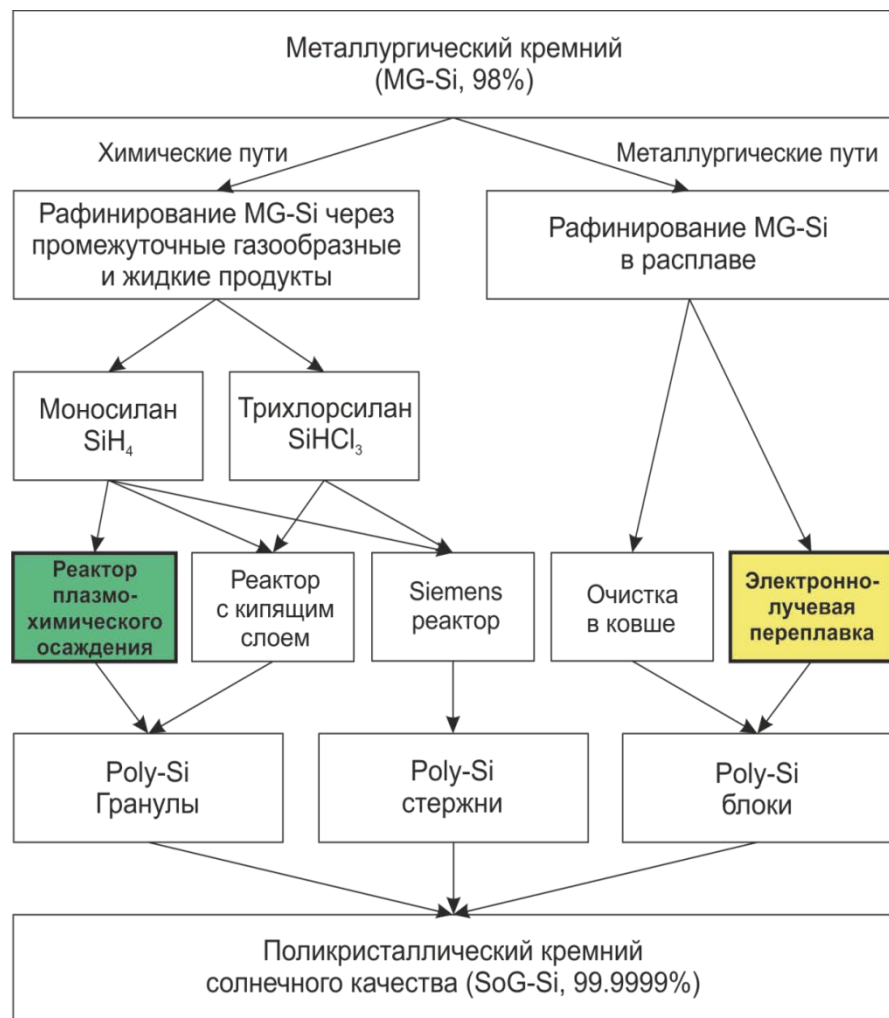


**Разработка технологии и промышленно-ориентированного
оборудования для производства кремния электронного и
солнечного качества электронно-пучковым рафинированием
металлургического кремния с использованием струйного
плазмохимического метода**

ООО «Научно-технический центр «ПЛАЗМА» г. Новосибирск
ФГБУН Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН г. Новосибирск
ОАО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ» г. Воронеж

Промышленные методы получения поликремния



Сименс-реактор (хлорсилановый процесс) – самая распространенная, экологически вредная, энергоемкая технология.

Фирмы: «GCL-Poly», «OSI», «Hemlok», «Tokuyama», «Wacker».

Объем мощностей производства: 300 000 тонн/год.

Реактор кипящего слоя – моносилановая, энергоэффективная технология. Представлена в промышленном масштабе только у одной фирмы «REC». Очень сложна технологически.

Объем мощностей производства: 25 000 тонн/год.

Очистка кремния в ковше путем переплавки и направленной кристаллизации. Кремний получается грязнее, чем у вышеописанных технологий. Сравнительно новая и перспективная технология. Наиболее близка к предлагаемой нами технологии.

Фирмы: «Elkem Solar», «JACO».

Объем мощностей производства: 15 000 тонн/год.

Перспективные методы получения поликремния

Наиболее перспективным направлением металлургического подхода к рафинированию кремния является электронно-пучковый переплав (англ. EBM – Electron-Beam Melting) в комбинации с плазменной обработкой.

В отличие от химических путей получения поликремния в металлургическом подходе не используются химически вредные и взрывоопасные вещества.

Такие работы пока не вышли из стен лабораторий, но уже получены обнадеживающие данные по энергоемкости, которая не превышает 15 кВт*ч/кг, что ниже всех существующих методов.

Основные команды, которые разрабатывают подобную предлагаемой в проекте технологию:

- **JFE Steel Corporation** (Япония);
- **Kawasaki Steel Corporation** (Япония);
- **UniCamp** (Бразилия);
- **Advanced Materials and Devices Laboratory** (Республика Корея);
- **Key Laboratory for Solar Energy Photovoltaic System** of Liaoning Province (Китай).

Компания	Расход сырья, кг/час	Мощность ЭП, кВт	Мощность плазмы, кВт	Уровень вакуума, торр	Удельные энергозатраты, кВт*ч/кг	Чистота Si, %
Kawasaki	5	100-300	150	-	50 - 90	99,9999
Kawasaki	50	750	700	-	29	99,9999
JFE Steel Corp.	2-12	20-80	-	5×10^{-4}	6,6 - 10	P < 0.1 ppm
JFE Steel Corp.	16-70	80-250	-	6×10^{-4}	3,5 - 5	P < 0.1 ppm
НТЦ «Плазма»*	10	15	10	1	2,5	Не менее 99,9999

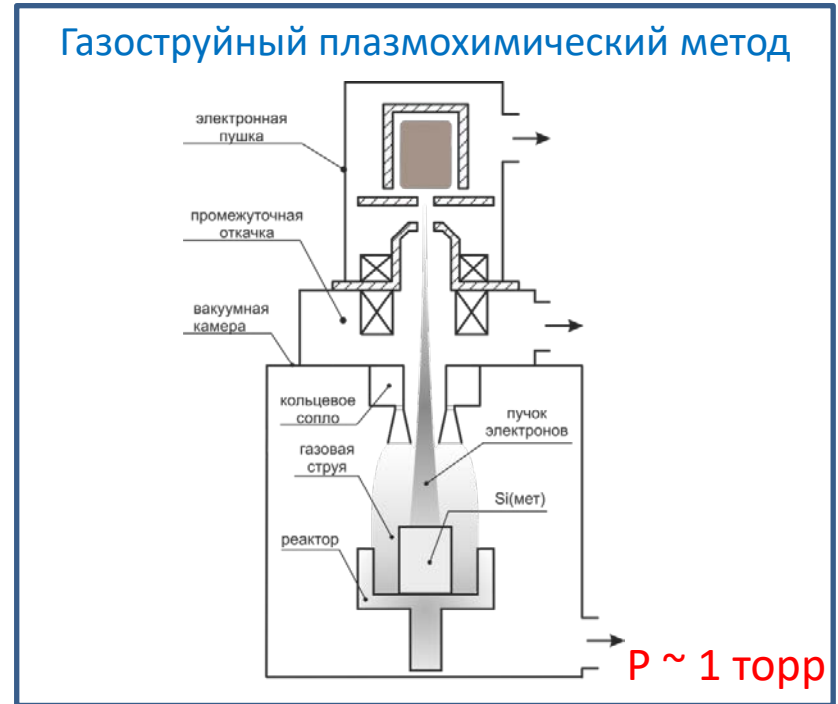
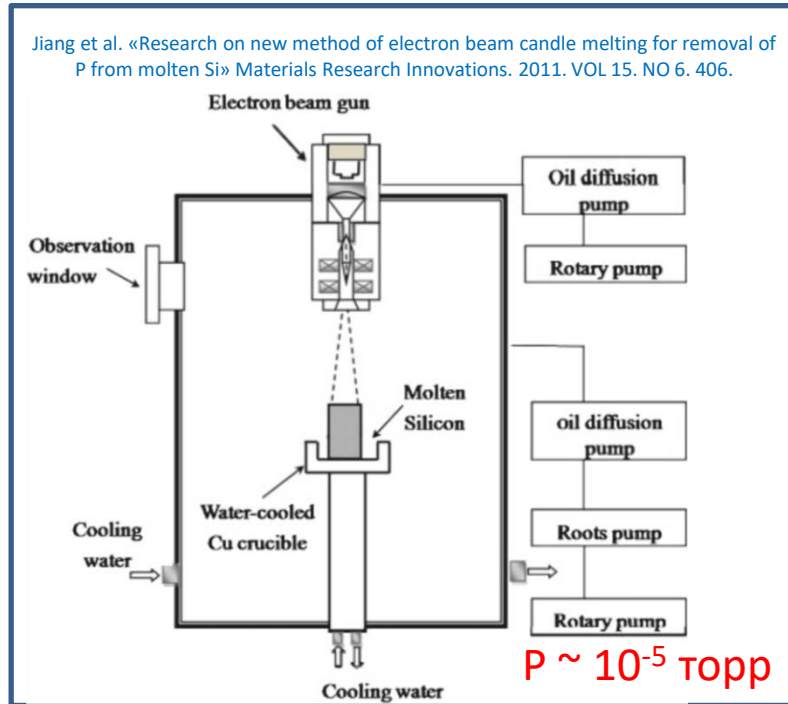
* Предполагаемые параметры технологии.

Рафинирование металлов с помощью пучков электронов давно вышло на промышленный уровень. Но этот способ рафинирования основан на использовании глубокого вакуума, что приводит к огромным габаритам установок и большим затратам на вакуумное оборудование.

Основные преимущества предлагаемой технологии:

- Отказ от больших заводов, переход на модульный принцип (меньшие площади производства, поэтапный запуск производства);
- Отказ от использования химически вредных и взрывоопасных веществ (экологически безопасная технология, снижение требований безопасности производства);
- Низкая энергоемкость процесса (не требует огромных электрических мощностей для организации производства);
- Снижение в разы капитальных затрат (быстрая окупаемость).

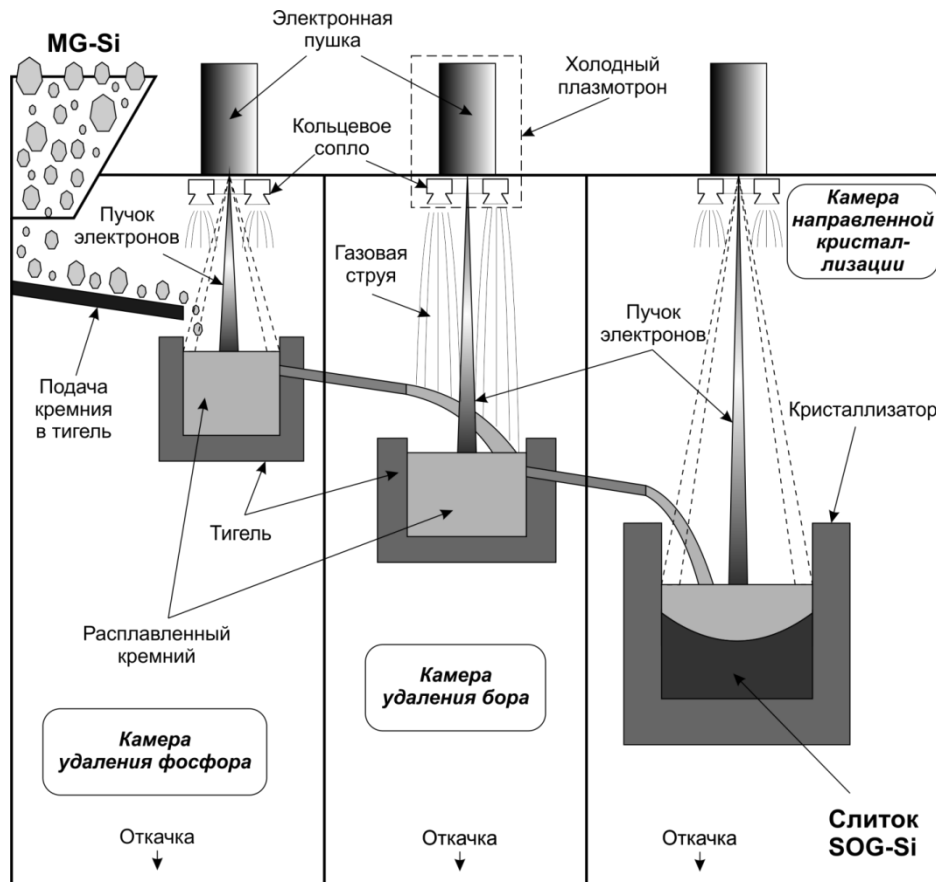
Сравнение с ближайшим аналогом



Основные преимущества нашего метода:

- Менее глубокий уровень вакуума в реакционной камере, связанный с использованием газового затвора, существенно сокращает затраты на откачное вакуумное оборудование и снижает себестоимость получаемой продукции;
- Возможность управления, контроля и модификации процесса рафинирования за счет проведения плазмохимических реакций, путем введения необходимых веществ в процесс в виде струи, помимо испарения и переплавки материала электронным пучком;
- Выполнение полного комплекса очистки кремния с использованием однотипного электронно-пучкового оборудования.

Схема блока рафинирования опытно-промышленной установки



Очистка металлургического кремния состоит из трех этапов:

1. Дефосфоризация кремния, за счет перевода его в газовую фазу и удаления при помощи вакуумных насосов*.
2. Удаление бора, за счет перевода его в летучие оксиды (BO , B_2O_3) или гидраты при использовании плазмохимических реакций*.
3. Направленная кристаллизация, поддерживаемая сканирующим электронным пучком, позволяет избавиться от труднолетучих примесей.

Основные параметры процесса:

- Ускоряющий потенциал до 30 кэВ;
- Ток пучка электронов до 0,5 А;
- Давление от 0,001 до 1 торр.

**также происходит частичная очистка от металлических примесей, что подтверждают результаты исследований*

Технические требования к опытно-промышленной установке

Параметр	Значение
Производимый продукт	Кремний солнечного качества (99,9999%)
Сырье	Металлургический кремний (98%)
Производительность опытно-промышленной установки (ОПУ), т/год	80
Количество холодных плазмотронов в модуле, штук	3
Режим работы, часов/год	8000
Расход металлургического кремния, т/год	100
Энергозатраты на процесс получения кремния солнечного качества, кВт*час/кг	50
Коэффициент переработки сырья, %	80
Рабочее давление в плазмохимическом реакторе ОПУ, торр	до 1
Площадь для размещения модуля, м ²	40
Прогнозируемая себестоимость продукта на ОПУ, руб./кг (\$/кг)	491,1 (8,18)
Прогнозируемая себестоимость продукта на серийной промышленной установке, руб./кг (\$/кг)	439,0 (7,32)

Промышленное производство кремния

Исходный продукт – металлургический кремний (чистота 98-99%)

Производители металлургического кремния

Россия	ЗАО «Кремний» г.Шелехов, Иркутская область	70 000 тонн/год
	ООО «СУАЛ-Кремний-Урал» г.Каменск-Уральский, Свердловская область	
Республика Казахстан	ТОО "МК "Kaz Silicon» г.Уштобе	28 000 тонн/год
	ТОО «Tau-Ken Temir» г.Караганда	

Конечный продукт – поликристаллический кремний солнечного качества (чистота 99,9999% - «2nd Grade PolySilicon (6N-8N)»)

Промышленное производство поликристаллического кремния

Россия	нет
Республика Казахстан	нет
Мировое	350 000 тонн/год

Потребители поликристаллического кремния в России и Республике Казахстан в области солнечной энергетики

	Основные потребители поли кремния	Запрос на поставки поликремния	Количество установок, обеспечивающих потребность, шт.
Россия	ООО «Гелиос-Ресурс»	1800 тонн/год по цене 10-16 \$/кг	29
	ООО «Солар Системс»	550 тонн/год по цене 14 \$/кг	
Республика Казахстан	ТОО «Kazakhstan Solar Silicon»	400 тонн/год	5

Количество установок, шт.	1	35
Стоимость проекта, млн. руб. (млн.\$)	150 (2,50)	1 900 (32)
Срок окупаемости, лет (с момента запуска производства продукции)	5	2

Потребность в России к 2020 году оценивается на уровне 6 000 тонн/год
(для производства такого количества кремния потребуется **75 установок**)

Экономические показатели проекта

Цена металлургического кремния марки «Silicon 553 min 98.8% fob China»
91 руб./кг (1,54 \$/кг)

Себестоимость поликристаллического кремния

Расходы на 1 кг кремния	1 установка	35 установки
Амортизация основного оборудования (7 лет)	142,9 руб./кг (2,382 \$/кг)	91,71 руб./кг (1,53 \$/кг)
Сырье (80% использование)	109,2 руб./кг (1,820 \$/кг)	109,2 руб./кг (1,82 \$/кг)
Энергозатраты на процесс (50 кВт*ч/кг при стоимости 1 кВт*ч – 3,5 руб.)	175 руб./кг (2,917 \$/кг)	175 руб./кг (2,92 \$/кг)
Ремонт основных средств (1,75% от стоимости оборудования)	2,50 руб./кг (0,042 \$/кг)	1,60 руб./кг (0,027 \$/кг)
Расходные материалы (5 % от стоимости основного сырья)	5,46 руб./кг (0,091 \$/кг)	5,46 руб./кг (0,091 \$/кг)
ФЗП сотрудников (5 сотрудников на одну установку)	56 руб./кг (0,933 \$/кг)	56 руб./кг (0,933 \$/кг)
Себестоимость поликремния	491,1 руб./кг (8,18 \$/кг)	439,0 руб./кг (7,32 \$/кг)

Средняя цена поликремния марки «2nd Grade PolySilicon (6N-8N)»
846 руб./кг (14,1 \$/кг)

Предполагаемый экономический эффект от производства – 407 руб./кг

Лабораторная проверка метода

Элемент	Содержание примеси, ppm	Требования к солнечному кремнию, ppm
Al	< 0,1	0,1
Mg	< 0,1	0,1
Fe	< 0,1	0,1
Ti	< 0,1	0,1
Cr	< 0,05	0,1
Cu	< 0,02	0,1
Ni	< 0,05	0,1
Mo	< 0,1	0,1
Co	< 0,06	0,1
Mn	< 0,01	0,1
Zn	< 0,7	0,1
B	< 0,05	1
P	< 1	0,6

“<” – означает, что эта величина является пределом обнаружения соответствующего элемента, т.е. реальная концентрация примесей может быть меньше.

Полученные результаты

(электронно-пучковый переплав)



Электронный пучок:
 $U=6\text{кВ}$; $I=100\text{mA}$; $P=600\text{ Вт}$

Давление в реакторе:
 $P_h=0,01\text{ торр}$

Навеска $\text{mg-Si} = 6\text{ г}$



Элемент	mg-Si исходный, ppmw	Si верх тигля, ppmw	Si дно тигля, ppmw	Требования к SoG-Si*, ppmw
Al	6,1	10	4,6	0,5
Ba	0,2	1,9	0,2	0,6
Ca	30	4,2	31	0,2
Co	< 2	28	< 2	0,1
Cr	3,4	120	6,5	0,1
Cu	7,5	32	2,5	0,1
Fe	760	11000	380	0,5
Mn	130	20	32	0,1
Na	9	< 6	< 6	0,2
Nb	10	98	2,6	0,1
Ni	31	480	14	0,5
Sn	14	34	16	0,1
Ta	< 20	51	< 20	0,1
Ti	45	14000	140	0,2
V	120	1200	33	0,1
Zr	1,8	27	0,6	0,1
B	700	600	20	1
P	< 10	< 10	< 10	0,6

*Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоний И.Ф. Технология полупроводникового кремния. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.

НТЦ «Плазма»

630055, г. Новосибирск, ул. М.Джалиля 3/1 оф. 86
ИНН 5408016285, КПП 540801001, ОГРН 1175476072705
[e-mail: stc.plasma@mail.ru](mailto:stc.plasma@mail.ru)

- Генеральный директор, к.т.н.
Городецкий Сергей Александрович
Тел.: +7 (913) 986 97 17
- Коммерческий директор
Миллер Алексей Александрович
Тел.: +7 (913) 955 74 88
- Директор по развитию
Быченков Алексей Вячеславович
Тел.: +7 (913) 750 24 42
- Директор по науке, д.ф.-м.н.
Шарафутдинов Равель Газизович
Тел.: +7 (913) 470 10 35
- Ведущий специалист
Константинов Виктор Олегович
Тел.: +7 (913) 791 31 75
- Ведущий специалист
Щукин Виктор Геннадьевич
Тел.: +7 (913) 928 03 94