

**ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА СТАБИЛЬНЫХ
ИЗОТОПОВ КРЕМНИЯ ВЫСОКОЙ ХИМИЧЕСКОЙ
И ИЗОТОПНОЙ ЧИСТОТЫ**

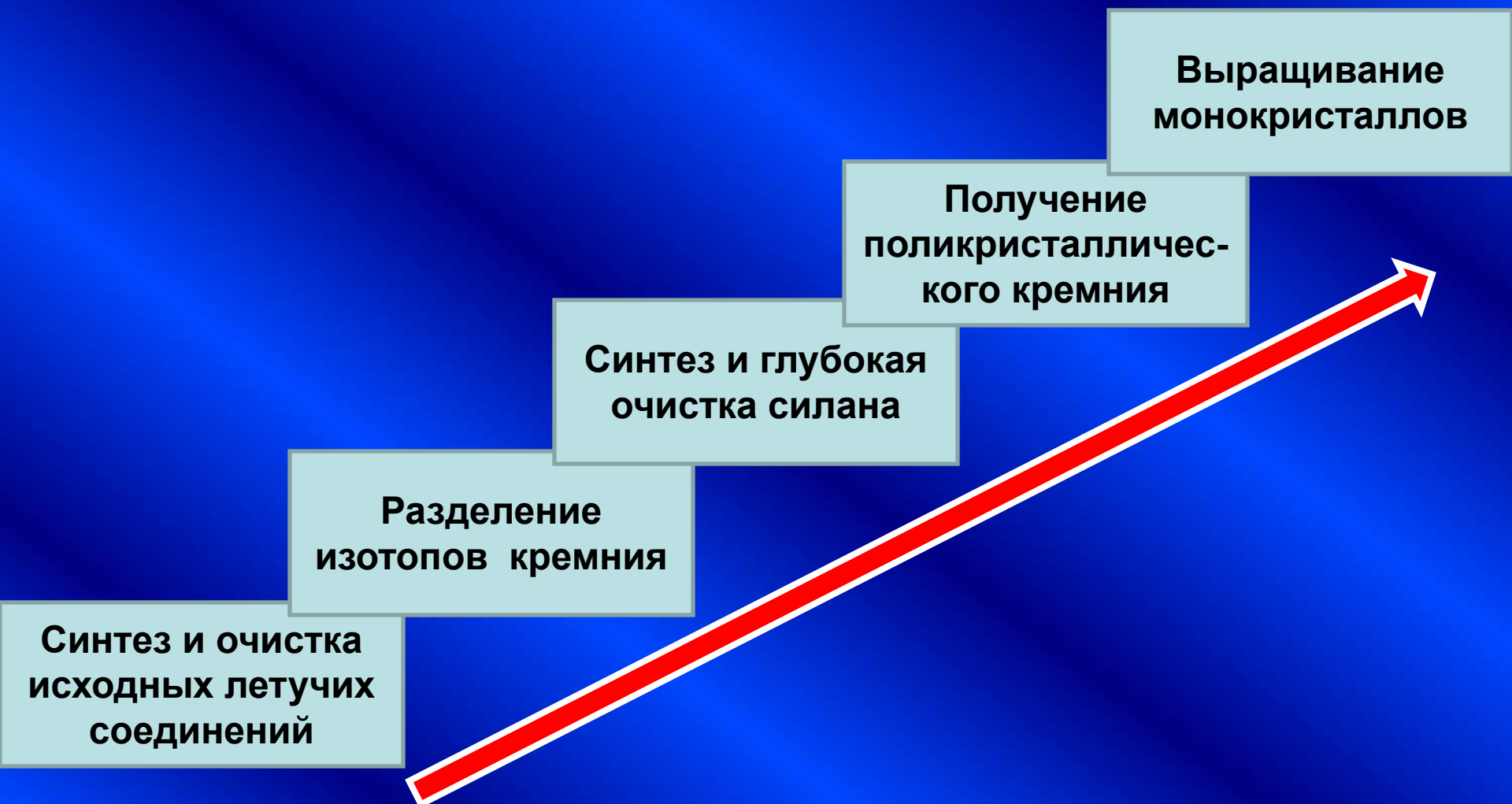
А.В.Гусев, В.А.Гавва, А.М.Гибин

Институт химии высокочистых веществ РАН

г. Нижний Новгород

gusev@ihps.nnov.ru

Схема получения моноизотопного кремния



Изотопное разбавление при выращивании монокристалла из кварцевого тигля



Получение стержня-подложки из моноизотопного кремния



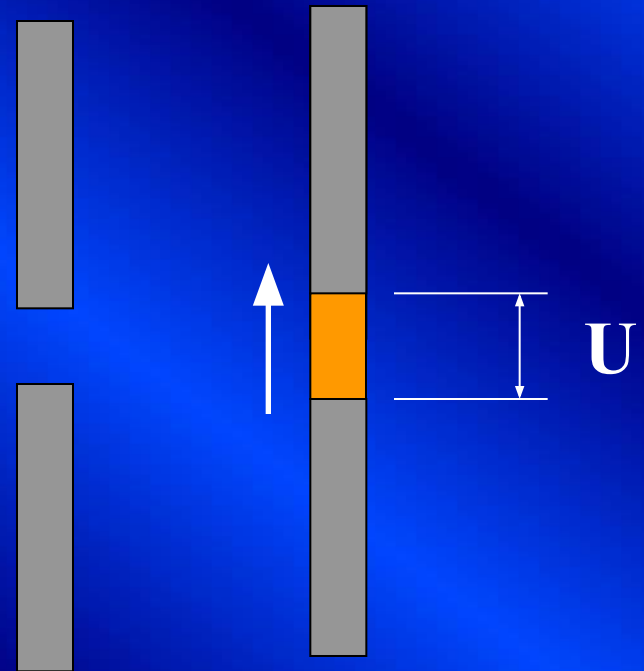
Изготовление монокристаллической затравки



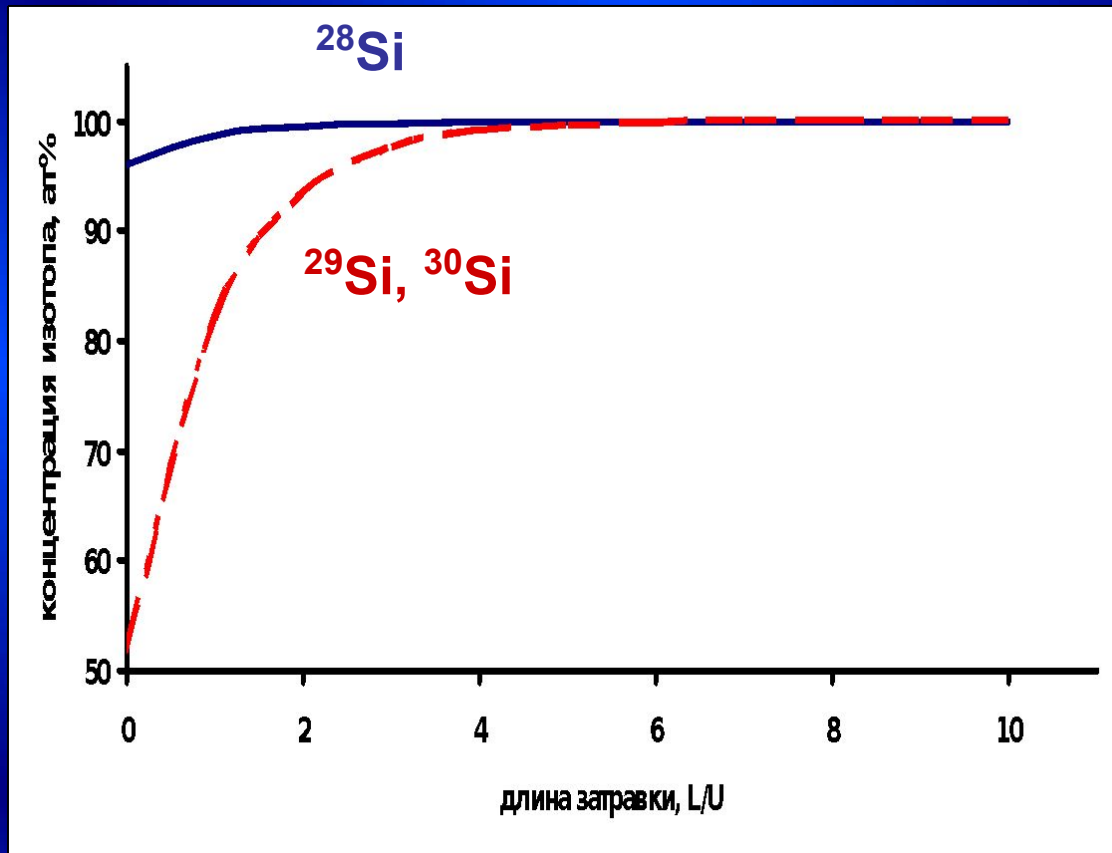
Зонноочищенный кремний

Поликристалл
моноизотопного
кремния

Монокристалл
природного
кремния

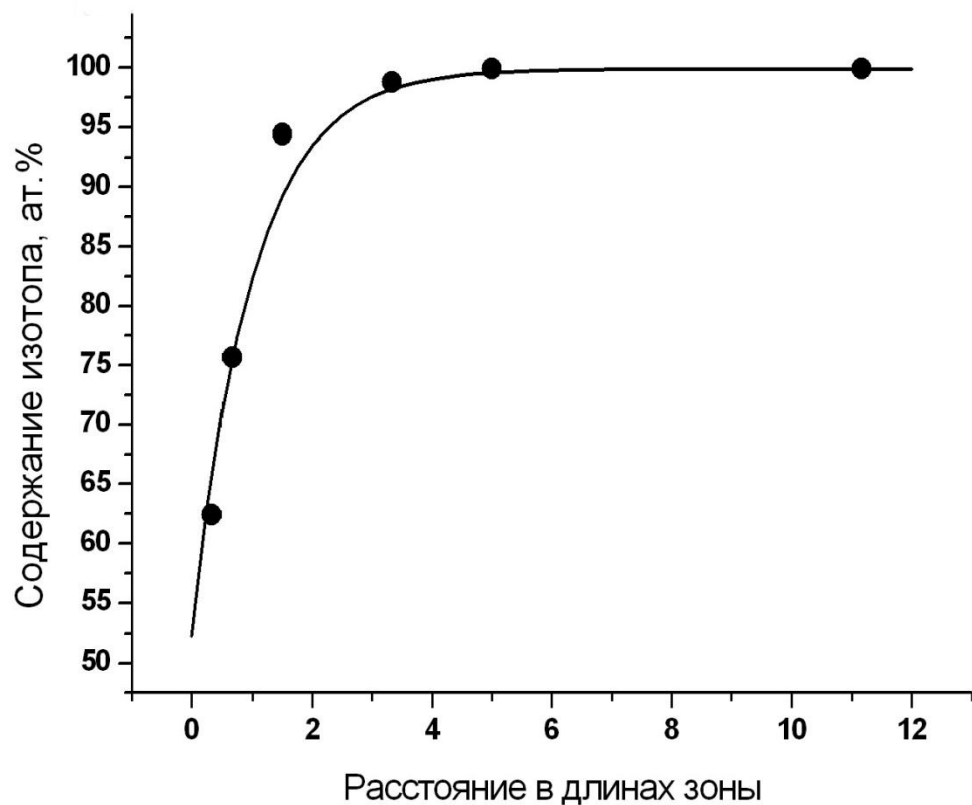


Распределение концентрации изотопов по длине затравки



$$C(L) = C^i - (C^i - C^0) e^{-L/U}$$

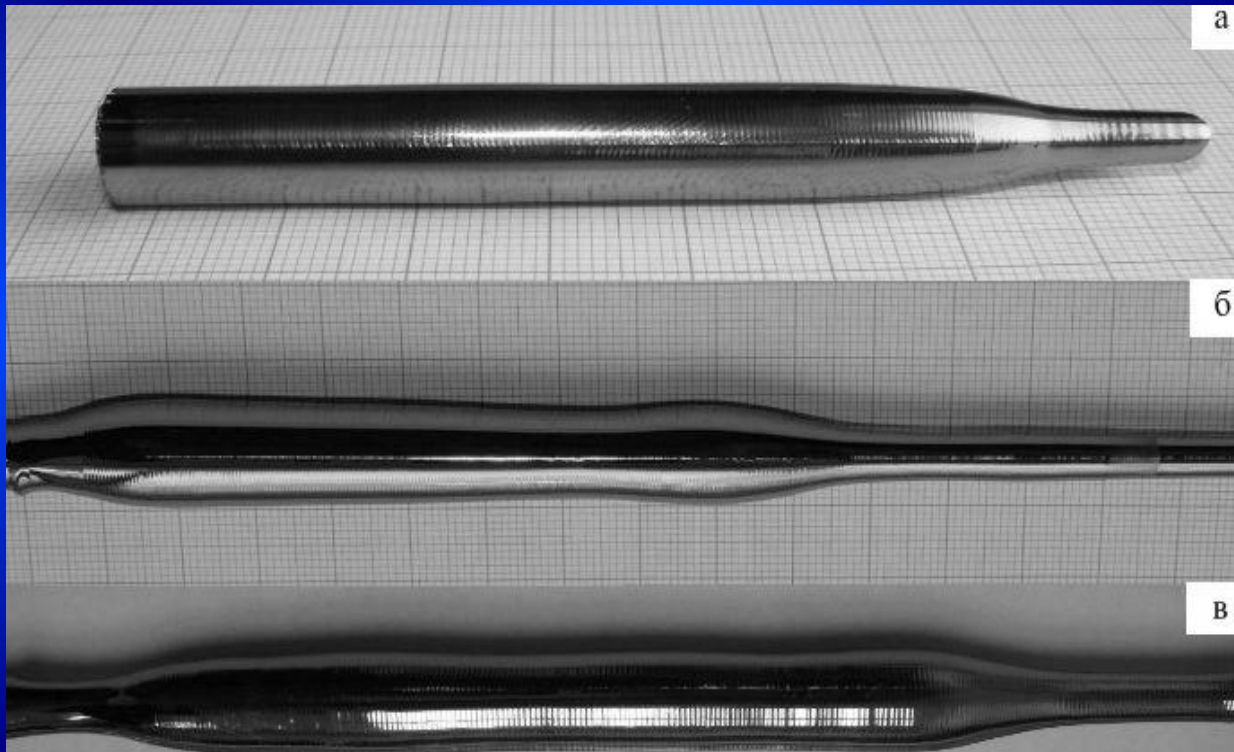
Распределение изотопа кремния-29 по длине затравки



— - расчет

● - эксперимент

Монокристаллы стабильных изотопов кремния



^{28}Si (99,99%)

^{29}Si (99,92%)

^{30}Si (99,97%)

Содержание газообразующих примесей (С,О) $<1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Удельное электросопротивление (300 К) - 100-200 ом*см

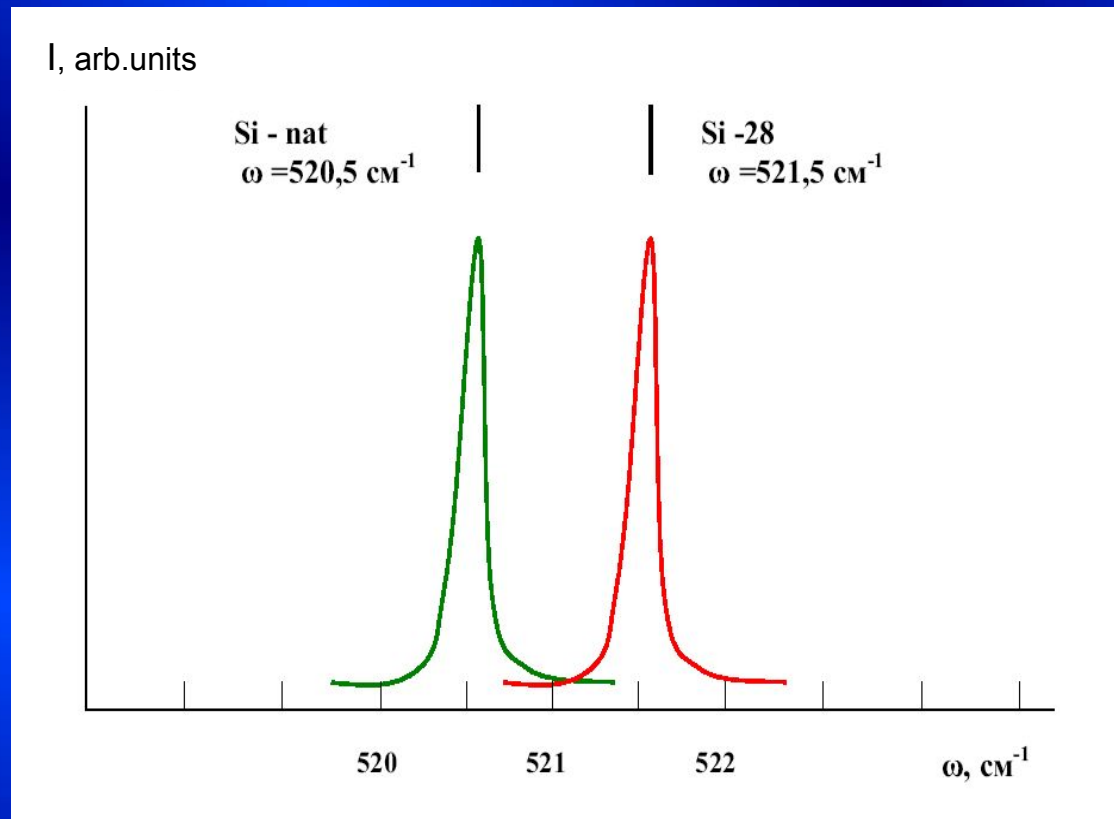
Примесный состав монокристаллического МОНОИЗОТОПНОГО кремния

Элемент	Примесь, ppm, масс	Элемент	Примесь, ppm, масс	Элемент	Примесь, ppm, масс
H	ND	Zn	<0,2	Pr	<0,05
Li	<0,001	Ga	<0,05	Nd	<0,2
Be	<0,001	Ge	<0,1	Sm	<0,4
B	<0,001	As	<0,03	Eu	<0,2
C	ND	Se	<0,05	Gd	<0,5
N	ND	Br	<0,05	Tb	<0,1
O	ND	Rb	<0,05	Dy	<0,5
F	<0,01	Sr	<0,05	Ho	<0,05
Na	<0,01	Y	<0,05	Er	<0,1
Mg	<0,01	Zr	<0,1	Tm	<0,05
Al	<0,04	Nb	<0,1	Yb	<0,2
Si	основа	Mo	<0,3	Lu	<0,1
P	<0,02	Ru	<0,2	Hf	<0,4
S	<0,05	Rh	<0,05	Ta	ND
Cl	<0,3	Pd	<0,2	W	<0,3
K	<0,05	Ag	<0,1	Re	<0,4
Ca	0,06	Cd	<0,2	Os	<0,8
Sc	<0,01	In	<0,05	Ir	<0,5
Ti	<0,02	Sn	<0,1	Pt	<0,4
V	<0,01	Sb	<0,1	Au	<0,2
Cr	<0,01	Te	<0,2	Hg	<0,6
Mn	<0,01	I	<0,05	Tl	<0,1
Fe	<0,05	Cs	<0,1	Pb	<0,5
Co	<0,01	Ba	<0,2	Bi	<0,3
Ni	<0,01	La	<0,1	Th	<0,1
Cu	<0,02	Ce	<0,1	U	<0,1

Изотопный состав моносилана и полученного из него поли- и монокристаллического кремния-29

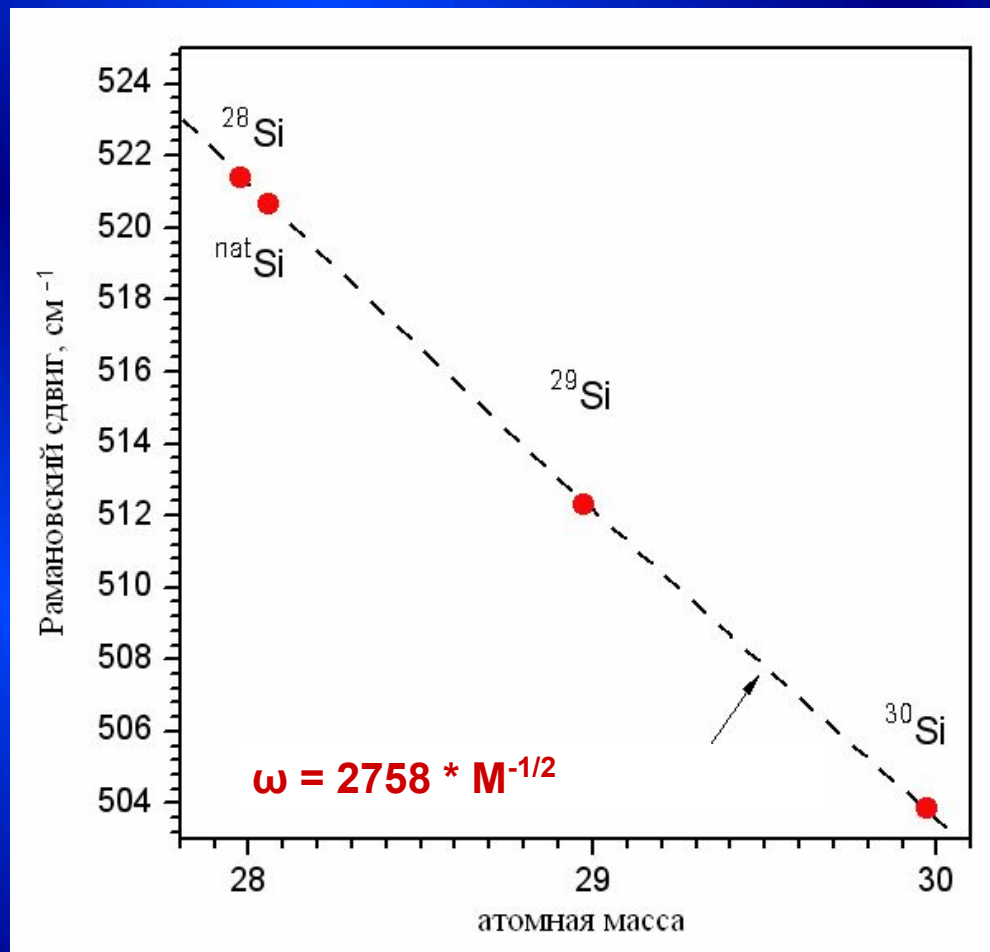
Масса изотопа	Моносилан	Поликристаллический кремний	Монокристалл
28	0,041±0,010	0,023±0,004	0,026±0,005
29	99,909±0,019	99,923±0,016	99,919±0,011
30	0,050±0,015	0,054±0,015	0,055±0,009

Спектры комбинационного рассеяния изотопнообогащенного кремния

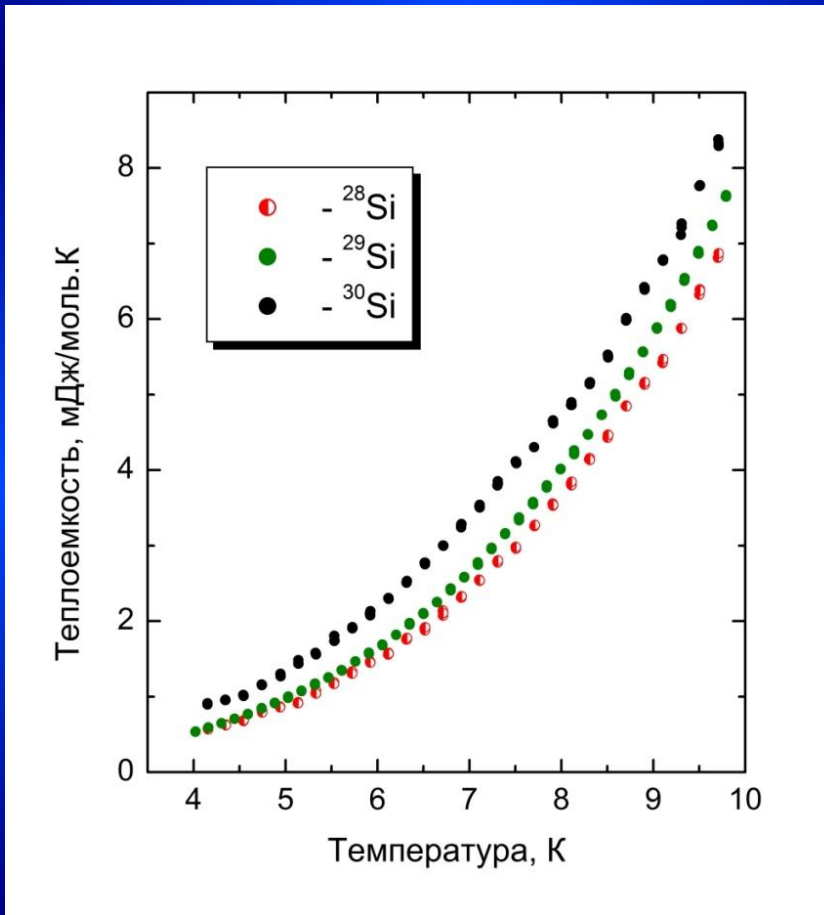


$$\omega = AM^{-1/2} - B/M$$

Зависимость положения максимума полосы комбинационного рассеяния от атомной массы



Теплоемкость изотопнообогащенного кремния Si-28, Si-29, Si-30



$$C_V = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (1)$$

$$^{28}\text{Si}: \Theta_D = 641 \pm 2 \text{ K}$$

$$^{29}\text{Si}: \Theta_D = 627 \pm 2 \text{ K}$$

$$^{30}\text{Si}: \Theta_D = 616 \pm 3 \text{ K}$$

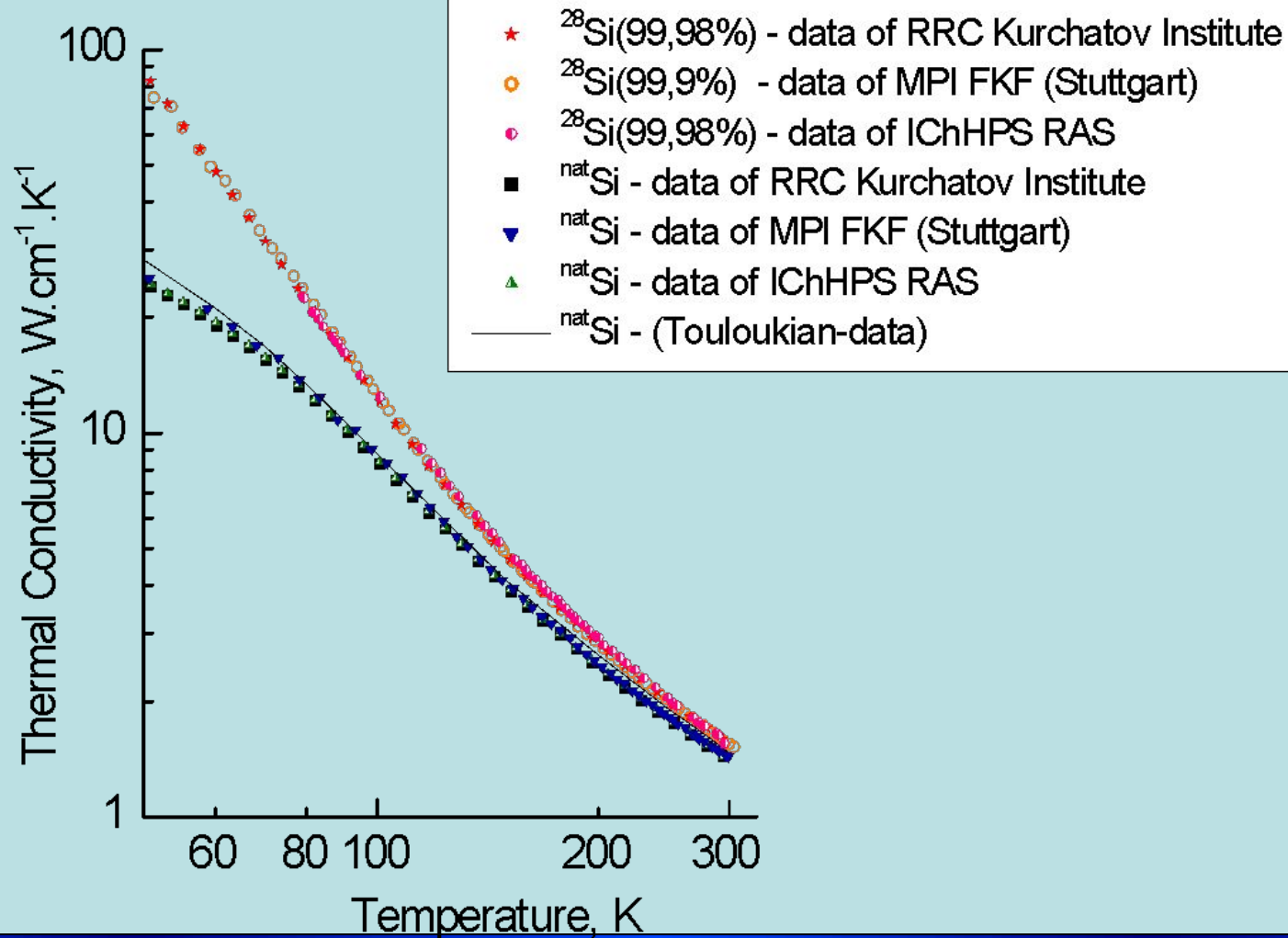
Измерения проведены совместно с Институтом исследований твердого тела общества Макса Планка (Штутгарт, Германия)

$$\Theta_D(\text{Si28}) : \Theta_D(\text{Si29}) : \Theta_D(\text{Si30}) = \frac{1}{\sqrt{M_{\text{Si28}}}} : \frac{1}{\sqrt{M_{\text{Si29}}}} : \frac{1}{\sqrt{M_{\text{Si30}}}} \quad (2)$$

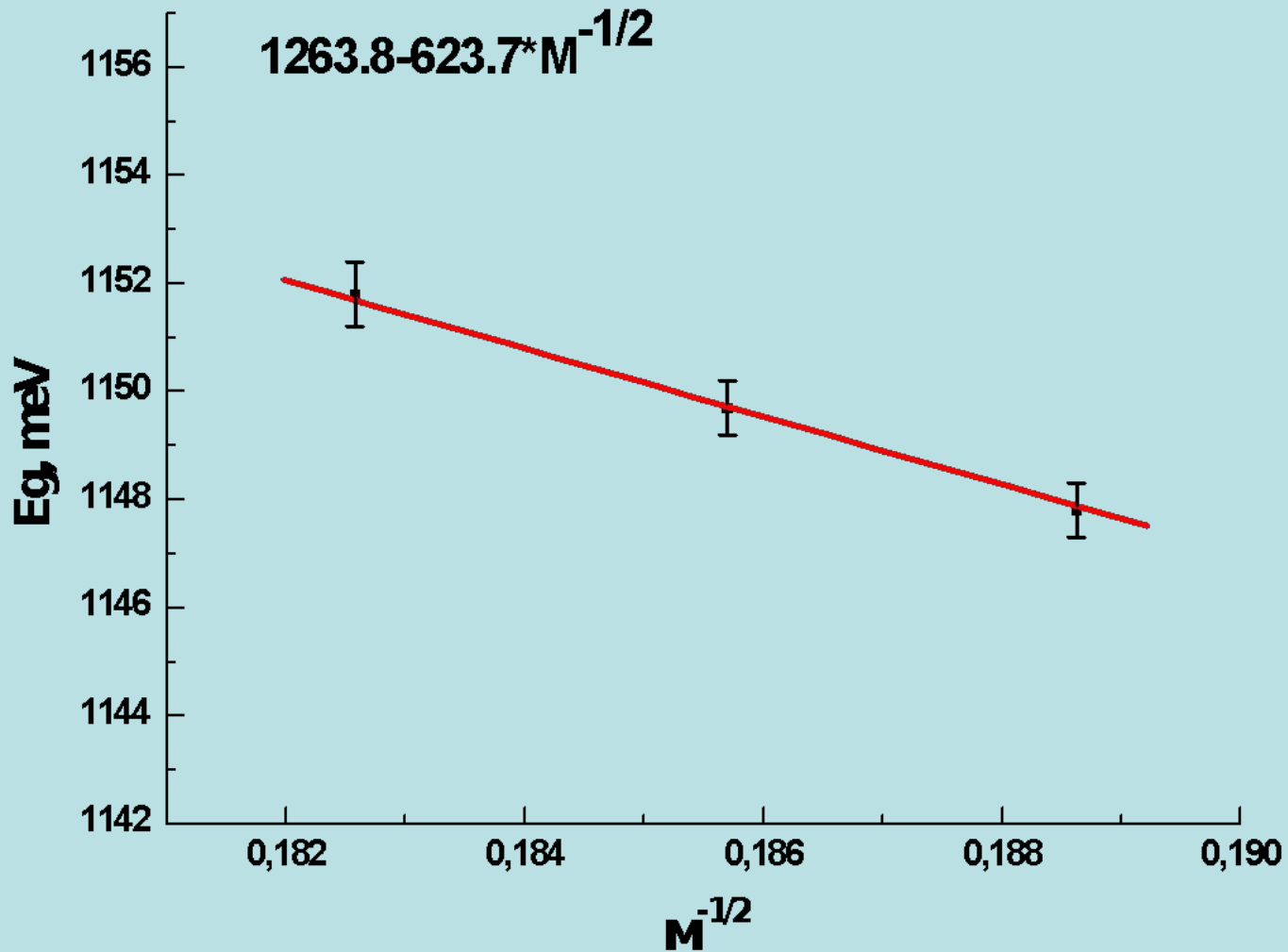
Теплопроводность изотопнообогащенного кремния-28

*Измерения проведены совместно
с РНЦ «Курчатовский институт»*

Теплопроводность изотопнообогащенного кремния-28 в интервале 50-300К



Зависимость ширины запрещенной зоны кремния от атомной массы

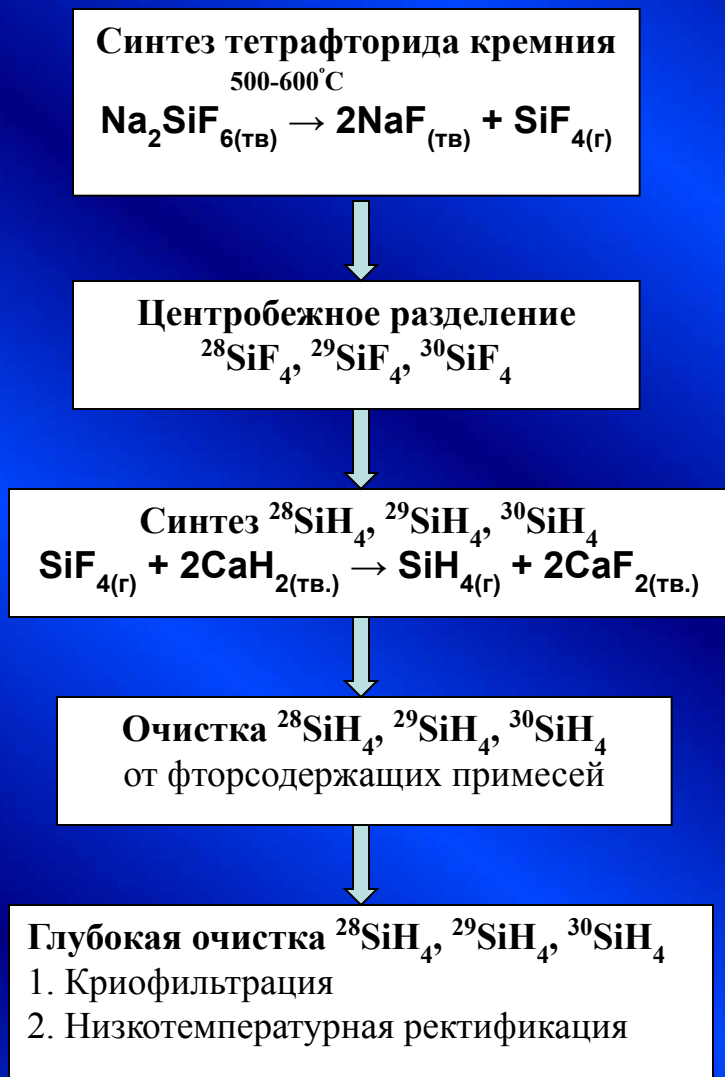


Перспективы применения моноизотопного кремния

- ❖ Создание эталонов свойств и физических постоянных
- ❖ Изотопные сверхрешетки, элементы наноэлектроники
- ❖ Детекторы ионизирующих излучений
 - *с высокой радиационной стойкостью*
 - *высокого временного и энергетического разрешения*
- ❖ Монохроматоры рентгеновского излучения
- ❖ Рефлекторы для рентгеновских лазеров
- ❖ Квантовые компьютеры

Благодарю за внимание !

Схема получения высокочистых моноизотопных силанов



Изотопный состав силанов

Изотоп	Содержание изотопа, %		
	$^{28}\text{SiH}_4$	$^{29}\text{SiH}_4$	$^{30}\text{SiH}_4$
28	99,993±0,001	0,041±0,010	0,014±0,005
29	0,0062±0,0007	99,909±0,019	0,042±0,007
30	0,0008±0,0004	0,050±0,015	99,944±0,010

Содержание примесей в очищенном силане

Примесь	C · 10 ⁶ , % мол.
Si_2H_6	(200 ±40)
Si_2OH_6	(10±2)
$\text{CH}_4, \text{CHF}_3, \text{C}_2\text{H}_6, \text{изо-C}_4\text{H}_{10}, \text{н-C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_2\text{H}_4, \text{CO}_2$	<6
$\text{C}_3\text{H}_6, \text{PH}_3, \text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}, \text{CH}_3\text{SiH}_3, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_2\text{H}_5\text{SiH}_3, \text{Si}_3\text{H}_8$	<1
$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{SiH}_2, \text{AsH}_3, \text{C}_2\text{H}_3\text{F}, \text{CH}_3\text{Cl}, \text{транс-1,2-C}_2\text{H}_2\text{F}_2$	<0,6
$\text{H}_2\text{S}, (\text{CH}_3)_2\text{SiH}_2, \text{цис-1,2-C}_2\text{H}_2\text{F}_2$	<0,4
$\text{C}_2\text{F}_4, \text{C}_2\text{HF}_3, (\text{SiH}_3)_2\text{CH}_2, \text{1,1-C}_2\text{H}_2\text{F}_2, \text{GeH}_4, \text{SF}_6$	<0,3