

Прогресс в технологиях полупроводникового кремния (обзор)*А. В. Наумов, Д. Л. Орехов, Н. А. Кульчицкий*

Рассмотрено текущее состояние и перспективы развития мировых рынков полупроводникового поликристаллического кремния и монокристаллического солнечного и электронного кремния, получаемого методом Чохральского (Cz-Si). Отмечено, что после периода низких цен на ПКК, что препятствовало инвестициям в отрасль, наступает период выравнивания цен до уровня инвестиционной привлекательности. Приведены оценки баланса спроса и предложения до 2024 года и в долгосрочной перспективе. Проанализированы основные технологические схемы получения ПКК и Cz-Si 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, способствовало появлению новых проектов заводов по производству ПКК. Отечественная солнечная энергетика наконец приблизилась к порогу, который делает рентабельным реализацию всей технологической цепочки производства фотовольтаической продукции. Следующим этапом должно стать расширение локализованного производства Cz-Si в дополнение к существующему сегодня единственному производству в Подольске.

Ключевые слова: солнечная энергетика, микроэлектроника, поликремний, Сименс-метод, метод «кипящего слоя», метод Чохральского, спрос, предложение, баланс, цены и ценообразование.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-34-52

ЛИТЕРАТУРА

Наумов Аркадий Валерьевич¹, рук. направления.Орехов Дмитрий Львович², ген. директор, к.т.н.Кульчицкий Николай Александрович^{3,4}, зам. нач. управления, д.т.н.¹ Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон».

Россия, 140080, Московская область, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.

E-mail: info@astrohn.ru

² Общество с ограниченной ответственностью «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике».

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 28.

E-mail: d.orehov@hevelsolar.com

³ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

⁴ МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2022 г.

© Наумов А. В., Орехов Д. Л., Кульчицкий Н. А., 2022

1. Наумов А. В., Пархоменко Ю. Н. / XI Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («Кремний-2018»). (Черноголовка, 2018). С. 11.

2. Фалькевич Э. С., Пульнер Э. О., Червоний И. Ф., Шварцман Л. Я. Технология полупроводникового кремния. – М.: Металлургия, 1992.

3. Сивошинская Т. И., Гранков И. В., Шабалин Ю. П., Иванов Л. С. Переработка тетраоксида кремния, образующегося в процессе производства полупроводникового кремния. – М.: Экономика, ЦНИИ экономики и информации цвет. мет., 1989.

4. Митин В. В., Кох А. А. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20(2). С. 99. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2017-2-99-106>

5. 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: 18.02.2022).

6. 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: 18.02.2022).
7. What's behind solar's polysilicon shortage – and why it's not getting better anytime soon. <https://www.berneuter.com/newsroom/pdf-articles/> (дата обращения: 18.02.2022)
8. Trend Force: 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>
9. 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: 18.02.2022)
10. FBR polysilicon technology – promise or hype? <http://www.berneuter.com/en/references/library.html> (дата обращения: 18.02.2022)
11. Daqo polysilicon demand hit by ‘dramatic rise’ in ASPs. <https://www.pv-tech.org/news/daqos-polysilicon-demand-hit-by-dramatic-rise-in-aspsShare> (дата обращения: 27.12.21)
12. 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/>
13. 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: 18.02.2022).
14. 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: 18.02.2022).
15. 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: 18.02.2022).
16. Fu R., James T. L., Woodhouse M. // IEEE J. Photovoltaics. 2015. Vol. 5(2). P. 515. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2388076>
17. Яркин В. Н., Кисарин О. А., Критская Т. В. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24(1). С. 5. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-5-26>
18. Критская Т. В., Шварцман Л. Я., Додонов В. Н., Кравцов А. А. / XIII Междунар. конф. по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («Кремний-2020»). (Ялта, 2020). С. 27.
19. Шаиш Ю.М. Выращивание монокристаллов методом вытягивания. – М.: Металлургия, 1982.
20. <https://promvest.info/ru/novosti-promyshlennosti/v-kaliningradskom-regione-nachalostroitelstvo-krupneyshego-v-rossii-zavoda-po-vyipusku-oborudovaniya-dlya-solnechnoy-energetiki/> (дата обращения: 18.02.2022).
21. Мощности по выпуску поликремния позволят производить 1000 ГВт солнечных панелей в год к 2030 г. <https://renew.ru/moshnosti-po-vypusku-polikremniya-pozvolyat-proizvodit-1000-gvt-solnechnyh-panelej-v-godk-2030-g/> (дата обращения: 18.02.2022).
22. Uecker R. // Journal of Crystal Growth. 2014. Vol. 401. P. 7.
23. Zulehner W. Historical Overview of Silicon Crystal Pulling development. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510799004274> (дата обращения: 18.02.2022).
24. ZSC представил кремниевые пластины сверхбольшого формата 218,2 мм – RenEn <https://renew.ru/zsc-predstavil-kremnievye-plastiny-sverhbolshogo-formata-218-2-mm/> (дата обращения: 18.02.2022).
25. Интрига солнечной энергетики: ячейки n-типа или p-типа? – RenEn <https://renew.ru/solar-energy-intrigue-n-type-or-p-type-cells/> (дата обращения: 18.02.2022).

PACS: 85.60 Gz; 81.10.Fq

The recent progress of the semiconductor silicon technology (a review)

A. V. Naumov¹, D. L. Orekhov², and N. A. Kulchitsky^{3,4}

¹ Experimental Design Bureau “ASTROHN”, JSC
1 Park st., Lytkarino, Moscow region, 140080, Russia
E-mail: info@astrohn.ru

² Research and Development Center for Thin-Film Technologies in Energetics
28 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 194021, Russia

³ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

⁴ MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernardsky Ave., Moscow, 119454, Russia

Received February 14, 2022

Current state and prospects of development of world markets of semiconductor poly-Si and mono-Si are considered. Solar and electron grade silicon grown by Cz-Si method are under consideration. It was noted that after a period of low prices for poly-Si, which prevented financial investment in the industry, there is a period of price equalization to the level of investment attractiveness. Estimates of the balance of supply and demand until 2024 and in the long term are given. The main process diagrams of poly-Si and Cz-Si production under modern conditions are analyzed. It was noted that some surplus of the poly-Si market will continue in the near and medium term. However, the “green turn” proclaimed by all governments in the energy sector, the development of local markets and the restoration of prices to an investment-attractive level, contributed to the emergence of new projects for poly-Si plants. Domestic solar energy has finally approached the threshold, which makes it profitable to implement the entire technological chain of production of photovoltaic products. The next stage should be the expansion of localized production of Cz-Si in addition to the current sole fab in Podolsk.

Keywords: solar energy, microelectronics, poly-silicon, Siemens method, FBR-method, Czochralski method, demand, supply, balance, prices and pricing.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-34-52

REFERENCES

1. A. V. Naumov and Yu. N. Parhomenko, in *XI Mezhdunarodnaya konferenciya po aktual'nym problemam fiziki, materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya, nanorazmernyh struktur i priborov na ego osnove* («Kremnij-2018»). – (Chernogolovka, 2018). p. 11.
2. E. S. Fal'kevich, E. O. Pul'ner, I. F. Chervonyj, and L. Ya. Shvarcman, *Tekhnologiya poluprovodnikovogo kremniya* (Metallurgiya, Moscow, 1992).
3. T. I. Sivoshinskaya, I. V. Grankov, Yu. P. Shabalina, and L. S. Ivanov, *Pererabotka tetrahlorida kremniya, obrazuyushchegosya v processe proizvodstva poluprovodnikovogo kremniya* (Ekonomika, Moscow, CNII ekonomiki i informacii cvet. met., 1989).
4. V. V. Mitin and A. A. Koh, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Materialy elektronnoj tekhniki* **20(2)**, 99 (2017); <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2017-2-99-106>
5. 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> (date of application 18.02.2022).
6. 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> (date of application 18.02.2022).
7. What's behind solar's polysilicon shortage – and why it's not getting better anytime soon. <https://www.bernreuter.com/newsroom/pdf-articles/> (date of application 18.02.2022).
8. Trend Force: 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>
9. 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/> date of application 18.02.2022).
10. FBR polysilicon technology – promise or hype? <http://www.bernreuter.com/en/references/library.html> (date of application 18.02.2022).
11. 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 (date of application 27.12.21).

12. 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/>
13. 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> (date of application 18.02.2022).
14. 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> (date of application 18.02.2022).
15. 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/> (date of application 18.02.2022).
16. R. Fu, T. L. James, and M. Woodhouse, *IEEE J. Photovoltaics* **5(2)**, 515 (2015).
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2388076>
17. V. N. Yarkin, O. A. Kisarin, and T. V. Kritskaya, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Materialy elektronnoj tekhniki* **24** (1), 5 (2021);
<https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-5-26>
18. T. V. Kritskaya, L. Ya. Shvarcman, V. N. Dodonov, and A. A. Kravcov, in *XIII Mezhdunar. konf. po aktual'nym problemam fiziki, materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya, nanorazmernyh struktur i priborov na ego osnove* («Kremnij-2020»). (Yalta, 2020). P. 27.
19. Yu. M. Shashkov, *Vyrashchivanie monokristallov metodom vytyagivaniya* (Metallurgiya, Moscow, 1982).
20. <https://promvest.info/ru/novosti-promyshlennosti/v-kaliningradskom-regione-nachalostroitelstvo-krupneyshego-v-rossii-zavoda-po-vyipusku-oborudovaniya-dlya-solnechnoy-energetiki/> (date of application 18.02.2022).
21. Moshchnosti po vypusku polikremniya pozvolyat proizvodit' 1000 GVt solnechnyh panelej v 2030 godu.
<https://renen.ru/moshchnosti-po-vypusku-polikremniya-pozvolyat-proizvodit-1000-gvt-solnechnyh-panelej-v-godk-2030-g/> (date of application 18.02.2022).
22. R. Uecker, *Journal of Crystal Growth* **401**, 7 (2014).
23. W. Zulehner, Historical Overview of Silicon Crystal Pulling development,
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510799004274> (date of application 18.02.2022)
24. ZSC predstavil kremnievye plastiny sverhbol'shogo formata 218.2 mm – RenEn
<https://renen.ru/zsc-predstavil-kremnievye-plastiny-sverhbolshogo-formata-218-2-mm/> (date of application 18.02.2022).
25. Intriga solnechnoj energetiki: yachejki n-tipa ili p-tipa? – RenEn
<https://renen.ru/solar-energy-intrigue-n-type-or-p-type-cells/> (date of application 18.02.2022).