

Кремний для солнечной энергетики

Александр Иосифович Непомнящих

Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН
E-mail: ainep@igc.irk.ru

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Содержание

- **Историческая справка**
- **Развитие солнечной энергетики**
- **Кварцевые материалы**
- **Карбо-термическое восстановление кремния**
- **Рафинирование расплава кремния**
- **Выращивание слитков мультикремния**
- **Структура межзеренных границ**
- **Лабораторная пилотная линия**
- **Пилотный проект**

Лаборатория синтеза минералов

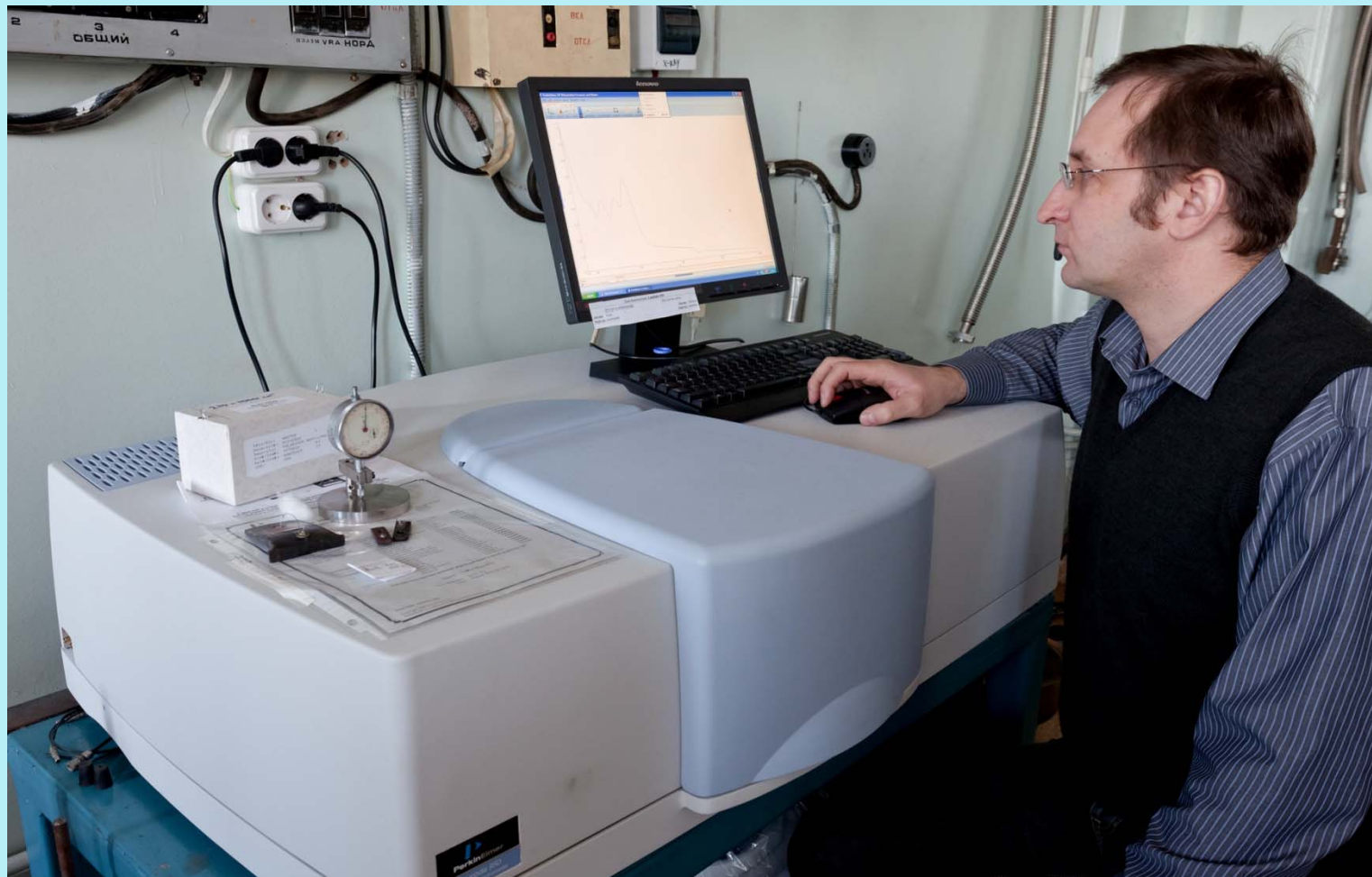


95 лет академику Л.В.Гаусону, Иркутск, 23 октября 2012 г



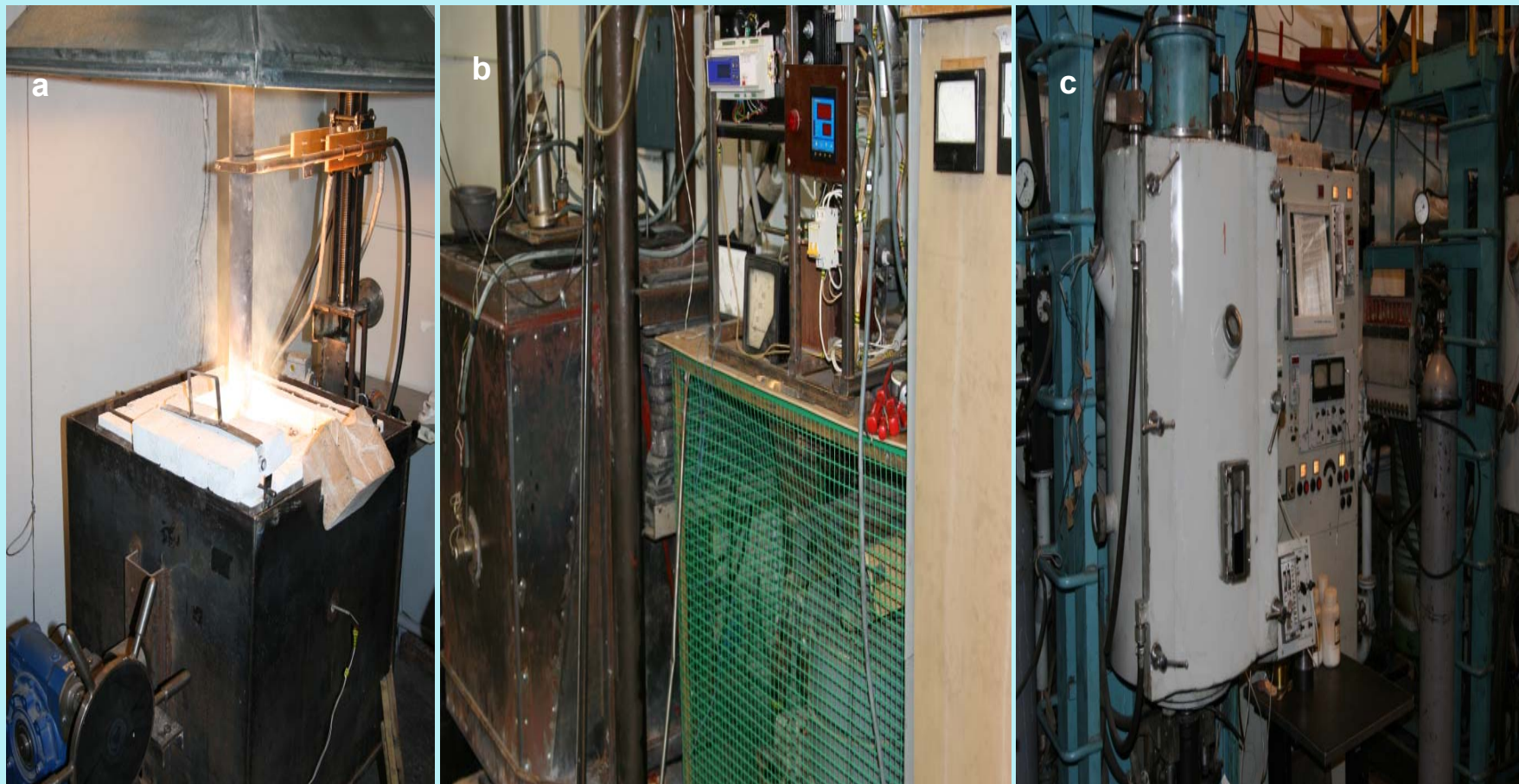
95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г



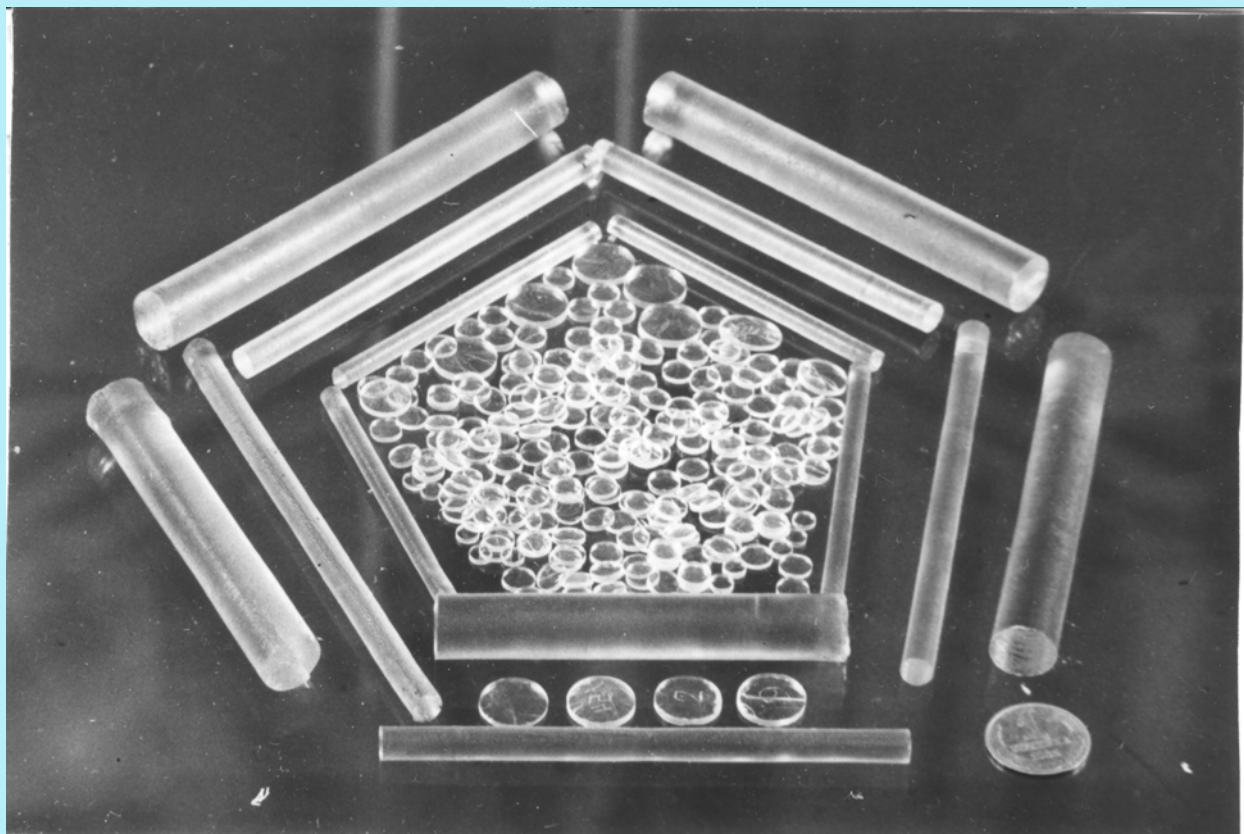




95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г



Термолюминесцентные монокристаллические детекторы ДТГ-4



Чернобыль – 26 апреля 1986 года.

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

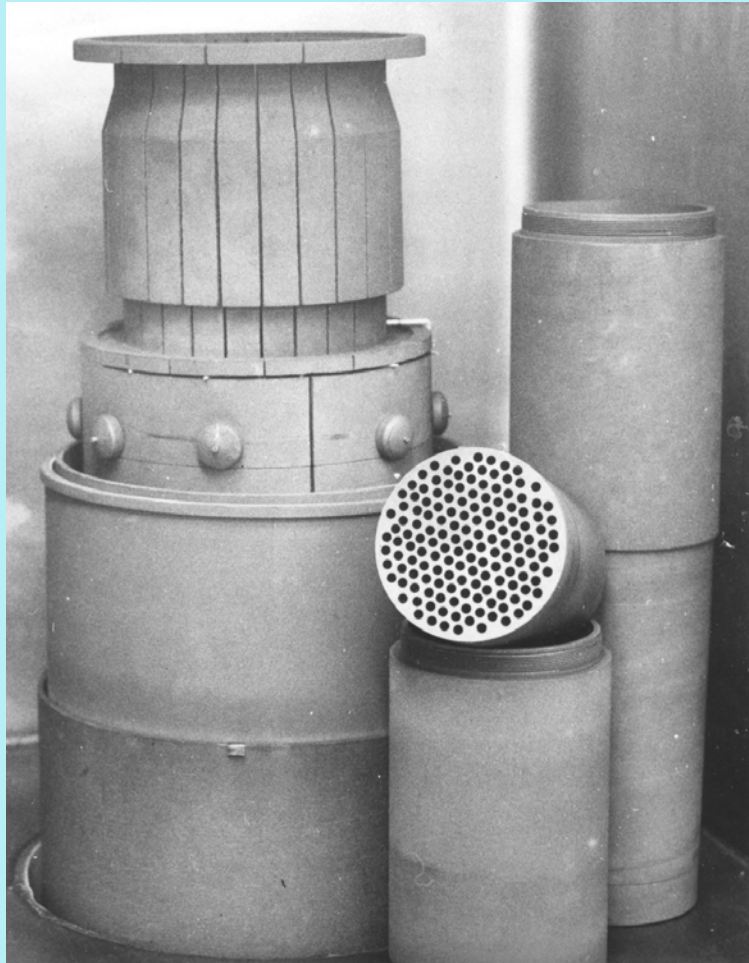
Термолюминесцентные монокристаллические детекторы ДТГ-4

LiF:Mg,Ti

(LiF:0.05%MgF₂,0.0005%TiO₂)

Однородность !

$$K_{Ef} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-V \delta / D)}$$



Общий вид комплекса АКЖДК-201



Термолюминесцентные монокристаллические детекторы

*"Разработка научных и практических основ
создания и организация серийного производства
комплекса средств термолюминесцентной
индивидуальной дозиметрии внешнего облучения
персонала и населения"*

Премия правительства РФ по науке и технике за 2004 год

Оптические широкозонные диэлектрики

Минералы со структурой берилла

Радиоэкология Байкальского региона

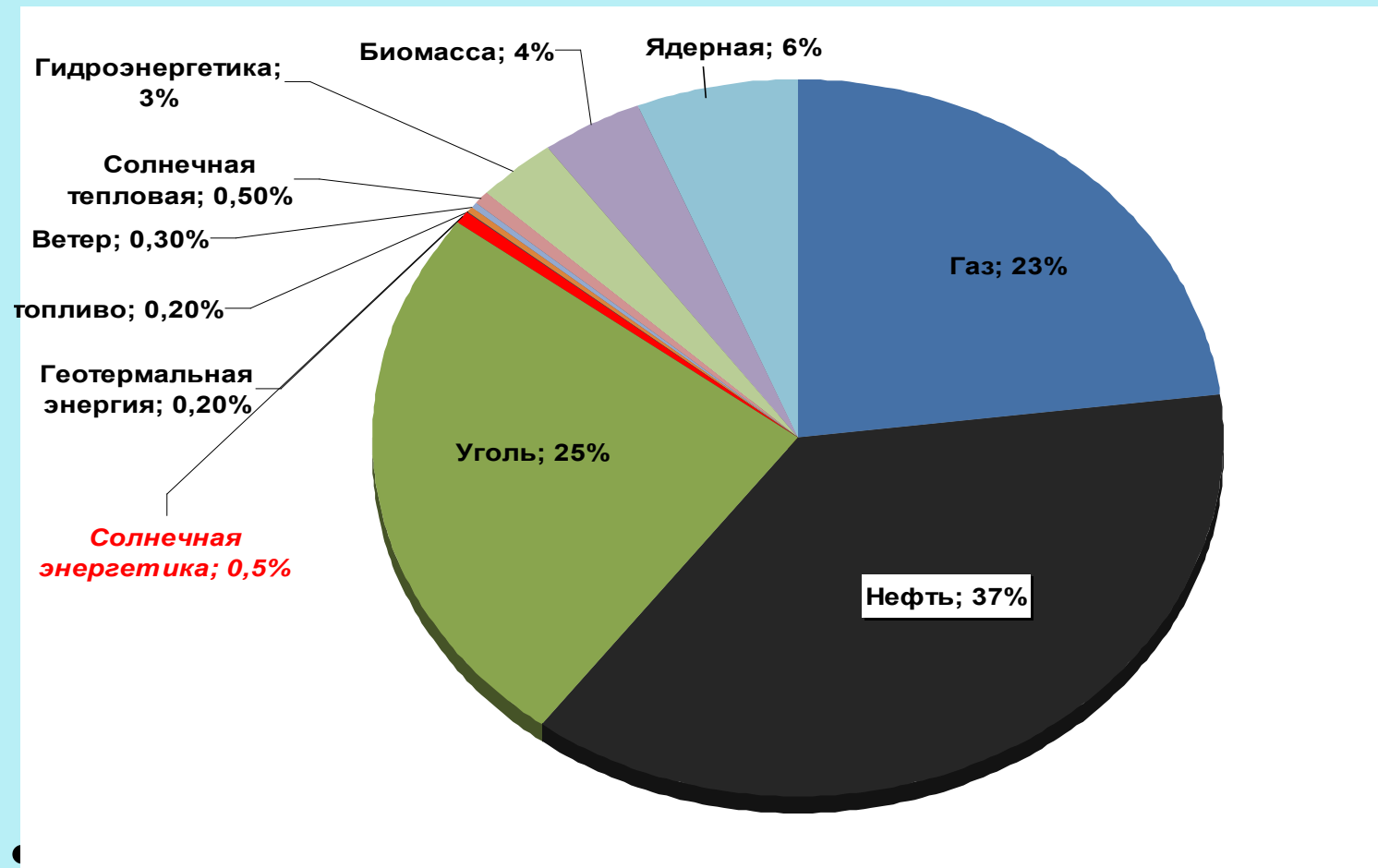
В.Д. Пампура, А.И. Непомнящих, С.Н. Мироненко, Г.П. Афонин. Применение метода термолюминесцентной дозиметрии в радиогеохимических исследованиях. Геохимия, 12, 1988, с.1789-1797

А.И. Непомнящих, Б.П. Черняго, А.Ф. Кузнецов, В.И. Медведев. Локальные выпадения на юге Иркутской области от наземных ядерных испытаний. ДАН, т. 369, N 21, 1999, с. 258-260.

Черняго Б.П., Непомнящих А.И. О радиоактивном загрязнении территории Прибайкалья от наземных ядерных испытаний. Геология и геофизика, 2008, 49, 2, стр. 171-178

В.Р. Chernyago, A.I. Nepomnyashchikh, V.I. Medvedev. Current radiation environment in the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory. Russian Geology and Geophysics. 2012,9,926-935.

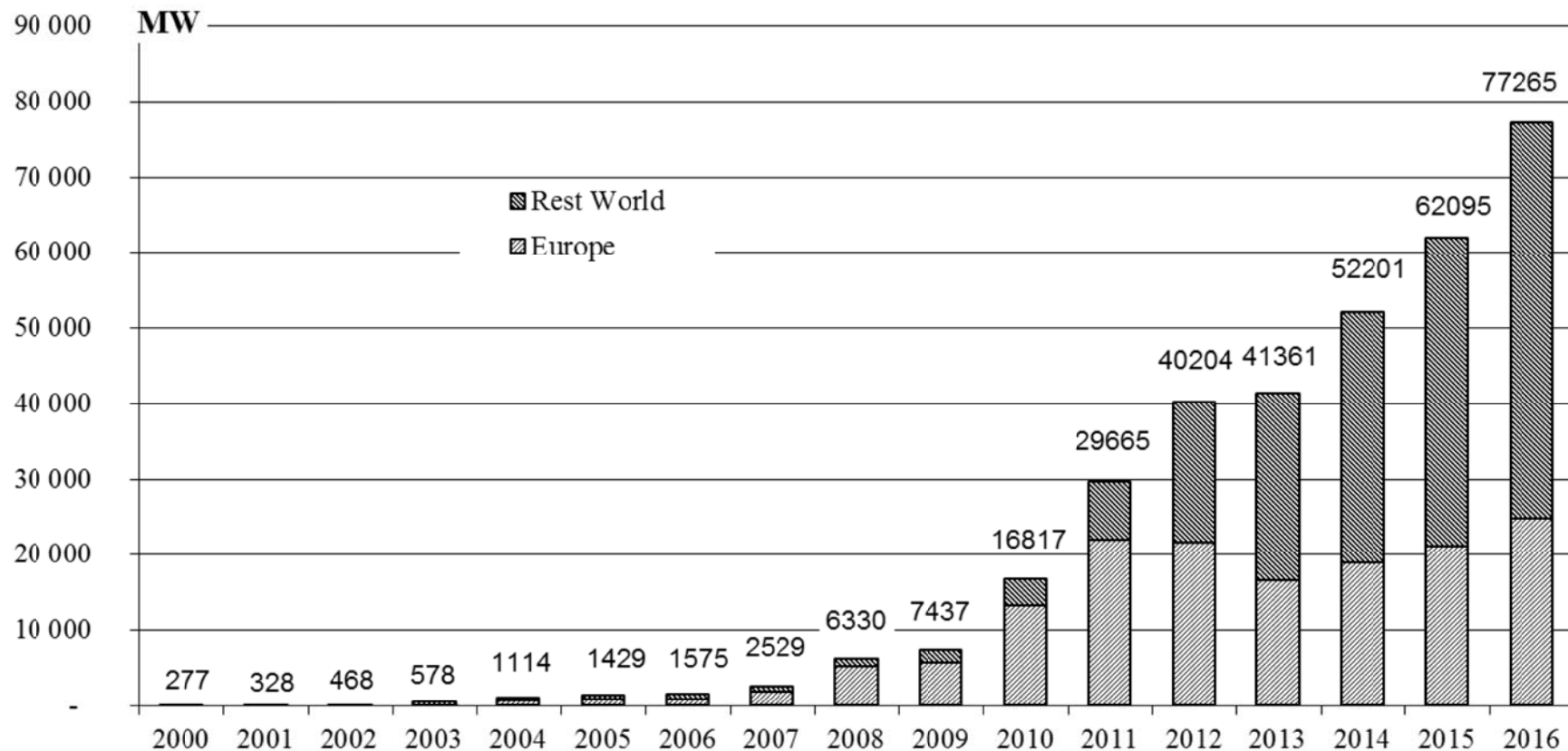
Кремний для солнечной энергетики (1996 г)



- Оценка доли выработки энергии от PV: 70 TWh/год
- Доля выработки энергии от PV в мире: 0.5%, в Европе 2 %.
- Доля выработки энергии от PV достигнет 10% к 2020 году.

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

За последние 10 лет рост мирового производства солнечных элементов составил более 25 % ежегодно, причем в 2011 году объем продаж увеличился на 70%.



Годовой объем производства солнечных модулей

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Figure 27 - Global cumulative installed capacity share 2011 (MW; %)

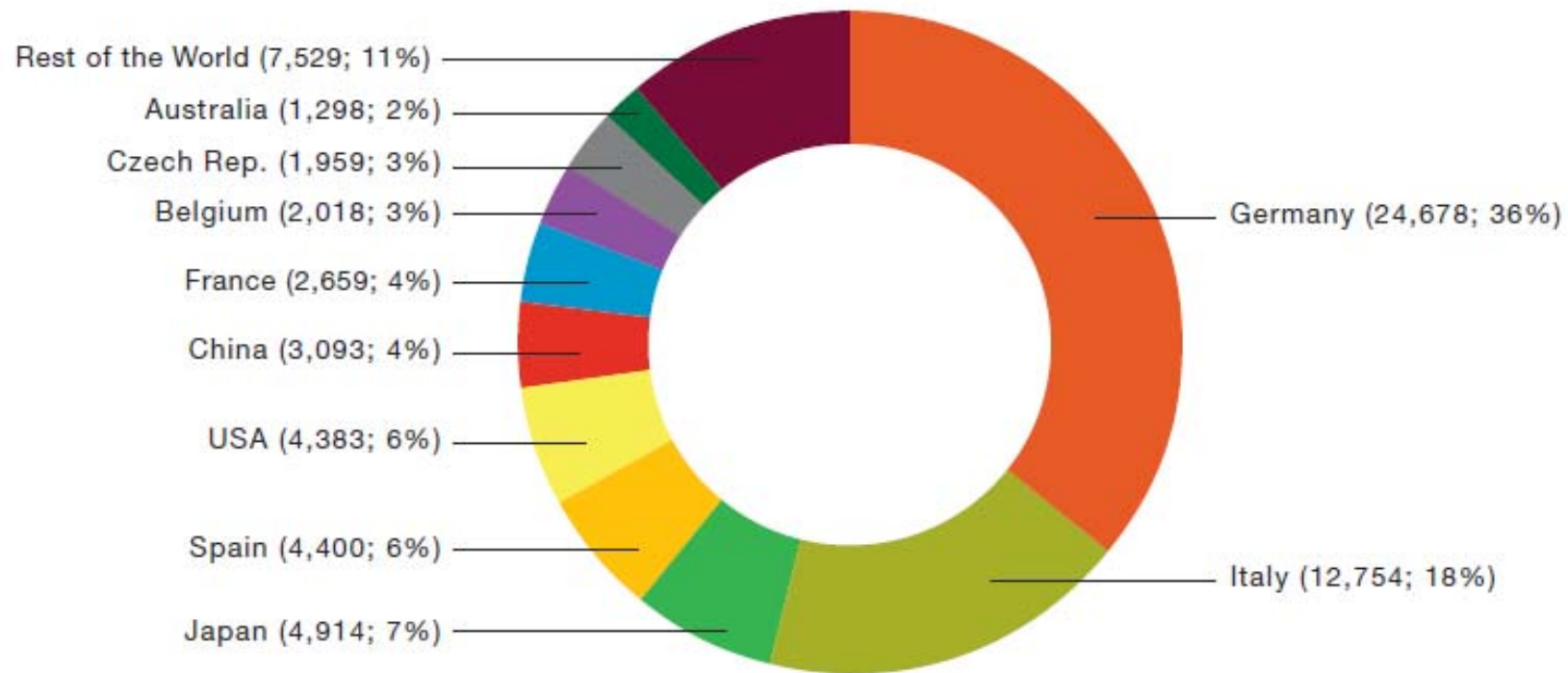
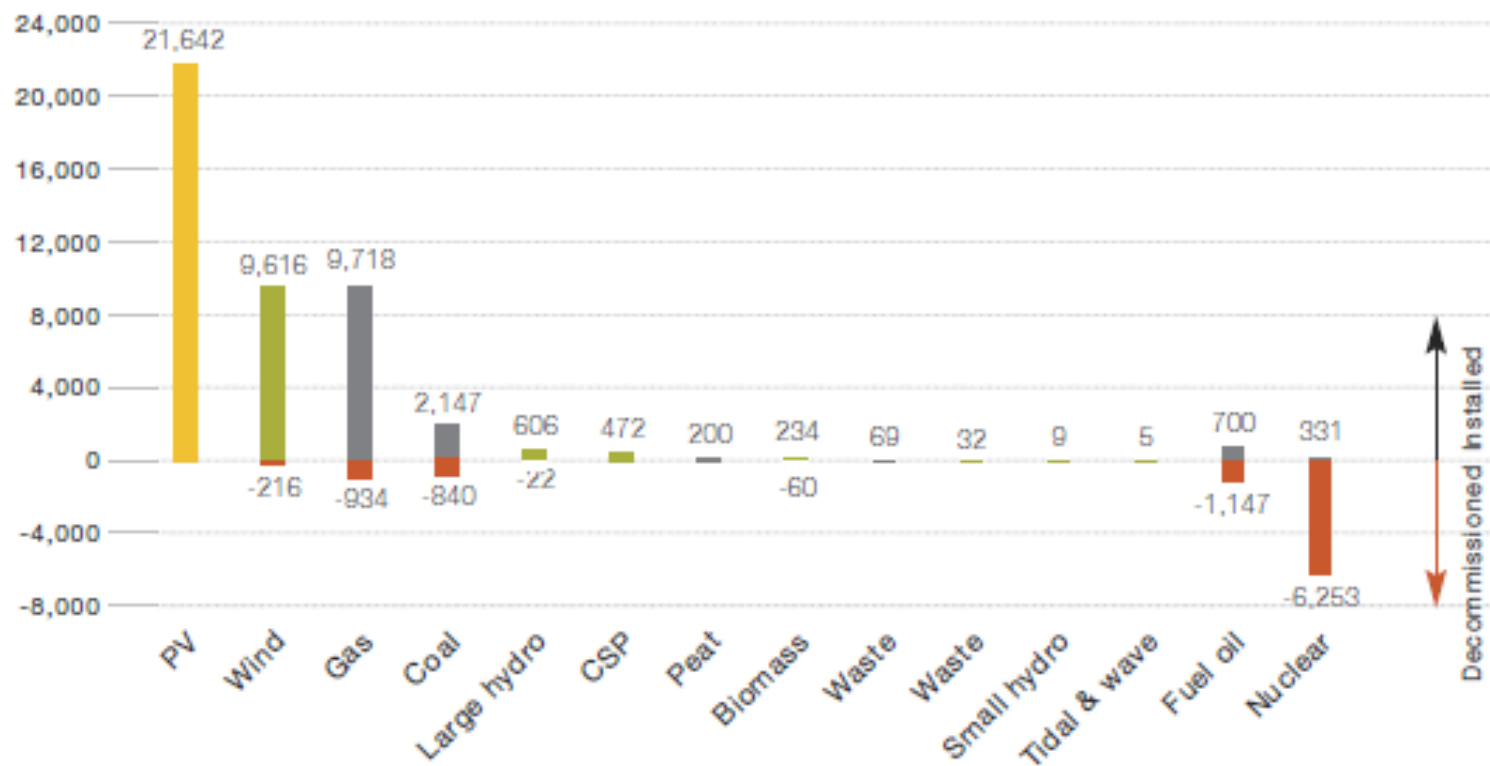
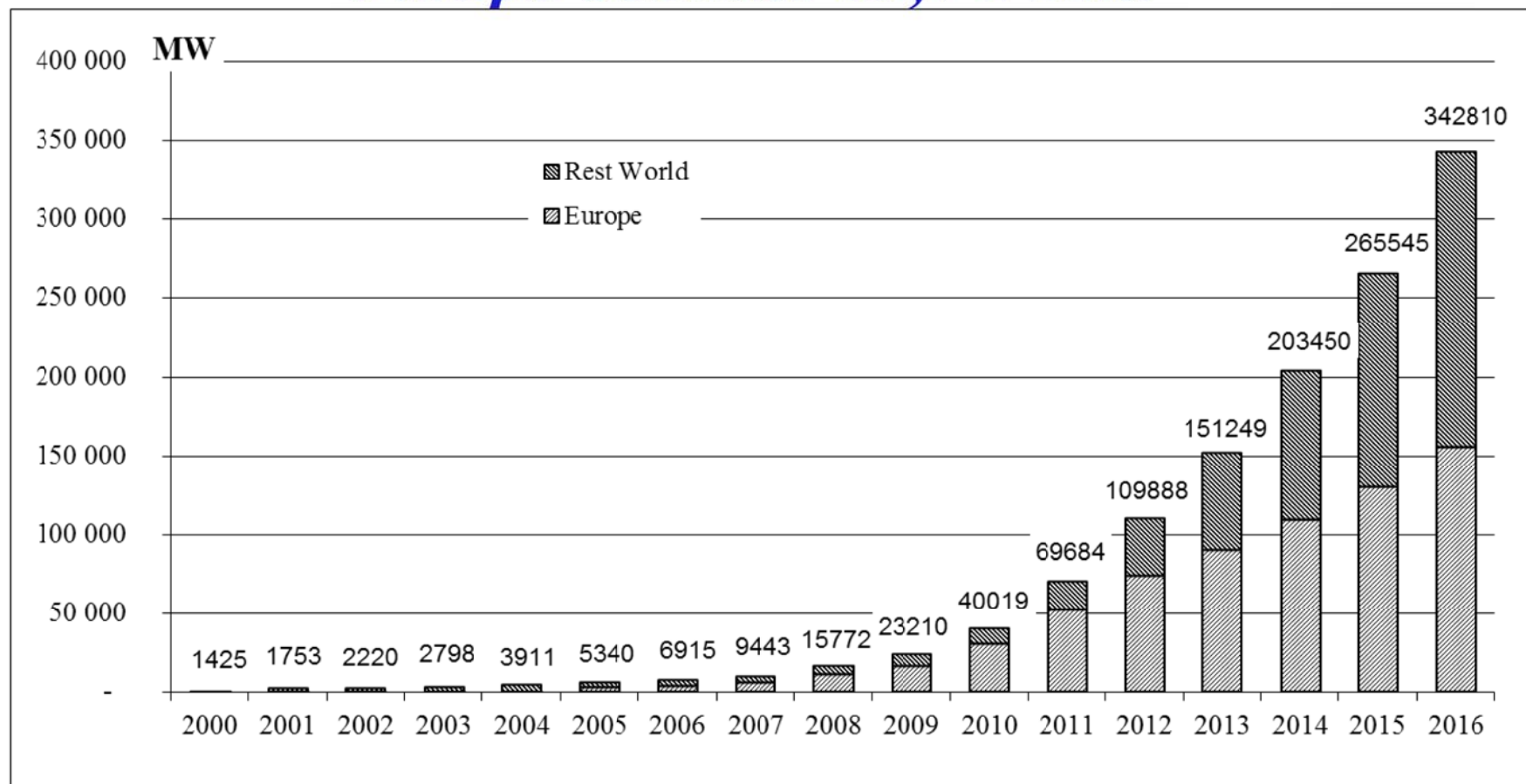


Figure 41 - Power generation capacities added in the EU 27 in 2011 (MW)

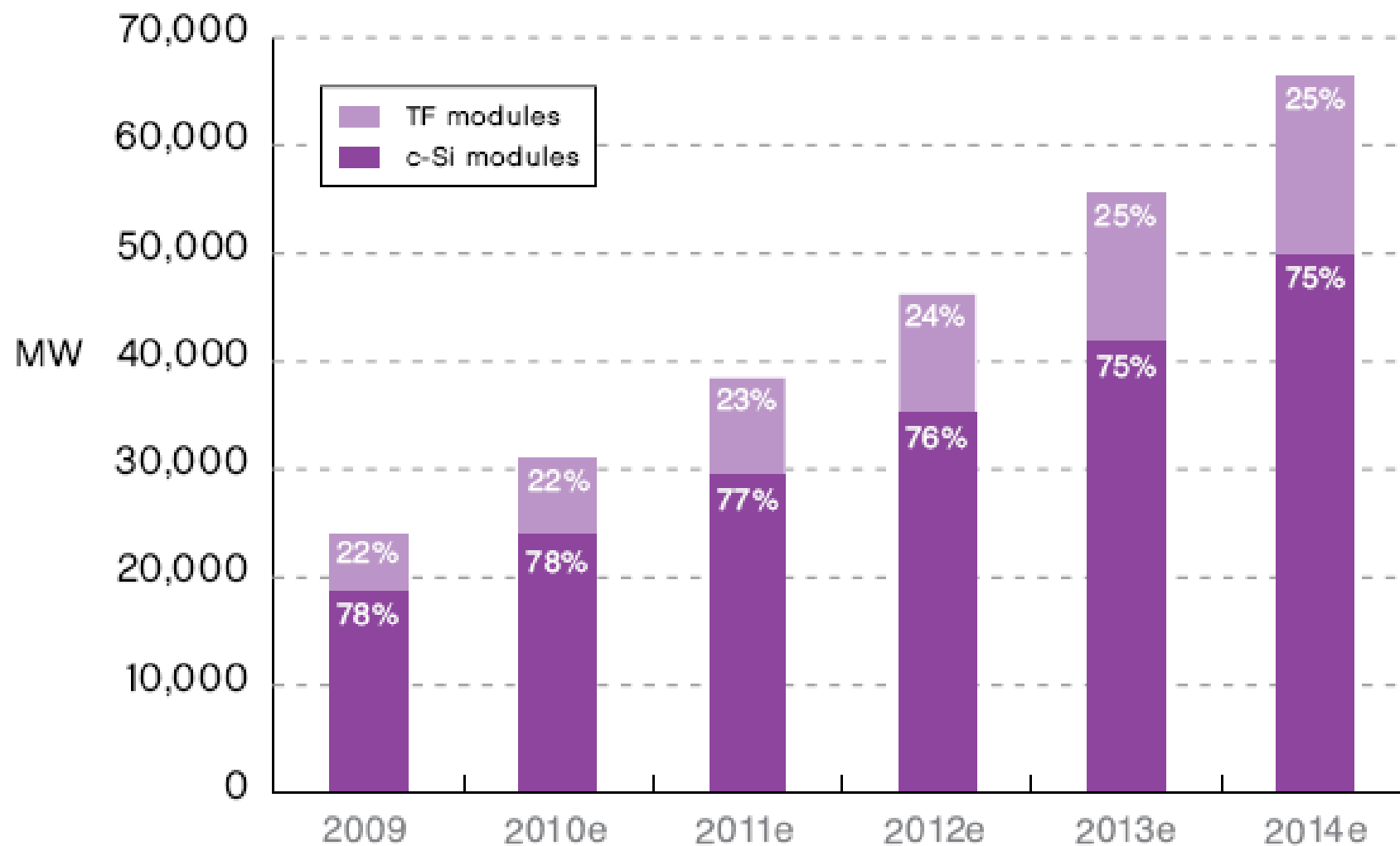


source: EPIA, EWEA

Объем установленных солнечных модулей в мире достиг 69,7 ГВт.



Изменение объемов установленных солнечных модулей



Production Capacity Outlook – Crystalline technologies vs. Thin Film

95 лет академику Л.В.Тausону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Поскольку основным материалом для производства солнечных элементов служат пластины мульти- и монокремния, то для обеспечения растущего спроса потребуется в течение пяти лет удвоить производство кремния для солнечной энергетики.

Основные проблемы при этом

- **Объемы производства кремния для солнечной энергетики**
- **Радикальное снижение стоимости кремния**

Как их решать?

Действующая схема получения кремния для солнечных элементов (сименс процесс)

Поликремний

- Карботермия $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$
- Получение трихлорсилана $\text{Si} + 3\text{HCl} \leftrightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$
- Ректификация трихлорсилана
- Восстановление трихлорсилана водородом и высаживание поликремния на горячем стержне либо в кипящем слое.

При этом затраты электроэнергии для производства поликремния составляют порядка 170 кВт*час/кг, а с учетом выращивания блока мультикремния – 200 кВт*час на 1кг мульткремния.

Затраты на создание производства объемом 1000 т/год составляют порядка 200 \$млн.

Технология прямого получения

кремния для солнечных элементов

В проекте предлагается безхлорная технология прямого получения мультикремния из высокочистого рафинированного металлургического кремния

- Карботермия - $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$
- Принципиально новая технология рафинирования расплава кремния
- Направленная кристаллизация

Затраты электроэнергии на производство 1 кг мультикремния составляют 40 кВт*час/кг

**А.И. Непомнящих, Б.А. Красин, В.С. Романови др. Патент РФ N 2131843, 1999*

**А.И. Непомнящих, Б.А. Красин и др.. Известия Томского политехнического университета, том 303, вып.2, 2000, с. 176-190*

**А.И. Непомнящих, В.П. Еремин, Б.А. Красин. Изв. ВУЗов Материалы электронной техники, 4, 02, 2002, с. 16-24.*

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

При этом необходимо достичь таких же электрофизических параметров, как и для кремния, полученного по сименс технологии.

Электрофизические характеристики кремния

Свойство	Значение
Тип проводимости	P-тип
Сопротивление, $\Omega \cdot \text{см}$	0,4-3
Время жизни, $\mu\text{с}$	≥ 2
Длина диффузионного пробега, $\mu\text{м}$	≥ 100
Размеры монокристаллов, мм	≥ 2

Требования к SoG кремнию

- Содержание примесей в SoG кремнии (*не более, ppm*)

<i>Carbon</i>	<i>3</i>	<i>Copper</i>	<i>0.1</i>
<i>Oxygen</i>	<i>10</i>	<i>Nickel</i>	<i>0.05</i>
<i>Boron</i>	<i>0.3</i>	<i>Chromium</i>	<i>0.01</i>
<i>Phosphorous</i>	<i>0.2</i>	<i>Manganese</i>	<i>0.01</i>
<i>Sodium</i>	<i>0.2</i>	<i>Iron</i>	<i>0.03</i>
<i>Magnesium</i>	<i>0.2</i>	<i>Cobalt</i>	<i>0.01</i>
<i>Potassium</i>	<i>0.5</i>	<i>Zinc</i>	<i>0.1</i>
<i>Aluminium</i>	<i>0.1</i>	<i>Barium</i>	<i>0.1</i>
<i>Titanium</i>	<i>0.001</i>	<i>Calcium</i>	<i>0.1</i>

Как их обеспечить?

Что необходимо для реализации технологии?

1. Высокочистые исходные материалы для карботермического восстановления кремния: кварц и углеродистый восстановитель
2. Тигли из кварцевой керамики для выращивания блока мультикремния

Прежде всего необходим сверхчистый природный кварцевый материал для обеих частей технологии

Суперкварциты Восточного Саяна



Необходимыми качествами обладают особо чистые кварциты месторождения «Бурал-Сардаг», (сумма примесей не более 100 ppm), открытое Институтом геохимии в Восточном Саяне

*Е.И. Воробьев, А.М. Спиридонов, А.И. Непомнящих, М.И. Кузьмин. ДАН, 2003, т. 390, 2, 219-223.

*А.М.Федоров, В.А.Макрыгина, А.Е.Будяк, А.И.Непомнящих. ДАН, 2012, т. 442, 2, с. 1-6

95 лет академику Л.В.Гаусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Месторождение Бурал-Сардаг

1. **Запасы кварцитов в продуктивных телах по категориям С1+С2 в объеме 972967.67 тонн, в том числе суперкварцитов – 66617.74 тонны, микрокварцитов – 807563.17 тонны**
2. **Суммарное содержание примесей как в суперкварцитах, так и в мелкозернистых кварцитах месторождения Бурал-Сардаг не превышает 100 ppm**
3. **Прогнозные запасы светло серых кварцитов на площади месторождения Бурал-Сардаг (среднее содержание примесей 250 ppm) по оценкам А.М.Федорова* составляют 83 млн.тонн**

*А.М.Федоров. Геохимия и условия образования особо чистых кварцитов на примере проявлений Восточного Саяна. Автореферат канд.дисс.Иркутск, 2012

Суперкварциты Бурал-Сардага

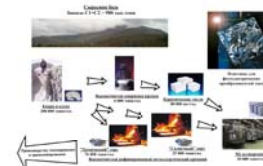
Содержание примесей в суперкварцитах, ppmw

Al	Ca	Mg	Fe	Ti	Mn	Na	K	Li	Cu	$\Sigma 10$	B	P
41	4	6	4	0,1	0.2	10	17	0.3	0.05	82	0.1	0.2

Содержание примесей в кварцевой крупке из суперкварцитов, ppmw

Al	Ca	Mg	Fe	Ti	Mn	Na	K	Li	Cu	$\Sigma 10$	B	P
3.5	1	0.1	0.1	0.1	0.1	2.3	1.3	0.1	0.01	8.6	0.01	0.02

Высокоочищенная кварцевая крупка является исходным материалом для производства тиглей и кремния.



95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Эксперимент

- Февраль 1999: *получение высокочистого кремния на одной из 25 MVA печей ЗАО «Кремний»*



Состав шихты:

Черемшанский
кварцит

Древесный уголь
завода г. Амзя

Ангарский нефтекокс

Щепа березы

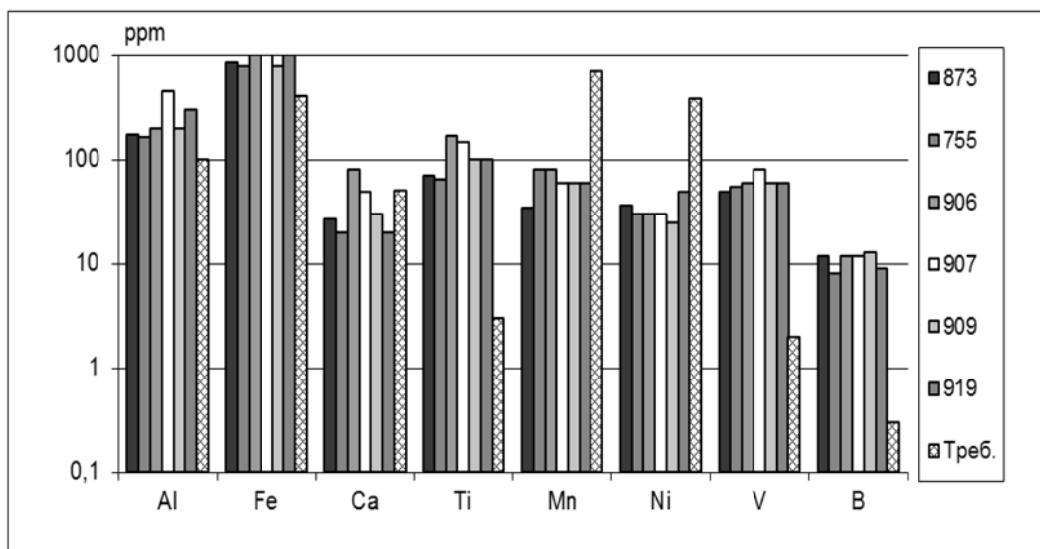
Требования к высокочистому рафинированному кремнию, ppm

- Содержание примесей в UMG кремнии (*не более, ppm*)

<i>Carbon</i>	<i>3</i>	<i>Copper</i>	<i>50</i>
<i>Oxygen</i>	<i>50</i>	<i>Nickel</i>	<i>50</i>
<i>Boron</i>	<i>0.3</i>	<i>Chromium</i>	<i>50</i>
<i>Phosphorous</i>	<i>0.3</i>	<i>Manganese</i>	<i>50</i>
<i>Sodium</i>	<i>10</i>	<i>Iron</i>	<i>300</i>
<i>Magnesium</i>	<i>10</i>	<i>Cobalt</i>	<i>50</i>
<i>Potassium</i>	<i>10</i>	<i>Zinc</i>	<i>50</i>
<i>Aluminium</i>	<i>30</i>	<i>Barium</i>	<i>10</i>
<i>Titanium</i>	<i>3</i>	<i>Calcium</i>	<i>10</i>
<i>Zirconium</i>	<i>3</i>	<i>Vanadium</i>	<i>2</i>
<i>Total impurities, not more than in ppm</i>	<i>1000</i>		
<i>Base element, %</i>	<i>99.9</i>		

Содержание химических примесей в сырье, ppmw

Сырье	Al	Fe	Mg	Ca	Ti	Mn	Ni	V	Cu	Zr	B	P
755	165	800	7.5	20	65	80	30	55	10	40	13	50
873	175	850	11	27	70	35	37	50	8	30	12	29



*A.I.Nepomnyashikh, V.A. Fedosenko, V.P. Eremin and B.A. Krasin. Low cost multicrystal-line silicon for solar cells. Silicon for chemical industry VI, Loen-Norway, 2002, p. 191-196

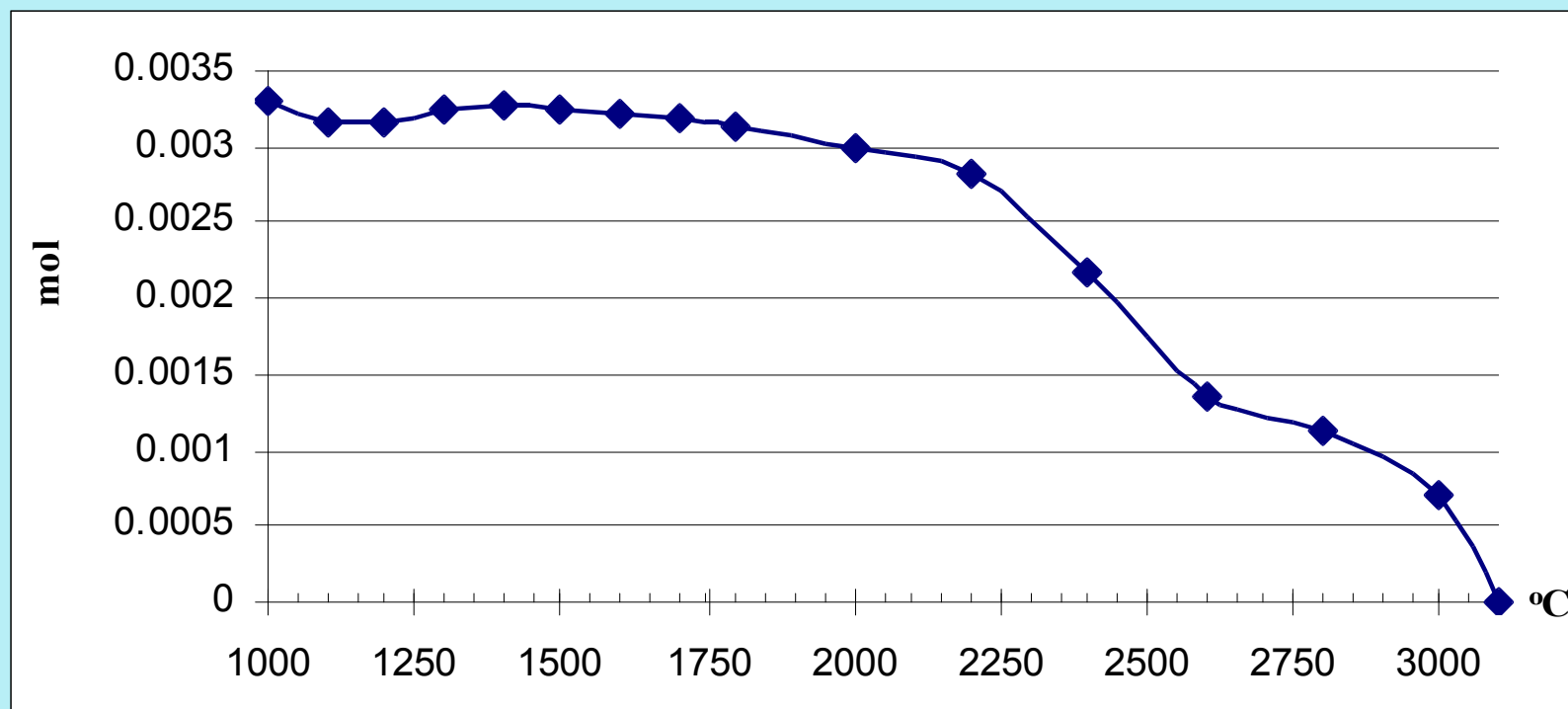
*A.I. Nepomnyashikh, A.V.Zolotaiko, B.A. Krasin and I.A.Eliseev. Direct production of multicrystalline solar silicon from high purity metallurgical silicon. Silicon for chemical industry VII, Trondheim, 2004, p. 299-306.

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Удаление бора

Рафинирование расплава кремния

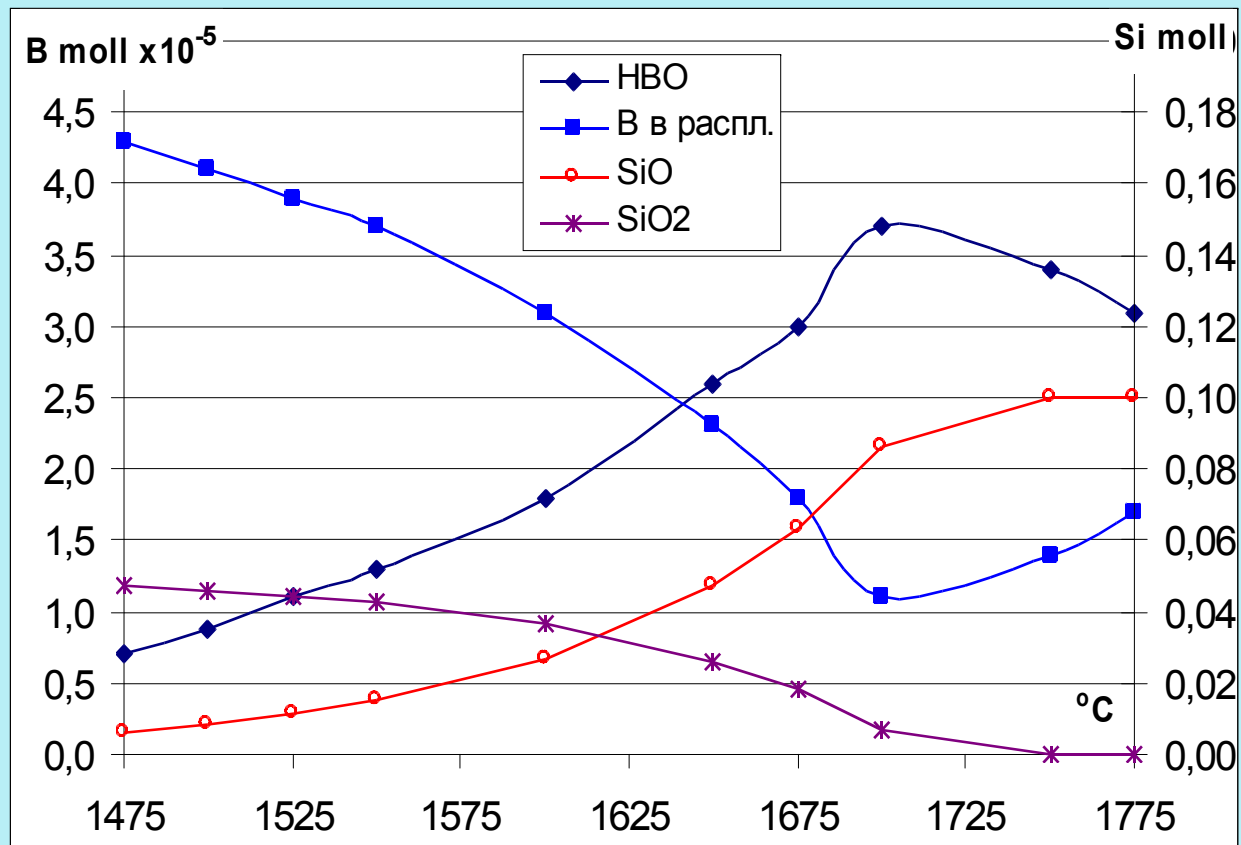
Для расчетов использовалась система Si-B-H₂O-Ar (or air), с 1 mol Si, содержащая 3 - 60 ppm B с добавлением 0.5 mol увлажненного газа. Температурный интервал был 1000 - 3000 0C



*И.А. Елисеев. Компьютерное моделирование процессов рафинирования кремния для солнечной энергетики. 2-я школа-семинар молодых ученых России «Проблемы устойчивого развития региона» г. Улан-Удэ 2001г.

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Удаление бора



Зависимость концентрации соединений бора и кремния от температуры.

*A.I. Nepomnyashikh, A.V.Zolotaiko, I.A.Eliseev et all. *Silicon for chemical industry VII, Trondheim, 2004, p. 299-306.*

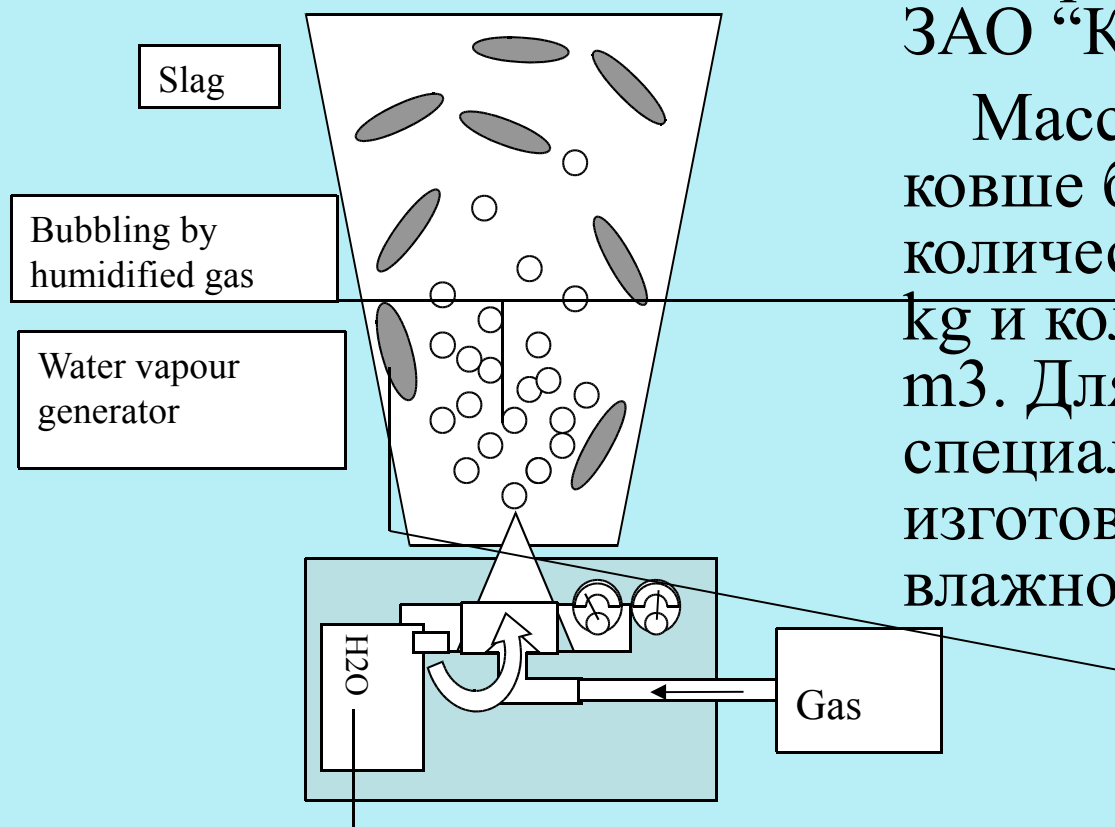
*Елизеев И.А., Непомнящих А.И., Бычинский В.А Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники, 2007,1, с.53-60

95 лет академику Л.В.Гаусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Эксперимент

В 2003 мы провели эксперимент на 16.5 МВА электротермической печи ЗАО “Кремний” (г.Шелехов).

Масса расплава кремния в ковше была 3000 kg, количество водяного пара 9 kg и количество воздуха 206 m³. Для эксперимента был специально разработан и изготовлен генератор влажности.



**A.I. Nepomnyashikh, A.V.Zolotaiko, I.A.Eliseev et all. Silicon for chemical industry VII, Trondheim, 2004, p. 79-89.*

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Эксперимент

T, 0C	arb. MSi (mol)	arb. Mwater (mol)	arb. Mair (mol)	Content of B, ppmw		Content of Fe, ppmw	
				C0	Cr	C0	Cr
1620	1	0.005	0.08	53	35	0.34	0.31

C0 – концентрация примесей в нерафинированном кремнии

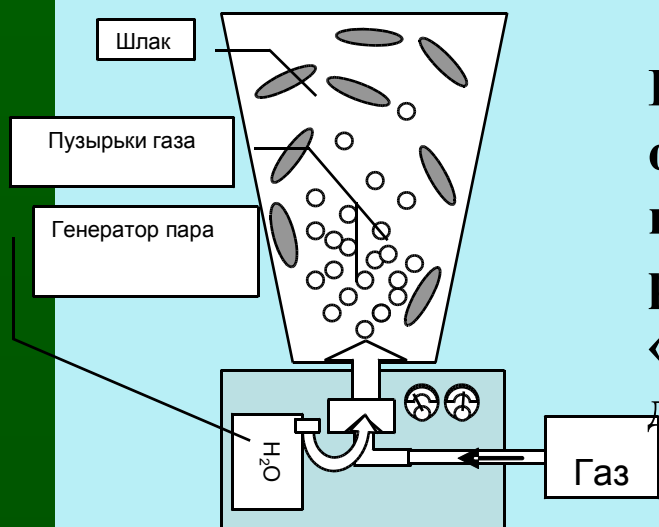
Cr – концентрация примесей в рафинированном кремнии

**A.I. Nepomnyashikh, A.V.Zolotaiko, I.A.Eliseev et all. Silicon for chemical industry VII, Trondheim, 2004, p. 79-89.*

Получение высокочистого рафинированного кремния

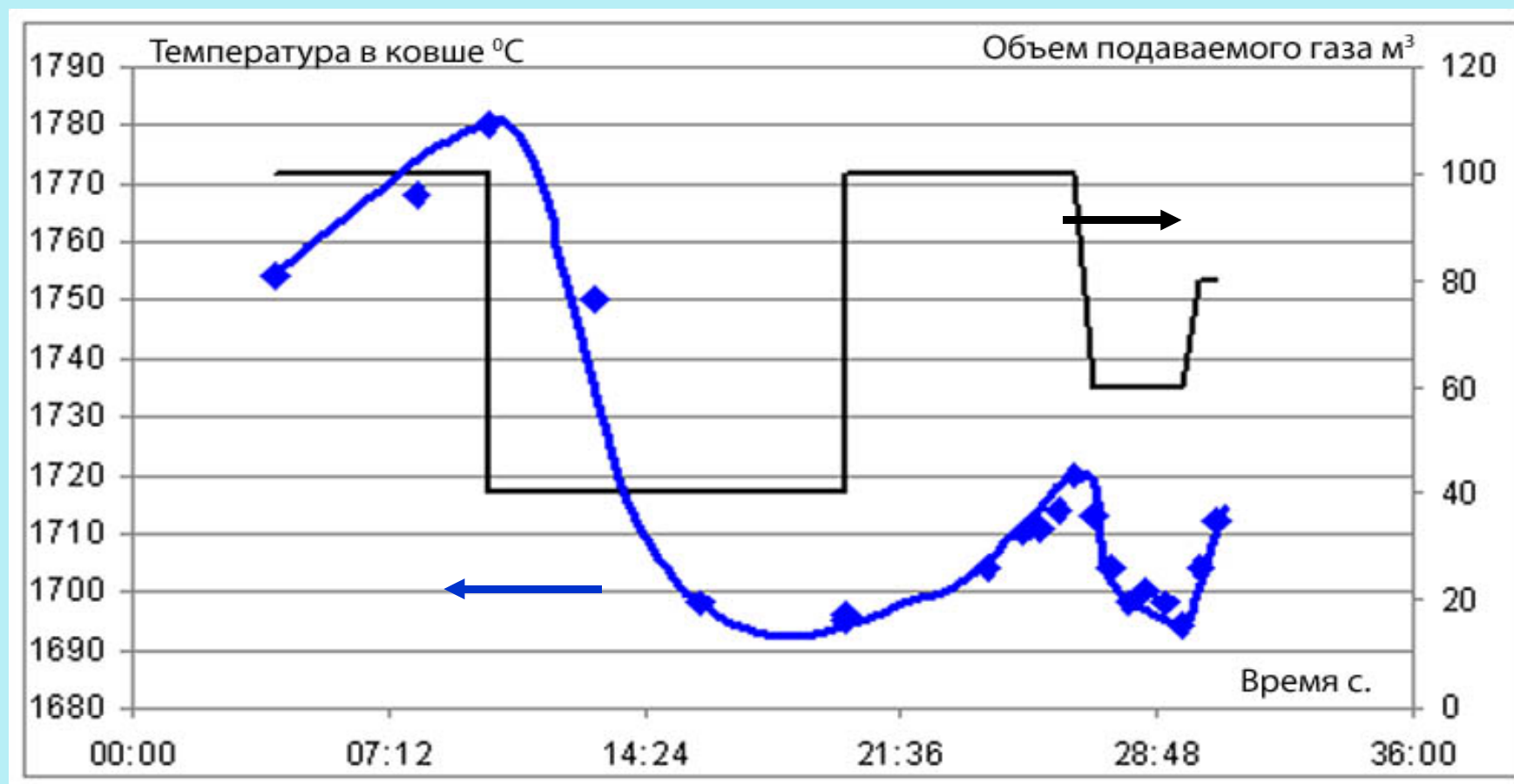
Таблица. Содержание примесей в компонентах шихты

Материал	Установленная массовая доля примесей, ppmw											
	Al	Fe	B	P	Ti	Ni	Cr	V	Zr	Co	Ca	Na
Кварц "Сарыкуль"	90	2	1	2	1	0.2	0,1	0,2	0,7	0,2	9	5
Древесный уголь, зольность 1 %	5	40	2	7	2	0,5	0.4	1	1	0,2	4	0,1
Электрод, зольность 0,5 %	20	10	2	2	9	2	1	0,2	6	0,4	3	0,2



Проведены подготовительные работы по отработке процесса рафинирования расплава кремния увлажненной газовой смесью на руднотермической печи 9.6 КВА МК «KazSilicon» в г.Уштобе Республики Казахстан, декабрь 2007.

Получение высокочистого рафинированного кремния



Изменение температуры в ковше(°C) и объема подаваемого газа по времени

95 лет академику Л.В.Гаусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Выращивание слитков мультикремния



Block 125*125*250 mm

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Равновесные коэффициенты распределения примесей в кремнии

Li	1*10 ⁻²	P	0.35	Ni	1*10 ⁻⁴	Zr	2*10 ⁻⁸
B	0.8	S	1*10 ⁻⁵	Cu	1*10 ⁻⁴	Nb	5*10 ⁻⁷
C	7*10 ⁻²	Ti	5*10 ⁻⁶	Zn	1*10 ⁻⁵	Ta	2*10 ⁻⁸
N	7*10 ⁻⁶	V	5*10 ⁻⁶	Ga	8*10 ⁻³	Ag	1*10 ⁻⁴
O	1.25	Cr	5*10 ⁻⁶	Ge	0.3	Cd	1*10 ⁻⁶
Na	2*10 ⁻³	Mn	1*10 ⁻⁵	As	0.3	Sb	2*10 ⁻²
Mg	2*10 ⁻³	Fe	1*10 ⁻⁵	Mo	5*10 ⁻⁸	Sn	2*10 ⁻²
Al	2*10 ⁻³	Co	1*10 ⁻⁵	W	5*10 ⁻⁸	Bi	7*10 ⁻⁴

$$C(g) = K_{\text{эфф}} C_0 (1 - g)^{K_{\text{эфф}} - 1}$$

Эффективные коэффициенты распределения примесей

Al	Fe	Mg	Ti	Mn	Ni	B
1,6*10 ⁻²	2*10 ⁻³	8*10 ⁻³	6*10 ⁻⁴	6,5*10 ⁻²	2*10 ⁻²	1,0

Содержание примесей в сырье, ppmw

Сырье	Al	Fe	Mg	Ca	Ti	Mn	Ni	V	Cu	Zr	B	P
755	165	800	7.5	20	65	80	30	55	10	40	13	50
873	175	850	11	27	70	35	37	50	8	30	12	29

Содержание примесей в образцах мультикремния, ppmw

Образец	Al	Fe	Mg	Ca	Ti	Mn	Ni	V	Cu	Zr	B	P
Крс-47	1	3	1	11	1	1	1	5	10	5	9	10
Крс-60	0.1	5	0.4		0.1	1	1			5	7	10
КРС-26	1	2	0.2	4	0.1	0,01	0,2	0,01	0,1	0,01	9	10

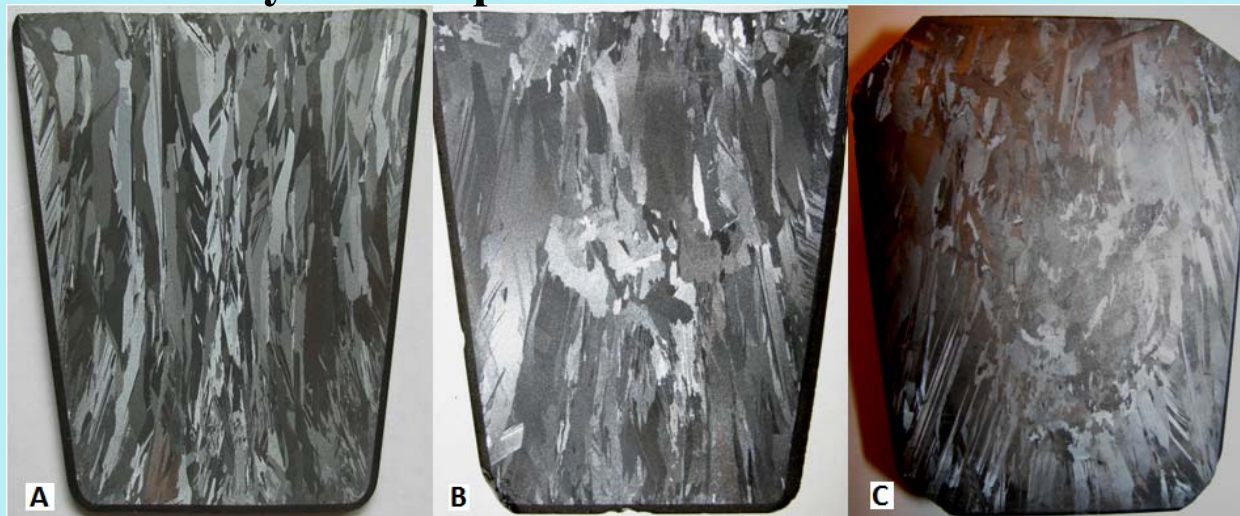
**A.I.Nepomnyashikh, V.A. Fedosenko, V.P. Eremin and B.A. Krasin. Low cost multicrystal-line silicon for solar cells. Silicon for chemical industry VI, Loen-Norway, 2002, p. 191-196*

**A.I. Nepomnyashikh, A.V.Zolotaiko, B.A. Krasin and I.A.Eliseev. Direct production of multicrystalline solar silicon from high purity metallurgical silicon. Silicon for chemical industry VII, Trondheim, 2004, p. 299-306.*

Степень очистки при направленной кристаллизации

Примесь	Содержание примеси, ppmw		Кратность очистки
	Исходное сырье	Мультикремний	
Fe	1000	1	1000.0
Al	200	1	200.0
Ca	30	4	7.5
Ti	70	0.1	700.0
V	50	0.01	5000.0
Zr	30	0.01	3000.0
Ni	40	0.1	400.0
Mn	40	0.01	4000.0
B	12	9	1.3
P	30	10	3.0

Распределение примесей вдоль блока и структура мультикремния очень сильно зависят от условий роста.



Структура межзеренных границ мультикремния, выращенных при разных скоростях: А - 5 мм/час, В – 10 мм/час, С – 15 мм/час

Распределение примесей в блоках мультикремния, ppmw

Ingots	Impurity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
"А"	Fe	4,1	4,7	3,7	2,4	3,8	1,8	2,5	4,5	4,6	1524
	Ni	0,2	0,2	0,2	0,3	0,6	0,4	0,4	0,8	0,5	75
"В"	Fe	0,9	1,2	1,1	3,3	1414	2353	99	5,4	5	34709
	Ni	0,8	0,9	0,15	0,24	40	74	3,3	1,1	0,45	1472
"С"	Fe	5	5	290	177	20	15	189	6103	23	23
	Ni	0,2	0,2	7,3	5,9	0,8	0,3	7,1	324	0,3	0,2

*А.И.Непомнящих и др. Письма в ЖТФ, 2011, том 37, вып.37, вып.15, стр. 103-110
 95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Влияние скорости вращения на колонную структуру блоков мультикремния

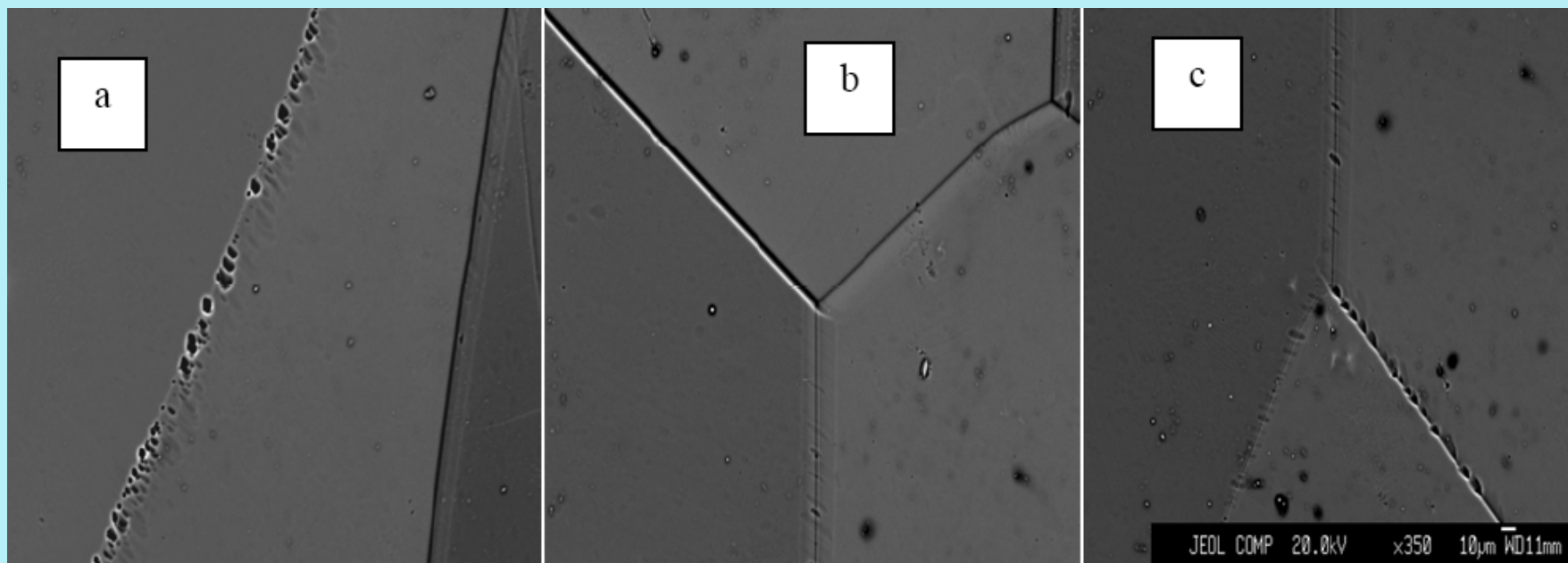


Структура межзеренных границ мультикремния, выращенных при разных скоростях вращения (А - 1 min⁻¹, В – 0.5 min⁻¹)

*К.А. Кокх, V.N. Попов, А.Е. Кокх, В.А. Красин, А.И. Непомняших. Journal of crystal growth, 2007, 303, p.253-257

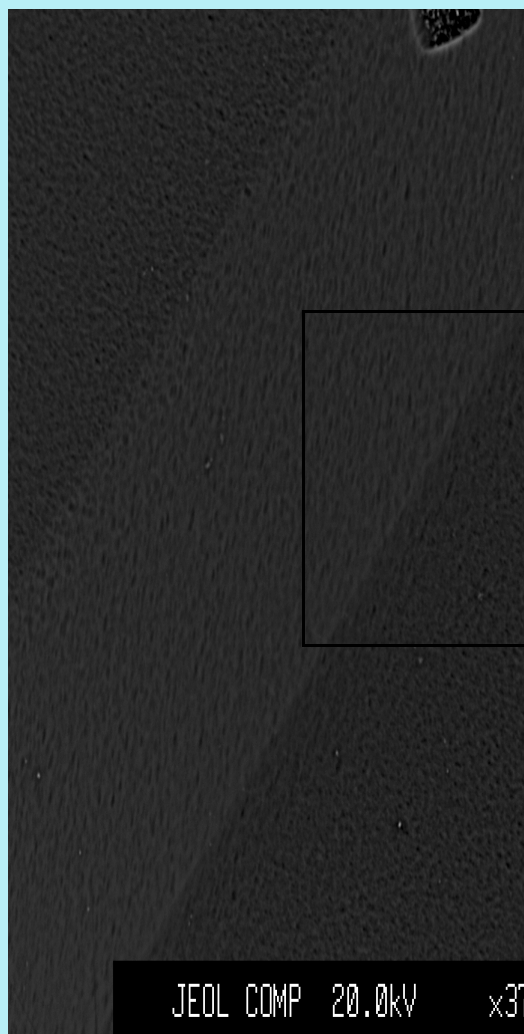
95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Типы межзеренных границ



Границы изучали на электронно зондовом рентгеноспектральном микроанализаторе JXA8200 (JEOL Ltd, Япония) в режиме электронного микроскопа во вторичных и обратно рассеянных электронах.

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г



nm

Межзеренные границы в мультитремнии не содержат примесей (x370 и x1000).

95 лет академику Л.В.Та

Технология получения SoG мультикремния

Содержание примесей в исходных материалах, ppmw.

	<i>Кварцит,</i>	<i>Древесный уголь</i>	<i>Электрод</i>
	<i>Бурал-Сардаг</i>	<i>Ash: 1.1%</i>	<i>1%</i>
<i>Fe</i>	10	40	10
<i>Al</i>	80	40	20
<i>Ca</i>	10	400	200
<i>P</i>	1	7	2
<i>B</i>	0,1	5	2
<i>Ti</i>	5	2	9
<i>Ni</i>	1	0,6	2
<i>Cr</i>	1	0,4	1

Технология получения SoG мультикремния

Ожидаемое содержание примесей в кремнии (Si ~6n), ppmw

	Нерафинированный	Рафинированный	Мультикремний
Fe	300	100	0.5
Al	350	3	0.1
Ca	460	2	0.7
Ti	20	10	0.01
V	10	10	0.01
Zr	10	10	0.02
Ni	10	10	0.1
Mn	10	1	0.01
B	3	0.3	0.3
P	10	0.3	0.1

HP-1

95 лет академику Л.В.Тausону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Карбо-термическое восстановление кремния

Создана лабораторная электродуговая установка постоянного тока мощностью 100 КВт. Установка может работать при напряжении 65-70 В и токе 1500А. Графитовый тигель составляет в длину 400мм и диаметром 200мм, диаметр электрода 75мм. Тигель является вторым электродом. Выливка кремния производится через верхний желоб.

В качестве восстановителя может быть использован гранулированный углерод-углеродистый восстановитель, разработанный ИШПУ СО РАН.



Electro-arc furnace



Карбо-термическое восстановление кремния



**Высокочистая кварцевая
крупка**

Для карботермического восстановления кремния нами разработан способ изготовления брикета на основе обогащенной кварцевой крупки и гранулированного углерод-углеродистого восстановителя. **В качестве связующего используется гель кремниевой кислоты.**



**Гранулированный
восста**



Брикет

Технология получения SoG мультикремния

Содержание примесей в исходных материалах, ppm.

	Кварцевая крупка	Гранулированный восстановитель	Электрод
Fe	5,5	6	3
Al	4,5	4	2
Ca	5,5	40	2
P	0,3	7	0,2
B	0,1	0,1	0,2
Ti	1	2	1
Ni	0,5	0,6	2
Cr	0,5	0,4	1

Технология получения SoG мультикремния

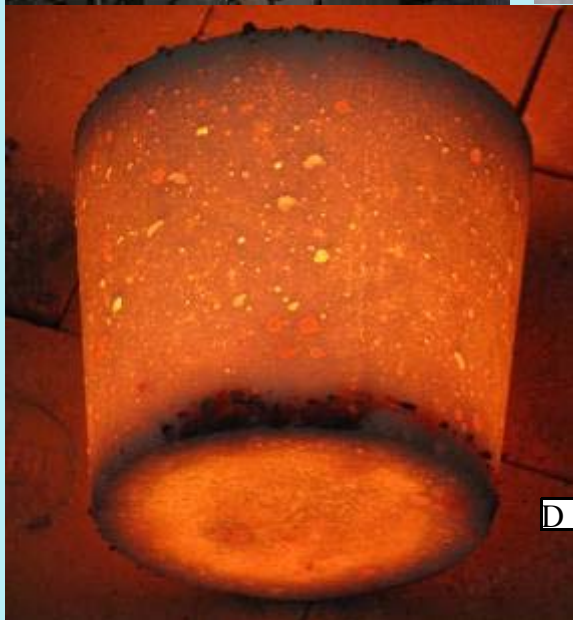
Ожидаемое содержание примесей в кремнии (Si ~7n), ppmw

	Нерафинированный кремний	Рафинированный кремний	Мультикремний
Fe	17	10	0,05
Al	16	1	0,02
Ca	50	0.1	0,03
Ti	4	1	0,001
Ni	2	2	0,02
Cr	2	2	0,06
B	0.3	0.1	0,1
P	8	0.2	0,07

HP-2

95 лет академику Л.В.Гаусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Экспериментальные образцы кремния и кварцевой крупки получены на лабораторной пилотной линии ИГХ СО РАН



95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Электротермическая печь



95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г



95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Высокотемпературная установка



Создана высокотемпературная установка с генератором газовой смеси для рафинирования расплава кремния при температурах до 1750 ОС.

95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г



95 лет академику Л.В.Таусону, Иркутск, 23 октября 2012 г

Экспериментальные образцы SoG мультикремния

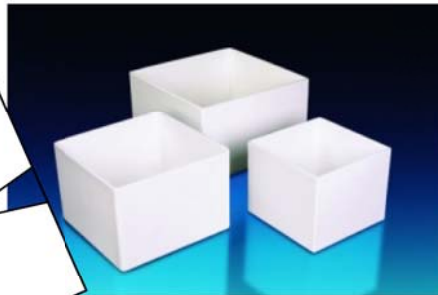
Содержание примесей в экспериментальных образцах мультикремния, ppmw.

Образец	Fe	Al	Ca	Ti	V	Zr	Ni	Cr	Mn	B	P
КРС 63Н	1,3	1,9	3,1	1	0,002	0,01	0,2	0,07	0,02	0,7	0,05
КРС 64Н	0,85	1,1	0,9	0,8	0,002	0,01	0,1	0,1	0,01	0,2	0,07

Электрофизические характеристики образцов

Образец	p/n	ρ , Ом·см	T, мкс	μ , см ² /(В·с)	n, см ⁻³
63н	p	0,22	2,1	175	$1,6 \cdot 10^{17}$
64н	p	0,66	4	254	$3,7 \cdot 10^{16}$

Pilot line



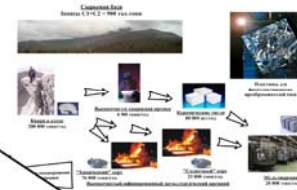
Quartz crucibles 8 000 per years



High-purity quartz grit 400 Mt



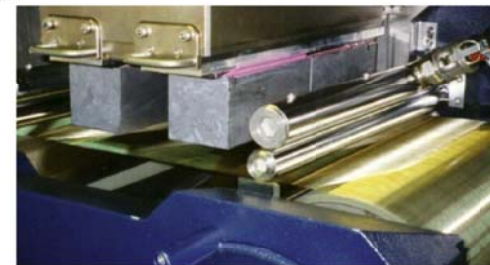
UMG silicon 500 Mt



Wafers 5 790 000



Polycrystalline Silicon 400



Pilot line

Work to be done	Duration of works Days	Expenditures Thousand rubles
Preparation of pilot project	122	2 400
Experimental & Industrial Production (EIP) Quartz concentrates	254	135 220
EIP Quartz crucibles	342	131 500
EIP Multi-silicon	512	375 700



Спасибо за внимание!