

К О Н Ц Е П Ц И Я

БАЛТИЙСКАЯ КРЕМНИЕВАЯ ДОЛИНА

ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННОГО
ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КРЕМНИЯ

<http://www.bgg.ru>



Научный руководитель проекта
Директор ЦЕНИ Института общей физики
РАН, Лауреат Нобелевской премии,
академик **А.М. Прохоров**

Идеи и "ноу-хау" - ЗАО "Эллина-НТ"
Генеральный директор Г.Н. Петров

Над проектом работали:
проектировщик
АО "ВСЕРОССИЙСКИЙ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫЙ
ИНСТИТУТ"
Заслуженный деятель науки и техники
РФ, д.т.н., профессор Н.А. Калужский

Администрация МО "Город Сосновый Бор"
зам. мэра по экономике и научно-
производственному комплексу
к.т.н. В.А. Шеволдин

Маркетинг и общая редакция
ООО "БАЛТИК-ГЛОБАЛ"
Генеральный директор В.П. Блинов

Москва - Сосновый Бор
август 2003 г.



Оглавление

Оглавление	1
1. Резюме проекта	3
1.1. Основные идеи Концепции	4
1.2. План работ по ПРОЕКТУ	5
1.3. Этапы реализации ПРОЕКТА	6
1.4. Оценка экономической эффективности 1 этапа ПРОЕКТА	7
2. Солнечная энергетика	9
3. Маркетинг	12
3.5. Развитие альтернативных источников энергии	12
3.6. Перспективы развития альтернативной энергетики в ЕС до 2010 г	13
3.7. Об использовании возобновляемых источников энергии в ФРГ	14
3.8. Планы развития энергетики стран Ближнего и Среднего Востока (строительство электростанций)	17
3.9. Структура рынка	18
3.10. Рынок металлургического кремния	21
3.11. Рынок поликристаллического кремния	22
3.12. Рынок монокристаллического кремния и пластин	25
3.13. Преобразователи силовой энергетики	28
4. Основные технологии ПРОЕКТА	30
4.14. Описание процесса обогащения кварцевого песка	30
4.15. Технология получения кремниевого порошка высокой чистоты	30
4.16. Описание процесса производства поликристаллического кремния	32
4.17. Описание процесса выращивания слитков солнечного кремния	38
4.18. Технология радиационного легирования слитков и пластин кремния в реакторах РБМК-1000 Ленинградской АЭС	41



1. Резюме проекта

Лауреатом Нобелевской премии, академиком Российской Академии Наук Прохоровым А.М. и к.т.н. Г.Н. Петровым разработан, обоснован и продвигается проект создания масштабного производства систем солнечной энергетики «Балтийская кремниевая долина» общей мощностью 1 ГВт/год (далее Концепция).

Концепция согласована и одобрена Президентом Российской Академии Наук Ю.С.Осиповым, Лауреатом Нобелевской премии, вице-президентом Российской Академии Наук Ж.И. Алферовым, Губернатором Ленинградской области В.П. Сердюковым и Главой муниципального образования «Город Сосновый Бор» В.И. Некрасовым.

Основные идеи и технологические инновации концепции были рассмотрены и получили позитивные заключения со стороны академика РАН В.А. Глухих (дир. ГП НИИЭФА им. Д.В.Ефремова), чл. –кор. РАН Е.А.Чернышева (дир. ГНЦ РФ ГНИИХТЭОС), д. ф. м.н. А.Д.Старикова (дир. ФНПЦ НИИКИ ОЭП), д.т.н. В.И.Лебедева (дир. ГП ЛАЭС им. В.И.Ленина), д.т.н. В.А.Василенко (дир. ФГУП НИТИ им. А.П.Александрова), и д.т.н. Н.А. Калужского (АО «ВАМИ») (Переписка приведена в разделе **Ошибка! Источник ссылки не найден.** на стр.**Ошибка! Закладка не определена.**).

В концепции использованы идеи А.М.Прохорова, Г.Н.Петрова, Н.А.Калужского, А.К. Лесненко и В.П.Блинова.

Концепция основывается на предпосылке, что благодаря сложившейся на мировом рынке систем солнечной энергетики (далее ССЭ) ситуации и достигнутых научно-технических достижениях, сконцентрировав свободные ресурсы Российской экономики на масштабном проекте, можно значимо ускорить развитие мировой альтернативной энергетики, одним из наиболее быстро развивающихся и перспективных рынков будущих десятилетий.

Электроэнергия ССЭ становится конкурентной на энергетическом рынке, при снижении стоимости солнечных элементов (СЭ) до ~ 1US\$/Вт. По оценкам экспертов, такое снижение может быть достигнуто при увеличении масштаба специализированного производства ССЭ до 1 ГВт/год.

До 2015 года, в рамках Концепции, должен быть создан промышленный комплекс, включающий в себя все необходимые, согласованные

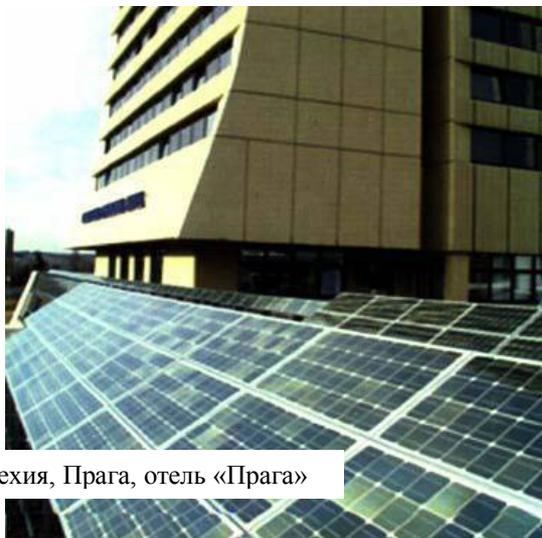


Рисунок 1. ССЭ, Чехия, Прага, отель «Прага»

по производительности переделов и утилизационному циклу производства, способные изготавливать ежегодно ССЭ, суммарной мощностью ~ 1ГВт. Производство такого объема ССЭ требует ~20 тыс. тонн высокочистого полупроводникового кремния, поскольку в стоимости СЭ ~ 80% занимает стоимость кремния .

Согласованность производительности переделов и размещение производств в непосредственной близости друг от друга значительно сокращает



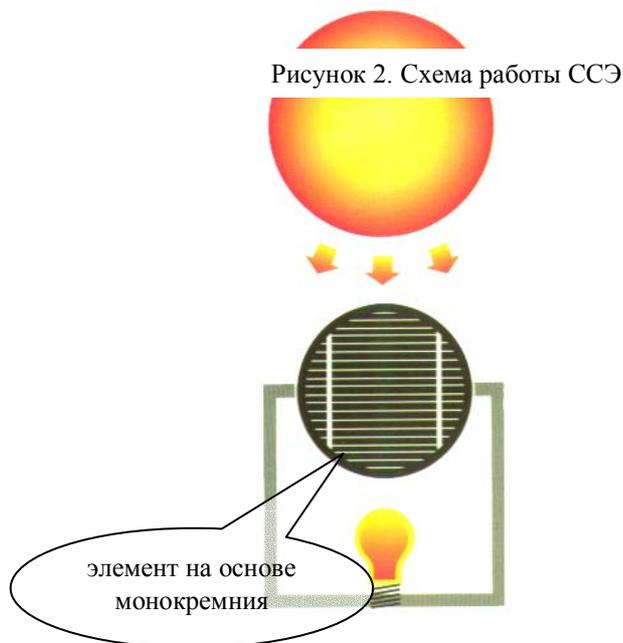
себестоимость конечного товара (ССЭ) за счет практически полной утилизации (возвращения в технологический оборот) появляющихся на разных стадиях материальных и не материальных отходов (электроэнергии, тепла, оборотной воды скрапа, тиглей и т.п.).

Все этапы (передель) производства ССЭ, за исключением сборочных операций, энергоемкие, расходы на электроэнергию в себестоимости продукции составляет десятки процентов, что делает важным расположение комплекса рядом с Ленинградской атомной электростанцией. Согласно достигнутым договоренностям ЛАЭС будет отпускать электроэнергию для данных производств по цене ~ 0,19 рубл./кВт ч (~0,005\$ US).

Все эти факторы должны стать основой конкурентоспособности продукции комплекса на мировом рынке.

1.1. Основные идеи Концепции

- Создание масштабного производства, сопоставимого с мировым объемом производства полупроводникового кремния, за счет эффекта масштаба, гарантированно обеспечит снижение себестоимости СЭ до 1 US\$/Вт. Это сделает электроэнергию ССЭ конкурентоспособной с энергией из традиционных источников. Как следствие начнется переток инвестиций из области традиционной энергетики в альтернативную, формируя обвальный спрос на ССЭ и сверхприбыли крупнейших производителей, способных обеспечить приемлемую себестоимость производства.
- Создание столь масштабного производства с нуля, общий объем инвестиций позволяет на стадии разработки проекта, оптимизировать и согласовать по производительности, доработать используемые технологии, обеспечить замкнутый энергетический и утилизационный циклы¹ производств, что ведет к повышению эффективности комплекса в целом. Обеспечить сравнимую оптимизацию в исторически сложившихся «открытых схемах»² производств, когда различные компоненты процесса производятся на разных



¹ для используемых технологий весьма значимых

² т.е. распределенных в пространстве, не согласованных по производительности и утилизации отходов



заводах³, транспортируются и только затем используются, сегодня не представляется реальным даже со стороны крупнейших участников рынка. По оценкам западных специалистов, создание эффективной «замкнутой схемы» путем ломки сложившейся «открытой», экономически нецелесообразно.

- Схема сбыта ССЭ на мировом рынке будет включать в себя как сбыт самих ССЭ, так и непосредственно электроэнергию, получаемой с помощью данных систем. Схема будет работать на условиях франчайзинга, т.е. продажи продукции через сеть независимых продавцов. Система может включать в себя международную специализированную франчайзинговую, лизинговую и энергетическую компании.

В основу решения технологических проблем Концепции положены самые современные разработки и технологии российских и зарубежных ученых в области производства сверхчистого кремния и систем солнечной энергетики:

- замкнутый экологически чистый цикл получения сверхчистого поликристаллического кремния (Российский патент на изобретение RU 2122971 С1 от 10 декабря 1998 года (Бюллетень изобретений №34);
- выращивание сверхбольших кристаллов кремния в электромагнитных полях;
- ядерное легирование кремниевых слитков диаметром не менее 12";
- новое поколение измерительной аппаратуры, позволяющее сертифицировать с большей достоверностью и точностью качество производимого кристаллического кремния;

1.2. План работ по ПРОЕКТУ

Металлургического кремния в России ежегодно производится ~70 тысяч тонн, имеющиеся производственные мощности позволяют легко нарастить производство до 100 тысяч тонн/год, поэтому вопрос организации нового производства металлургического кремния в рамках Концепции не стоит.

Концепция предусматривает проработку и реализацию проекта «Балтийская кремниевая долина» (далее ПРОЕКТ) создания:

- Производства, на базе Лужского месторождения,



Рисунок 3. Месторождение кварцитов



³ В технической литературе встречаются только общее описание производства поликремния, поскольку детальные аппаратурно-технологические схемы являются «ноу-хау» каждой фирмы. Тем не менее известно, что все действующие производства используют «открытую схему». Например фирма WACKER практически весь SiCl₄, направляет на рядом расположенное производство аэросила (Fumed Silica) и только небольшое количество SiCl₄ подвергается гидрированию и возвращается в цикл.



по обогащению кварцевого песка (до $\text{SiO}_2 > 99,7\%$) мощностью ~ 25 тыс. тонн/год.

- Производства кремниевого порошка высокой чистоты ($\text{Si} > 99,95\%$) методом гидрохимического рафинирования кускового кремния технической чистоты (металлургического кремния) мощностью ~20 тыс. тонн/год.
- Производства суперчистого поликристаллического кремния по замкнутой технологии $\text{Si} > 99,999999\%$ мощностью ~20 тыс. тонн/год.
- Производство суперчистого монокристаллического кремния $\text{Si} > 99,999999$ мощностью ~ 20 тыс. тонн/год.
- Производство по струнной резке моно, мультикристаллических слитков мощностью ~ 500 млн. пластин 100x100 мм.
- Производство высоко мощных коммутирующих полупроводниковых устройств, для управления промышленными ССЭ.
- Производство высокочистых кварцевых тиглей мощностью ~ 45 тыс. шт./год, включающее фабрику по обогащению кварца мощностью ~ 4,5 тыс. тонн/год.
- Производство ФЭП и прочих конструкционных элементов для ежегодного создания ССЭ суммарной мощностью ~ 1 ГВт.
- Системы продаж продукции и электроэнергии по месту эксплуатации ССЭ на основе франчайзинга, включающую в себя международную франчайзинговую и лизинговую компании.



Рисунок 4. Кремниевые пластины

1.3. Этапы реализации ПРОЕКТА

ПРОЕКТ должен реализовываться на площадке, позволяющей этапно разместить все производства в полном масштабе, обеспечить замкнутость энергетического цикла производств и утилизацию большей доли компонентов.

1 этап

Создание комбината по производству поликремния мощностью ~ 2000 тонн/год, включая необходимые мощности по обогащению кварцевого песка, подготовке и брикетированию шихты и производству высокочистого кремниевого порошка из металлургического кремния.

2 этап

Создание комбината по производству ССЭ, общей мощностью ~ 100 МВт, включая мощности по производству мульти и монокристаллического кремния мощностью ~ 2000 тонн/год товарных мульти и



монокристаллических слитков полупроводникового кремния для солнечной энергетики, производства кварцевых тиглей, производства и легирования кремниевых пластин (~ 50 млн. шт./год), изготовления ФЭП, коммутирующих устройств и сборки ССЭ в необходимой комплектации.

3 этап

Увеличение мощности действующих производств до ~ 200 МВт/год, путем создания необходимых производственных предприятий.

4 этап

Увеличение мощности действующих производств до ~ 400 МВт/год, путем создания необходимых производственных предприятий.

5 этап

Увеличение мощности действующих производств до ~ 600 МВт/год, путем создания необходимых производственных предприятий.

6 этап

Увеличение мощности действующих производств до ~ 1000 МВт/год, путем создания необходимых производственных предприятий.

1.4. Оценка экономической эффективности 1 этапа ПРОЕКТА

По имеющейся информации и ряда экспертных заключений (Подробно описано в разделе 3.11 на стр. 22), ситуация на мировом рынке поликремния (при сохраняющихся тенденциях) позволяет прогнозировать дефицит к 2005 году в ~ 5000 тонн. Ожидается, что крупнейшие мировые производители, за счет планируемого ввода новых мощностей, частично (~ 3 500 тонн) восполнят данный дефицит.



Рисунок 5. Ленинградская Атомная Электростанция

Тем не менее, общие тенденции развития технологий в области ССЭ и прежде всего в области производства высокочистого кремния, позволяют говорить о возможно скачкообразном развитии ситуации на рынке ССЭ. Крупный производитель, имеющий возможность продавать ССЭ по цене 1 US\$/Вт сможет резко повлиять на структуру мирового инвестиционного рынка энергетики в

целом, переориентировав существующие инвестиционные потоки. Тем самым данный производитель сможет получить необходимые инвестиционные ресурсы для ускоренного расширения производственных мощностей, а энергетические компании практические возможности по созданию конкурентоспособных промышленных ССЭ. Это приведет, в том числе, к резкому возрастанию спроса на поликремний. Используемая в ПРОЕКТЕ технология позволяет обеспечить себестоимость поликремния на уровне ~ 11-15 US\$/кг⁴, что в 2-3 раза ниже существующего у прочих

⁴ Оценка сделана на основании данных, предоставленных разработчиком технологии – ЗАО «Эллина-НТ».



производителей уровня. При этом уровне себестоимости, реализация произведенного объема поликремния на мировом конкурентном рынке не представляет особых трудностей. Риски введения антидемпинговых барьеров находятся на приемлемом уровне, т.к. рынок имеет тенденцию к дефициту материала (поликремния), необходимого для реализации государственных (в т.ч. Евросоюза) программ (Подробно в разделе 3.6 на стр. 13). В Таблице 1 представлена упрощенная оценка экономической эффективности производства поликремния по «замкнутой» технологии.

Таблица 1. Оценка эффективности производства поликристаллического кремния, производительностью 2000 тонн в год

Наименование статьи	ед.изм.	кол-во
<i>Инвестиционные затраты</i>		
Проектные и конструкторские работы, НИОКР	тыс. US\$	9300
Подготовка территории строительства и строительно-масштабные работы	тыс. US\$	18150
Основное технологическое оборудование	тыс. US\$	29000
Вспомогательное технологическое оборудование	тыс. US\$	87000
Прочее оборудование	тыс. US\$	13400
Непредвиденные расходы	тыс. US\$	7700
	ВСЕГО: тыс. US\$	164550
<i>Доходы</i>		
Производство высокочистого поликремния	тонн/год	2000
Рыночная цена поликремния в прутках	US\$/кг	41
Доход от продажи товарной продукции в виде прутков	тыс. US\$/год	82 000
<i>Расходы</i>		
Себестоимость продукции		
	<i>сырье</i> US\$/кг	3,00
	<i>энергия</i> US\$/кг	3,15
	<i>прочие расходы</i> US\$/кг	4,85
Себестоимость производства	тыс. US\$/год	22 000
Расчетная окупаемость инвестиций	лет	~ 3-4



2. Солнечная энергетика

Солнечная энергия способствовала возникновению жизни на Земле, поддерживает ее в настоящее время и будет делать это еще достаточно долго. Запасенная, благодаря фотосинтезу, в древесине солнечная энергия до XVII века была единственным источником энергии для человека. Сегодня свыше 20% мирового производства энергии основано на сжигании древесины, использовании энергии рек и ветра, то есть на производных солнечной энергии. Объем использования таких источников при производстве электроэнергии составляет ~ 6% от общеевропейского объема производства,



в развивающихся странах достигая 80%. По принятой в ООН терминологии, все виды энергии, в основе которых лежит солнечная энергия, называются возобновляемым

и источниками энергии. Европейским Союзом принято решение об удвоении к 2010 г. (с 6 до 12%) доли таких источников в энергетическом балансе (Подробно в разделе 3.6 на стр. 13). По сценарию Мирового энергетического Совета к 2050 г. предусматривается удвоение (с 20 до 40%) доли использования мировых возобновляемых источников энергии. В соответствии с этими решениями возобновляемые источники постепенно будут замещать уголь, нефть, газ и уран в производстве электроэнергии, теплоты и жидкого топлива.

Помимо экологических проблем, связанных с производством энергии традиционными способами и иссякающими запасами полезных ископаемых, такие решения обоснованы тем, что более 46% общих ресурсов человечества заняты в цикле производства энергии. Добывающая отрасль и тяжелое машиностроение – области, традиционно наиболее капиталоемкие, стоящие в единой технологической цепи производства энергии, сами по себе потребляют ее громадное количество. Именно для добычи полезных ископаемых, их переработки, транспортировки и извлечению из них энергии требуются самые большие и сложные машины, сделать которые можно только на огромных заводах, из большого количества металла, для производства которого нужны другие громадные заводы и соответствующие энергетические ресурсы. И все эти карьеры, заводы и транспортные артерии несчастно эксплуатируют и загрязняют окружающую среду. Перераспределение хотя бы доли этих ресурсов приведет к революционному скачку в уровне жизни человечества, который сегодня определяется уровнем энергопотребления на душу населения, а ~1 миллиард человек на земном шаре (в России ~ 7,5 млн.) живет в домах без электричества.



Рисунок 6. Площадь ССЭ, необходимая для обеспечения потребности человечества в энергии



Наиболее перспективным и технологически проработанным видом альтернативной энергетики является преобразование солнечной энергии в электрическую с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

$1,8 \times 10^{11}$ МВт солнечной энергии, падает на землю, $1,3 \times 10^{11}$ МВт (с учетом поглощения и рассеяния в атмосфере) достигает поверхности. Это почти в 30 000 раз превышает сегодняшний уровень энергопотребления всего человечества, для обеспечения которого достаточно смонтировать системы солнечной энергетики (ССЭ)⁵, заняв под них менее 3% площади пустынь планеты.

Энергетика будущего будет состоять из экологически чистых, безопасных, бесшумных и практически не требующих обслуживания локальных ССЭ (монтируемых в виде отдельных панелей, облицовки крыш, стен зданий или автомобилей...), промышленных установок большой мощности и эффективной, автоматической системы управления потоками энергии распределенного типа. Гарантированный срок эксплуатации ССЭ составит не менее 100 лет. Питание потребителей энергии в темное время суток будет обеспечиваться транспортировкой энергии со светлой стороны земного шара. Технические проблемы подобного рода транспортировки и управления в течении продолжительного времени решает единая энергетическая система России.

Создание двух высокотехнологичных промышленных ССЭ (на Чукотке и в Калининграде) общей мощностью 187 млн. кВт, интегрированных в единую энергетическую систему, позволит полностью удовлетворить энергетические потребности России. За 6 месяцев работы энергосистема выработает 420 млрд. кВт ч, что равноценно выработке 600 электростанций России общей мощностью 207 млн. кВт за шесть месяцев 2000 г. При КПД 15% площадь каждой ССЭ составит 25x25 км, а пиковая мощность — 93.5 млн. кВт. Используя только отработанные технологии (КПД ФЭП - 12%) можно удовлетворить потребность России в электроэнергии, построив ССЭ, площадью 4000 кв. км (0,024% территории государства). И это без учета существенного сокращения энергопотребления в добывающей, транспортной и машиностроительных отраслях!

При существующем технологическом развитии, рыночная стоимость солнечного элемента (СЭ) составляет от 2,5 до 3 US\$/Вт. В связи с этим себестоимость электроэнергии, получаемых на ССЭ, составляет от 0,2 до 0,5 US\$/кВт ч (мировая цена на электроэнергию колеблется от 0,03 до 0,125 US\$/кВт ч).

⁵ 1 кг кремния в ССЭ за 30 лет может произвести 300 МВт ч электроэнергии, для производства тех же 300 МВт ч электроэнергии потребуется 25 т нефти с теплотворной способностью 43,7 МДж/кг, а с учетом того, что КПД теплотростанции составляет примерно 33%, количество нефти, эквивалентное 1 кг кремния возрастает до 75 т. 1 т природного урана в генераторе открытого цикла производит 35 ГВт ч, в то время как одна 1 т кремния в ССЭ за 30 лет срока службы сможет выработать 92 ГВт ч.



КПД современных ФЭП составляет 12 - 15%, достигая в лабораторных условиях 30- 40%. Основным фактором, влияющим на КПД и стоимость ФЭП – качество и себестоимость кремниевой пластины, из которой он изготовлен (рыночная цена кремния 40-200 US\$/кг). Поэтому снизить себестоимость энергии, получаемой с помощью солнечных электростанций, можно увеличивая КПД ФЭП или снижая себестоимость производства кремния.⁶

По оценке экспертов, стоимость электроэнергии, производимой ССЭ, снижается на 20% при каждом удвоении установленных мощностей. В период 1982 - 2000 гг. затраты снизились в 4 раза⁷.

Ожидается, что при цене производства СЭ ~2 US\$/Вт мировая потребность в ССЭ составит ~100 ГВт, т.е. по 100 Вт на одного человека из 1 млрд. населения Земли, живущего сегодня без электричества⁸. При расчетном

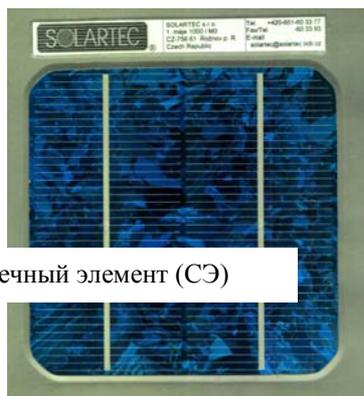


Рисунок 7. Солнечный элемент (СЭ)

периоде насыщения рынка в 20 лет, потребность в ССЭ может оцениваться в 5 ГВт/год (для создания такой мощности требуется ~100 тыс. тонн кремния/год)⁹. При дальнейшем снижении себестоимости СЭ (до 1 US\$/Вт)¹⁰, стоимость вырабатываемой электроэнергии снизится до 0,12 US\$/кВт ч, что сделает ее конкурентоспособной с энергией, получаемой традиционными способами. В этом случае можно будет говорить о этапном (в течение 20 лет) замещении ССЭ 10% общемирового объема электроэнергии. Такие темпы развития будут предусматривать

ежегодный ввод в эксплуатацию 50 ГВт (для создания такой мощности требуется ~ 1 млн. тонн кремния/год). По оценке экспертов, наиболее перспективным рынком сбыта ССЭ в первой половине XXI века будут страны Ближнего и Среднего Востока (Перспективные планы развития энергетики региона описаны в разделе 3.8 на стр. 17).

Мир на пороге новой индустриальной революции. Специалисты, занимающиеся фундаментальными исследованиями и глобальным прогнозом, утверждают, что для этого накопилось достаточно научно-технических знаний.

⁶ Цена кремния степени очистки 99,99 % сегодня равна стоимости топлива для атомных электростанций, хотя содержание кремния в земной коре в 100 000 раз превышает содержание урана (наша планета на 29.5% состоит из кремния), а производственный цикл уранового топлива сложнее и опаснее метода производства полупроводникового кремния. Учитывая, что уран в земной коре находится в рассеянном состоянии и содержится в несоизмеримо меньших концентрациях, чем кремний, непонятно, почему эти материалы имеют примерно одинаковую стоимость. Этот "парадокс" можно объяснить только тем, что в технологии производства уранового топлива были инвестированы миллиарды долларов.

⁷ БИКИ 20.04.2002

⁸ Мощность 100 Вт покрывает потребности в электроэнергии на освещение, питание телевизора, небольшого холодильника и водяного насоса населения развивающихся стран и удаленных сельскохозяйственных районов России.

⁹ По оценке специалистов, такое снижение себестоимости возможно на специализированном производстве, суммарной мощностью по ФЭП не менее 200 МВт/год (требуется производить ~ 4000 тонн кремния/год).

¹⁰ По оценке специалистов, такое снижение себестоимости возможно на специализированном производстве, суммарной мощностью по ФЭП не менее 400 МВт/год (требуется производить ~ 8000 тонн кремния/год).



3. Маркетинг

3.5. Развитие альтернативных источников энергии

Ветроэнергетика

С 1997 по 1999 год установленная мощность ветроустановок в мире возросла вдвое, по прогнозу к 2006 год возрастет еще втрое и составит ~ 36000 МВт.

Страны-лидеры: Германия — 4444 МВт (на этот год), США — 1819 МВт, Индия — 1100 МВт. Россия — 4 МВт.

Солнечная энергетика

В производстве ФЭП и других систем на их основе в мире наблюдается настоящий бум. Годовое производство этих систем поднялось до 2000 МВт с темпами прироста до 30 процентов.

Страны-лидеры: Япония—80 МВт, США—60 МВт, Германия — 50 МВт. Россия — 0,5 МВт.

Площадь солнечных коллекторов составляет: в Японии — 7 млн. м², в США — 4 млн. м², в Греции — 2 млн. м². В России — 0,1 млн. м².

Геотермальная энергетика

Установленная мощность ГеоЭС в мире поднялась до 8000 МВт.

Страны-лидеры: США—2228 МВт, Италия-785 МВт, Индонезия — 589 МВт. Россия — 23 МВт.

В настоящее время солнечная энергия, в основном, используется для производства низкопотенциального тепла с помощью простейших плоских солнечных коллекторов.

В России удельная стоимость 1 кВт установленной мощности для микроГЭС, работающих изолированно, — 600-700 US\$, в Европе — 1500-1800 US\$. Удельные инвестиции в фотоэлектрические установки пока еще высоки. Но традиционный кВт ч постоянно дорожает вместе с топливом, а альтернативный постоянно дешевеет в связи с техническим прогрессом и унификацией промышленного производства. С 1980 по 1990 года удельная стоимость ССЭ снижена с 50 до 4-5 тыс. US\$/кВт. За этот же период удельные инвестиции на ТЭЦ возросли с 750 до 1000-1100 US\$/кВт, на атомных станциях — с 1500 до 2200 US\$/кВт.

В централизованных энергосистемах, на традиционных источниках, с учетом неизменности нынешних цен на энергоносители, приемлемый срок окупаемости (5-10 лет) гарантирован при удельных инвестициях не более 1500 US\$/кВт и при годовом использовании установленной мощности от 2200 часов и более. Для автономных систем ССЭ эти величины составляют сегодня соответственно 2000 US\$/кВт (с учетом дорогих пока фотоэлементов) и не менее 1500 часов в год.

Традиционной энергетике всегда присуща и будет только нарастать стрессовая проблема - рост цен на энергоносители. Солнце, ветер, морской прибой и течение рек подорожают, при существующем на сегодняшней день избытке, не могут¹¹.

¹¹ О. Деменин Строительная газета 15.06 2001г.



3.6. Перспективы развития альтернативной энергетики в ЕС до 2010 г.¹²

Политика стран ЕС в области энергетики направлена на увеличение доли возобновляемых источников, что обусловлено необходимостью



Рисунок 9. Ветровая энергоустановка

диверсификации энергоснабжения, повышения безопасности производства энергии и защиты окружающей среды, обеспечения экономических и социальных требований.

В большинстве стран Евросоюза осуществляется государственная поддержка программ развития альтернативной энергетики, при

этом предусматривается:

- обеспечение производителям электроэнергии справедливого и гарантированного доступа к рынкам;
- использование экономических рычагов для стимулирования инвестиций в соответствующие проекты;
- применение механизмов налогообложения, учитывающих сложившийся уровень цен и издержки производства энергии из возобновляемых источников;
- оказание поддержки на местном уровне со стороны региональных властей (в частности, при выделении земельных участков для реализации проектов).

Развитие альтернативной энергетики рассматривается многими странами ЕС как одно из возможных решений проблемы безработицы. По сравнению с традиционной она имеет ряд преимуществ в плане создания новых рабочих мест. При этом учитывается отсутствие зависимости от импорта сырья и необходимости создания производственной инфраструктуры. На всех этапах эксплуатации установок на возобновляемых источниках используются местные ресурсы, что способствует развитию экономики отдельных регионов. Объемы инвестиций вполне доступны местным структурам. Немаловажно, что развитие альтернативной энергетики влечет за собой также развитие смежных отраслей, связанных со строительством, транспортом, сферой обслуживания. По различным оценкам, к 2020 г. в ЕС возможно создание 900 тыс. рабочих мест в секторе альтернативной энергетики. Это число может увеличиться в случае завоевания новых рынков за счет сбыта установок на возобновляемых источниках в развивающихся странах.

К 2010 г. планируется довести долю возобновляемых источников в энергобалансе стран Евросоюза до 12%, а в производстве электроэнергии - до 22%. Объем необходимых инвестиций оценивается примерно в 165 млрд. евро. Более половины (84 млрд.) будет направлено на финансирование проектов, связанных с производством электроэнергии из биомассы, 29 млрд. - проектов ветро- и 9 млрд. - солнечной энергетики. Однако эти цифры, по

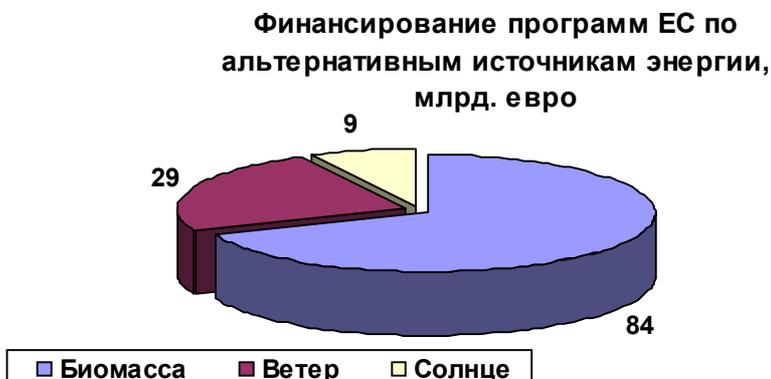
¹² БИКИ 23.07.02



мнению экспертов, будут корректироваться. Так, скорее всего, ветроэнергетика будет развиваться более быстрыми темпами, чем предполагается.

В странах - кандидатах на вступление в Евросоюз, по большинству оценок, наиболее перспективным источником является биомасса благодаря

доступности и широкого использования в этих странах для теплоснабжения. Значительный потенциал имеют и другие источники, в том числе ветровая, солнечная и гидроэнергетика. Иностранные компании уже начали активно продвигать свои технологии на рынки



стран-кандидатов.

На настоящий момент Евросоюз является самым большим рынком сбыта ВЭУ, установленная мощность которых составляет 12 ГВт (в мире в целом - 18 ГВт), причем к 2010 г. предполагается довести этот показатель до 60 ГВт. Емкость мирового рынка, по прогнозу, к 2006 г. увеличится на 25%.

Лидерами на рынке ВЭУ в ЕС являются датские компании (их доля - около 50%). Другие страны, например Германия и Испания, развивают свои внутренние рынки.

Солнечные установки в ЕС, как правило, используются в местах, удаленных от централизованной системы электроснабжения. Более 75% всех СЭУ стран Евросоюза находятся в Германии, что связано с принятием государственных программ поддержки данного сектора. Достаточно активны в этой области также Италия и Великобритания. Несмотря на развитие собственных мощностей по производству солнечных элементов, страны ЕС уступают в этом отношении мировым лидерам - Японии и США¹³.

3.7. Об использовании возобновляемых источников энергии в ФРГ¹⁴¹⁵

Солнечная энергетика сейчас относится к одной из наиболее быстрорастущих отраслей экономики ФРГ. Согласно оценке, в 2002 г. продажи солнечных батарей в стране составили примерно 1,5 млрд. евро, что на 20 - 50% больше, чем в 2001 году.

В 1995 г. суммарная установленная мощность предприятий солнечной энергетике в ФРГ составляла менее 20 МВт, в 1997 г. данный показатель достиг 40, а в 2001 г. превысил 180 МВт. Ввод новых мощностей в 2001 г. равнялся примерно 79 МВт (при максимальной интенсивности солнечного освещения), что вдвое больше, чем в 2000 г., а в 1999 г. прирост мощностей достиг лишь 15 МВт.

¹³ По материалам Торгово-экономического бюро Посольства РФ в ФРГ

¹⁴ По материалам Торгово-экономического бюро Посольства РФ в Германии. БИКИ 1.06 2002г.

¹⁵ БИКИ 29.10.2002



По мнению экспертов, бурный рост солнечной энергетики в ФРГ обусловлен, прежде всего, принятием в 2000 г. закона о возобновляемых источниках энергии (EEG - Erneuerbare Energien Gesetz). Закон призван создать благоприятные экономические и правовые условия для существенного увеличения их доли в общем энергообеспечении страны в период до 2010 г.

Эффективность такого стимулирования была уже с успехом доказана на практике. Так, в ранее действовавшем законе о подаче электроэнергии 1991 г. (Stromeinspeisungsgesetz) предусматривалось создание условий для расширения использования ветровой энергии, особенно на северном



Рисунок 10. Традиционная энергетика.

побережье Германии. Результатом стало увеличение более чем в 100 раз количества ветровых установок (за счет введенных в эксплуатацию в течение 9 лет), суммарная мощность которых в ФРГ к концу 1999 г. достигла 4444,51 МВт, составив около 1/3 мощности всех ВЭУ в мире.

Закон EEG определил виды энергии и установок, на

которые он распространяется; в нем оговорены условия приема-подачи электроэнергии от установки в центральную сеть, сформулированы обязательства и условия по оплате электроэнергии владельцу установки, а также обязательства государства по компенсационным выплатам владельцам сетей. В законе определены тарифы на различные виды возобновляемых источников энергии в зависимости от мощности установок и времени (даты) ее ввода в эксплуатацию. Диапазон тарифов весьма широк и составляет от 6,5 до 49 евроц./кВт-ч. Для установок по переработке биомассы тарифы находятся в пределах 8,5 - 10,0 евроц./кВт-ч. На электроэнергию, произведенную на базе использования воды, газов (рудничного, полученного при очистке сточных вод, переработке отходов), они составляют 6,5 - 7,5 евроц., выработанную с применением геотермических Процессов - 7,5 - 9,5 евроц., на ВЭУ - 6,0 - 8,5 евроц.

Наиболее высокая цена на электроэнергию, полученную при использовании солнечной энергии, на действующих установках, которые были введены до 1 января 2002 г. на срок не менее 20 лет, установлена на уровне 45,0 евроц./кВт-ч. Для установок, введенных в более поздние сроки, ставка снижена до 42,4 евроц.

Новый закон направлен на более широкое привлечение частных инвестиций в развитие альтернативных видов энергии. Из сферы его действия исключены мощные установки по использованию воды и газов (мощностью более 5 МВт), по переработке биомассы, мощность которых превышает 20 МВт, использованию солнечной энергии мощностью свыше 5 МВт. Исключаются также все установки, в которых доля участия федерального правительства и земель превышает 25%.

В соответствии с этим законом фирма-поставщик электроэнергии получает от государства по 48,1 е. ц. за каждый проданный киловатт в случае ввода в эксплуатацию новых мощностей по выработке электричества с



использованием солнечной энергии. Указанная сумма снижается на 5% в случае ввода таких мощностей в каждом из последующих годов. По мнению экспертов, принятие закона о возобновляемых источниках энергии в ближайшей перспективе обеспечит постепенную коммерциализацию рынка солнечной энергетики ФРГ.

Основным фактором, сдерживающим развитие солнечной энергетики в ФРГ, сейчас является резкий рост цен на кремний, доля которого в общей стоимости солнечных батарей составляет примерно 80%. В этой связи германские поставщики солнечных батарей уделяют большое внимание созданию производственных мощностей по выпуску кремния, что позволяет снижать стоимость солнечных батарей. В результате, согласно оценке, в ближайшей перспективе можно ожидать снижения стоимости солнечных батарей мощностью более 10 кВт примерно на 4%.

По данным компании "Volt-mark", удельные затраты на создание 1 кВт производственных мощностей для установки мощностью 200 кВт в ФРГ составляют 5,2 тыс. евро, а для установки мощностью 5 кВт - 6,5 тыс. евро. Компания уже ввела в эксплуатацию установки мощностью 600 кВт и 1,6 МВт. Разрабатывается также установка на 1,8 МВт, что, по расчетам компании, позволит снизить стоимость 1 кВт производственных мощностей до 4,8 тыс. евро.



Рисунок 11. Монокристалл кремния в ростовой камере

Большое внимание в ФРГ и других ведущих странах уделяется повышению коэффициента полезного действия солнечных батарей, а также поиску новых материалов для замены кремния. Так, в университете шт. Калифорния (США) созданы гибридные солнечные батареи с использованием органического полимера "РЗНТ" и селенида кадмия. Коэффициент полезного действия этих батарей составляет 6,9%. В Высшей технической школе шт. Виржиния (США) недавно созданы чрезвычайно тонкие солнечные батареи из соединений углерода. В качестве основы солнечных элементов используется полимер, который при

освещении испускает электроны; однако коэффициент полезного действия новых батарей составляет лишь примерно 20% от соответствующего показателя у кремниевых батарей.

Как и прежний закон от 1991 г., новый закон о приоритетном развитии нетрадиционных источников энергии предусматривает оказание немецкими государственными структурами содействия в финансировании и фискальном стимулировании путем разработки и проведения в жизнь различного рода проектов и программ, таких, например, как «100000 Daecher-Solarstrom-Programm», «Marktanreizprogramm» и др. Создано около 10 таких программ федерального уровня. В целях улучшения экологии льготы предоставляются потребителям электро- и тепловой энергии, произведенной на базе возобновляемых источников, а также осуществляющим модернизацию оборудования и применяющим энергосберегающие технологии владельцам частных хозяйств, квартир, домов и т. д.



3.8. Планы развития энергетики стран Ближнего и Среднего Востока (строительство электростанций)¹⁶

В течение ближайших 15 лет в странах Ближнего и Среднего Востока будет установлено свыше 100 ГВт новых мощностей по производству электроэнергии, что соответствует 400 турбоагрегатам мощностью 250 МВт каждый и стоимостью 40 - 50 млн. долл., говорится в недавно опубликованном докладе “Economist Intelligence Unit”.

Рост спроса на электроэнергию обусловлен быстрым ростом населения в большинстве стран региона, растущей урбанизацией и неослабевающим спросом на кондиционированный воздух и опресненную воду. Масштаб необходимых инвестиций столь значителен, что большинство правительств пытается привлечь к реализации проектов частный капитал.

Однако опыт строительства частных электростанций в регионе пока



скромен. Наиболее заметные успехи отмечены в ОАЭ, Катаре и Саудовской Аравии. В Алжире и Египте также были начаты подобные проекты, но Египет решил вернуться к традиционной схеме финансирования новых электростанций после того, как два первых частных проекта вызвали валютные проблемы.

Иран и Турция также намерены продолжать реализацию проектов частных электростанций, однако для этого все еще необходимо разрешить сложные проблемы с местным законодательством.

В Саудовской Аравии рост потребления электроэнергии в прогнозируемый период составит, как ожидается, в среднем более 6% в год. Для удовлетворения растущего спроса потребуются увеличить установленные мощности минимум на 10 ГВт в ближайшие 5 лет. Нынешний объем мощностей составляет 26,3 ГВт. В настоящее время “Saudi Electricity Company” и “Saline Water Conversion Corporation” совместно разрабатывают планы четырех частных энергетических комплексов (включающих электростанции и опреснительные установки) совокупной мощностью 3700 МВт. “SEC” намечает реализацию второй очереди проекта ТЭС Шуайба близ г. Джидда, которая предусматривает установку трех энергоблоков по 367 МВт в дополнение к пяти в рамках первой очереди, строительство которой близится к завершению. В середине июля должны начаться торги на поставку паровых турбин, к участию в которых приглашены 5 компаний.

Египет, как уже отмечалось, решил вернуться к старой схеме финансирования проектов электроэнергетики и может получить на льготных условиях долгосрочные займы региональных и международных финансовых организаций. Правительству страны удалось ускорить реализацию новых проектов, а также сократить затраты на инжиниринг. Выбор был сделан в пользу серии модулей комбинированного цикла мощностью 750 МВт, основанных на проектах “PGESCO” - местной консультационной фирмы,

¹⁶ БИКИ 05.07.03



учрежденной как совместное предприятие с американской “Bechtel”. Эта компания также проводит все торги по новым проектам и осуществляет надзор за строительством.

В настоящее время идет сооружение первой ТЭС комбинированного цикла на севере Каира и начаты работы на двух других проектах - в г. Нуберия и в дельте Нила.

Правительство утвердило также планы строительства ТЭС Куреймат к югу от Каира и в промышленной зоне Тальха в дельте Нила. Первый крупный контракт в рамках проекта ТЭС Нуберия на поставку четырех газовых турбин мощностью 250 МВт каждая на сумму 157 млн. долл. был предоставлен германской группе “Siemens”. Общая стоимость проекта оценивается в 810 млн. долл.

Правительство Турции планирует к 2020 г. добавить 23 ГВт установленных мощностей по производству электроэнергии к имеющимся 26 ГВт. Значительную часть необходимых инвестиций намечается привлечь из частных источников. Однако реализация частных (“независимых”) проектов осложняется

разногласиями во властных структурах, и вероятность появления новых проектов резко уменьшилась после принятого в конце 2001 г. решения снизить уровень казначейских гарантий для проектов электростанций на условиях “build-operate-transfer”.

В докладе отмечается также, что в Иране спрос на электроэнергию возрастает в среднем на 7% в год. Парламент страны одобрил участие частного сектора в развитии отрасли, утвердив монополию государства на передачу и распределение электроэнергии. На долю частного сектора отводятся проекты совокупной мощностью порядка 12 ГВт. Государство намерено также привлечь частные компании для повышения эффективности действующих электростанций.

Переговоры по финансовой структуре первого проекта на условиях “build-operate-transfer” - ТЭС комбинированного цикла Парехсар мощностью 900 МВт на северо-западе страны - уже находятся в активной стадии, и скоро ожидается подписание контракта по той же схеме по проекту ТЭС в Исфахане. В середине июня должны были открыться торги по ТЭС в Зенджане на условиях “build-own-operate”, и летом текущего года будет объявлен первый тендер по продаже частному сектору действующей электростанции.

Всего в настоящее время правительством утверждены 6 проектов на условиях “build-own-operate” совокупной мощностью 3000 МВт и 4 проекта на условиях “build-operate-transfer” на 4000 МВт.

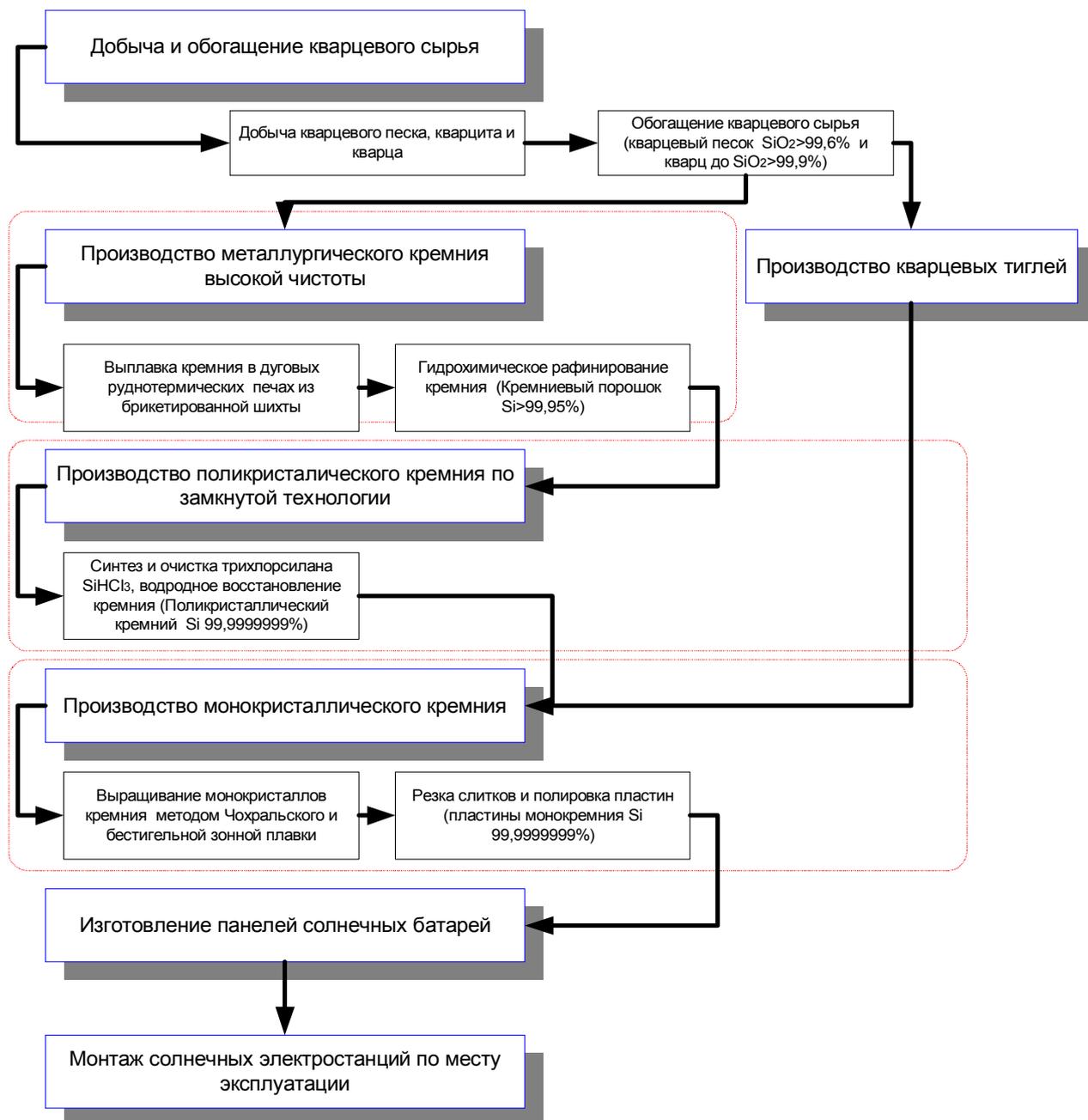
3.9. Структура рынка

Основными факторами, влияющими на себестоимость электроэнергии, получаемой с помощью ССЭ, являются стоимость и КПД СЭ. КПД СЭ, в свою очередь, зависит от качества кремния (в т.ч. чистоты и однородности).





Предусмотренное ПРОЕКТОМ производство ССЭ включает в себя получение высокочистого кремния, идущего на изготовление чипов и солнечных батарей, – сложный химико-технологический процесс, основанный на инновационных технологиях, состоящий из нескольких основных переделов, приведенных на схеме:



Мировое производство высокочистого кремния за последние пять лет увеличилось в 2 раза и достигло 23 тысяч тонн в год, имея ежегодный прирост не менее 2 тысяч тонн. При этом ~90% продукции традиционно потребляется электронной промышленностью. В область солнечной энергетики поступает менее ~10% произведенного кремния (т.н. кремний солнечного сорта, т.е. чистый кремний, но не соответствующий строгим требованиям электронной промышленности).

Темпы развития мирового рынка ССЭ составляли в период с 1990 по 1997 г.г. 12-15% в год и соответствовали общим темпам развития кремниевой



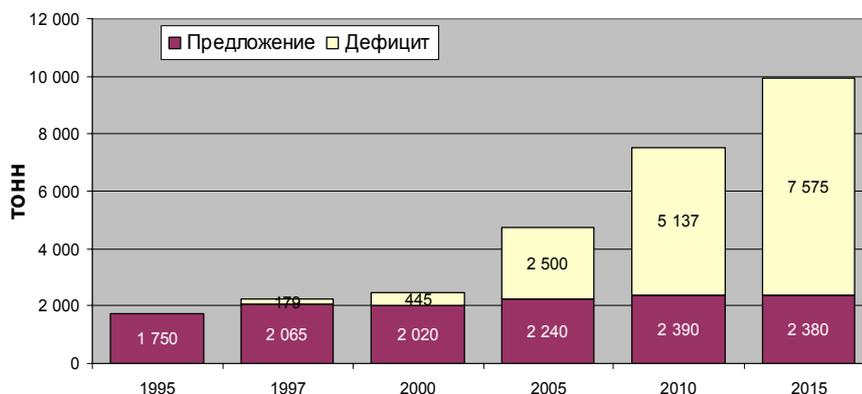
полупроводниковой промышленности. В 1996 году была принята Международная солнечная программа, поставившая задачу создания альтернативных возобновляемых источников энергии. По программе, к 2012 году, объем производства солнечной энергии должен составить около 20% от общего объема вырабатываемой электроэнергии.

Как следствие программы, с 1997 года темпы возросли до 27% и удерживались на этом уровне в 1998 году. В 1999 году в мире было смонтировано ССЭ общей мощностью более 270 Мвт, что соответствует 37% росту. Дальнейший рост и прогноз, связанной с ним динамики производства кремния для ССЭ приведен в таблице и на диаграмме.

Перспективы рынка кремния Солнечного Сорта с точки зрения специалистов фирмы "Bayer"

Наименование пункта	1995	1997	2000	2005	2010	2015
Предложение	1 750	2 065	2 020	2 240	2 390	2 380
Дефицит		179	445	2 500	5 137	7 575
Спрос	1 750	2 244	2 465	4 740	7 527	9 955
Предпосылки прогноза	растущий внутренний рецикл производителей и потребителей кремния Электронного Сорта с 1997 года, более эффективное производство, повышенная экономия;					
	10%-ная доля тонкоплёночного метода на PV рынке;					
	30%-ная доля тонкоплёночного метода на PV рынке.					

СПРОС И ПРЕДЛОЖЕНИЕ КРЕМНИЯ СОЛНЕЧНОГО СОРТА



Стремительные темпы роста связаны с принятием в 1995-1997 г.г. рядом стран (Германия, США, Япония, Оман, Египет и т.п.) стимулирующих программ развития ССЭ (Подробно описаны в разделе 3.7 на стр. 14). В частности, по программе правительства Германии, государство выкупает энергию производимую на ССЭ, смонтированных в рамках программы, по цене ~0,5 \$/кВт час, при рыночной цене электроэнергии ~0,05\$/кВт час.

По оценке Международного экономического форума возобновляемых источников энергии "IWK" (Internationales Wirtschaftsforum Regenerativer Energien)¹⁷, в 2000 -2020 гг. ежегодные мировые продажи новых видов энергии и технологий возрастут с 12 млрд. до 30 млрд. евро. Однако доля возобновляемых источников в мировой выработке электроэнергии в течение указанного периода будет оставаться почти неизменной (на уровне 20%).

¹⁷ БИКИ 09.09.2000



В 2000 - 2010 гг., согласно данной оценке, наиболее высокие темпы роста прогнозируются в ветро- и солнечной энергетике. По мнению экспертов "IWK", в ближайшем десятилетии благоприятными являются перспективы роста спроса на оборудование для выработки электроэнергии с использованием возобновляемых источников. Продажи указанного оборудования возрастут с 12 млрд. евро в 2000 г. до 30 млрд. в 2010 г (Подробно описано в разделе 3.6 на стр. 13).

Безусловно, что рост объемов, структура и технологии производства высококачистого кремния до последнего времени определялись спросом электронной промышленности, принципиально менее материалоемкой, по сравнению с солнечной энергетикой. Об этом говорит тот факт, что ни одного, сколь-нибудь значимого, специализированного производства кремния для солнечной энергетики в мире не создано до сих пор.

3.10. Рынок металлургического кремния

Действующие производства металлургического кремния, суммарной проектной мощностью ~ 120 тыс. тонн кремния/год размещены на Уральском, Иркутском и Братском алюминиевых заводах¹⁸. В 2001 году в России было выработано около 70 тыс. тонн металлургического кремния. Основные производителями является Братский алюминиевый завод (входит в «Русал»), «СУАЛ-Кремний-Урал» и «Кремний». Группа СУАЛ занимает 7-е место в мире по выпуску металлургического кремния (~ 51 тыс. тонн/год). Большая часть произведенного в России кремния экспортируется (объем экспорта ~ 60 млн. US\$/год, из которых 25 тыс. тонн идут в страны ЕС, а 30 тыс. тонн в США).

В больших объемах, транзитом через Россию, свой кремний в страны ЕС и США поставляют азиатские производители. По оценкам Минэкономразвития, доля импортного кремния на российском рынке составляет 36% (около 30 тыс. тонн), причем 90% приходится на поставки из Китая¹⁹.

Европейские цены на металлургический кремний в середине 2002 года оставались относительно стабильными ~ 950 – 1 040 US\$/ тонну, поддерживаемые укреплением евро относительно доллара. Цены на китайский материал быстро росли и сегодня дошли до ~ 850 US\$/тонну²⁰.

Таким образом, можно уверенно говорить о избыточности предложения на мировом рынке металлургического кремния и наличия достаточных, для реализации ПРОЕКТА, свободных производственных мощностей на Российских предприятиях.

Поскольку действующие мощности по производству металлургического кремния в России не загружены, рынок сформирован и прогнозируем, в рамках ПРОЕКТА будут создаваться только вспомогательные мощности по дозированию и смешению шихтовых материалов, брикетированию шихты, подготовки брикетов к плавке, а также организовано производство черного кремния с повышенным содержанием кальция.

¹⁸ На этих заводах установлено 16 руднотермических печей мощностью от 10 до 25 мВА.

¹⁹ Д. Пономарев «Время новостей» от 23.10.2002

²⁰ ГИРЕДМЕТ по материалам Metal Bulletin.2002. N 8677. P. 15.



3.11. Рынок поликристаллического кремния

Мировое производство поликристаллического кремния в 2002 г., по данным “Roskill”, увеличилось по сравнению с 2001 г. более чем на 15%. По прогнозу, в 2003 г. оно возрастет еще на 15% - до 23 150 т, из которых 71% будет приходиться на материал полупроводникового сорта и 29% - на материал для солнечных батарей.

Мировое производство поликристаллического кремния (тонн)

	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г. ¹⁾
Всего	18380	17800	20350	23150
США	9000	8600	9650	11850
Hemlock Semiconductors	4600	4300	5100	5300
ASiMI	2600	2500	1900	2150
СП SGS-ASiMI	-	-	150	1900
MEMC	1000	1000	1500	1500
Mitsubishi Materials Polysilicon	800	800	1000	1000
Япония	4680	5200	5700	6100
Tokuyama	2600	3300	3600	4000
Mitsubishi Materials Polysilicon	1450	1200	1400	1400
Sumitomo Titanium	630	700	700	700
ФРГ				
Wacker Siltronic	3700	3000	4000	4200
Италия				
MEMC	1000	1000	1000	1000

¹⁾ Прогноз.

Компания “Advanced Silicon Materials” (“ASiMI”) планирует в 2003 г. повысить производство поликристаллического кремния на 13% по сравнению с 2002 г. - с 1,90 тыс. до 2,15 тыс. т. Вся продукция компании потребляется полупроводниковой промышленностью. Совместное предприятие, партнерами которого являются “ASiMI” и норвежская фирма “SGS”, начало выпускать в США поликристаллический кремний для солнечных батарей в ноябре 2002 г., по оценке, в 2003 г. производство достигнет 1,9 тыс. т.

“Hemlock Semiconductors” в 2003 г. предполагает увеличить выпуск поликристаллического кремния на 4% - до 5,3 тыс. т за счет расширения

производства материала полупроводникового сорта.

Выпуск кремния для солнечных батарей не увеличится, поскольку их производители в 2002 г. накопили достаточные складские запасы товара в ожидании роста спроса в 2003 - 2004 гг.

“Mitsubishi Materials Polysilicon” планирует

поддерживать стабильным производство поликристаллического кремния в 2003





г.: 1,4 тыс. т в Японии и 1,0 тыс. т в США; 88% ее продукции потребляется полупроводниковой промышленностью.



“Токуяма” предполагает в 2003 г. повысить производство поликристаллического кремния на 11% - до 4 тыс. т, при этом выпуск материала полупроводникового сорта возрастет на 15% - до 3 тыс. т, а материала для солнечных батарей

останется на прежнем уровне.

Планируемое компанией “Wacker Siltronic” 5%-ное повышение выпуска полупроводникового кремния в 2003 г. должно быть осуществлено за счет увеличения производства материала полупроводникового сорта на 100 т - до 2,6 тыс. т и материала для солнечных батарей также на 100 т - до 1,6 тыс. т.

Товарная структура мирового производства поликристаллического кремния (тонн)

	2002 г.			2003 г. ¹⁾		
	I	II	III	I	II	III
В с е г о	20350	15400	4950	23150	16350	6800
США	9650	7400	2250	11850	7850	4000
Hemlock Semiconductors	5100	3100	2000	5300	3300	2000
ASiMI	1900	1900	-	2150	2150	-
СП SGS-ASiMI	150	-	150	1900	-	1900
MEMC	1500	1500	-	1500	1500	-
Mitsubishi Msterials Polisilicon	1000	900	100	1000	900	100
Япония	5700	4500	1200	6100	4900	1200
Токуяма	3600	2600	1000	4000	3000	1000
Mitsubishi Materials Polisilicon	1400	1200	200	1400	1200	200
Sumitomo Titanium	700	700	-	700	700	-
ФРГ						
Wacker Siltronic	4000	2500	1500	4200	2600	1600
Италия						
MEMC	1000	1000	-	1000	1000	-

¹⁾ Прогноз.

П р и м е ч а н и е. I - всего, II - полупроводниковый сорт, III - материал для солнечных батарей.



Загрузка мощностей по выпуску поликристаллического кремния в мире в 2003 г., по оценке, составит 87%, тогда как в 2002 г. данный показатель равнялся 76%, а в 2001 г. - 68%. Таким образом, имеется вероятность того, что к 2005 г. встанет вопрос о необходимости инвестиций в расширение производственных мощностей в этой сфере.

Мировые мощности по выпуску поликристаллического кремния (тонн в год)

	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г. ¹⁾
В с е г о	24600	26100	26700	26700
США	13800	13800	14400	14400
Hemlock Semiconductors	6100	6100	6100	6100
ASiMI	4000	4000	2400	2400
СП SGS-ASiMI	-	-	2000	2000
МЕМС	2700	2700	2700	2700
Mitsubishi Materials Polysilicon	1000	1000	1200	1200
Япония	5600	7100	7100	7100
Tokuyama	3300	7100	7100	7100
Mitsubishi Materials Polysilicon	1600	1600	1600	1600
Sumitomo Titanium	700	700	700	7000
ФРГ				
Wacker Siltronic	4200	4200	4200	4290
Италия				
МЕМС	1000	1000	1000	1000

¹⁾ Прогноз.

Крупным рынком поликристаллического кремния является Япония. Его импорт в страну в 2002 г. снизился по сравнению с 2001 г. на 17% - до 5,16 тыс. т вследствие сокращения ввоза товара из США, а также в связи с использованием его складских запасов. Запасы поликристаллического кремния полупроводникового сорта в Японии в течение прошлого года сократились на 300 т - до 4400 т. В 2002 г. вдвое увеличился ввоз в страну поликристаллического кремния из Великобритании (за счет увеличения отгрузок материала для солнечных батарей).

Географическая структура японского импорта поликристаллического кремния (тонн)

	2000 г.	2001 г.	2002 г.
В с е г о	4857	5453	5166
США	3956	4161	3456
ФРГ	759	825	823
Великобритания	126	379	792
Прочие страны	16	89	95

Цены на поликристаллический кремний полупроводникового сорта на японском рынке снизились с 5200 - 5400 иен за кг в 2001 г. до 5000 - 5200 иен (41-43 US\$) в 2002 г., однако продуценты не исключают возможности их повышения в дальнейшем.



По оценкам экспертов, потребность России и Белоруссии в поликристаллическом кремнии на 2003-2005 гг. составляет 350 т (в “электронном” - 270 т, в “солнечном” - 80 т)²¹.

Себестоимость производства поликремния электронного качества традиционными методами (структура различных производителей приведена в таблице) составляет от 21,6 до 42,8 US\$/кг²².

Таблица Структура себестоимости производства 1 кг поликремния, полученного различными способами, различными производителями, при объеме производства 1000 т/год, US\$

Статья затрат	Сименс-процесс, ТХС	Сименс-процесс с рециклом ТХС	Фирма Hemlock, ДХС	Union Carbide, моносилан	Сименс-процесс, ТХС	Union Carbide, моносилан	Фторидный метод
	Стержневой реактор				Реактор с псевдоожиженным слоем		
Технический кремний	4,4	1,27	1,38	1,38	1,36	1,38	—
Тетрахлорсилан	6,24	0,58	1Д7	1,00	0,76	1,00	—
Водород	2,16	0,48	0,56	0,16	0,45	0,16	—
Прочие виды сырья	6,98	1,4	1,4	1,4	0,3	0,28	0,04 (SiO ₂)
Итого сырье	7,34	3,73	4,52	3,94	3,03	2,82	0,04
Электроэнергия	9,6	7,5	5,4	4,2	3,66	2,64	0,6
Пар	4,08	3,2	4,8	3,2	1,62	3,2	—
Другие виды энергии	—	—	—	—	0,09	—	—
Итого энергия	13,68	10,7	10,2	7,4	5,37	5,6	0,6
Зарплата	1,8	1,8	1,8	1,8	1,2	1,2	0,8
Другие виды прямых расходов	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	—
Итого прямые расходы	23,54	16,95	17,24	13,86	10,32	10,34	1,44
Накладные расходы	19,36	15,27	14,11	19,54	11,28	11,28	1,44
Полная себестоимость	42,80	32,22	31,35	33,40	21,60	21,62	2,88

Примечание: ТХС - трихлорсилан, ДХС - дихлорсилан

3.12. Рынок монокристаллического кремния и пластин

Мировые отгрузки кремниевых пластин величиной не менее 200 мм (8 дюймов), на которые приходится примерно 60% суммарных отгрузок данных пластин, в июле 2002 г. достигли максимального уровня в 5,2 млн. шт., но в

²¹ 43 (158) 8-14 ноября 2001 «Московская промышленная газета»

²² по перспективной фторидной технологии теоретически возможно снижение до 2,9-3,3 US\$/кг



октябре соответствующий показатель снизился до 4,5 млн. Высокими темпами в последнее время увеличиваются мировые отгрузки 300-миллиметровых (12-дюймовых) кремниевых пластин. По оценке, они возросли с 34 тыс. шт. в ноябре 2000 г. до 200 тыс. в октябре 2002 г. К концу 2003 г. и в 2004 г. прогнозируется их рост соответственно до 400 тыс. и 500 тыс. шт. в месяц.

Спрос на 300-миллиметровые кремниевые пластины растет ускоренными темпами. В начале 2003 г. он составил, по оценке, 200 тыс. шт. в месяц, а к концу года прогнозируется его рост до 400 тыс. шт. в месяц. В



Рисунок 12. Слиток монокристаллического кремния

2002 г. японский экспорт монокристаллического кремния в количественном выражении в целом увеличился на 31%, а в стоимостном - на 41%. Такое превышение стоимостного показателя над количественным было обусловлено расширением отгрузок дорогостоящих 300-миллиметровых пластин.

Некоторые производители с целью удовлетворения растущего спроса расширяют свои производственные мощности по выпуску пластин диаметром

300 мм. В 2002 г. мировые мощности по выпуску указанной продукции увеличились на 45%, а в 2003 г. ожидается их дальнейший рост. Расширение своих мощностей осуществляют, в частности, следующие компании:

“Komatsu Electronic Metals”; производит полированные пластины на заводе в г. Миядзаки (мощности сокращены до 15 тыс. шт. в месяц) и монокристаллические и эпитаксиальные пластины на предприятии в Нагасаки, которое специализируется на выпуске 300-миллиметровых пластин и мощности которого предполагается повысить до 30 тыс. шт. в месяц. В целом в период с конца 2001 г. до 2005 г. компания планирует расширить мощности по выпуску 300-миллиметровых кремниевых пластин с 10 тыс. шт. в месяц до 45 тыс. “Komatsu” рассматривает возможность создания совместного предприятия для производства 300-миллиметровых пластин.

“Mitsubishi Sumitomo Silicon”; выпускает монокристаллические кремниевые пластины на предприятии в преф. Ямагата и эпитаксиальные пластины на заводе в преф. Сага, где проводятся работы, направленные на увеличение мощностей вдвое. В настоящее время компания имеет производственные мощности по выпуску 300-миллиметровых пластин в 100 тыс. шт. в месяц и намерена их расширить к началу 2004 г. до 150 - 200 тыс. шт. в месяц.

“Shin-Etsu Semiconductors”; с февраля 2001 г. повысила производство 300-миллиметровых кремниевых пластин на своем заводе в г. Сиракава (преф. Фукусима). К весне 2003 г. компания предполагала осуществить расширение мощностей с 75 тыс. шт. в месяц до 100 тыс. ввиду повышения спроса на товар со стороны Тайваня и США. В дальнейшем мощности компании могут быть увеличены до 300 тыс. шт. 300-миллиметровых кремниевых пластин в месяц.

“Wacker Siltronic”; строит новый завод по производству 300-миллиметровых кремниевых пластин в г. Фрайберге (ФРГ). Первоначальные



масштабы отгрузок, начало которых планируется на август 2004 г., составят 60 тыс. шт. в месяц. В дальнейшем производственные мощности будут расширены до 150 тыс. т в месяц. В настоящее время компания имеет мощности по выпуску 300-миллиметровых пластин в 75 тыс. т на предприятии в г. Бургхаузен (ФРГ) и в 10 тыс. шт. в месяц в преф. Ямагути (Япония), но они используются не полностью.

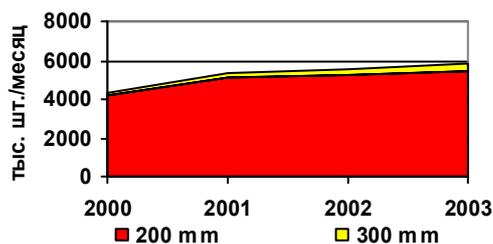
“МЕМС”; планирует расширить вдвое свои мощности по выпуску 300-миллиметровых кремниевых пластин - с 20 тыс. до 40 тыс. шт. в месяц. Компания выпускает монокристаллический кремний в Республике Корея, США и Японии, а эпитаксиальные пластины - в Японии.

Мировые производственные мощности по выпуску кремниевых пластин (тыс. шт. в месяц)

	2000	2001	2002	2003 ¹⁾
200-миллиметровые пластины	4240	5080	5210	5400
Komatsu Electronic Metals	400	550	600	650
LG Siltron	200	250	250	300
МЕМС	700	700	700	700
Mitsubishi/Sumitomo Silicon	1050	1300	1300	1300
Mitsubishi Materials Silicon	450	600	600	...
Sumitomo Metals	600	700	700	...
Shin-Etsu Semiconductors	1000	1200	1200	1200
Toshiba Ceramics	250	300	300	300
Wacker Siltronic	640	780	860	950
300-миллиметровые пластины	80	210	305	345-445
Komatsu Electronic Metals	10	10	15	30
МЕМС	20	20	20	20
Mitsubishi/Sumitomo Silicon	15	70	100	100-150
Shin-Etsu Semiconductors	15	75	75	100-150
Toshiba Ceramics	5	10	10	10
Wacker Siltronic	15	25	85	85

¹⁾ Прогноз.

Структура мирового производства пластин



Японские отгрузки монокристаллического кремния выросли в 2002 г. на 23% - до 4455 т после сокращения в 2001 г. на 31%. При этом отгрузки на внутренний рынок в прошлом году увеличились на 17% - до 2521 т, а экспорт - на 31% - до 1934 т. Темпы роста оказались значительно выше, чем прогнозировалось в начале 2002 г.



(7%), что было обусловлено расширением спроса на товары широкого потребления - сотовые телефоны, DVD-R и электронное оборудование для автомобилей.

Ожидается, что в 2003 г. японские отгрузки монокристаллического кремния возрастут на 8% - до 4,8 тыс. т. Ожидается, что экспорт из страны повысится на 10% - до 2130 т, а отгрузки на внутренний рынок - на 6% - до 2670 т. Такой рост также будет связан с восстановлением спроса на полупроводники для сотовых телефонов, бытовой электронной техники, автомобильных электронных приборов. Однако темпы роста в 2003 г. будут ниже, чем в 2002 г., поскольку рынок персональных компьютеров расширяется не столь быстро, как предполагалось.

По оценке "Japan Semiconductor Producers' Association", суммарные японские продажи полупроводниковых материалов, включая экспорт, в 2002 г. в стоимостном выражении увеличились на 5,3% - до 914,8 млрд. иен после резкого падения в 2001 г. на 51%. Прогнозируется, что ввиду возрастания спроса на 300-миллиметровые кремниевые пластины среднегодовые темпы роста продаж полупроводников в 2002 - 2005 гг. повысятся до 18%, а сами продажи будут оцениваться следующим образом (млрд. иен): 2003 г. - 1073,2, 2004 г. - 1366,7, 2005 г. - 1487,6.

Характеристика японского рынка монокристаллического кремния (т)

	2000	2001	2002	2003 ¹⁾
Производство	5349	3536	4310	4650
Отгрузки	5238	3626	4455	4800
На внутренний рынок	3029	2153	2521	2670
Экспорт	2209	1473	1934	2130
Импорт кремниевых пластин	841	8191	1246	...

¹⁾ Прогноз.

Примечание. I - 2000 г., II - 2001 г., III - 2002 г., IV - 2003 г.

На сегодняшний день Подольский ХМЗ - единственный в СНГ, успешно функционирующий производитель полупроводникового и солнечного кремния. Объем производства растет на 20% ежегодно. Завод производит 27 тонн монокристаллического кремния солнечного качества, что составляет больше 16% от мирового производства, и 15 тонн поликремния в месяц. Также на заводе имеется собственное производство кварцевых тиглей (емкостей для выращивания монокристаллов). На заводе работает 1450 человек, а объем продаж в первом полугодии 2002 г. достиг 255 млн руб.²³.

3.13. Преобразователи силовой энергетики

В силу неравномерности освещенности поверхности и динамики ее изменения в течении даже короткого промежутка времени ССЭ включают в себя эффективные коммуникационные устройства, основанные на мощных, а для промышленных ССЭ супермощных полупроводниковых приборах. Такие приборы должны иметь сложное сочетание параметров, как по предельным

²³ Журнал "Управление компанией" № 9 за 2002 год «Рынок солнца» Д. Качановский



токовым нагрузкам, так и по динамическим характеристикам, которые являются во многом взаимоисключающими. Выбор полупроводниковых приборов с оптимальным сочетанием технико-экономических параметров определяется заданием и схематическим решением.

Условия конкретной работы требуют применения в качестве активного элемента электрической схемы (силовая часть) преобразователя высоконадёжного полупроводникового прибора со сложным сочетанием электрических параметров. Получение заданных параметров в структуре прибора современными технологическими приёмами требует использование высококачественного кремния с высокой однородностью электрофизических параметров, низким уровнем активных примесей и структурных дефектов. Влияние дефектов на характеристики приборов можно разделить на такие категории как:

- Уменьшение пробивного напряжения на всей площади p-n перехода или на её локальном участке;
- Увеличение обратного тока и тока утечки;
- «Шнурование» тока в прямом или обратном направлении;
- Уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда, в результате которого возрастают прямое падение напряжения и обратный ток и ухудшаются динамические характеристики структур.

Получение необходимого сочетания характеристик и качественных параметров кремния предусматривает обязательное нейтронное (ядерное) легирование (Подробнее описано в разделе 4.18 на стр. 41).



4. Основные технологии ПРОЕКТА

В рамках ПРОЕКТА предполагается использовать набор различных ноу-хау в области получения кристаллического кремния, разработанных в течении последних десятилетий. Оригинальные технологии, используемые в ПРОЕКТЕ, защищены патентами ЗАО «ЭЛЛИНА-НТ».

4.14. Описание процесса обогащения кварцевого песка

Сырье

Кремний (Si-атомный номер 14, ат.м. 28,086) по распространенности в природе занимает второе место после кислорода (29,5% массы земной коры). В элементарной форме в природе не встречается и содержится в земной коре в виде силикатов и кремнезема (SiO₂).

Рисунок 13. Разработка карьера



Россия обладает многочисленными месторождениями кварцитов и кварцевых песков, пригодных для производства технического (металлургического) кремния. Metallургический кремний получают из брикетированной шихты на основе обогащенного кварцевого песка.

Для обогащения наиболее пригодны кварцевые пески Ташлинского (Ульяновская обл.), Лужского (Ленинградская обл.) и Игирминского (Иркутская обл.) месторождений.

ПРОЕКТ предусматривает использование кварцевых песков Лужского месторождения. Запасы месторождения превышают 200 млн. м³. На настоящий момент сооружен карьер для открытой гидромониторной добычи песка и начато строительство обогатительной фабрики, использующей инновационную технологию. Из-за отсутствия финансирования строительство фабрики законсервировано.

Для производства кварцевых тиглей, используемых при выращивании моно и мультикристаллических слитков, требуется кварц высокой чистоты. Природные и обогащенные кварциты и кварцевые пески России не пригодны для изготовления тиглей. Положительные результаты достигаются при использовании обогащенного природного кварца, в т.ч. горного хрусталя месторождений Полярный Урал (Россия), Бразилии или Мадагаскара.

4.15. Технология получения кремниевого порошка высокой чистоты

Обычно, используемый для производства поликристаллического кремния и кремнийорганических соединений, порошок кремния производят путем размола кускового кремния в шаровых мельницах. Технология приводит к увеличению содержания (загрязнению) в продукте железа,



избыточному измельчению и значимым потерям сырья при размоле. Производство взрывоопасно.

Металлургический кремний чистотой Si 98-99% производится путем восстановления его углеродом из природного (не обогащенного) кварцита в дуговых электрических печах. Производство металлургического кремния является энергоемким, удельный расход электроэнергии составляет 11 300-12 500 кВт ч/тонну, доля энергозатрат в себестоимости продукта достигает 26-27%.

В рамках ПРОЕКТА предполагается использовать новый²⁴ способ выплавки кремния из брикетированной шихты на основе обогащенного кварцевого сырья и измельченных восстановителей (нефтяной кокс или технический углерод) с добавками в шихту кускового кварца и древесной щепы.

Применение брикетированной шихты даст следующие преимущества:

- за счет применения чистых шихтовых материалов (обогащенного кварцевого песка) повысится качество металлургического кремния;
- за счет однородности шихты улучшится ведение процесса плавки, уменьшатся удельные расходы электроэнергии и сырьевых материалов;
- улучшится экологическая обстановка в районах производства металлургического кремния

Будет создано производство, основанное на инновационной технологии гидрохимического рафинирования технического (металлургического) кремния Si 98-99% до кремниевого порошка высокой чистоты Si>99,95%²⁵.

Максимальная потребность производств ПРОЕКТА в металлургическом кремнии составит ~ 21 000 тыс. тонн/год.

Основные технологические объекты металлургического комплекса

- шихтовый корпус с отделениями дозирования, смешения шихтовых материалов, брикетирования шихты и подготовке брикетов к плавке;
- электропечной цех с установками сухой газоочистки;
- отделение дробления слитков и гидрохимического рафинирования кремния;
- отделение готовой продукции с участками расфасовки и упаковки;
- лаборатория;
- система управления производством;
- объекты энергетического и ремонтного хозяйства, склады сырья и вспомогательных материалов;

Процесс производства кремниевого порошка высокой чистоты методом гидрохимического рафинирования кускового кремния

Сырьем в данной технологии служит кусковой кремний технической чистоты (металлургический кремний) с повышенным содержанием кальция. Основа метода в том, что при кристаллизации расплава кремния вначале

²⁴ Способ разработан и освоен в опытно промышленном масштабе в ВАМИ

²⁵ Проведены научные исследования и проектно-конструкторские работы. ВАМИ 1990-1993

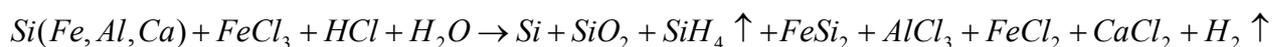


образуются чистые кристаллы кремния. В связи с тем, что t плавления кремния – 1417 °С, дисилицида железа -1220 °С, а дисилицида кальция – 980 °С, все примеси концентрируются между зёрнами чистого кремния.

Расплав чернового кремния разливается в графитовые изложницы и дробится до размера кусков ~ 40 мм, которые загружаются в реактор, где во взвешенном слое подвергаются обработке соляной кислотой с добавкой хлорного железа.

При обработке кусков кремния травильным раствором происходит их разрушение по межкристаллическим зёрнам с образованием порошка кремния и одновременно идет процесс рафинирования порошка от примесей.

Суммарно этот процесс описывается уравнением:



Регенерация травильного раствора осуществляется путем компенсации израсходованного количества соляной кислоты и окисления двухвалентного железа до трехвалентного газообразным хлором.

После завершения процесса диспергирования и рафинирования кремниевый порошок тщательно промывается, подвергается гидроклассификации на трехситном грохоте и пофракционно сушится. Каждая фракция поступает в свой бункер, затаривается и отгружается потребителям для производства трихлорсилана или синтеза кремнийорганических соединений. Самая мелкая фракция <0,07 мм содержит много примесей и выводится из процесса для получения растворимого стекла.

Технологией предусмотрено двухстадийное рафинирование кремниевого порошка. На второй стадии порошок промывается водой и подвергается повторному рафинированию смесью плавиковой и азотной кислот. Во время процесса растворяются интерметаллиды железа и др., выпадающие в виде мелких зёрен.

Получение кремниевого порошка высокой чистоты может включать в себя повторение операций очистки по схеме: переплавка кремниевого порошка с введением в шихту соединений кальция и повторного диспергирования кремния травильными растворами в одну или две стадии.

Основные технологические объекты химико-металлургического комплекса

- отделение дробления кускового кремния;
- отделение индукционных печей для переплавки и подшихтовки кремния;
- отделение готовой продукции
- объекты энергетического, складского и ремонтного хозяйства
- лаборатория;
- система управления производством;
- объекты энергетического и ремонтного хозяйства, склады сырья и вспомогательных материалов;

4.16. Описание процесса производства поликристаллического кремния

Процесс состоит из трех этапов. Кремний, подлежащий очистке, химически переводится в летучее соединение трихлоросилан (TCS). Данное



летучее соединение легко очищается с помощью ректификации (фракционная перегонка). Очищенное соединение затем преобразуется в чистый поликремний. Каждый из указанных этапов означает снижение содержания примесей на несколько порядков. Основная проблема - удаление соединений бора и углерода. Данным методом, разработанным фирмой Siemens, осуществляется свыше 80% мирового производства поликристаллического кремния полупроводниковой чистоты (поликремний). Силановым методом, разработанным фирмой Union Carbide на основе технологии осаждения поликремния фирмы Komatsu Electronic Metals производится менее 20% мирового объема данного продукта. В рамках проработки ПРОЕКТА предполагается исследовать возможность использования перспективного электролитического способа получения поликремния из тетрафторида кремния (SiF_4). Тетрафторид кремния можно получать из кварцевого песка фторированием обратным элементарным фтором (Российский патент на изобретение RU № 2156220 С1 от 26.05.99). По теоретическим проработкам, использование данной технологии позволит на порядок снизить себестоимость производства поликремния (с 21-42 US\$ до 2,9-3,3 US\$)²⁶.

Упрощенная технологическая схема производства поликремния



Данная схема не включает другие хлорсиланы (моно-, ди-, полихлорсиланы), образующиеся в незначительных объемах. Не включены потоки безопасности – азотная защитная атмосфера и образование отходов.

Синтез

Металлургический кремний улучшенного качества Si 99,95% дробится, измельчается, после чего, в реакторе кипящего слоя, вступает в реакцию с HCl. При этом образуется TCS.



Доля TCS в т.ч. зависит от условий реакции и не достигает 100%. Доля тетрахлорида кремния (STC) составляет 20-40%.

²⁶ Степень готовности к выпуску товарной продукции высокая. У авторов имеются рабочие чертежи всего нестандартного оборудования, за исключением чертежей электролизера для электролитического разложения тетрафторида кремния. Этот электролизер подлежит разработке. В промышленности имеются аналоги необходимого оборудования, например электролизеры для производства алюминия, циркония и др. металлов.



Ректификация (перегонка)

Получаемые из каждой смеси соединения должны быть отделены и очищены. Смесь охлаждается и TCS очищается ректификацией. Прочие хлорсиланы используются для осаждения кремния на следующем этапе. Система ректификационных колонн (количество, последовательность, параметры) проектируется при помощи математической модели. TCS имеет точку кипения при 31⁰С, что позволяет легко обеспечить теплоизоляцию, нагрев и охлаждение ректификационной колонны. При ректификации не используются и не вводятся дополнительные химикаты, что позволяет получать продукты самой высокой чистоты.

Химическое осаждение из паров (CVD)

Очищенный TCS, вместе с водородом, подается в реактор восстановления. Высокочистый кремний получается в виде прутков. С TCS протекает следующая реакция:



Остальные хлорсилкаты не принимаются во внимание. В процессе используется температура в ~ 1100-1150 ⁰С, в зависимости от молярного отношения (H₂/SiHCl₃) и прочих расчетных параметров (чистота, геометрические параметры, структура поверхности).

Удаление отходов

Кремниевая пыль, образующаяся в реакторе кипящего слоя при использовании металлургического кремния (синтез, регенерация) будет нейтрализовываться при помощи известняковой суспензии. После нейтрализации образуется поверхностные оксидные пленки, что делает производство взрывобезопасным.

Отходы будут брикетироваться и повторно использоваться. Хлорсиланы, содержащие газы (азот и хлористый водород) будут удаляться системой водяного распыления, с последующей нейтрализации известняком.

Азот

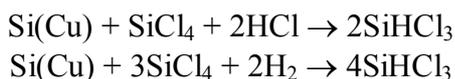
Азот в процессе используется как хладагент и защитный газ, поскольку TCS не должен вступать в контакт с атмосферой. Хлорсиланы будут удаляться водяным распылением или пламенем.

Конденсация и сепарация

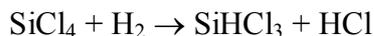
Будет использоваться отработанная система, основанная на базе различия в точек кипения компонентов, эффективно разделяющая водород, хлористый водород и хлорсиланы. При наличии жидкого азота в качестве основной охлаждающей среды система прекрасно управляется через теплообменники. Система даёт возможность повторно использовать все компоненты на уровне чистоты, ранее достигнутой очисткой, поскольку не предусматривает использование или ввод дополнительных химикатов.

Регенерация STC (тетрахлорида кремния)

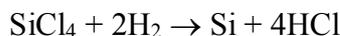
Осуществляется в реакторах кипящего слоя. Известны и используются в промышленности несколько процессов. В рамках ПРОЕКТА предполагается использовать несколько методов:



а также:



или:



Последние две реакции могут быть выполнены как путем химического осаждения паров или в реакторах кипящего слоя, так и другими путями.

Тетрахлорид кремния (STC)

Предполагается использовать SiCl_4 в качестве сырьевого источника, чтобы возместить потери хлора. Эта субстанция наименее опасна при транспортировке. Ожидается, что в соответствии с количеством отходов, потребность в компоненте будет менее 1000 тонн в год.

Технология замкнутого цикла

ПРОЕКТОМ предусматривается использование, разработанной фирмой «ЭЛЛИНА-НТ», технологии получения поликремния. По данной технологии поликремний производится в замкнутом цикле при помощи химического парового осаждения, где газообразные субстанции фильтруются для удаления механических примесей, затем охлаждаются жидким азотом, а хлористый водород отделяется через сублимацию и вместе с тетрахлоридом кремния при помощи кремния используется для синтеза трихлорсилана. Трихлорсилан затем снова используется для химического парового осаждения паров кремния.

Основная проблема метода – выдерживать *замкнутость цикла*, т.е. соблюдать материальный баланс «сбалансированным». Сбалансированность будет достигнута за счет:

- изменений условий для всех химических реакций (химическое паровое осаждение, синтез, регенерация), в которой происходят количественные изменения каких-либо химических компонентов;
- обеспечения контроля систем оборудования в реальном времени на основе математической модели процесса;
- избыточного количества контейнеров-емкостей, в которых идут процессы.

Основные потоки (материальный баланс)

Технологические потоки, в расчетах, приведены для одного часа (часовой поток) и 7000 часов –годовой объем производства в 2000 тонн поликремния.





Данные расчеты только иллюстрируют возможность использования технологии, в реальном производстве большинство потоков могут и должны изменяться в широких пределах.

Для реакции химического парового осаждения:

SiHCl_3 (TCS) – 7,0 т (52,000 молей) и 12,450 м³ (520,0000) H₂.

Из реактора химического парового осаждения:

- 300 кг поликремния (10,700 молей, т.е. ~ 20% выхода (извлечение));
- 950 кг (26,100 молей) HCl; 1,0 т (6,000 молей) SiCl₄ (STC); 4,9 т (36,000 молей) SiHCl₃ (36,000 молей)
- примерно, такое же количество (минус 10,700 молей).

Регенерация SiCl₄:

- Входит: 1,0 т (6,000) SiCl₄ и – когда мы берем только первую реакцию – Si(Cu) + SiCl₄ + 2HCl → 2SiHCl₃ – 200 кг Si (6,000 молей + 20% для потерь) и 0,440 т (12,000 молей) HCl.
- Выход: 1,6 т SiHCl₃ (12,000 молей)

Ситуация будет много сложнее, фактически выход не 100%; некоторое количество SiCl₄ не прореагирует и будет рециркулировать, но конечный результат будет приблизительно тем же самым.

Синтез SiHCl₃:

Чтобы возместить остаток, который в данном случае составляет 0,5 т SiHCl₃ (4,000 молей).

- Входит: 135 кг Si (4,000 молей + 20% потерь)
- 0,44 т HCl (12,000 молей).
- Выход: 0,5 т (4,000 молей) SiHCl₃

Система ректификации

Система должна переработать (параллельно) приблизительно 12 тонн хлорсиланов.

Количество отходов

В системе материального потока должно приниматься во внимание количество отходов (расчетные - часовой поток и 7000 часов годового производства):

- 10 кг полихлорсиланов (SiH_{0,5}Cl_{1,5})_n. при гидролизе, необходимо добавить 20 кг (STC) SiCl₄, для обеспечения безопасности.
- хлорсиланы с более низкой точкой кипения (SiH₂Cl₂, SiH₃Cl), образующиеся при осаждении, регенерации и синтезах, будут использованы (пущены в оборот) для осаждения кремния, в той мере, в какой это будет возможно.

Необходимо учитывать, что не менее 3% кремния содержится в соединениях «носителях», выводящих загрязнения из системы и составляющие ~ 70 кг хлорсиланов (3% от хлорсиланов, поступающих от регенерации и синтеза);

- вместе это 100 кг, что означает около 700 тонн в год (420 тонн SiO₂ и 780 тонн CaCl₂). Все хлорсиланы легко и полностью гидролизуются на простом оборудовании и проверяются



длительной термической операцией. Гидратированное SiO_2 (нейтрализованное известью) может идти прямо в отвал²⁷.

- для производства 300 кг чистого поликремния требуется ~ 400 кг (700 т в год) металлургического кремния. Отходы кремниевой пыли от реакторов с кипящим слоем, после нейтрализации, могут быть направлены в отвал или повторно использованы на металлургических предприятиях.

Таким образом данная технология является безотходной и экологически безопасной. Не утилизируемыми отходами являются абгазы и промывочные воды. Абгазы после санитарной очистки не содержат токсичных соединений (азот, водород). Промывочные воды образуются при очистке абгазов и содержат хлорид кальция и не токсичный SiO_2 . Количество промывочных вод уменьшается по сравнению с «открытой схемой» в 1,5-2 раза и будут упариваться до содержания хлорида кальция в 35%, после чего использоваться для обработки дорог в зимнее время. Использование «замкнутой» технологии приведет к резкому снижению расходных норм и повышению выхода продукции с 20-24% до 95%, с одновременным снижением отходов в 5-10 раз.

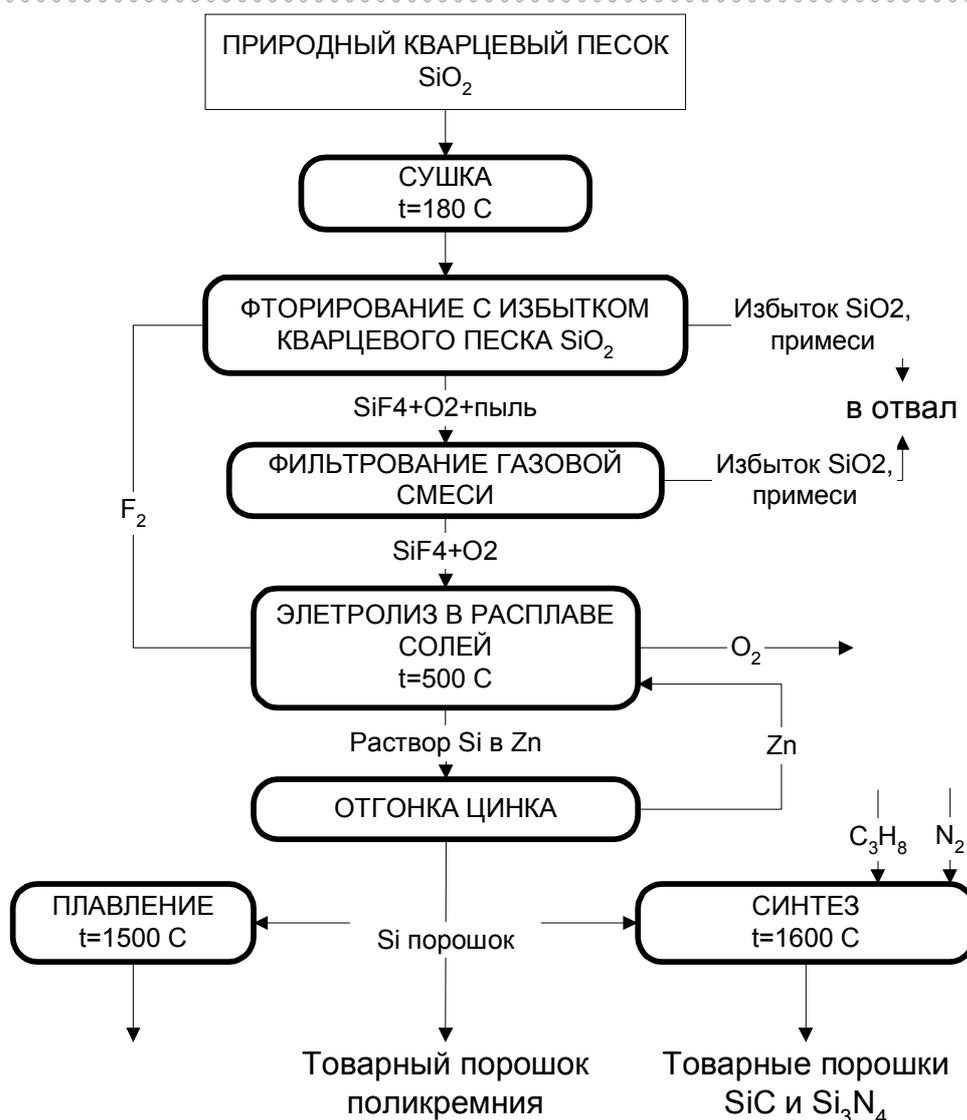
Спецификации на компоненты производства

TCS (трихлорсилан) солнечный:	
Форсфор и кремний	<1 ppb
бор	<1 ppb
углерод	< 1ppm
TCS – полупроводник	
фосфор и кремния	<0,3 ppb
бор	<0,2 ppb
углерод	0,3 ppm
Метилдихлорсилан и этилхлорид (оба)	<0,1 ppm
Поли Si-солнечный	
Доноры (P, As, Sb)	<600 ppt
Акцепторы (B, Al)	<200 ppt
Углерод	<0,4 ppm
Размер кристалликов	1-30/5 – 150 мм
Поверхность «по мере роста» (Тепловой удар)	
Поли Si – для роста кристаллов	
Размер кристалликов	1-20/10- 150 мм
Концентрация: Доноры (P,As, Sb)	<150 ppt
Акцепторы (B, Al)	< 50 ppt
Углерод	< 0,1 ppm
Железо	<500 ppt

²⁷ Примечание: Это хороший материал для химической промышленности, CaCl_2 можно использовать для «соления» дорог.



Перспективная схема производства поликристаллического кремния электролитическим способом из тетрафторида кремния



4.17. Описание процесса выращивания слитков солнечного кремния

По совокупности физико-химических свойств кремний относят к разряду неметаллических материалов. Высокая реакционная способность кремния в расплавленном состоянии вынуждает вести процессы выращивания кристаллов кремния либо в вакууме, либо в атмосфере защитного инертного газа. Увеличение объема кремния в процессе кристаллизации требует специальных технологических приемов, исключающих возможность затвердевания свободной поверхности раньше кристаллизации слитка. Эти факторы учитываются при создании технологий выращивания кристаллов кремния.

Основными методами выращивания монокристаллов кремния являются метод Чохральского и метод бестигельной зонной плавки



В начале 90-х годов более 85% от общего объема производства монокристаллического кремния для нужд микроэлектроники, силовой электроники и солнечной энергетики было выращено по методу Чохральского.

Метод Чохральского предусматривает выращивание монокристаллов из кварцевого тигля с расплавом кремния, в который опускается затравка определенного сечения и заданной ориентации. По мере нарастания кремния шток с затравкой постепенно поднимается вверх, вращая вокруг вертикальной оси. Тигель с расплавом вращают в противоположном направлении.

Современная установка для выращивания монокристаллов кремния по методу Чохральского представляет собой сложный инженерно-технический комплекс, состоящий из камеры для выращивания монокристалла в кварцевом тигле с механизмами, обеспечивающими вращение и перемещение верхнего и нижнего штоков, вакуумного агрегата, системы электропитания, блока очистки, подачи и регулирования инертного газа, блока водяного охлаждения и системы автоматического управления процессом.

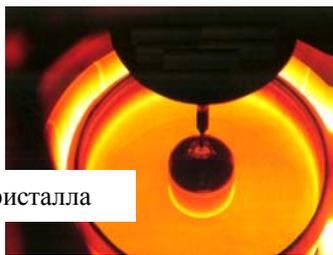


Рисунок 14. Рост кристалла

Одним из недостатков получения монокристаллов кремния по методу Чохральского является загрязнение расплава растворяющимся кварцевым тиглем. При этом в расплав попадает кислород и ряд других примесей, имеющих в кварцевом тигле. Для устранения этого явления был разработан метод бестигельной зонной плавки, особенностью которого является создание в стержне зоны расплава без применения контейнера. По этому методу затравка подводится снизу, а плавится конец исходного кремниевого стержня. Зону расплава создают в вертикально расположенном стержне. В этой зоне развивается давление, обусловленное массой расплава. Сам расплав удерживается силами поверхностного натяжения, обеспечивающими возможность создания зоны расплава высотой до 1,5 см при сохранении ее устойчивости. Эта величина не зависит от диаметра переплавляемого стержня. После введения в расплав затравки и начала роста кристалла затравка постепенно опускается с растущим кристаллом вниз; в том же направлении движется и исходный стержень. Как и в первом методе также применяется взаимно противоположное осевое вращение затравки и плавящегося стержня. В качестве источника нагрева могут быть использованы - радиационный, электронно-лучевой, индукционный и другие методы. В промышленности наибольшее распространение получил высокочастотный (индукционный) метод нагрева, когда стержень кремния охватывается кольцевым индуктором, по которому пропускается электрический ток высокой частоты в диапазоне 1,7-5,3 МГц. Бестигельный метод обычно используется для получения особо чистых кристаллов.

Концепция предлагает использование обоих методов. Метод бестигельной зонной плавки будет носить вспомогательный технологический характер, использующийся при получении особо чистых монокристаллов кремния, применяющихся в реакторах водородного восстановления трихлорсилана при производстве поликристаллического кремния.

Для производства солнечного монокремния будет использован метод Чохральского, но с принципиальными усовершенствованиями



Принципиально новым моментом предлагаемой авторами технологии выращивания монокристаллов кремния является использование в процессе выращивания кристалла комбинированного магнитного поля - постоянного аксиального и переменного вращающегося, что позволяет выращивать кристаллы со структурой, близкой к совершенной. В свою очередь, использование комбинированного магнитного поля послужило основой еще одного "ноу-хау" предлагаемой технологии, ускоряющего процесс кристаллизации в десятки раз.

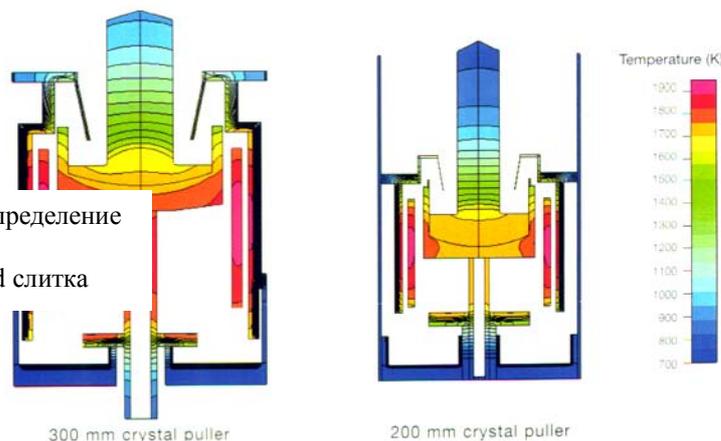
Использование этих и других усовершенствований позволило авторам технологии придать методу Чохральского законченный промышленный характер, что привело к созданию Центральным конструкторским бюро машиностроения "ДОНЕЦ" (г.Луганск, Украина) технологического комплекса для выращивания монокристаллов кремния диаметром 300 мм и длиной 2100 мм (с возможностью увеличения диаметра выращиваемого слитка до 400 мм) методом Чохральского в магнитном поле - "ПЕГАС-300". Загрузка тигля в "ПЕГАС-300" планируется равной 320-600 килограмм.

Помимо выращивания монокристаллов кремния Концепция предусматривает получение мульткристаллических слитков кремния. Такие слитки со столбчатой структурой, массой более 100 кг широко используют

для изготовления кремниевых пластин, применяемых в солнечной энергетике.

Производство мульткристаллического кремния является в настоящее время наиболее дешевым методом получения сверхчистого кристаллического

Рисунок 15. Распределение температуры, в зависимости от d слитка



кремния.

Производство крупных слитков мульткристаллического кремния массой 120-200 кг осуществляется методом приготовления расплава в квадратных кварцевых тиглях больших размеров с последующей направленной кристаллизацией слитков снизу вверх за счет охлаждения днища гелием. Такое производство обеспечивает получение заданной текстуры слитков, необходимую крупность зерен, а также эвакуацию растворенных в расплаве газов в верхнюю прибыльную часть. Полученные слитки режутся на более мелкие, которые с помощью проволочной резки режутся на пластины для солнечных элементов. По имеющимся данным более 1/3 всех солнечных батарей в последние годы изготавливаются на основе мульткристаллического кремния.

Технологический процесс производства мульти и монокристаллических слитков, помимо процесса выращивания слитков, предусматривает стадию как подготовки сырья и затравочных кристаллов. Стадия подготовки сырья предусматривает колку поликристаллических стержней на куски от 20 до 200 мм и специальные приемы удаления окисной пленки и других загрязнений методом химической обработки и отмывки, сортировку и подготовку мерных загрузок. Используемая в проекте



технология выращивания моно и мультикремния предполагает очистку поверхности выращенных кристаллов и доводку полученных слитков до товарной продукции, а также переработку отходов (скрапа) моно и мультикремния. Авторы проекта разработали специальные химико-технологические приемы очистки кристаллов и скрапа от различных посторонних примесей и включений и гидрохимических приемов отмыва с последующей санитарной обработкой промывных вод. Предлагаемые к использованию технологические приемы полностью соответствуют принципам безотходности и разделения среды человеческого обитания и технологических процессов. Технология реализует целый ряд мероприятий, позволяющих осуществить 100% утилизацию отходов производства. Так например, тепло, сопровождающее процесс выращивания кристаллов используется для отопления производственных помещений.

Перед началом каждой плавки проводится чистка печи, подготовка теплового блока, загрузка исходного сырья в тигель, крепление затравки в держателе, перемещение кристалла. Осуществляется проверка работоспособности всех систем обеспечения работы печи. Печь закрывается, откачивается воздух, подается аргон и включается нагреватель в режиме прогрева исходного сырья. Затем нагреватель переводится в режим плавления. Осуществляются этапы затравливания, выращивания «тонкой шейки», формирования конусной части слитка с выходом на заданный размер и выращивание монокристалла с обратным конусом в конце слитка. Процесс выращивания заканчивается отрывом кристалла от расплава, его охлаждением, вскрытием печи и ее разгрузкой.

Технология предусматривает тщательную проверку выращенного кристалла на соответствие стандартам качества. При этой процедуре ищутся части слитка, удовлетворяющие стандартам. Процедура включает в себя химическое травление кристалла, разметку кристалла, обрезку верхней и нижней части кристалла, отрезку контрольных пластин и выполнение других операций по подготовке слитка для оформления сертификата качества. Реализация всех этих операций требует специального оборудования.

4.18. Технология радиационного легирования слитков и пластин кремния в реакторах РВМК-1000 Ленинградской АЭС.

Легировать – латинское слово (*ligare*) в переводе означает – вводить добавку для улучшения свойств металлических изделий, добываясь однородного распределения лигатуры по объему.

В связи с повышением требований к качеству полупроводниковых материалов увеличивается спрос на монокристаллический кремний, нейтронно-лированный в ядерных реакторах.

На Ленинградской АЭС созданы облучательные каналы и производственный комплекс по нейтронному легированию слитков и пластин монокристаллического кремния диаметром 100-305 мм (4-12 дюймов).

Радиационное легирование кремния, поставляемого на облучение в виде монокристаллических слитков и пластин электронного и дырочного типа электропроводности, служит для получения легированного фосфором кремния.

При проведении нейтронного легирования решаются следующие задачи:



- Получение заданного типа проводимости;
- Перевод удельного электрического сопротивления (далее УВС) с исходного значения, как правило, более высокого в более низкое значение;
- Обеспечение распределения УВС по торцам и длине слитка не хуже нескольких процентов;
- Обеспечение высокой производительности и надежного ритма поставок.

Реактор РБМК-1000 наилучшим образом отвечает всем требованиям заказчиков и имеет бесспорные преимущества перед различными типами исследовательских и энергетических ядерных реакторов. В соответствии с ПРОЕКТОМ объем легирования слитков составит ~100 тонн/год (первая очередь). Общая продолжительность цикла облучения одной загрузки кремния 26 часов, производительность одного облучательного канала для слитков больших размеров ~ 75 тонн/год.