begins-pilot-production-at-new-polysilicon-facility-targets-105000mt-of-capacity-by-start-of-next-year/>
14. Global and China Polysilicon Industry Report 2019—2023. <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/05/24/1843135/0/en/Global-and-China-Polysilicon-Industry-Report-2019-2023.html> (дата обращения: 27.12.2021).
15. China's polysilicon output will reach 450,000 tons in 2020. <https://www.funcmater.com/china-s-polysilicon-output-will-reach-450-000-tons-in-2020.html> (дата обращения: 24.02.2020).
16. PV Price Watch: Module prices stable as polysilicon prices continue downward trend. <https://www.pv-tech.org/pv-price-watch-module-prices-stable-as-polysilicon-prices-continue-downward-trend/> (дата обращения: 27.12.2021).
17. Fu R., James T.L., Woodhouse M. Economic measurements of polysilicon for the photovoltaic industry: market competition and manufacturing competitiveness. *IEEE J. Photovoltaics*. 2015; 5(2): 515—524. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2014.2388076>
18. Du Pont de Nemours: Divests Trichlorsilane Business and its Stare in Hemlock Semiconductor Joint Venture. [www.marketscreener.com/quote/stock/](http://www.marketscreener.com/quote/stock/) (дата обращения: 09.09.2020).

19. Photovoltaic I: Polycrystalline Silicon. <https://www.globalmarketmonitor.com> (дата обращения: 27.12.2021).

20. Яркин В.Н., Кисарин О.А., Критская Т.В. Методы получения трихлорсилана для производства поликристаллического кремния. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2021; 24(1): 5—26. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-5-26>

21. Критская Т.В., Шварцман Л.Я., Додонов В.Н., Кравцов А.А. Новые направления модернизации технологии кремния полупроводниковой чистоты. В сб.: *XIII Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе (Кремний — 2020)*. Ялта, 21—25 сентября 2020 г. Под ред. Е.С. Горнева. М.: МАКС Пресс; 2020. 402 с. (С. 27). <https://doi.org/10.29003/m1554.Silicon-2020>

### References

1. Naumov A.V., Parkhomenko Yu.N. New reality of the polysilicon market. *XI Intern. conf. on topical issues of physics, materials science, technology and diagnostics of silicon, nanoscale structures and devices based on it* (“Silicon-2018”). Chernogolovka; 2018. p. 11. (In Russ.)

2. Eremin V.P., Eliseev I.A. State of silicon production in Russia and the world, its refining to high grades and “solar” quality. *XIII Intern. conf. on topical issues of physics, materials science, technology and diagnostics of silicon, nanoscale structures and devices based on it* (“Silicon-2020”). Yalta; 2020. p. 44. (In Russ.)

3. Falkevich E.S., Pulner E.O., Chervonyi I.F., Shvartsman L.Ya., Yarkin V.N., Salli I.V. Semiconductor silicon technology. Moscow: Metallurgiya; 1992. 408 p. (In Russ.)

4. Sivoshinskaya T.I., Grankov I.V., Shabalin Yu.P., Ivanov L.S. *Processing of silicon tetrachloride formed during the production of semiconductor silicon*. Moscow: Ekonomika, 1989, 49 p. (In Russ.)

5. Mitin V.V., Kokh A.A. The development of the market and the production technology of polycrystalline silicon. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2017; 20(2): 99—106. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2017-2-99-106>

6. Photovoltaic Industry Price Trend: Polysilicon Sustains Minor Price Reduction While Large-Scale Products Remain Robust in Prices. <https://www.energytrend.com/pricequotes/20201014-19600.html> (accessed: 27.12.2021).

7. Polysilicon the key factor in 2020 PV industry supply as value-chain production forecast at 140GW. <https://www.pv-tech.org/editors-blog/polysilicon-the-key-factor-in-2020-pv-industry-supply-as-value-chain-production-forecast-at-140gw> (accessed: 27.12.2021).

8. What’s behind solar’s polysilicon shortage – and why it’s not getting better anytime soon. <https://www.berneuter.com/newsroom/pdf-articles/> (accessed: 27.12.2021).

9. TrendForce: Prices of Polysilicon Expected to Remain Sturdy on High Levels in 2021 under Balanced Supply and Demand. <https://www.energytrend.com/research/20210107-20605.html>

10. Daqo polysilicon demand hit by ‘dramatic rise’ in ASPs. <https://www.pv-tech.org/news/daqos-polysilicon-demand-hit-by-dramatic-rise-in-asps> (accessed: 27.12.2021).

11. Daqo begins pilot production at new polysilicon facility, targets 105,000MT of capacity by start of next year.

<https://www.pv-tech.org/daqo-begins-pilot-production-at-new-polysilicon-facility-targets-105000mt-of-capacity-by-start-of-next-year/> (accessed: 27.12.2021).

12. Global and China Polysilicon Industry Report 2019—2023. <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/05/24/1843135/0/en/Global-and-China-Polysilicon-Industry-Report-2019-2023.html> (accessed: 27.12.2021).

13. Xinyi Solar to enter polysilicon production with launch of new entity and Yunnan-based facility. <https://www.pv-tech.org/xinyi-solar-to-enter-polysilicon-production-with-launch-of-new-entity-and-yunnan-based-facility/> (accessed: 27.12.2021).

14. FBR polysilicon technology – promise or hype? <http://www.berneuter.com/en/references/library.html> (accessed: 27.12.2021).

15. China’s polysilicon output will reach 450,000 tons in 2020. <https://www.funmater.com/china-s-polysilicon-output-will-reach-450-000-tons-in-2020.html> (accessed: 24.02.2020).

16. PV Price Watch: Module prices stable as polysilicon prices continue downward trend. <https://www.pv-tech.org/pv-price-watch-module-prices-stable-as-polysilicon-prices-continue-downward-trend/> (accessed: 27.12.2021).

17. Fu R., James T.L., Woodhouse M. Economic measurements of polysilicon for the photovoltaic industry: market competition and manufacturing competitiveness. *IEEE J. Photovoltaics*, 2015; 5(2): 515—524. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2014.2388076>

18. Du Pont de Nemours: Divests Trichlorosilane Business and its Stare in Hemlock Semiconductor Join Venture. [www.marketscreener.com/quote/stock/](http://www.marketscreener.com/quote/stock/) (accessed: 09.09.2020).

19. Photovoltaic I: Polycrystalline Silicon. <https://www.globalmarketmonitor.com> (accessed: 27.12.2021).

20. Jarkin V.N., Kisarin O.A., Kritskaya T.V. Methods of trichlorosilane synthesis for polycrystalline silicon production. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2021; 24(1): 5—26. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-5-26>

21. Kritskaya T.V., Shvartsman L.Ya., Dodonov V.N., Kravtsov A.A. New Directions for Modernization of Semiconductor—Purity Silicon Technology. *XIII Intern. conf. on topical issues of physics, materials science, technology and diagnostics of silicon, nanoscale structures and devices based on it* (“Silicon-2020”). Yalta; 2020. p. 27. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Наумов Аркадий Валерьевич** — руководитель направления, АО ОКБ «Астрон», ул. Парковая, д. 1, Лыткарино, Московская область, 140080, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6081-8304>; e-mail: [naumov\\_arkadii@mail.ru](mailto:naumov_arkadii@mail.ru)

**Орехов Дмитрий Львович** — канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «НТЦ «Тонкопленочных технологий в энергетике», Политехническая ул., д. 28, Санкт-Петербург, 194021, Россия; e-mail: [d.orehov@hevelsolar.com](mailto:d.orehov@hevelsolar.com)

**Arkady V. Naumov** — Head of Development, 1 Astrohn Technology Ltd., 1 Parkovaya Str., Lytkarino, Moscow Region 140080, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6081-8304>; e-mail: [naumov\\_arkadii@mail.ru](mailto:naumov_arkadii@mail.ru)

**Dmitry L. Orehov** — Cand. Sci. (Eng.), General Director, Research and Development Center for Thin-Film Technologies in Energetics, 28 Politekhnicheskaya Str., St. Petersburg, 194021, Russia; e-mail: [d.orehov@hevelsolar.com](mailto:d.orehov@hevelsolar.com)

*Поступила в редакцию 25.01.22; поступила после доработки 04.03.2022; принята к публикации 30.03.2022  
Received 25 January 2022; Revised 4 March 2022; Accepted 30 March 2022*

\* \* \*