

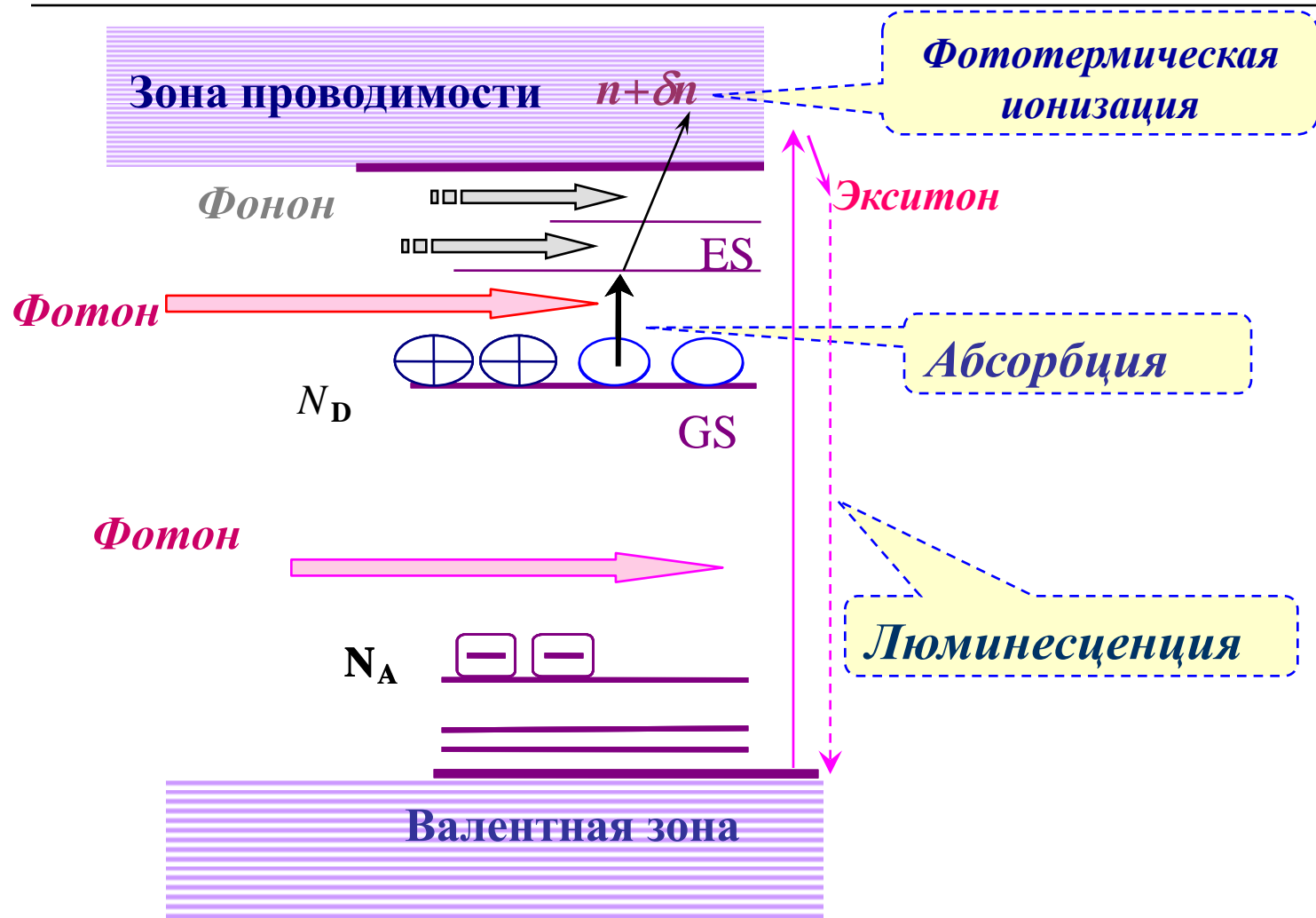
Инфракрасная спектроскопия примесей в полупроводниках



Б.А. Андреев

Институт физики микроструктур РАН, Нижний
Новгород

Электронные переходы с участием примесей.



ИК спектроскопия кремния и структур на его основе

Абсорбционная спектроскопия

- Определение примесей O, H, F, C по линиям LVM.
- Определение толщины слоя
- Собственное поглощение
- Поглощение на свободных носителях
- Определение электроактивных примесей
- Измерение коэффициентов поглощения и сил осцилляторов переходов

Фотолюминесценция и спектроскопия возбуждения люминесценции

- Определение электроактивных примесей
- Определение ширины запрещенной зоны
- Оценка размера нанокристаллов
- Кинетика релаксации
- Исследование оптически активных центров

Фотопроводимость

- Определение электроактивных примесей
- Определение ширины запрещенной зоны
- Кинетика фотопроводимости

Спектроскопия комбинационного рассеяния

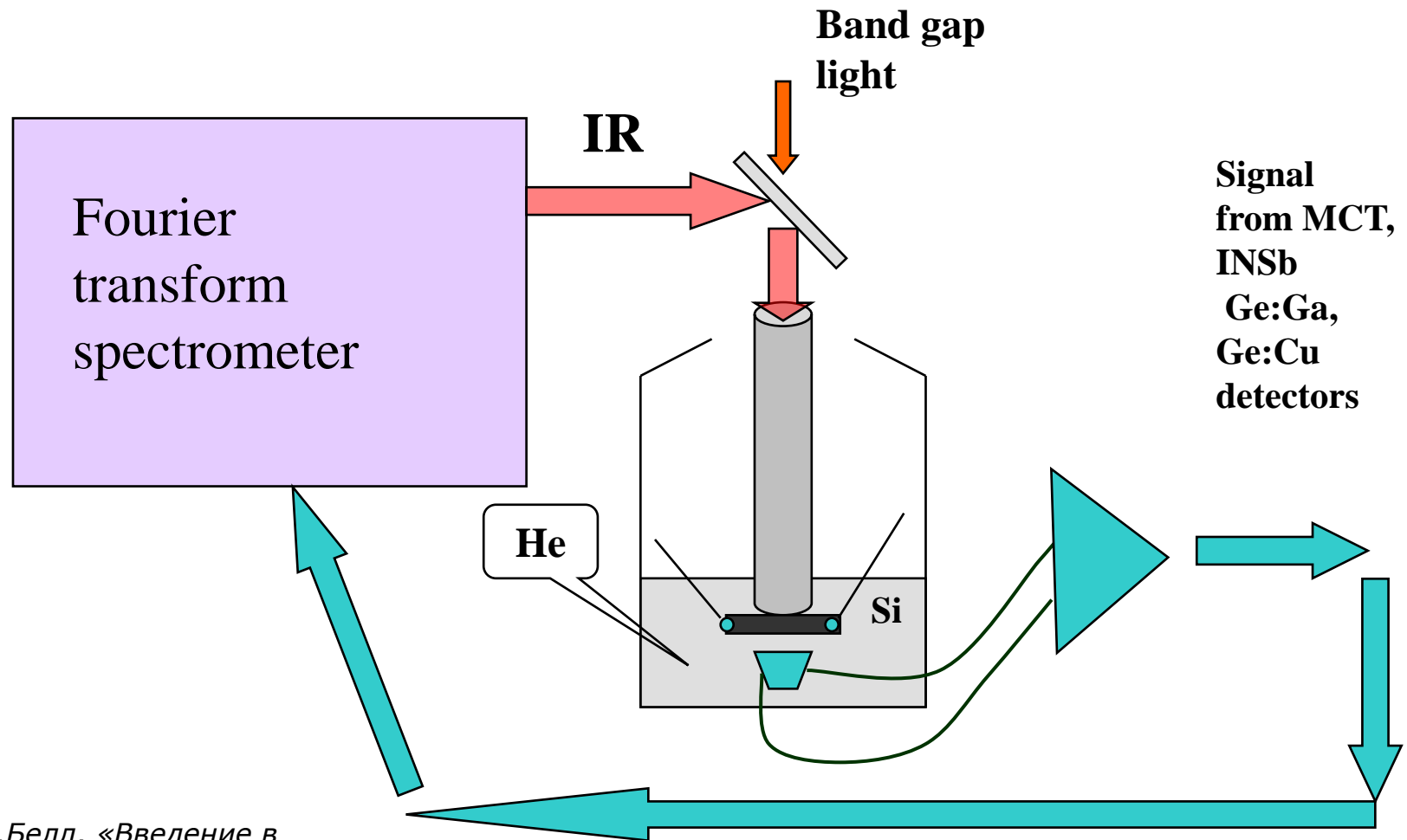
- Спектроскопия LVM
- Оценка размера нанокристаллов и доли аморфной фазы



Абсорбционная спектроскопия

1. Спектроскопия доноров и акцепторов
2. Спектроскопия LVM

Экспериментальные условия регистрации спектров поглощения и фотопроводимости

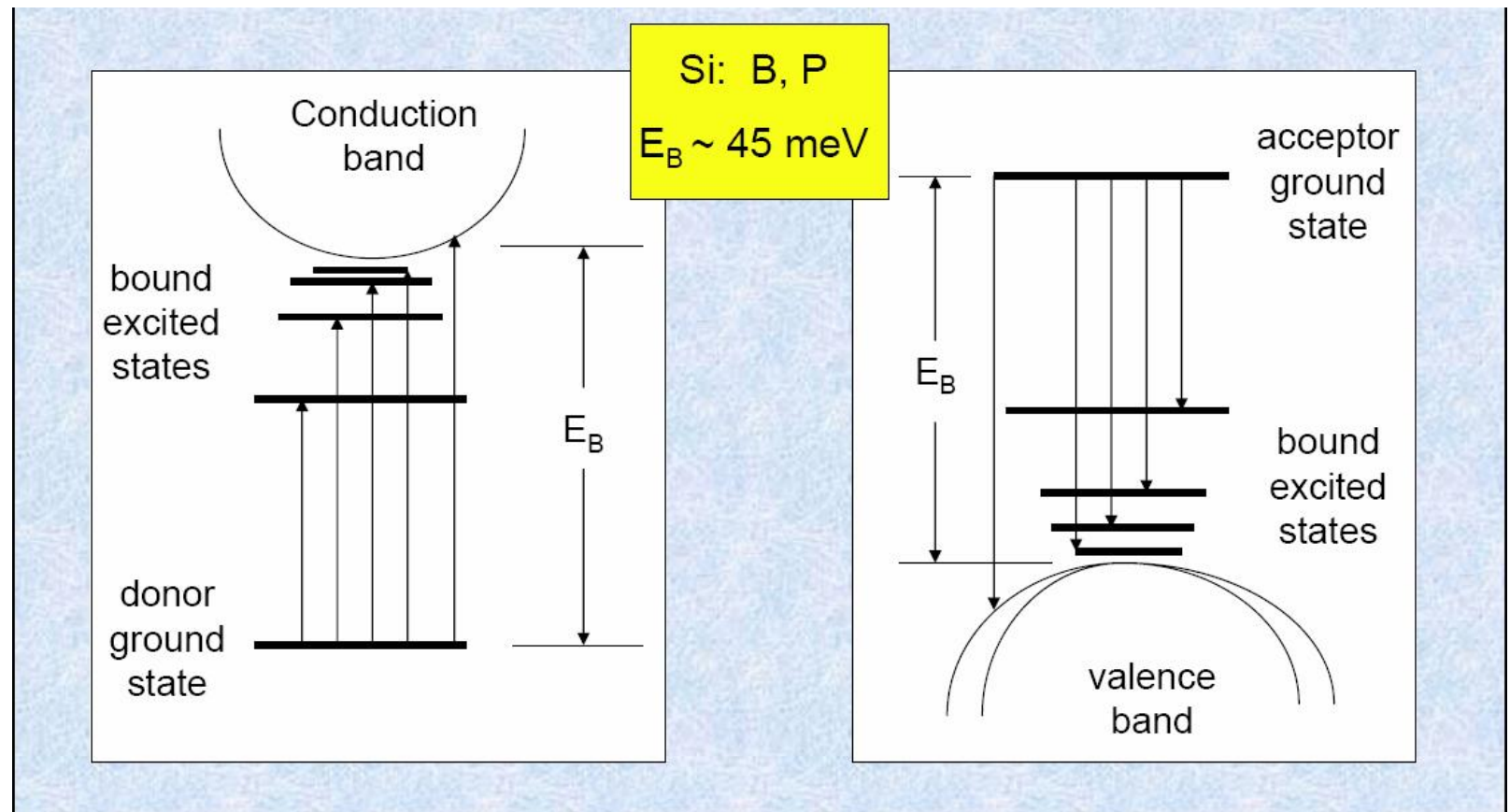


Р.Дж.Белл, «Введение в
фурье-спектроскопию» Мир,
Москва, 1975

Москва, 1975

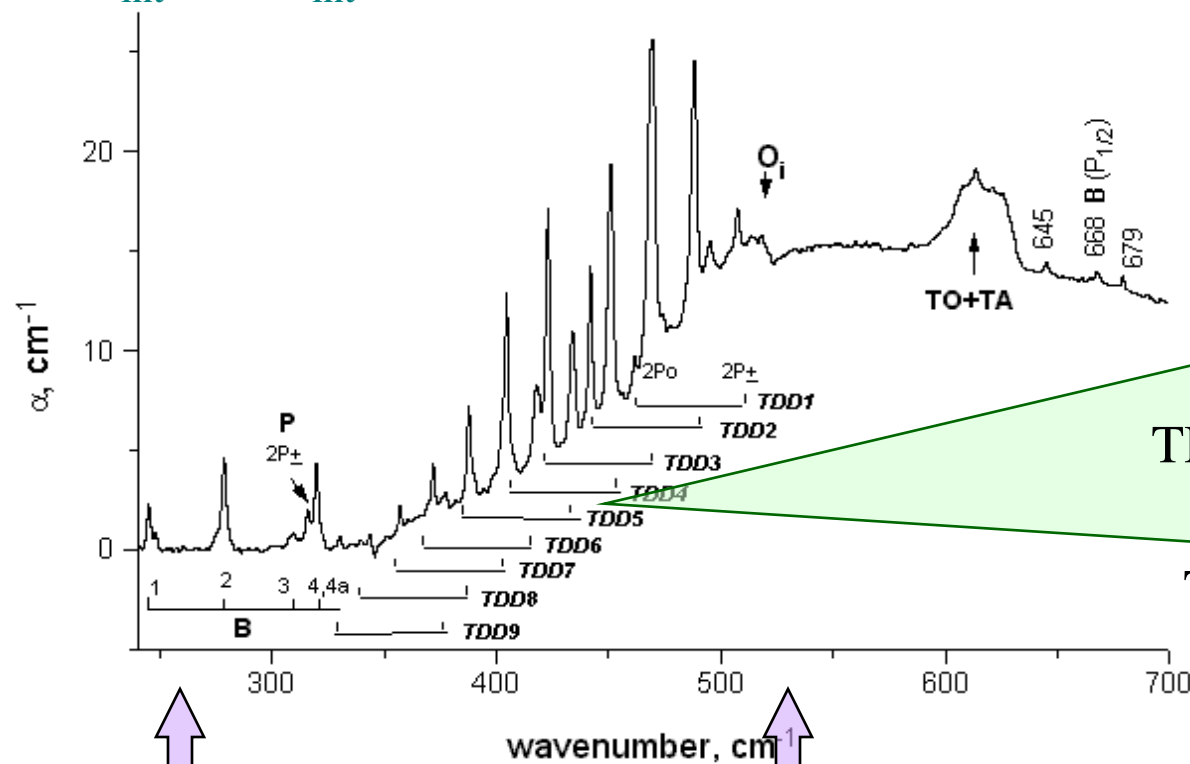
Доноры и акцепторы в Si

Для кремния (валентность 4): – донор-фосфор, мышьяк, сурьма...
– акцептор – бор, алюминий, галлий...



Абсорбционный спектр Cz-Si

$$\alpha_{\text{int}} = \sigma_{\text{int}} \cdot N^0$$



$E_{\text{GS}}(\text{TDD16})$
=41,9 meV

$E_{\text{GS}}(\text{TDD1})$
=69,9 meV

$$E_{\text{GS}} = 13.6 \cdot m^* / \epsilon_0^2 \text{ (eV)} \sim 30 \text{ meV}$$

Определение концентрации примесей В и Р в Si

$$N^0 = \alpha_{\text{int}} / \sigma_{\text{int}}$$

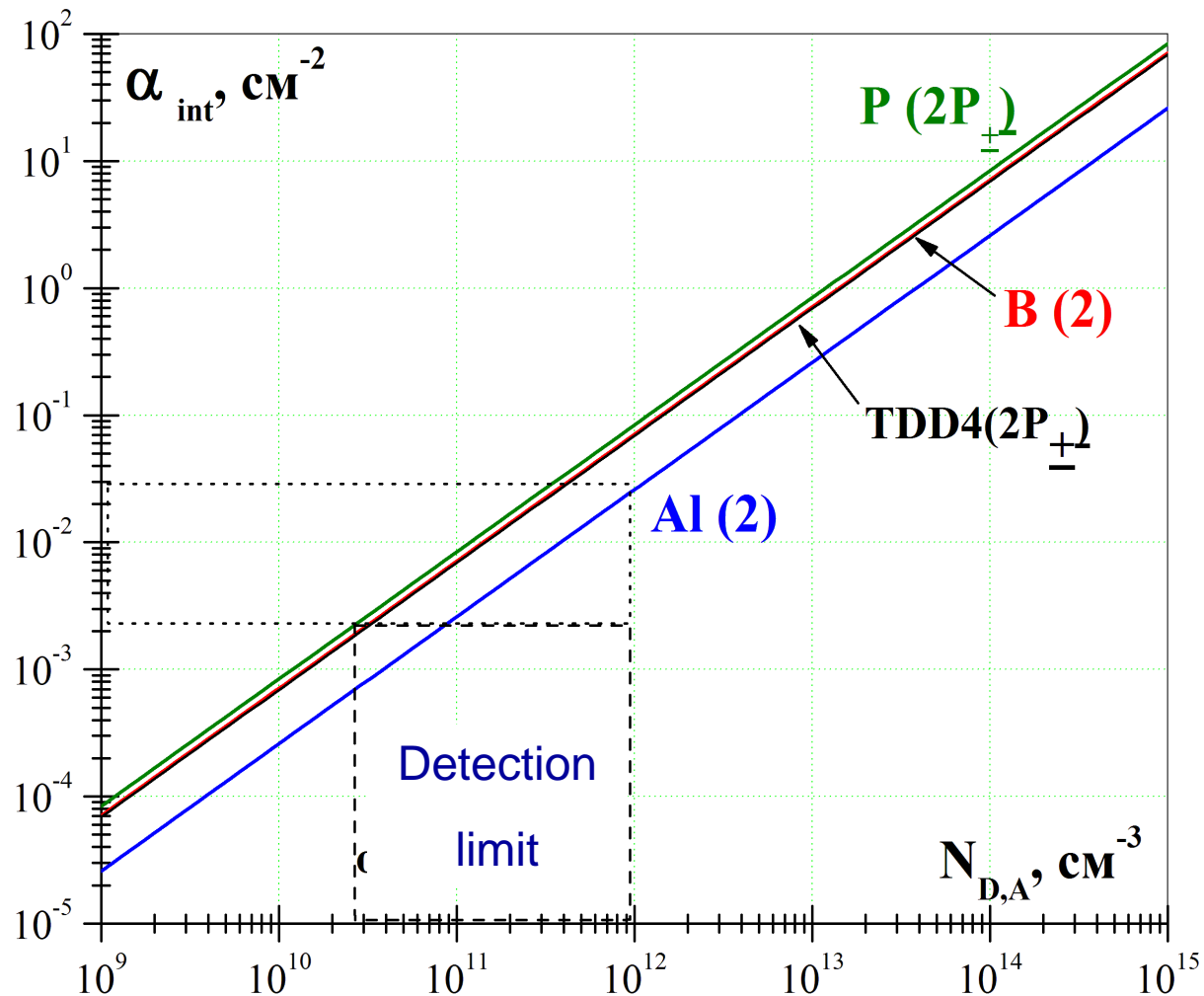
$$[\text{B}] = S (\text{peak area at } 278 \text{ cm}^{-1}) / 7.1 \cdot 10^{-14} \\ (\text{absorption cross section})^* \quad 1\Gamma_8^- \rightarrow 2\Gamma_8^-$$

- $[\text{B}] = S (\text{peak area at } 319 \text{ cm}^{-1}) / 6.9 \cdot 10^{-14}^* \\ 1\Gamma_8^- \rightarrow 2\Gamma_7^- \text{ and } 1\Gamma_8^- \rightarrow 2\Gamma_6^-$

$$[\text{P}] = S (\text{peak area at } 316 \text{ cm}^{-1}) / 8.4 \cdot 10^{-14}^* \\ 1\text{S} \rightarrow 2\text{P}_{\pm}$$

**B.A.Andreev et al. Mat.Sci.For.(1995)*

Предел обнаружения примесей в Si



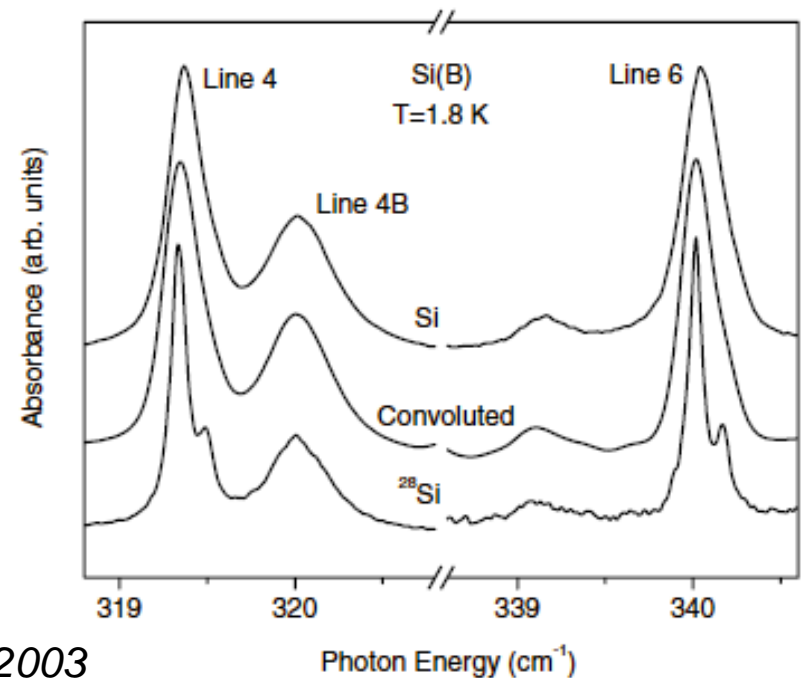
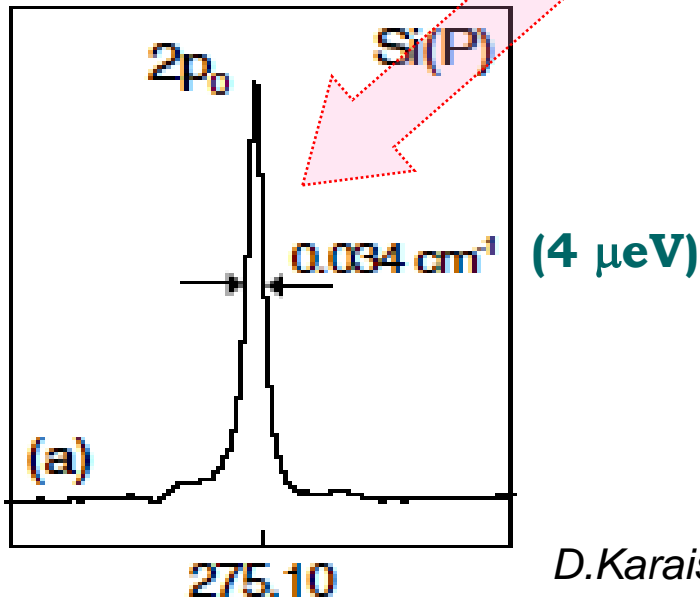
Форма линий примесного поглощения в NATSi и MONOSi

NatSi (P)

Минимальная ширина линии в бездислокационном natSi(P) **FWHM=0.13 cm^{-1} (16 μeV)**
 В.А.Андреев et al. Mater.Sci.Forum 196-201 (1995).

$^{28}\text{Si (B)}$

$^{28}\text{Si (P)}$



D.Karaiskaj et al. PRL, 2003

IR absorption in ^{28}Si and ^{30}Si

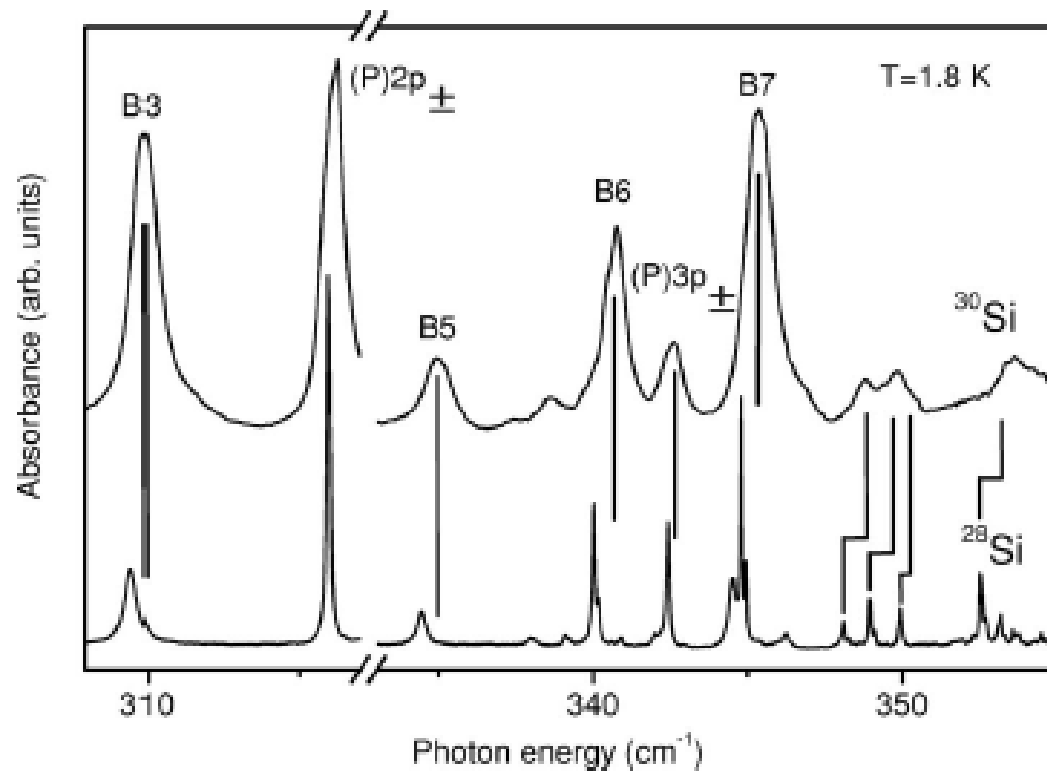
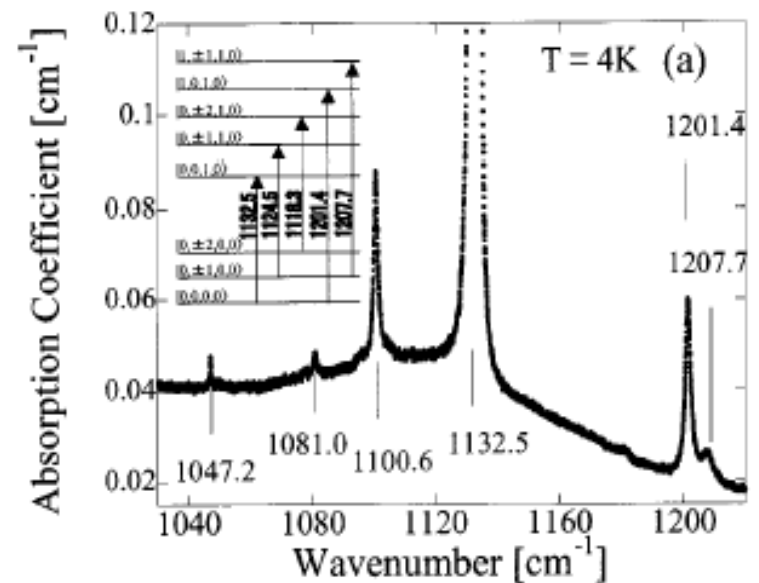
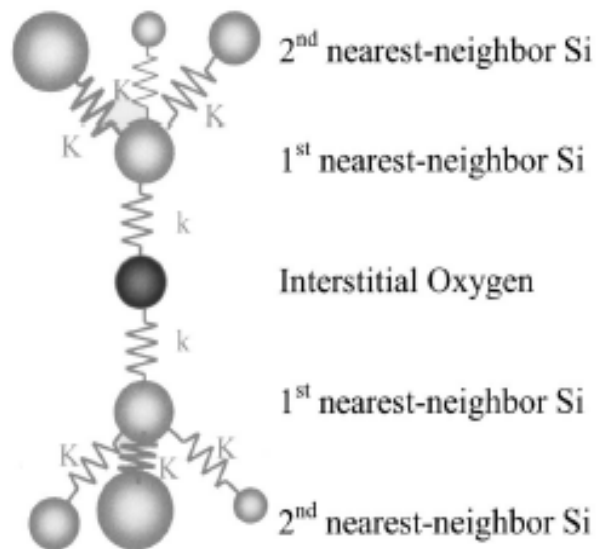


FIG. 30. Comparison of several of the infrared absorption lines of the acceptor boron and the donor phosphorus between ^{28}Si and ^{30}Si . From Karaiskaj, Thewalt, *et al.*, 2003.

Локальные колебательные моды (LVM) примесей

KATO, ITOH, YAMADA-KANETA, AND POHL

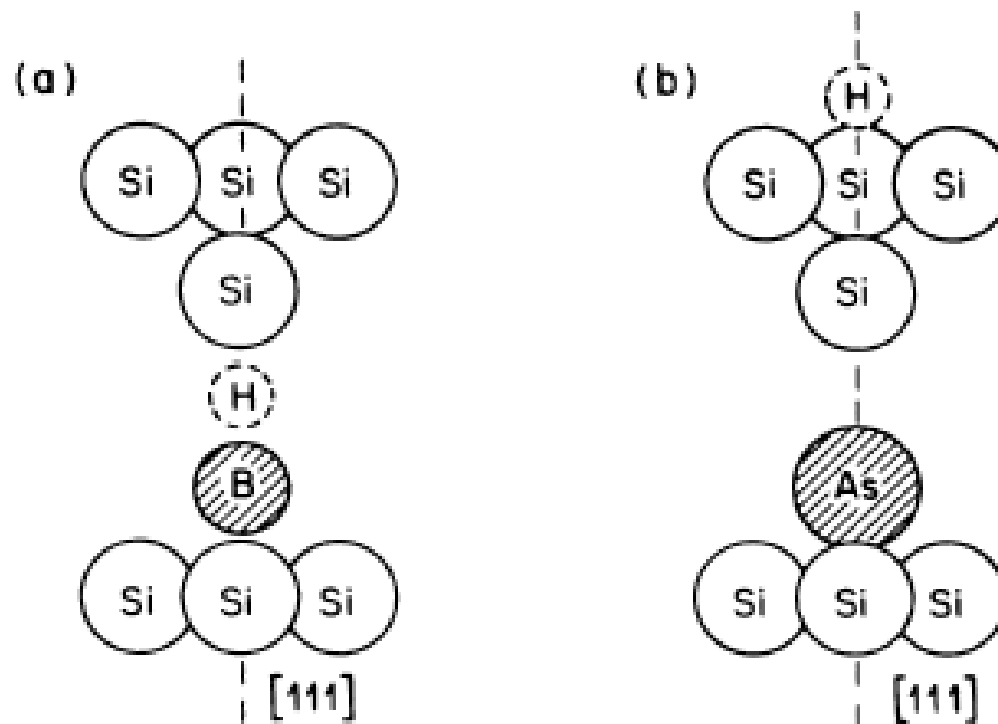
PHYSICAL REVIEW B 68, 035205 (2003)



Absorption- and Raman IR spectroscopy

Модель примесных комплексов В-Н и As-H в Si

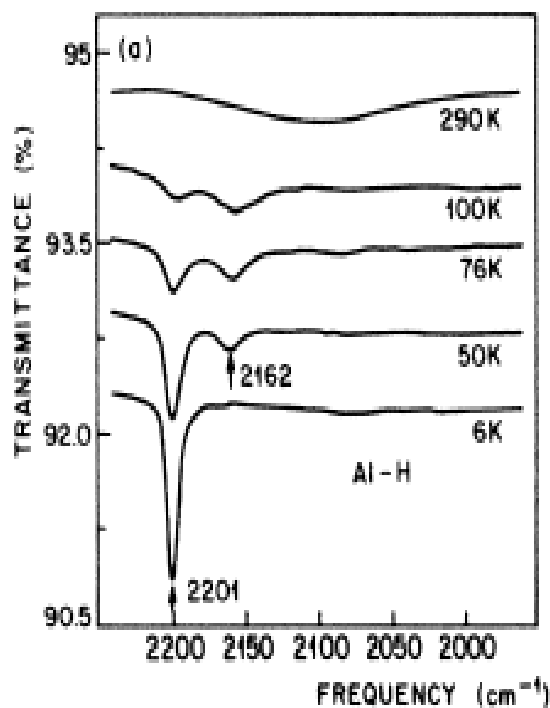
M. Stavola et al. PRB, 37 1988



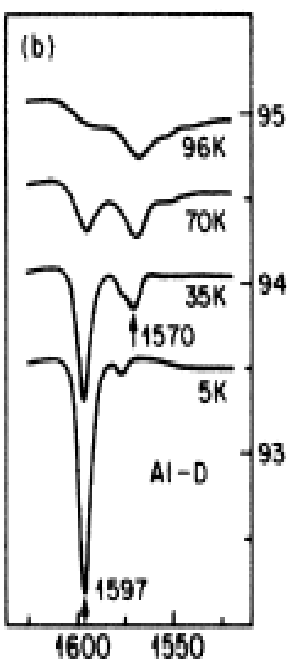
Спектры поглощения LVM в Si

M. Stavola et al. PRB, 37 1988

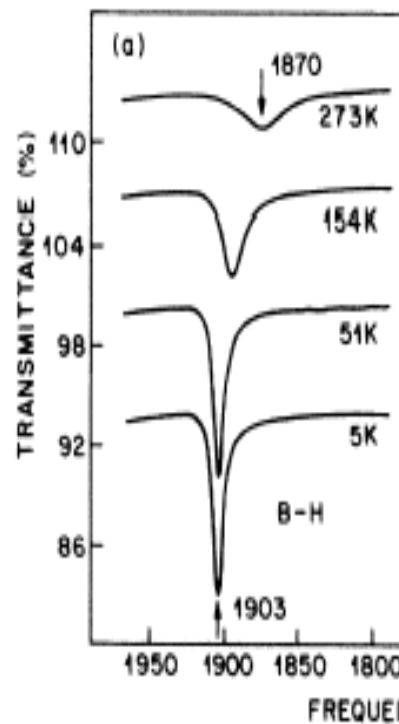
AL-H



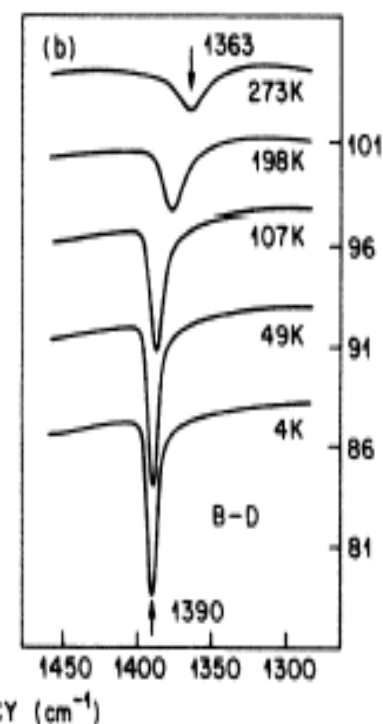
AL-D



B-H



B-D



C, O and vacancy related LVM in Si

DAVIES *et al.*

PHYSICAL REVIEW B 71, 115212 (2005)

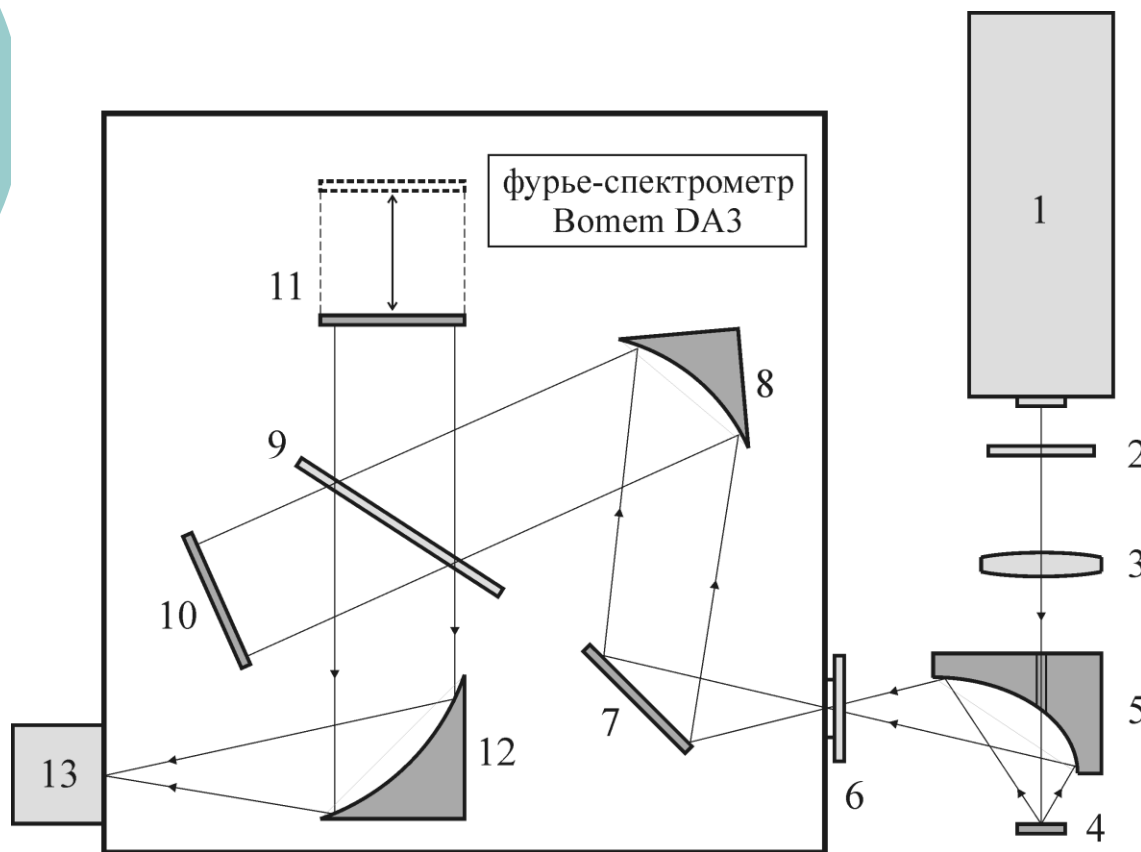
Center	NATSi cm ⁻¹	³⁰ Si cm ⁻¹
C _S	607.5	604
Si _i - O _i -Si _i	518.3	501.4
Si _i - O _i -Si _i	1136.4	1129.1
C _i	922.3	916.8
C _i -Si _i	966.7	961.8
C _i -O _i	529.6	515.4
C _i -O _i -Si _i	939.8	933.2
VO	835.7	829.8
COV	3942.1	3943.6
V ₂	2767	2764



Люминесцентная спектроскопия

1. Спектроскопия доноров и акцепторов
2. Излучающие примесные центры
3. Спектроскопия возбуждения люминесценции
4. Экситоны
5. Моноизотопный кремний

Установка для наблюдения спектров люминесценции



Fourier transform spectrometers IPM RAS

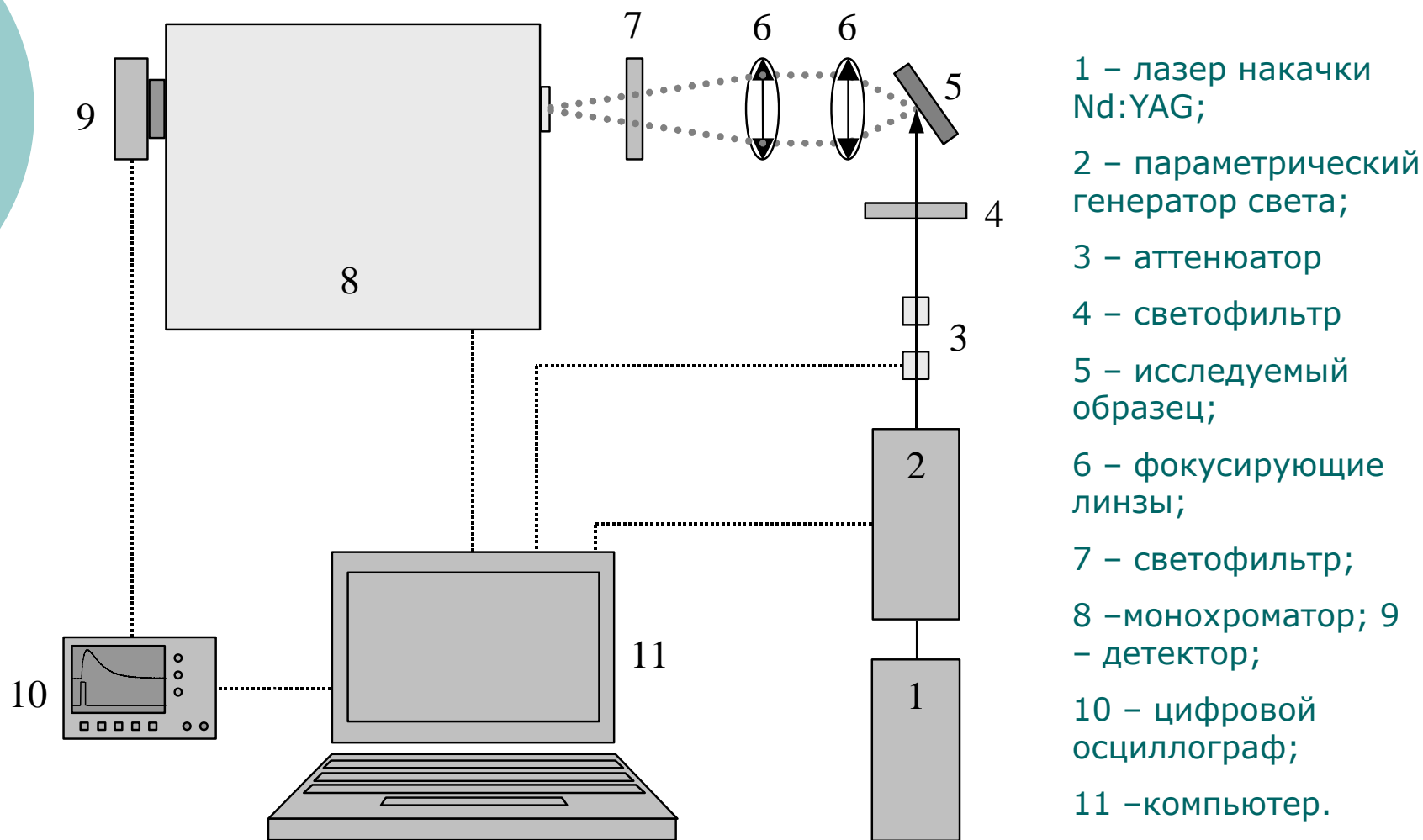
BOMEM DA3. 10-15000 cm^{-1} ($\lambda=1000\text{-}0,6 \mu\text{m}$)
Resolution up to $0,002 \text{ cm}^{-1}$

BRUKER Vertex 80V 10-20000 cm^{-1} ($\lambda=1000\text{-}0,5 \mu\text{m}$) Resolution up to $0,2 \text{ cm}^{-1}$

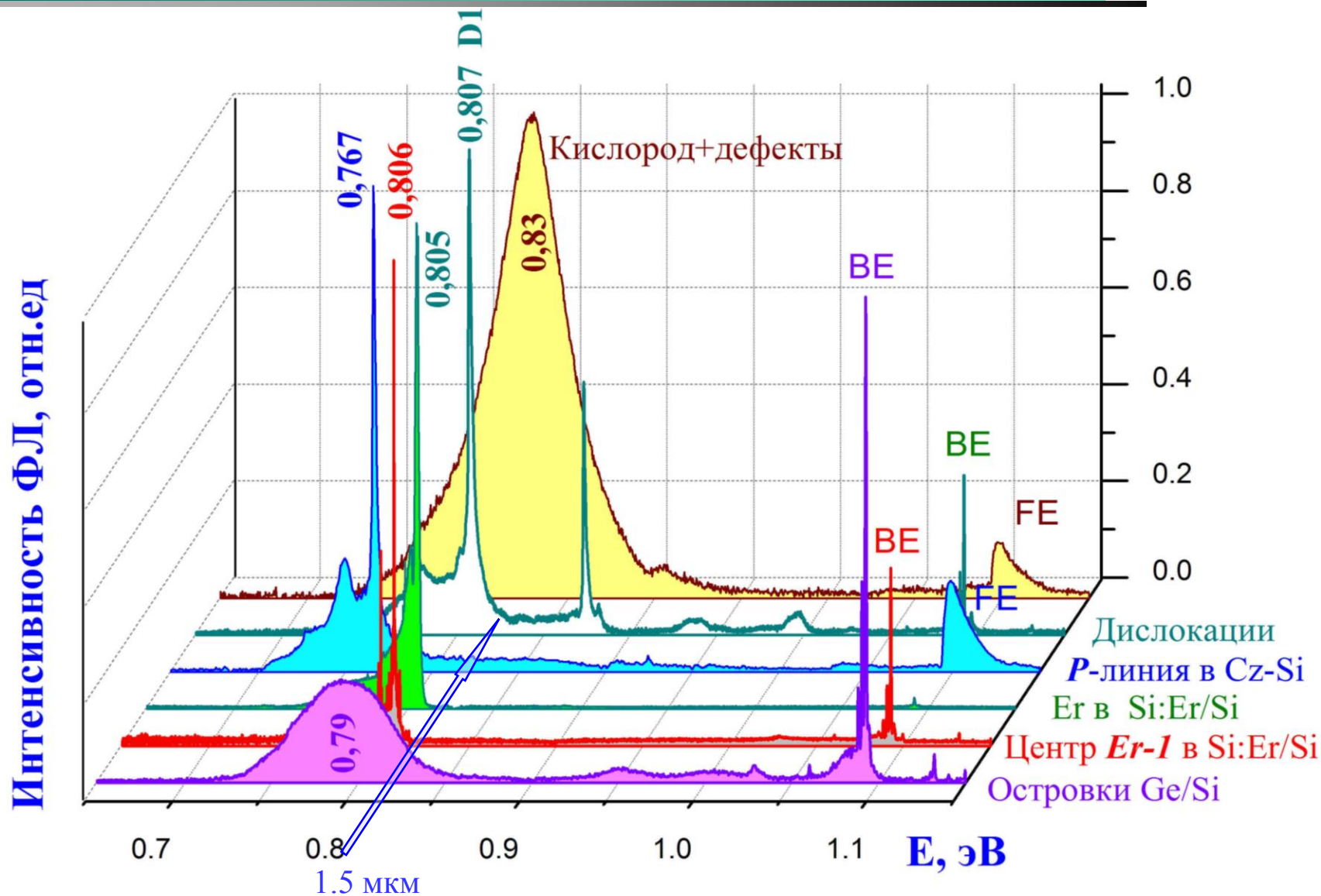
Optical cryostats $T=300\text{-}4.2 \text{ K}$

Lasers for excitation of PL

Схема экспериментальной установки для измерения спектров возбуждения и кинетики ФЛ



Излучающие центры в кремнии и кремниевых структурах

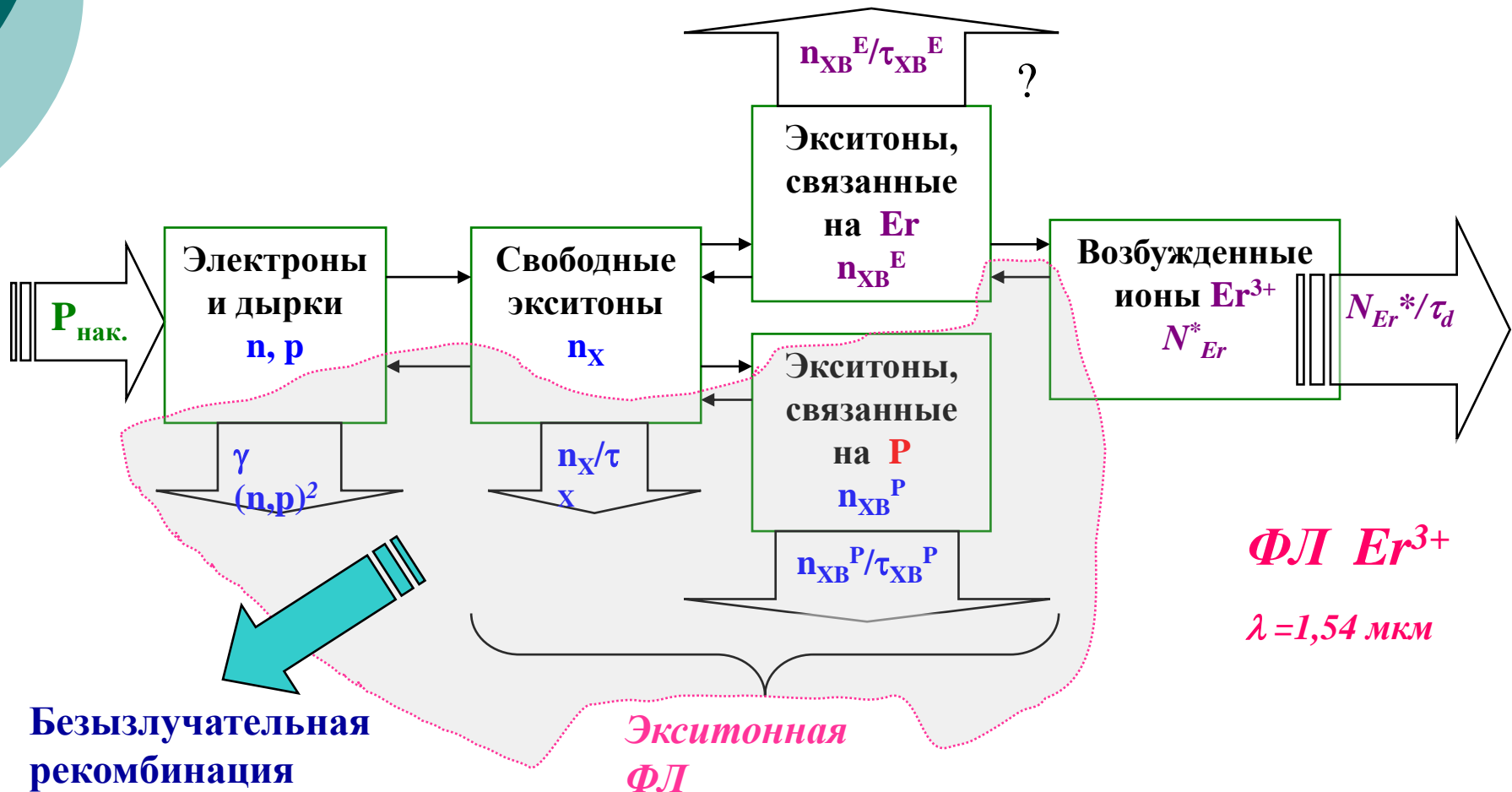


Экситонный механизм возбуждения фотолюминесценции

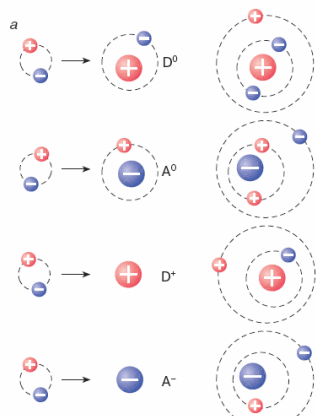
$$\sigma_{\text{eff}} \sim 10^{-15} \text{ см}^2 \text{ (в Si)}$$

$$\sigma_{\text{abs}} = 8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2 \text{ (в SiO}_2\text{)}$$

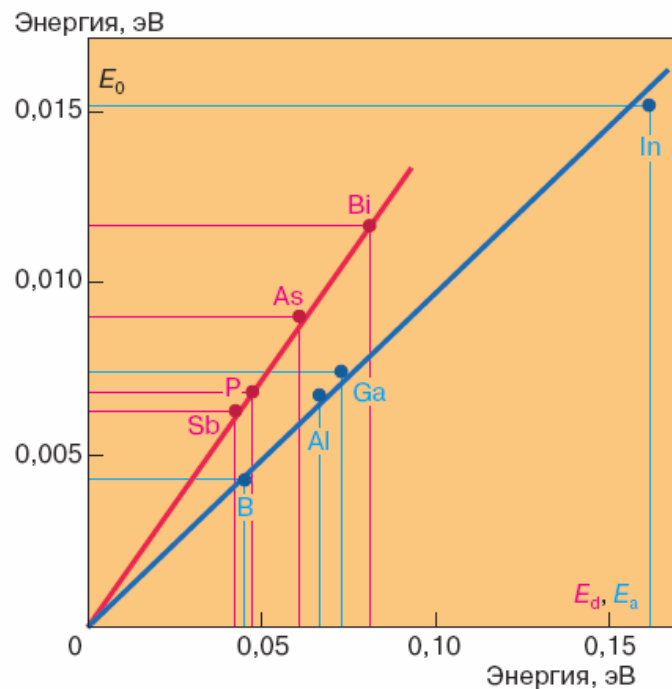
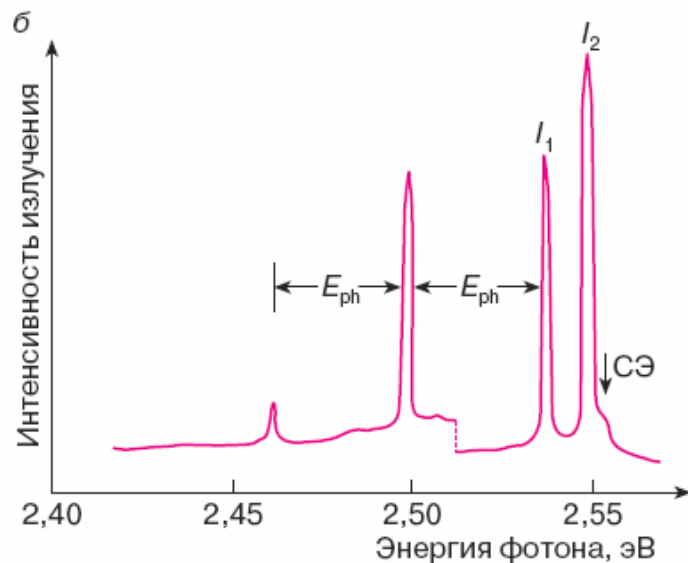
K. Takahei, Mat.Sci.Forum, (1992)



Экситон-примесные комплексы

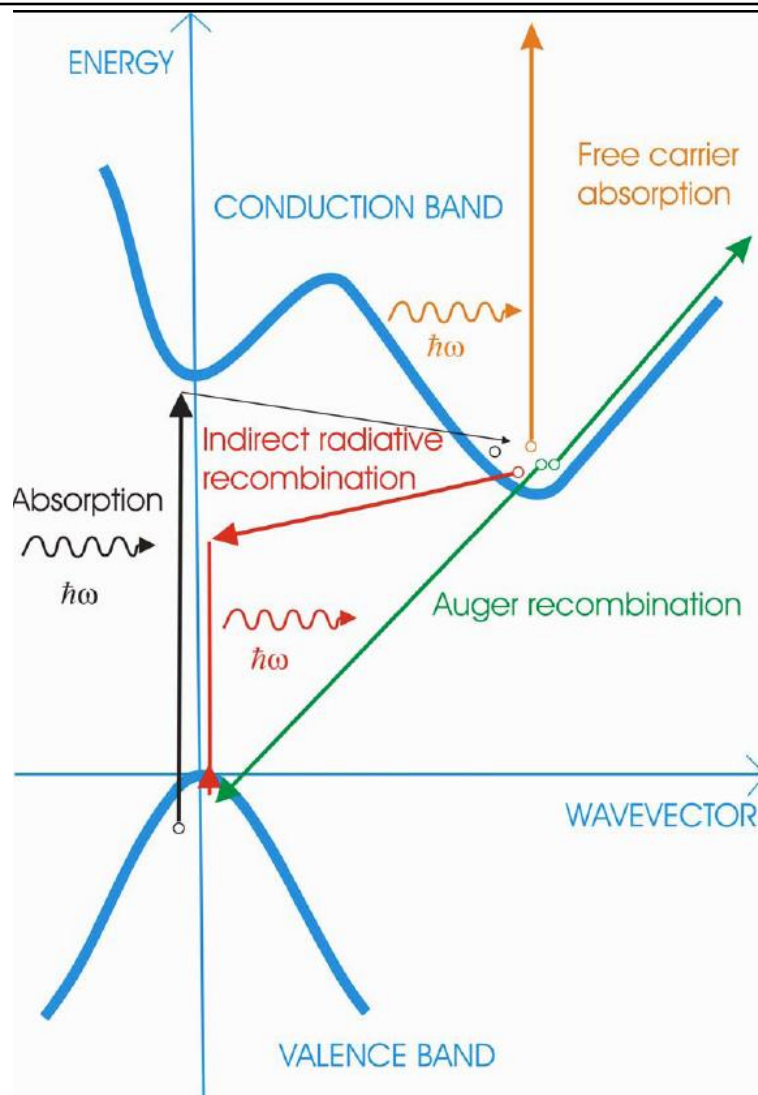


Энергия связи
экситонов



Энергия основного
состояния примесей

Поглощение и излучение в непрямозонных полупроводниках



Переход Мотта для экситонов

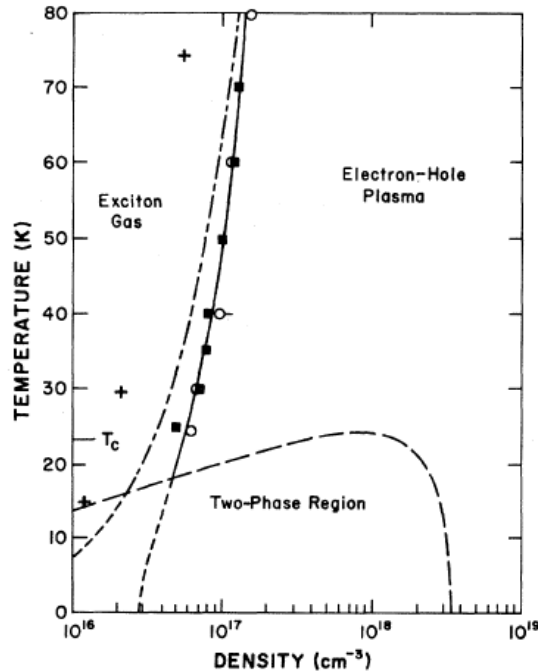


FIG. 2. Mott transition in unstressed silicon. The Debye-Hückel Mott criterion is given by the doubly dashed line. The results of Ref. 15 are shown as crosses. The results of the present work are shown as the solid line. These may be compared to the experimental results of Ref. 4 (solid squares) and Ref. 5 (open circles).

$$E_{ex} \approx E_0 \left(1 - \frac{r_B}{r_S}\right)^2$$

$$E_{ex} \approx E_0 - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_B} \approx E_0 - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S} \approx E_0 - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S} \approx E_0 - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S}$$

$$r_B \approx r_C - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S} \approx r_C - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S} \approx r_C - \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S}$$

$$r_S = \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S} \approx \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S} \approx \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{1}{r_S}$$

$$r_S = \left[\left(\frac{4\pi e^2}{\epsilon k T} \right) + (n + p) \right]^{1/2}$$

The effect of excitons on apparent band gap narrowing and transport in semiconductors

D. E. Kane
67 Fortuna Avenue, San Francisco, California 94115

R. M. Swanson
SunPower Corporation, 435 Indio Way, Sunnyvale, California 94086

Отношение концентрации ЭКСИТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ (n_{ex}/n) в Si

$n+p \Leftrightarrow \text{exciton}$
 $np = n^* n_{ex}$

$$n^* = \frac{\sqrt{N_C N_V}}{f} \exp \left\{ -\frac{E_{EX}}{kT} \right\}$$

$$f = \sqrt{g_{EX}} \left[\left(1 + \frac{m_e}{m_h} \right) / \sqrt{\frac{m_e}{m_h}} \right]^{3/2}$$

		T = 300K			T=77 K		
r_S / r_B	E_{ex} / E_0	n (10^{16}cm^{-3})	n^* (10^{16}cm^{-3})	$\frac{n_{ex}}{n}$	n (10^{16}cm^{-3})	n^* (10^{16}cm^{-3})	$\frac{n_{ex}}{n}$
10.0	0.810	0.52	89.6	0.0058	0.151	2.98	0.0503
4.0	0.563	3.23	103	0.0314	0.941	5.25	0.179
2.0	0.250	12.9	124	0.104	3.76	10.6	0.355
1.5	0.111	23.0	134	0.172	6.69	14.5	0.461
1.2	0.028	35.9	141	0.255	10.5	17.5	0.600
1.0	0	51.6	143	0.361	15.1	18.6	0.809

Дискретные и континуальные состояния экситонов

«Танго»

«Дискотека»

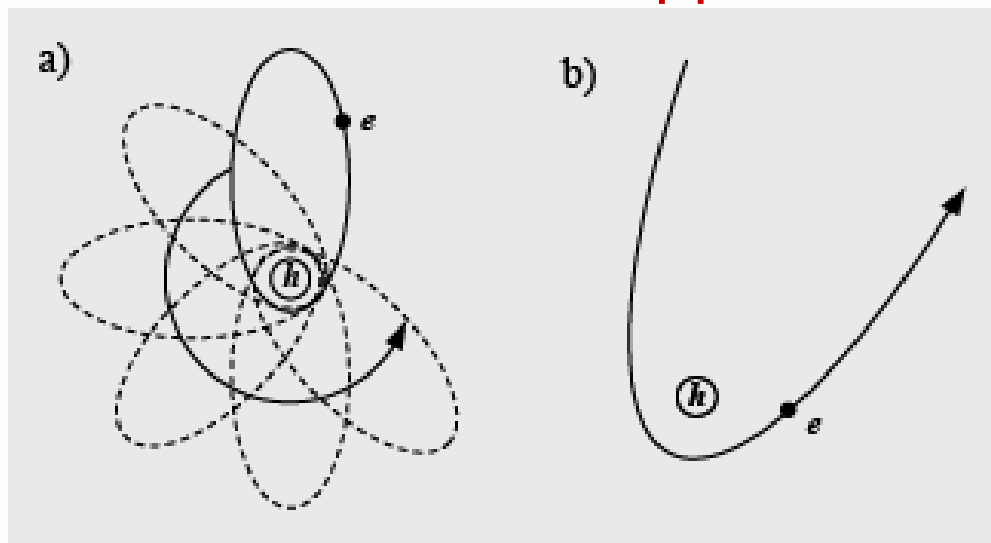


Fig. 1 Illustration of the discrete (a) and the continuum (b) excitonic states in the real space in analogy to the classical mechanics. Gray periodic background in the figure imitates lattice of the crystal.

$$a_0^{ex} = a_B^H \frac{m_0}{\mu} \varepsilon_r = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \hbar^2}{\mu e^2}; \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}, \quad (1)$$

$$50 \text{ nm} \geq a_0^{ex} \geq 1 \text{ nm} > a_{lattice}.$$

VOLUME 91, NUMBER 24

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 DECEMBER 2003

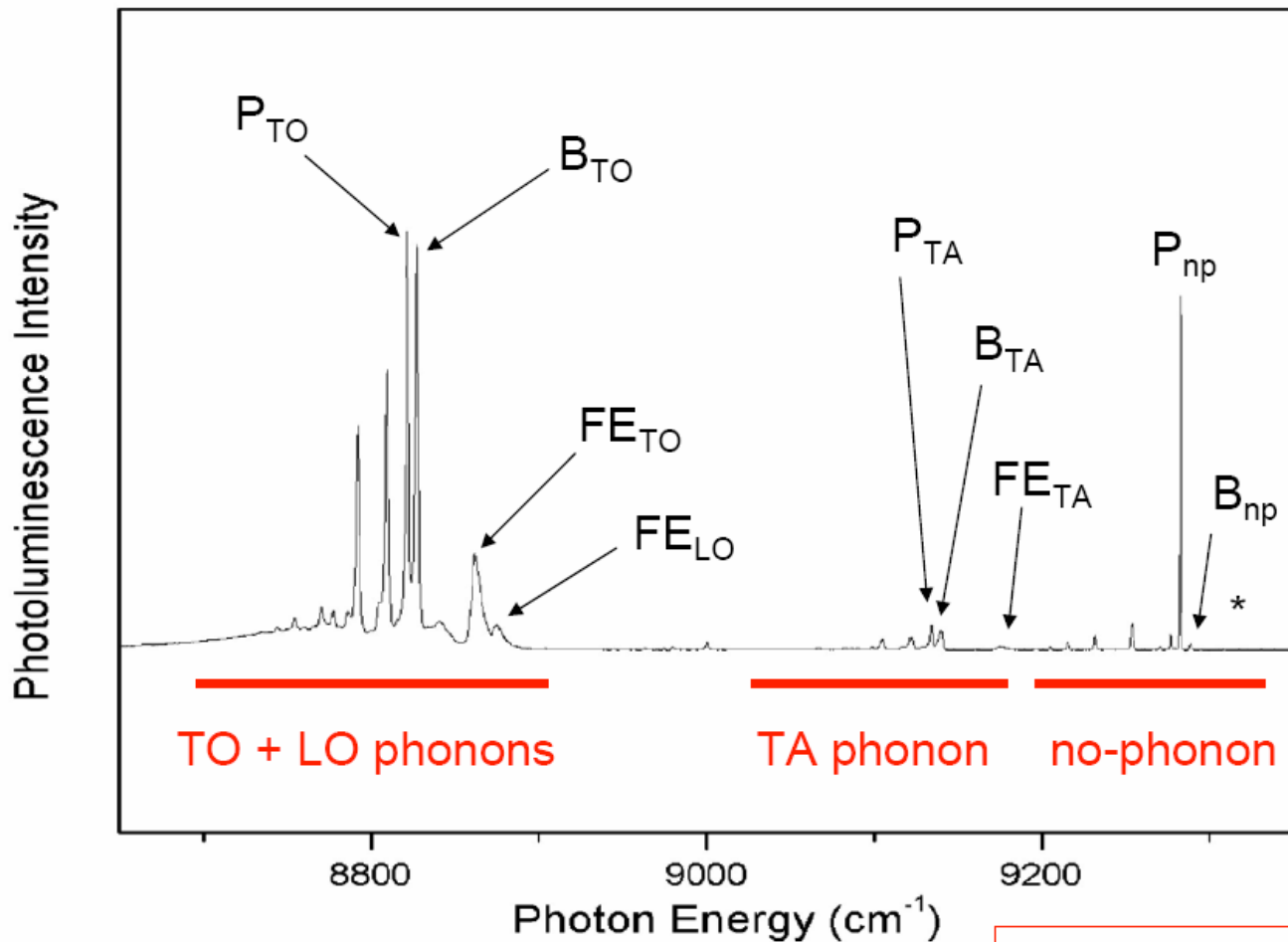
Excitonic Absorption above the Mott Transition in Si

P. Grivickas,¹ V. Grivickas,² and J. Linnros¹

¹Department of Microelectronics and Information Technology, Royal Institute of Technology, Electrum 229, SE-164 40 Stockholm, Sweden

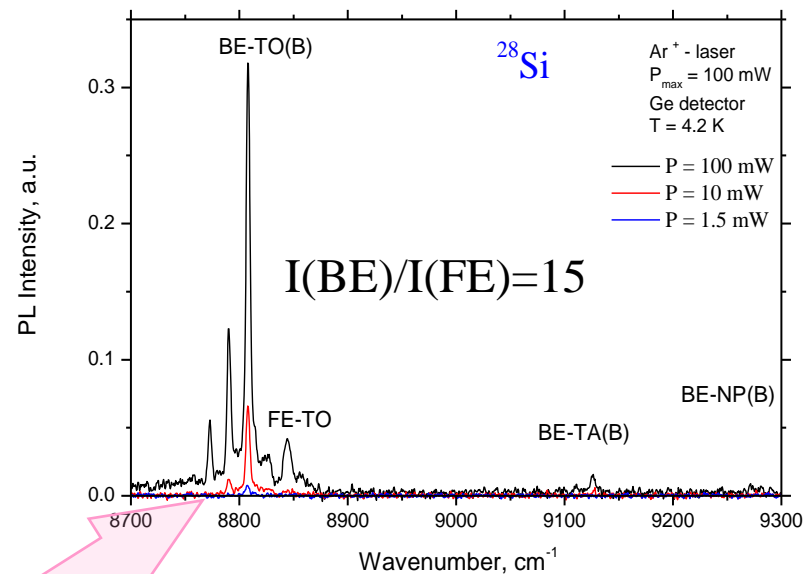
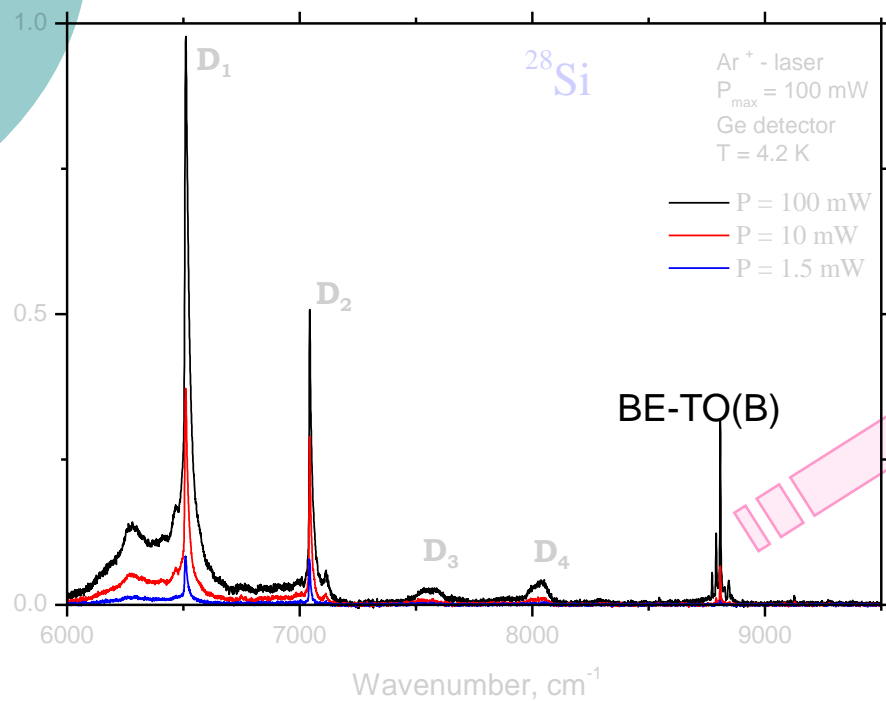
²Institute of Materials Science and Applied Research, Vilnius University, Sauletekio 10, LT-2040 Vilnius, Lithuania
(Received 14 April 2003; published 9 December 2003)

Спектр ФЛ монокристаллического кремния



$1 \text{ cm}^{-1} \sim 0.12 \text{ meV}$

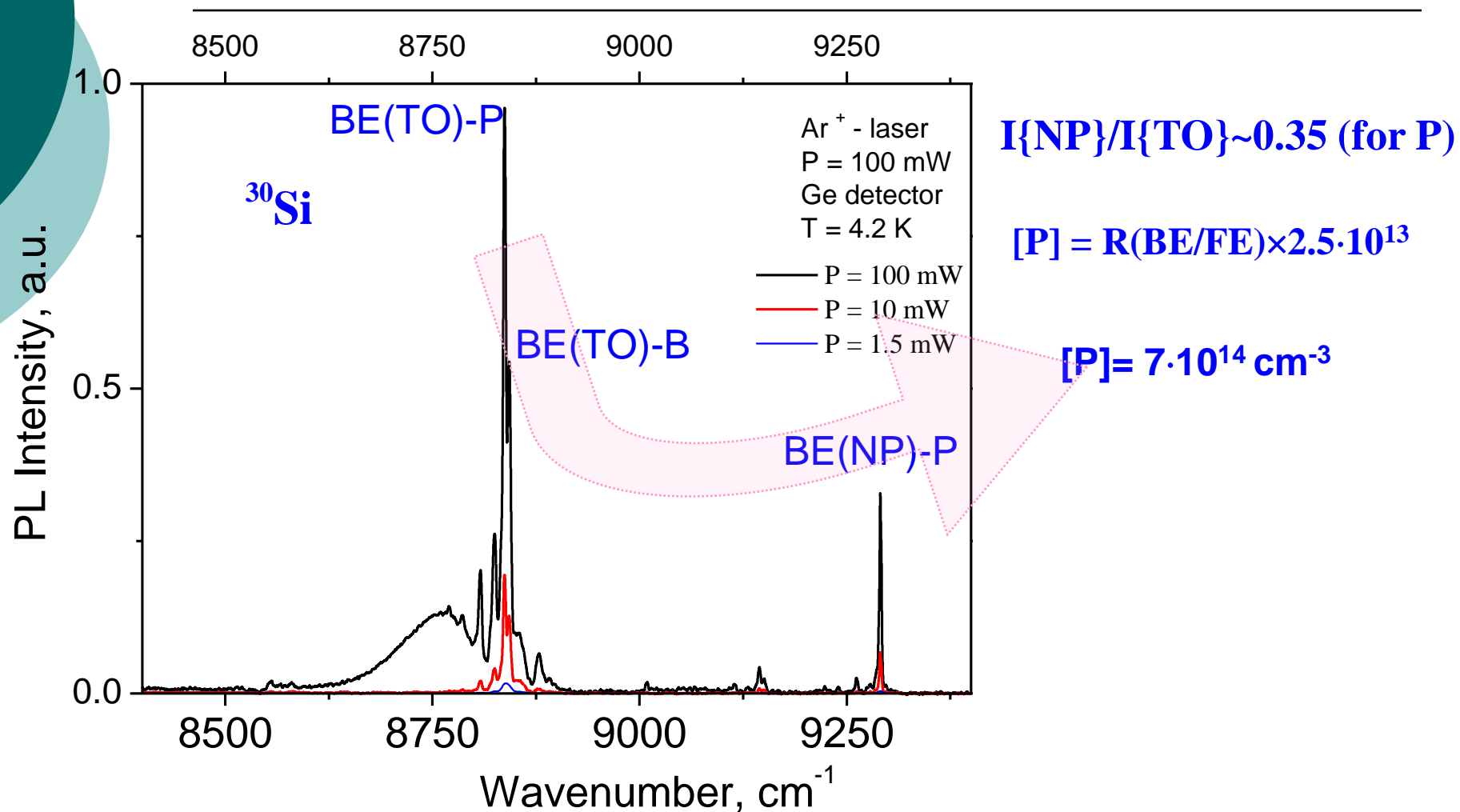
Определение концентрации примеси В в Si методом люминесцентной спектроскопии



$$R = I(BETO)/I(FETO) = R_0 \cdot (N^0)^q$$

$$[B] = R \cdot 10^{13} = 1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

Определение концентрации Р в MONO-Si



Градуировочные зависимости для определения P и B в $NATSI$

M. Tajima, APL, V. 32 (1978)

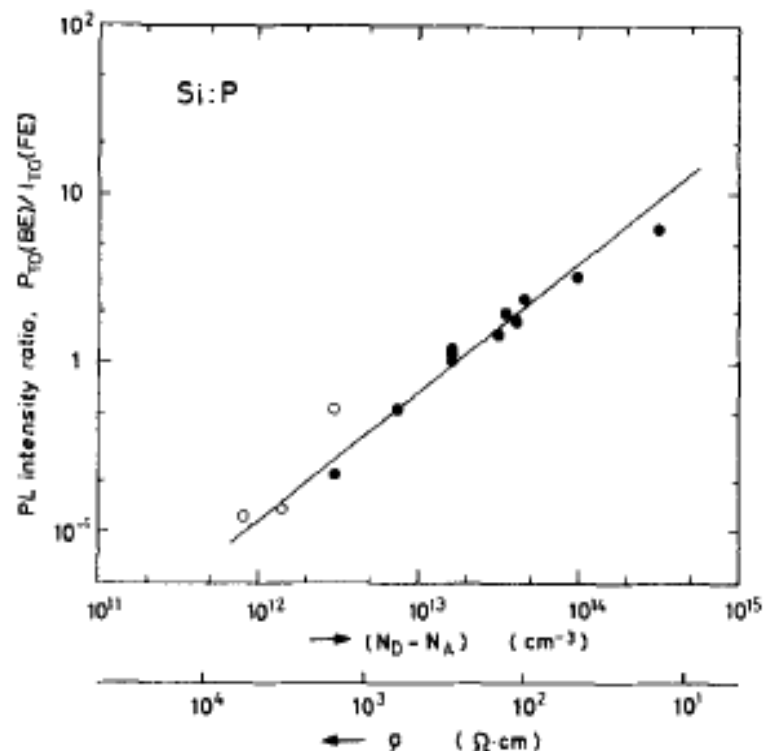


FIG. 2. Calibration curve for the PL method for P-doped Si. The PL intensity ratio between P and intrinsic components, $P_{TO}(BE)/I_{TO}(FE)$ is plotted against ρ , or $N_D - N_A$. \bullet , weakly compensated specimen; \circ , highly compensated specimen.

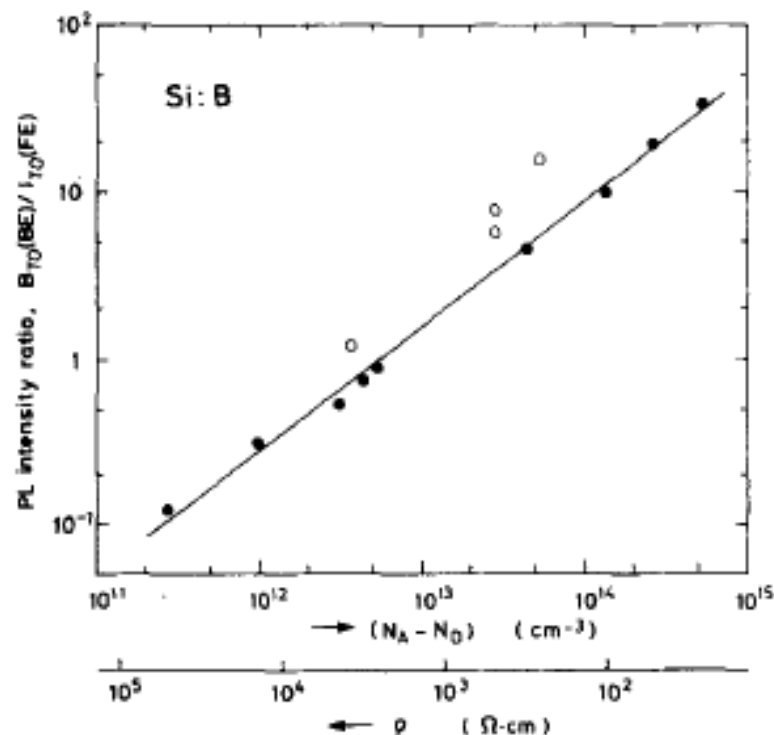
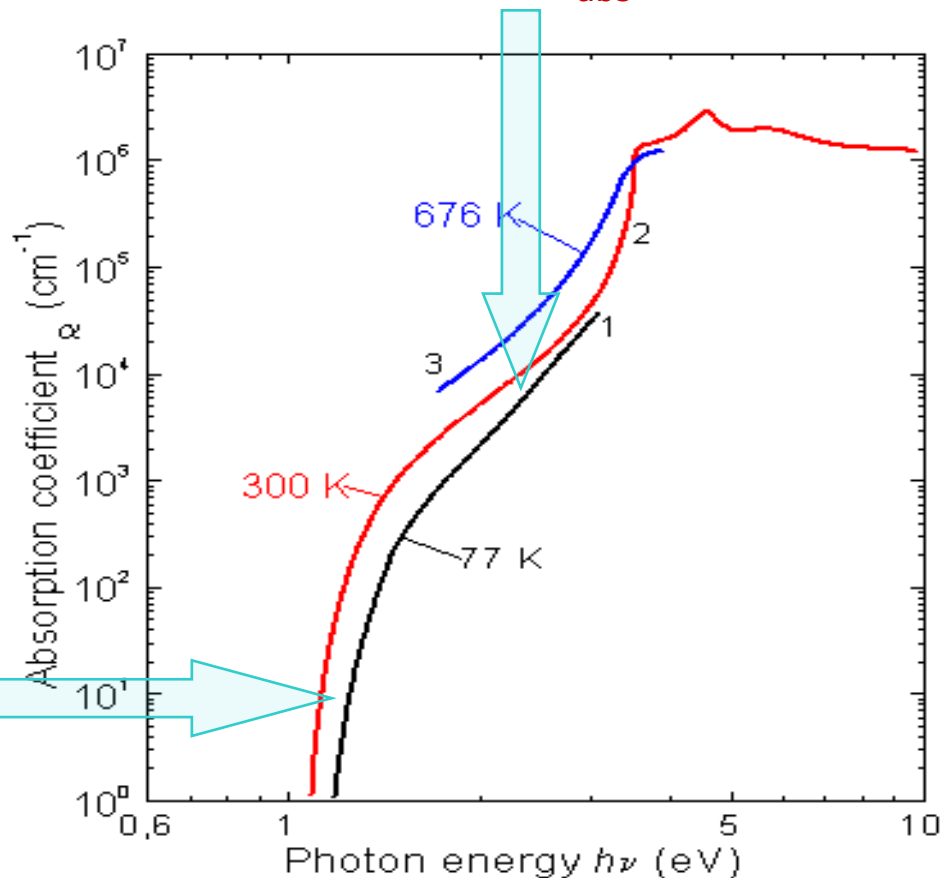


FIG. 3. Calibration curve for the PL method for B-doped Si. The PL intensity ratio of $B_{TO}(BE)/I_{TO}(FE)$ is plotted against ρ , or $N_A - N_D$. \bullet , weakly compensated specimen; \circ , highly compensated specimen.

Поглощение в кремнии

$\alpha \sim 10^4 \text{ см}^{-1}$ для излучения с
 $\lambda = 532 \text{ нм}$ $L_{\text{abs}} = 10^{-4} \text{ см}$

$\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$ для
 излучения с
 $\lambda = 1047 \text{ нм}$
 $L_{\text{abs}} = 0.1 \text{ см}$



$$\alpha \propto (h\nu - E_g \pm E_p)^2$$

Снижение предела обнаружения примесей в Si при возбуждении ФЛ излучением PL лазером Nd:YLF на длине волны 1047 nm

J. Appl. Phys., Vol. 92, No. 10, 15 November 2002

Broussell, Stotz, and Thewalt 5915

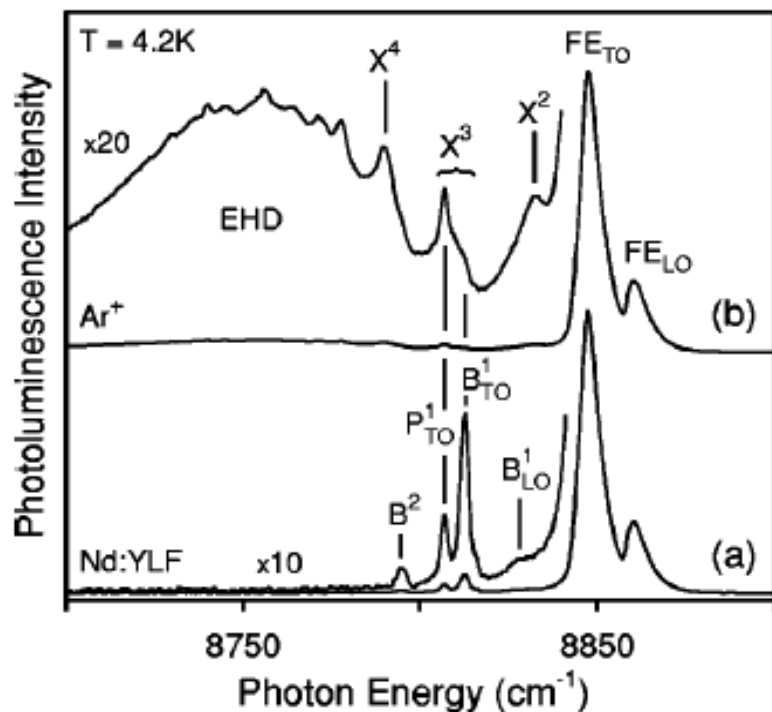


FIG. 1. The luminescence spectra of a sample containing $8.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ boron and $1.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ phosphorus are compared under (a) low excitation conditions using the Nd:YLF laser for excitation and (b) high excitation conditions using the Ar^+ laser, normalized to equal FE_{TO} intensity. The weak luminescence lying at energies below the FE_{TO} transition has been magnified by factors of 10 and 20, respectively, in order to reveal the details of the spectra.

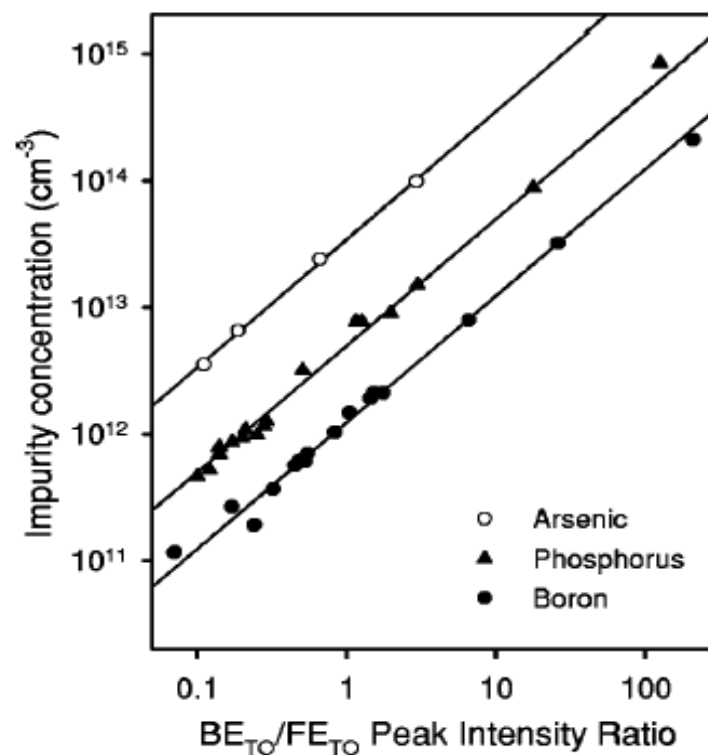


FIG. 3. The calibration data for boron, phosphorus, and arsenic based on the $\text{BE}_{\text{TO}}/\text{FE}_{\text{TO}}$ peak heights in the TO-phonon region under low excitation density conditions. The solid lines are linear fits to the data and concentrations of $3.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (As), $5.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (P), and $1.25 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (B) occur at $\text{BE}_{\text{TO}}/\text{FE}_{\text{TO}} = 1$.