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

Синтез и очистка исходных летучих соединений

Разделение изотопов кремния

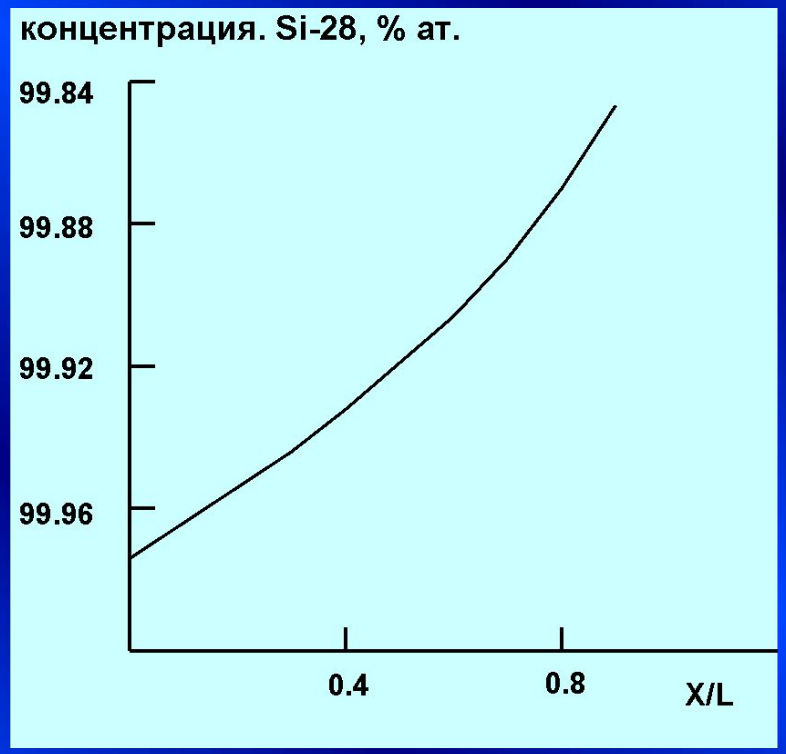
Синтез и глубокая очистка силана

Получение поликристалличес-кого кремния

Выращивание монокристаллов

Изотопное разбавление при выращивании монокристалла из кварцевого тигля

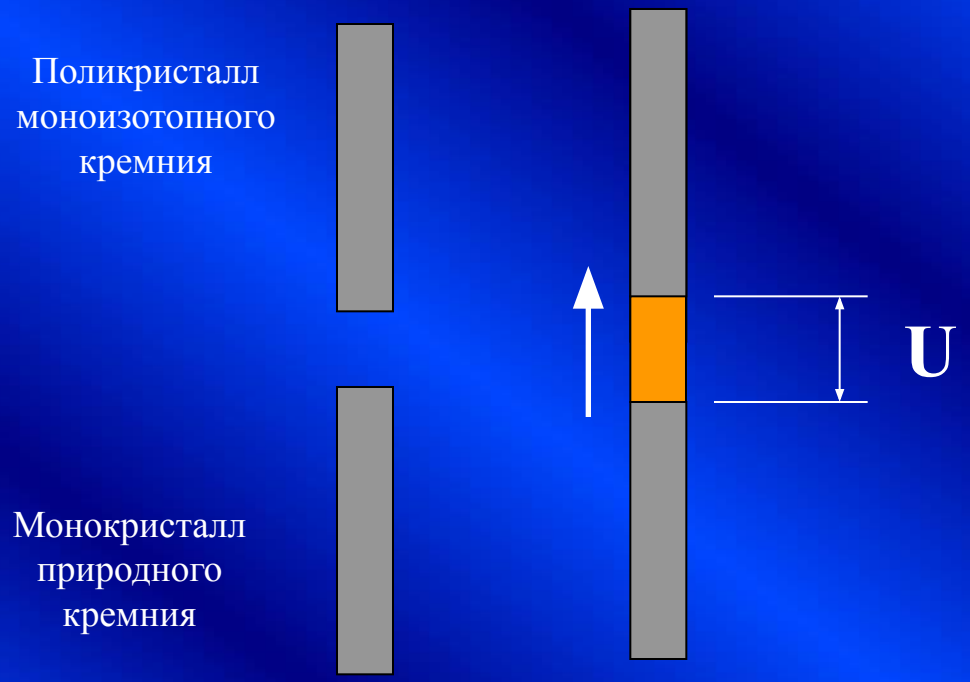
$SiO_2 + Si = 2\ SiO$



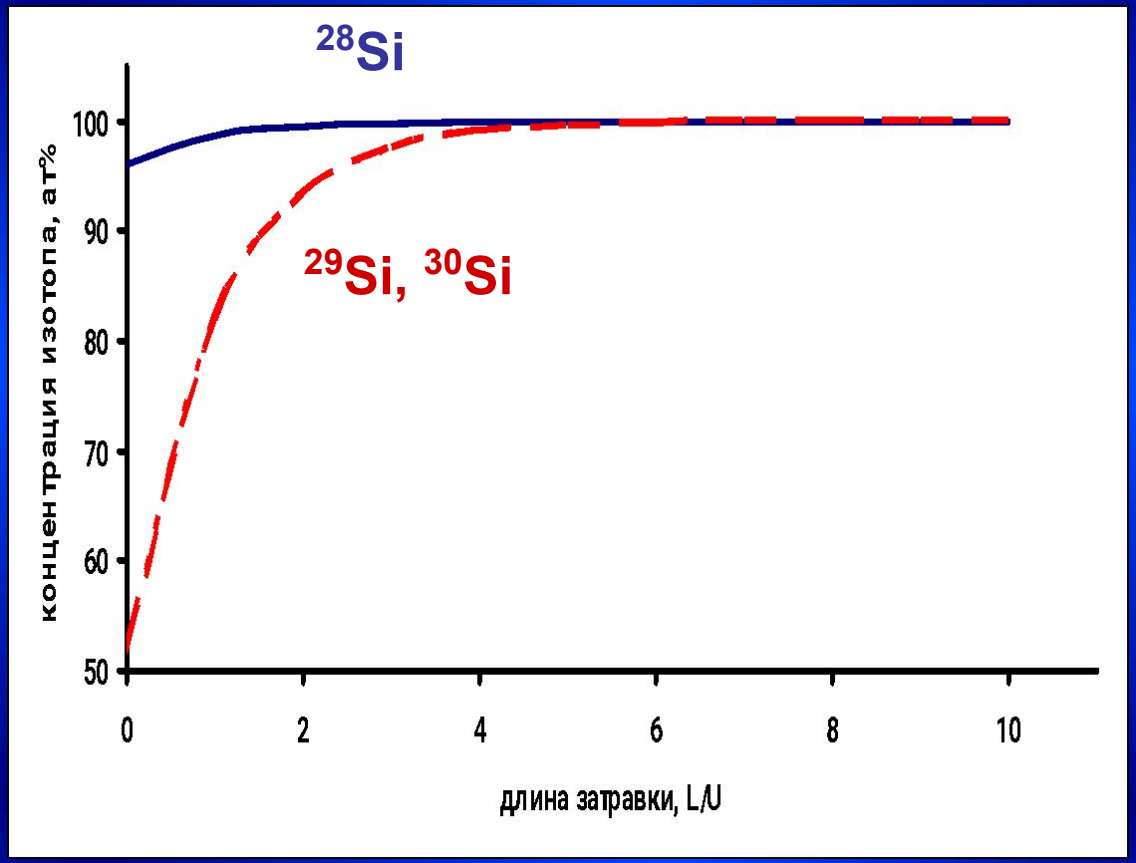
Получение стержня-подложки из моноизотопного кремния

Изготовление монокристаллической затравки

Зонноочищенный кремний

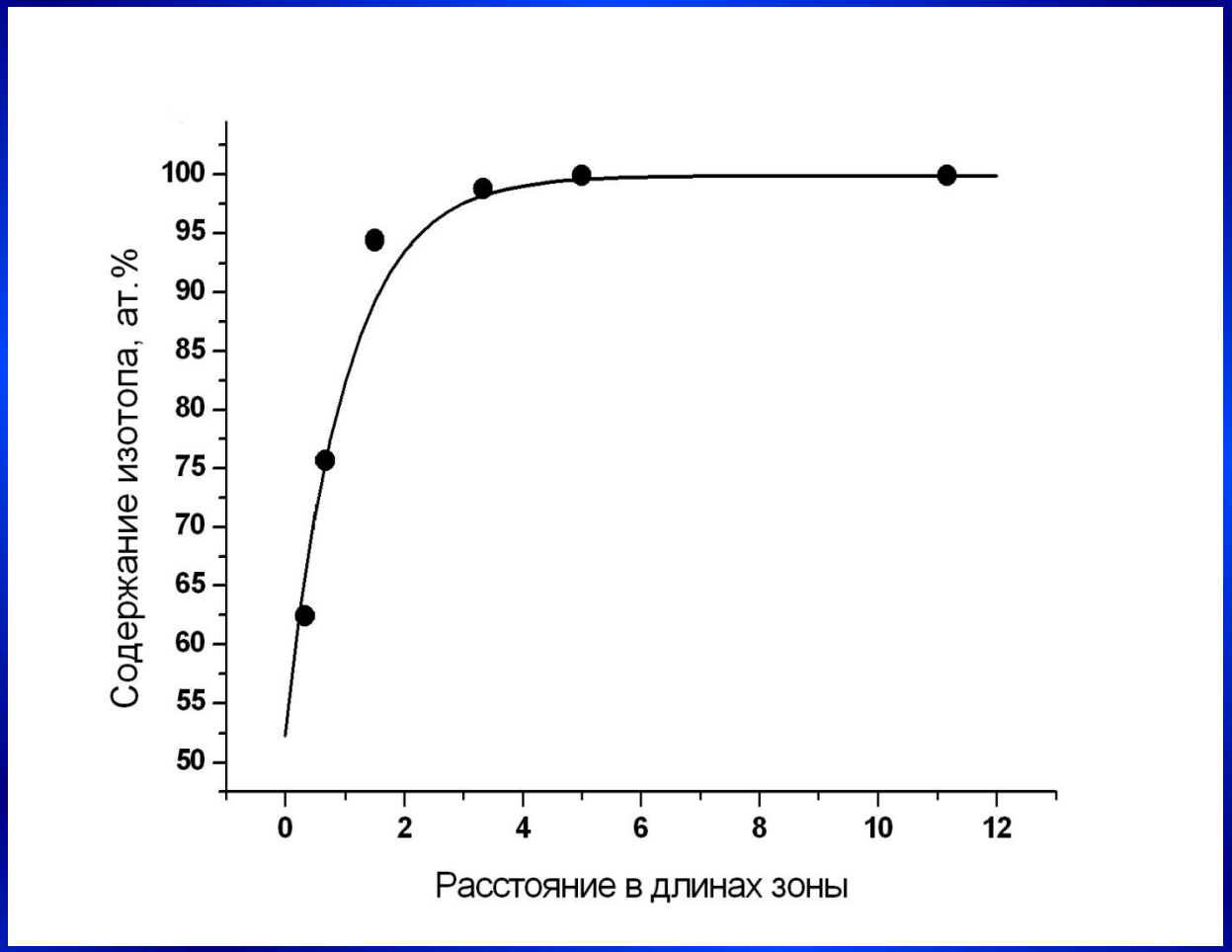


Распределение концентрации изотопов по длине затравки



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

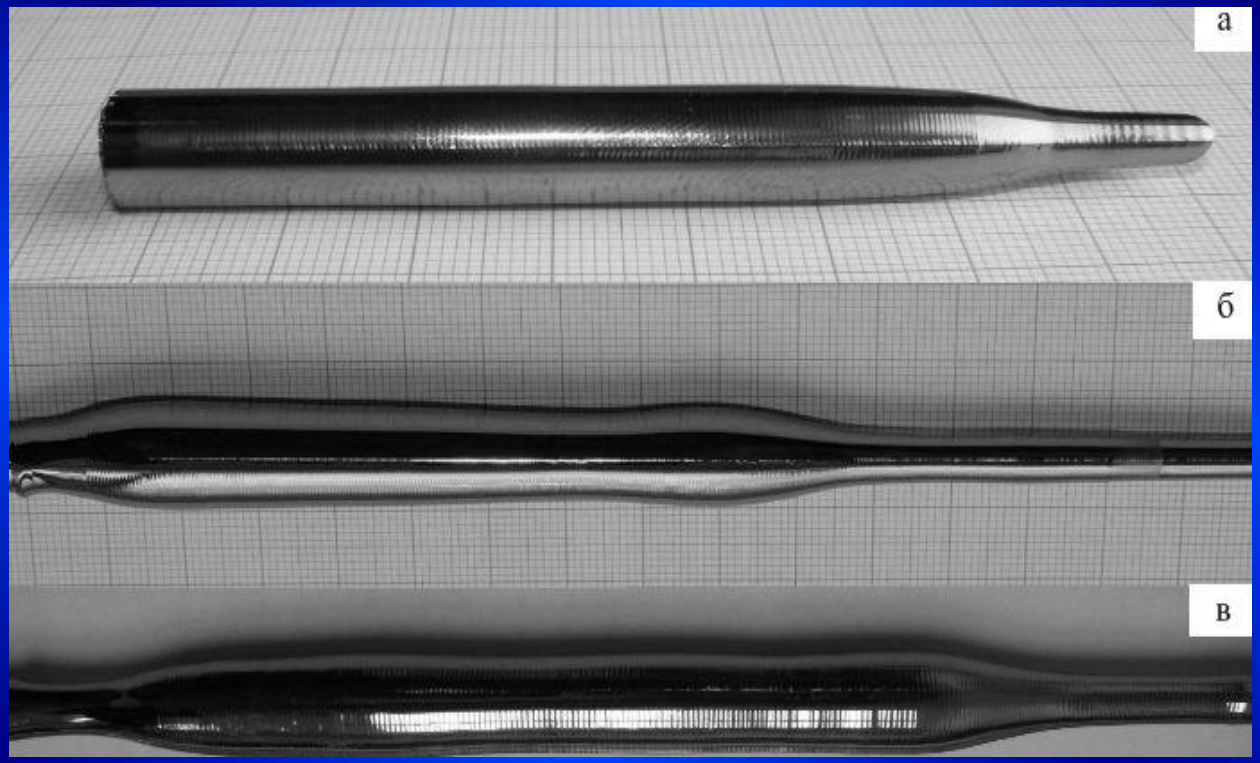
Распределение изотопа кремния-29 по длине затравки



— - расчет

● - эксперимент

Монокристаллы стабильных изотопов кремния



^{28}Si (99,99%)

^{29}Si (99,92%)

^{30}Si (99,97%)

Содержание газообразующих примесей (C,O) <1.10^{16} см$^{-3}$

Удельное электросопротивление (300 К) - 100-200 ом*см

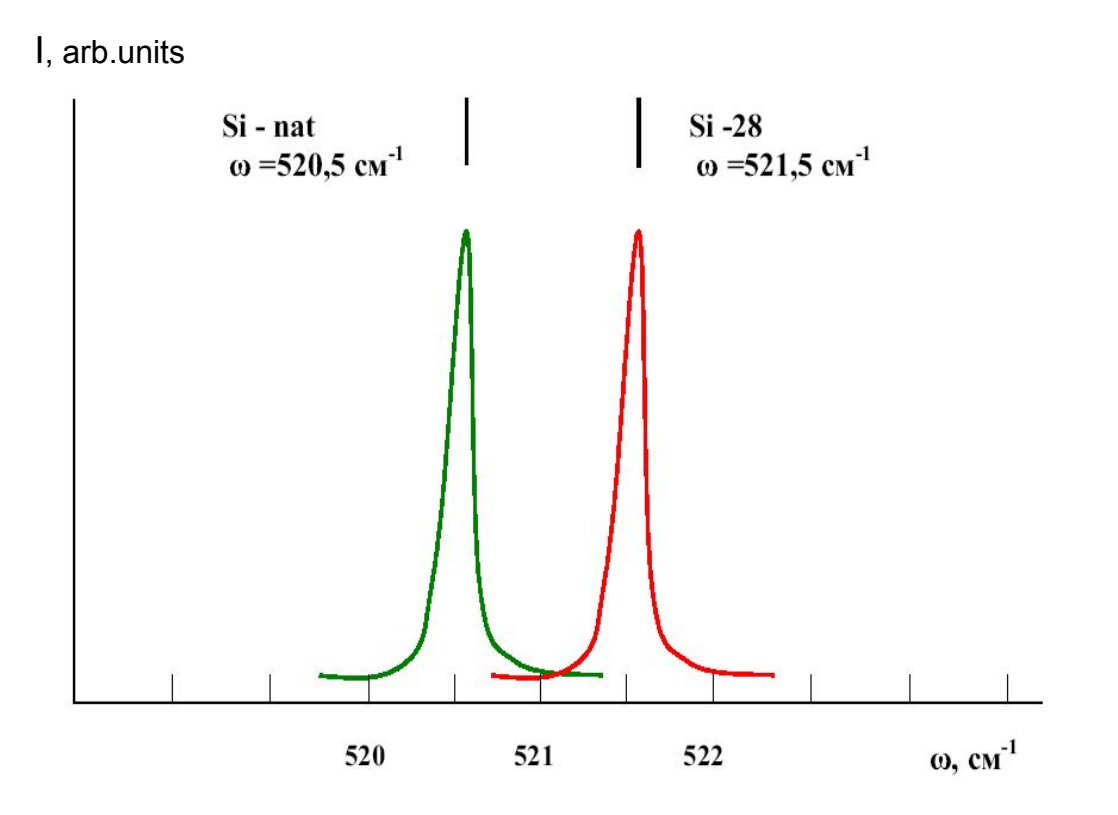
Примесный состав монокристаллического моноизотопного кремния

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

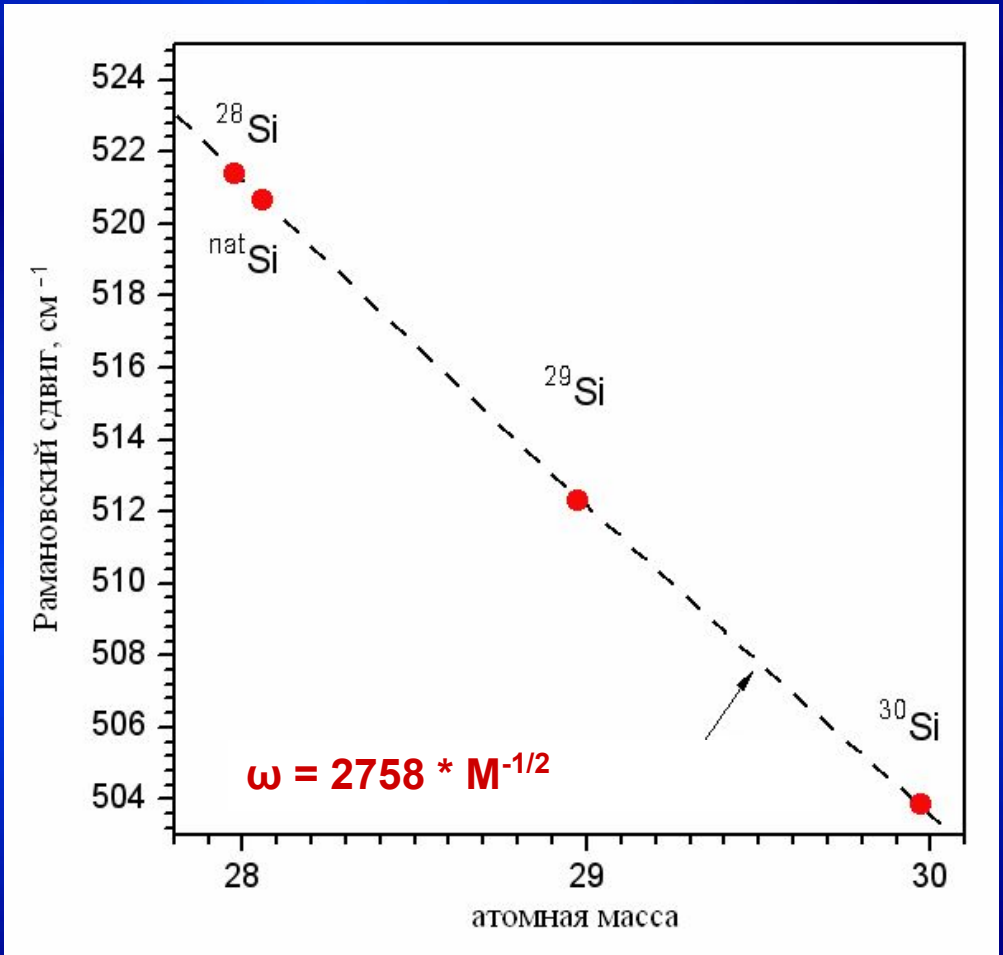
Масса изотопа	Моносилан	Поликристаллический кремний	Монокристалл
28	0,041±0,010	0,023±0,004	0,026±0,005
29	99,909±0,019	99,923±0,016	99,919±0,011
30	0,050±0,015	0,054±0,015	0,055±0,009

Спектры комбинационного рассеяния изотопнообогащенного кремния

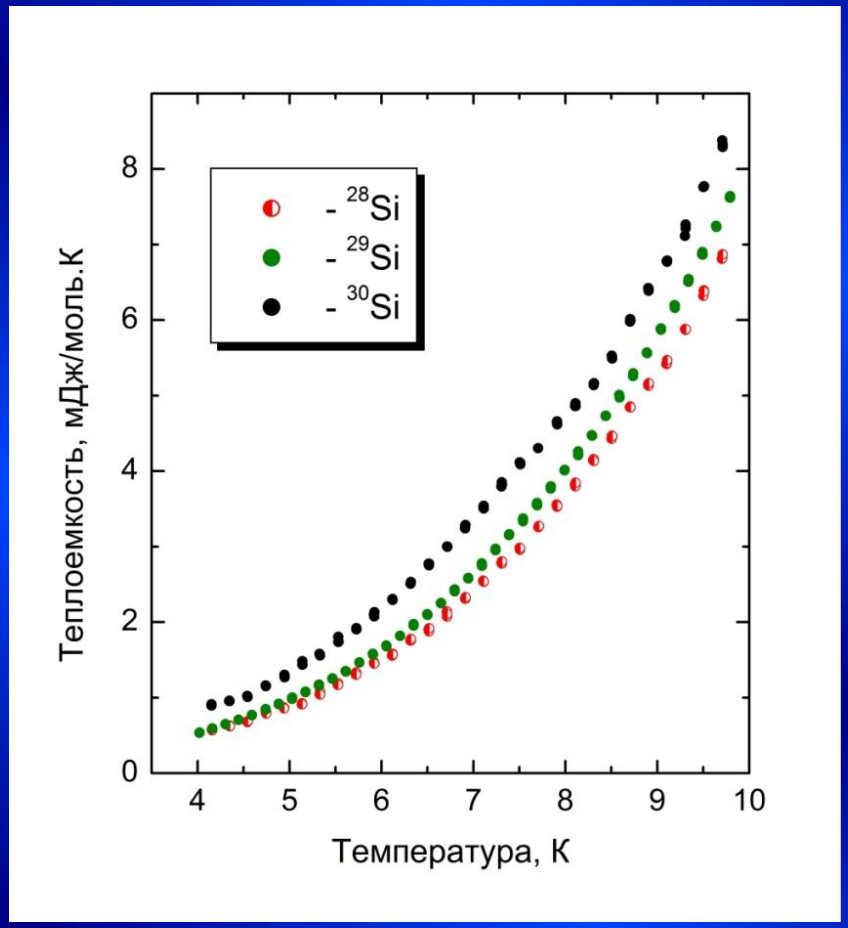


$$\omega = AM^{-1/2} - B/M$$

Зависимость положения максимума полосы комбинационного рассеяния от атомной массы



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



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

^{28}Si: Θ_D = 641±2 K

^{29}Si: Θ_D = 627±2 K

^{30}Si: Θ_D = 616±3 K

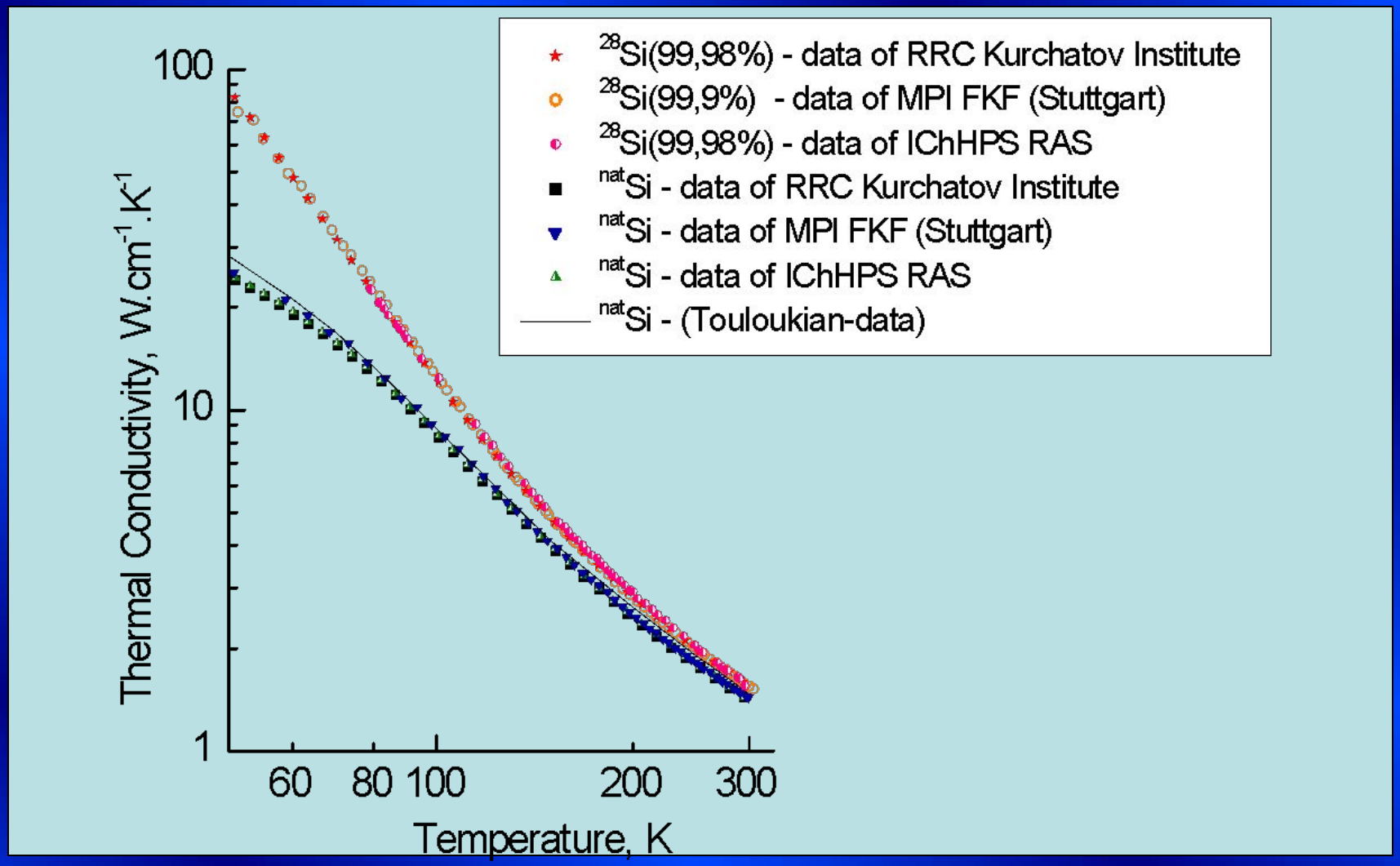
Измерения проведены совместно с Институтом исследований твердого тела общества Макса Планка (Штутгарт, Германия)

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

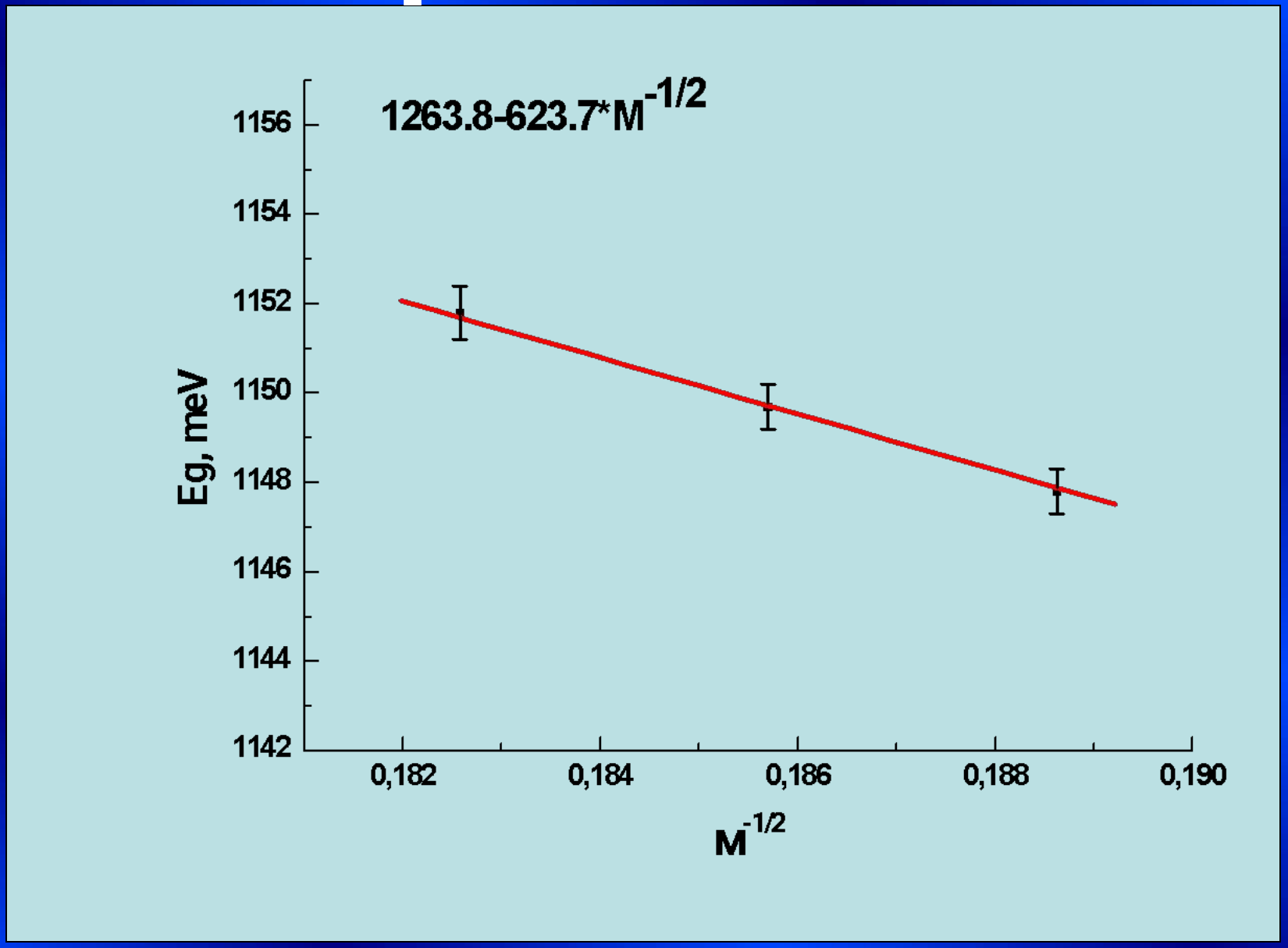
Теплопроводность изотопнообогащенного кремния-28

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

Синтез тетрафторида кремния

$$Na_2SiF_{6(тв)} \xrightarrow{500\text{-}600^\circ C} 2NaF_{(тв)} + SiF_{4(г)}$$

↓

Центробежное разделение

$^{28}SiF_4$, $^{29}SiF_4$, $^{30}SiF_4$

↓

Синтез $^{28}SiH_4$, $^{29}SiH_4$, $^{30}SiH_4$

$$SiF_{4(г)} + 2CaH_{2(тв.)} \rightarrow SiH_{4(г)} + 2CaF_{2(тв.)}$$

↓

Очистка $^{28}SiH_4$, $^{29}SiH_4$, $^{30}SiH_4$

от фторсодержащих примесей

↓

Глубокая очистка $^{28}SiH_4$, $^{29}SiH_4$, $^{30}SiH_4$

1. Криофильтрация
2. Низкотемпературная ректификация

Изотопный состав силанов

Изотоп	Содержание изотопа, %		
	$^{28}SiH_4$	$^{29}SiH_4$	$^{30}SiH_4$
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	$C \cdot 10^6$, % мол.
Si_2H_6	(200 ±40)
Si_2OH_6	(10±2)
CH_4, CHF_3, C_2H_6, изо-C_4H_{10}, н-C_4H_{10}, C_2H_4, CO_2	<6
C_3H_6, PH_3, C_2H_5Cl, CH_3SiH_3, C_3H_8, $C_2H_5SiH_3$, Si_3H_8	<1
$(C_2H_5)_2SiH_2$, AsH_3, C_2H_3F, CH_3Cl, транс-1,2-$C_2H_2F_2$	<0,6
H_2S, $(CH_3)_2SiH_2$, цис-1,2-$C_2H_2F_2$	<0,4
C_2F_4, C_2HF_3, $(SiH_3)_2CH_2$, 1,1-$C_2H_2F_2$, GeH_4, SF_6	<0,3