

УДК 669.782; 621.315.592

**КРЕМНИЙ В XXI ВЕКЕ**

Немчинова Н.В., Клёц В.Э., \*Непомнящих А.И.

*Иркутский государственный технический университет**\*Институт геохимии СО РАН, Иркутск*

**Благодаря значительным ресурсам солнечной радиации, поступающей на территорию России, в нашей стране солнечная энергия может являться серьёзной альтернативой традиционным видам энергетики. В статье показано преимущество выбора кремния как материала для изготовления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП); дан краткий обзор видов кремниевых основ при производстве солнечных модулей в настоящее время; прогноз эффективности таких модулей (до 2010 г) и пути снижения стоимости единицы производимой мощности кремниевых элементов.**

В статье «Перспективы развития солнечной энергетики» [1] мы показали, что данный вид энергии при соответствующем её оформлении является серьёзной альтернативой традиционной энергетике. В этой проблеме существенную роль играет кремний.

С 30-50 гг XX столетия кремний стал использоваться для изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечного света. Наша страна обладает высоким потенциалом по ресурсам солнечной энергии, составляющим более 2300 млрд. т условного топлива:

Таблица 1

<u>экономический регион</u>	<u>энергетический потенциал, млн.т у.т.</u>
Северный район	172 000
Северо-Западный	23 000
Центральный	60 000
Центрально-Черноземный	22 000
Волго-Вятский	33 000
Поволжье	87 000
Северный Кавказ	57 000
Урал	110 000
Западная Сибирь	318 000
Восточная Сибирь	560 000
Дальний Восток	858 000
<b>Россия в целом</b>	<b>2 300 000</b>

Наиболее благоприятными районами для использования солнечной энергии в России являются Астраханская и Читинская области, Северный Кавказ, Восточная Сибирь, Калмыкия, побережье Каспийского и Черного морей, Тува, Дальний Восток, Краснодарский край. Регион Восточной Сибири (в частности, Прибайкалье) богат солнечными ресурсами.

Первое практическое использование кремниевых солнечных батарей имело место в околоземном космическом пространстве. В 1958 г были запущены искусственные спутники Земли, осна-

щенные данными батареями: «Спутник-3» (СССР) и «Авангард-1» (США).

Научной базой для создания первых солнечных батарей стала разработка теории и технологии полупроводниковых материалов и приборных структур с *p-n*-переходом. В начале 1960-х гг были созданы первые солнечные фотоэлементы с *p-n*-переходом на основе арсенида галлия (Ga-As) [2].

Выбор кремния в качестве исходного материала для изготовления ФЭП обусловлен рядом факторов: 1) Si является наиболее распространенным после кислорода элементом на Земле (его кларк в земной коре составляет 27,6%; он

входит в большинство минералов и горных пород, составляющих твёрдую оболочку Земли) и промышленное производство его при переработке кварцевого сырья хорошо освоено [3-5]; 2) согласно теоретическим расчётам, для солнечного спектра наибольшая выходная электрическая мощность получается у ФЭП, изготовленных из тех полупроводников, ширина запрещённой зоны которых лежит в пределах 1-1,5 эВ; 3) ФЭП на основе кремния подходят для использования солнечного излучения по своей спектральной чувствительности; 4) по сравнению, например, с германиевыми приборами кремниевые менее чувствительны к температурным колебаниям; 5) Si позволяет достигнуть минимальных потерь на отражение.

В настоящее время КПД кремниевых ФЭП составляет в среднем 12–15%. В лабораторных условиях получены образцы с КПД  $\approx 25\%$ . Технология изготовления кремниевых ФЭП хорошо отработана и непрерывно совершенствуется. Именно кремниевые солнечные батареи можно видеть сегодня на крышах домов разных стран мира.

Существует реальная перспектива снижения стоимости кремниевых ФЭП на один-два порядка при внедрении новых автоматизированных методов производства, которые позволяют, в частности, получать кремниевые ленты, солнечные элементы большой площади и т.п.

По прогнозу, в 2005–2010 гг мировой спрос на поликристаллический кремний полупроводникового сорта будет увеличиваться на 6% в год; суммарный спрос на поликристаллический Si в мире, по прогнозу, в 2010 г достигнет 63 тыс. т [6].

А рост мирового производства солнечных элементов за последние 10 лет составит от 15% (при действующих мощностях) до 25% (при вводе в эксплуатацию новых предприятий) ежегодно. В 2000 г произведено солнечными батареями 278 МВт мощности, в 2001 г – более 300 МВт, а к 2020 г достигнет, по прогнозам, 18 ГВт. На рисунке 1 показана потребность кремния как базового материала для изготовления

ФЭП.

Какие же материалы на основе кремния используются в настоящее время для изготовления ФЭП?

**Плёнки аморфного кремния:** очень тонкие слои, толщиной менее 1 мкм, некристаллического (аморфного) кремния осаждаются на стеклянную, металлическую или пластиковую подложку в процессе, который позволяет создавать «элементы» площадью от 1 до 10000 см<sup>2</sup>. В настоящее время в эксплуатации находятся три завода по производству аморфного кремния.

**Монокристаллический кремний:** цилиндрические слитки монокристаллического кремния режутся на пластины 5 или 8 дюймов, которые трансформируются в круглые или квадратные солнечные элементы, монтируемые и свариваемые вместе в прочной упаковке для создания модуля. Упаковка обычно изготавливается из упрочнённого стекла, этилвинилацетата (EVA), сваренных вместе элементов и покрытия тыльной стороны фотоэлементов.

**Поликристаллический и мультикристаллический (полупроводниковый кристаллический) кремний:** брусок слитков поликристаллического Si объемом до 1/2 м<sup>3</sup> режутся на квадратные пластины размером 10,16 или 15,24 см, из которых изготавливаются элементы, которые затем монтируются и свариваются вместе в прочной упаковке для создания модуля. Заводы, работающие с отлитым в слитках поликристаллическим Si, производят солнечных модулей на 100 МВт.

**Ленточный (листовой) кремний:** ленты или листы кремния вытягиваются непосредственно из ванны расплавленного кремния в непрерывной операции, затем режутся на прямоугольники, которые трансформируются в элементы. Элементы монтируются и свариваются вместе для создания модулей. Объём производства обеспечивает выпуск ФЭП на 20 МВт.

**Плёнка на дешёвой подложке:** для изготовления элементов площадью 100-300 см<sup>2</sup>, из которых затем создаются модули в описанной выше упаковке, лист толстой плёнки (толщиной 50-150 мкм) мультикристаллического Si выращивается

на недорогой подложке. Элементы с эффективностью 10% и стоимостью ниже, чем у отлитого в слитках поликристаллического кремния, изготавливаются в настоящее время на новом заводе с объёмом производства ФЭП на 10 МВт.

**Концентраторы:** оптическая система фокусирует солнечный свет на небольшие солнечные элементы на основе монокристаллического Si. Элементы собираются в модули на двухосевых следящих основаниях. Используются либо оптические приборы точечного фокуса, либо оптические приборы линейного фокуса. Концентратор «видит» прямую солнечную радиацию, поэтому он особенно подходит климатам с высокой прямой радиацией, низкой облачностью, низким содержанием пыли или тумана и т.д. (тем самым, его географическое применение ограничено). Концентрирование с увеличением в 250-350 и воздушным охлаждением может способствовать в процессе опытного производства получению ФЭП с КПД более 24%. Уже установлено подобных систем общей мощностью  $\approx 500$  кВт.

Помимо кремния в качестве материала для ФЭП стали разрабатываться сплавы CuInSe<sub>2</sub> (CIS), GaAs, CdTe, а также каскадные элементы на основе аморфного кремния (Германия CIS). Из анализа данных прогноза снижения стоимости и увеличения эксплуатационных параметров модулей на кремнии видно, что любые другие преобразующие материалы неконкурентоспособны в области наземного использования на ближайшие 5-6 лет [7].

Таким образом, по прогнозам к 2010 г КПД модулей на основе монокристаллического кремния достигнет 22%. Эффективность производства на основе литья слитков поликристаллического Si останется  $\approx$  на 10% ниже и достигнет максимума 20%. КПД элементов на основе кремниевых листов (в настоящий момент по технологии выращивания плёнок с восьмиугольными краями компании «ASE Americas») будет находиться между величинами этого показателя для моно- и поликристаллического кремния (таблица 2).

Таблица 2. Динамика роста КПД (%) солнечных модулей промышленного производства

<i>Основные материалы для изготовления модулей</i>	2000	2005	2010
Монокристаллический Si	14-16	17	22
Поликристаллический Si	13-15	16	20
Ленточный (листовой) Si	14	16	21
Концентраторные кремниевые элементы	20	24	30
Аморфный кремний	5-7	8-10	12
CuInSe <sub>2</sub>	8-10	10-12	14
CdTe	Не оговорено	8-10	14
Кремниевые плёнки	Не оговорено	12	14

В настоящее время проводятся интенсивные разработки новых технологий производства Si, пригодного для изготовления солнечных элементов с высоким КПД. Ожидаемая себестоимость такого кремния – не более 15 \$ США/кг при мощности производства 5000 т/г [8]. Значительное снижение стоимости Si как необходимое условие получения фотоэлектрической энергии, конкурентноспособной с энергией, получаемой в других источниках, возможно двумя

путями: а) получение дешёвого кремния полупроводниковой чистоты; б) получение менее чистого кремния (и более дешёвого), но пригодного в производстве солнечных элементов – так называемого «солнечного» кремния.

Название «солнечный кремний» («terrestrial solar grade» или TSG) означает кремний, пригодный для изготовления солнечных элементов. Он должен иметь сумму электрически активных примесей (Al, Fe, Ti, V, P, B) в пределах  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  ат.

% или 0,1–10 ppm. Эти требования к чистоте материала «солнечного» качества существенно ниже, чем к Si электронного сорта для микроэлектроники. В связи с этим в настоящее время можно выделить несколько основных направлений разработки методов получения дешёвого «солнечного» кремния:

1) восстановление или пиролиз летучих соединений кремния;

2) фторидные методы получения высокочистого кремния;

3) рафинирование технического кремния с целью уменьшения содержания электрически активных примесных элементов;

4) восстановление кварцевого сырья повышенной чистоты углеродистым восстановителем с низкой зольностью.

Нами проводятся исследования по оптимизации карботермического процесса получения кремния, рафинирования технического кремния. При этом для получения (в руднотермической печи) кремния с минимальным содержанием примесей необходимо подбирать особо чистые шихтовые материалы: кварцит и углеродистый восстановитель [9]. При регулировании поступления примесей в карботермический процесс из шихтовых продуктов, проведении ковшевого рафинирования (например, продувкой воздухом, использованием флюсов), осуществления направленной кристаллизации (с выращиванием мультикристаллического кремния и одновременным удалением примесей методами вакуумной сублимации, дегазации расплава) возможно получение материала, годного по своим электрофизическим параметрам и структурным характеристикам для изготовления ФЭП [10,11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Клёц В.Э., Немчинова Н.В. Перспективы развития солнечной энергетики // Проблемы земной цивилизации. – Выпуск 14. – Ч.1. – Иркутск: ООО «Фрактал», 2006. – С. 167-181.
2. Технология полупроводникового кремния // Под ред. Э.С. Филькевича. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
3. Катков О.М. Выплавка технического кремния: Учеб пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1997. – 243 с.
4. Попов С. И. Металлургия кремния в трёхфазных руднотермических печах. – Иркутск, 2004. – 237 с.
5. Справочник металлурга. Производство кремния / А.Е. Черных, Б.И. Зельберг, А.Р. Школьников, А.И. Гринберг, Д.З. Баймашев, М.Р. Школьников, Е.Ю. Пологов, С.Б. Громов – С.-Пб: Изд-во МАНЭБ, 2004. – 555 с.
6. БИКИ №52 (8998), 13 мая 2006 г. – С. 12-13.
7. Грибов Б.Г., Зиновьев К.В. Получение высокочистого кремния для солнечных элементов // Неорганические материалы. – Т. 39, №7. – 2002. – С. 775 – 785.
8. Barth B.R., Gretella M.C. Revier Solar Grade Silicon // J. Mater. Sci. 1982. – V. 17. – P. 3077 – 3096.
9. Немчинова Н.В. Требования к сырью для получения кремния высокой чистоты // Матер. Совец. «КРЕМНИЙ-2004», г. Иркутск, 5-9 июля 2004. – Иркутск: Изд-во инст. географии СО РАН, 2004. – С. 29.
10. Непомнящих А.И., Красин Б.А., Елисеев И.А., Непомнящих А.А., Ерёмин В.П., Федосенко В.А., Золотайко А.В. Получение мультикристаллического кремния для солнечных элементов // Матер. X Нац. конф. по росту кристаллов «НКРК-2002», Москва, 2002. – М.: ИК РАН, 2002. – С. 3-94.
11. Nemchinova N.V., Belsky S.S., Krasin B.A. High-purity metallurgical silicon as base element for solar energy // European journal of Natural History, Materials of the conference «Climate and environment», Amsterdam, 21-23 april, 2006. – P. 95-96.

**The Silicon in the XXI century**

Nemchinova N.V., Kloytz V.E., \*Nepomnyaschikh A.I.,  
Irkutsk State Technical University

\*Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

Due to big resources of sun radiation on Russia territory received such energy may be serious competitor for traditional energy.

There are silicon advantages as material for production of photoelectric converters (PEC); review of types of Si bases under solar modules production in real time; the prognosis (until 2010) of such modules efficiency and the ways of decreasing of unit capacity cost in this article.