

# **Инфракрасная спектроскопия примесей в полупроводниках**

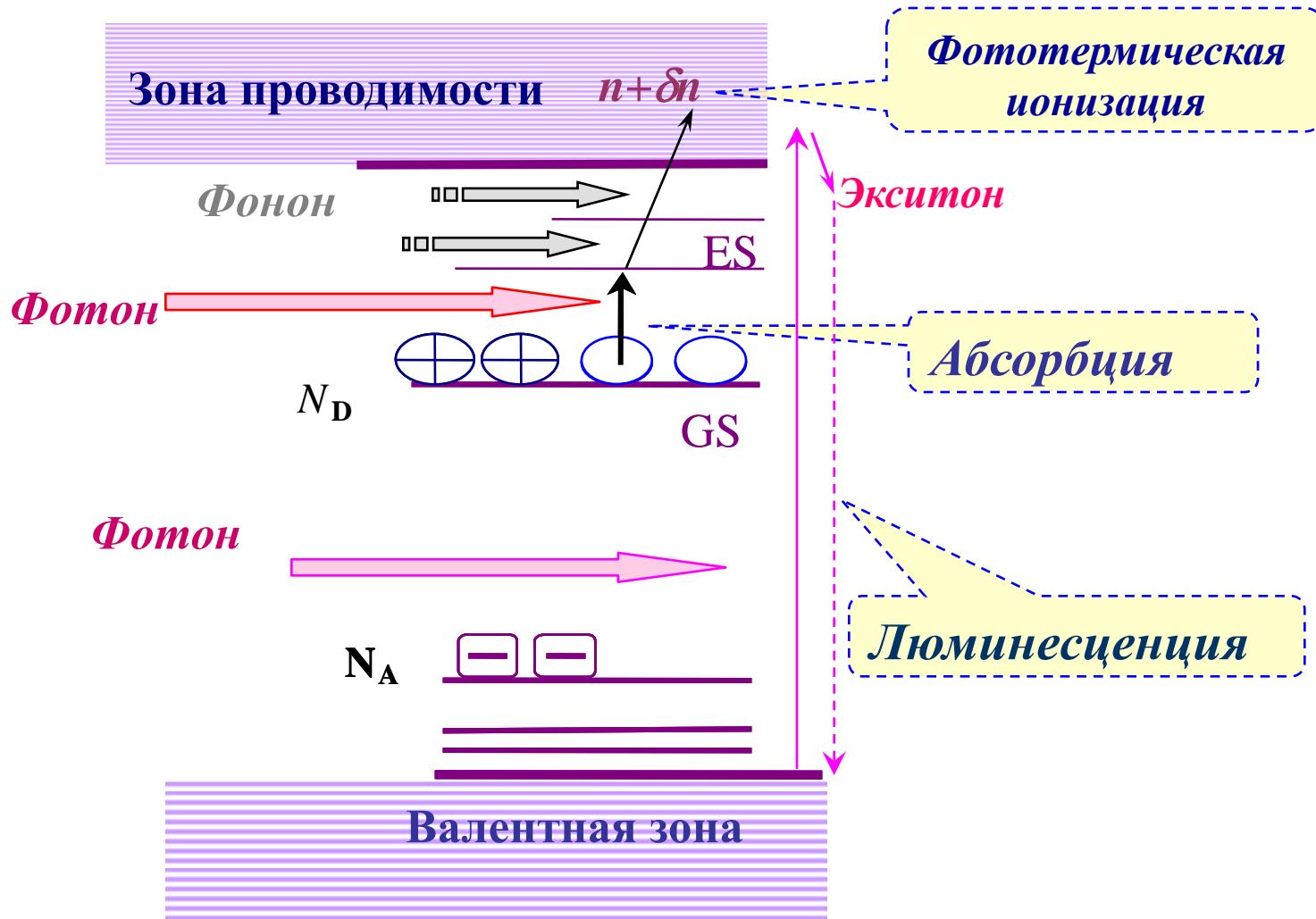
## **Часть 2**



**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**

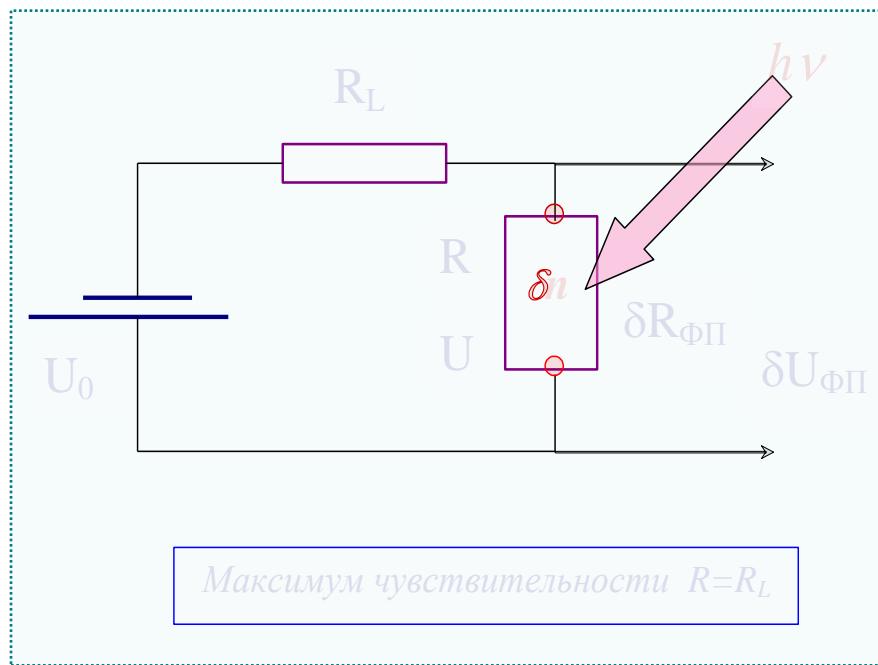
- Определение электроактивных примесей
- Определение ширины запрещенной зоны
- Примесные фотоприемники

## **Спектроскопия комбинационного рассеяния**

- Спектроскопия LVM
- Оценка размера нанокристаллов и доли аморфной фазы

# **Спектроскопия фотопроводимости**

# Фотосопротивление



$$\delta U_{\Phi P} = \frac{U}{1+R/R_L} \frac{1}{1+(\Omega\tau)^2} \frac{\delta n}{n}$$

$\Omega$  - частота модуляции ;

$\tau$  - время жизни,

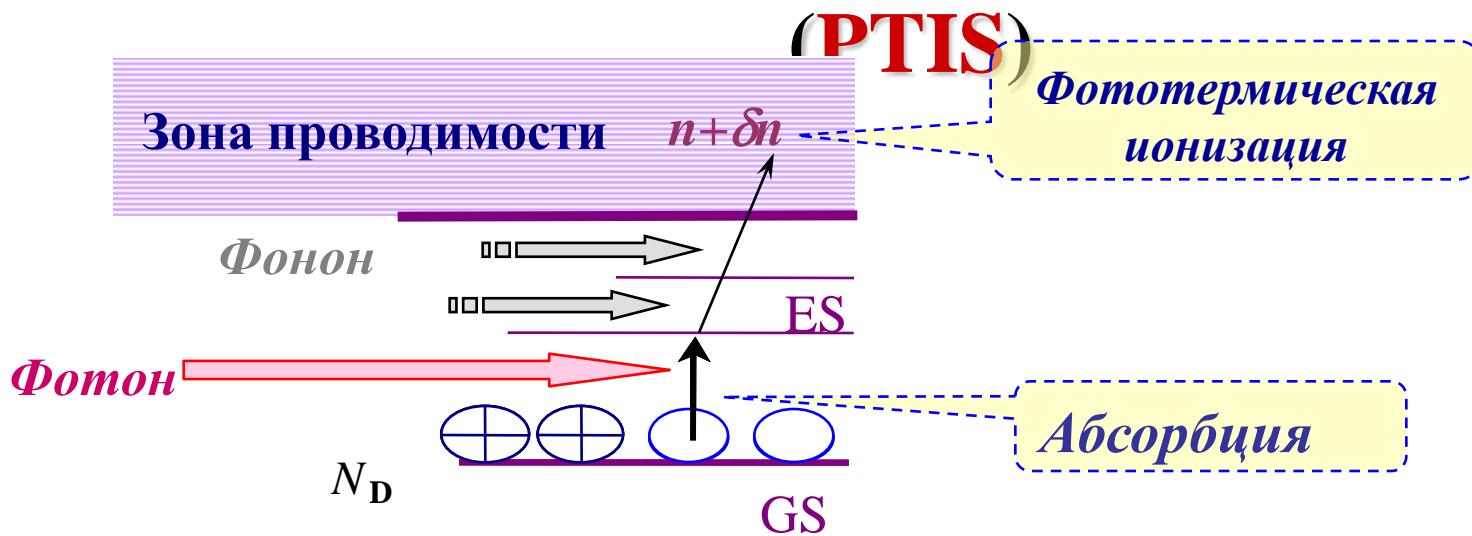
$n$  – концентрация  
равновесных носителей

$$\delta n \text{ и } n \propto N_A - N_D \quad \rightarrow \quad \delta U_{\text{ph}} \propto \delta n/n \neq f(N_A - N_D) !!!$$

Сигнал фотопроводимости не зависит от концентрации примесей.

# Фототермоионизационная спектроскопия (ФТИС)

## Photo Thermal Ionisation Spectroscopy



Лифшиц Т.М., Надь Ф.Я. ДАН  
СССР. 1965.



$$\begin{aligned}\sigma(PTI) / \sigma(E_{ion}) &= \\ &= I f (E_{ion}/\Gamma) \\ \sigma(E_{ion}) - &\text{ сечение фотоионизации} \\ I - &\text{вероятность термоионизации} \\ E_{ion} - &\text{энергия ионизации,} \\ \Gamma - &\text{ширина линии,} \\ f - &\text{сила осциллятора}\end{aligned}$$

# Чувствительность ФТИС

Для сигнала, ограниченного генерационно-рекомбинационными  
флуктуациями

$$N_{min} = n_1 (2A/J \cdot \sigma \cdot I) \cdot [\alpha \cdot \Delta f / V(1-k)]^{1/2}$$

$$N_{min} \sim 10^6 \text{ cm}^{-3} !!!$$

$\beta$  - коэф. ионизации примеси теплом и фоном

$\alpha$  -коэф. захвата носителя на примесь

$\cdot \sigma, I$ - сечение поглощения и вероятность термической ионизации

$A, V$  – облучаемая площадь образца и его объем

$J$  – поток фотонов

$k$  – степень компенсации

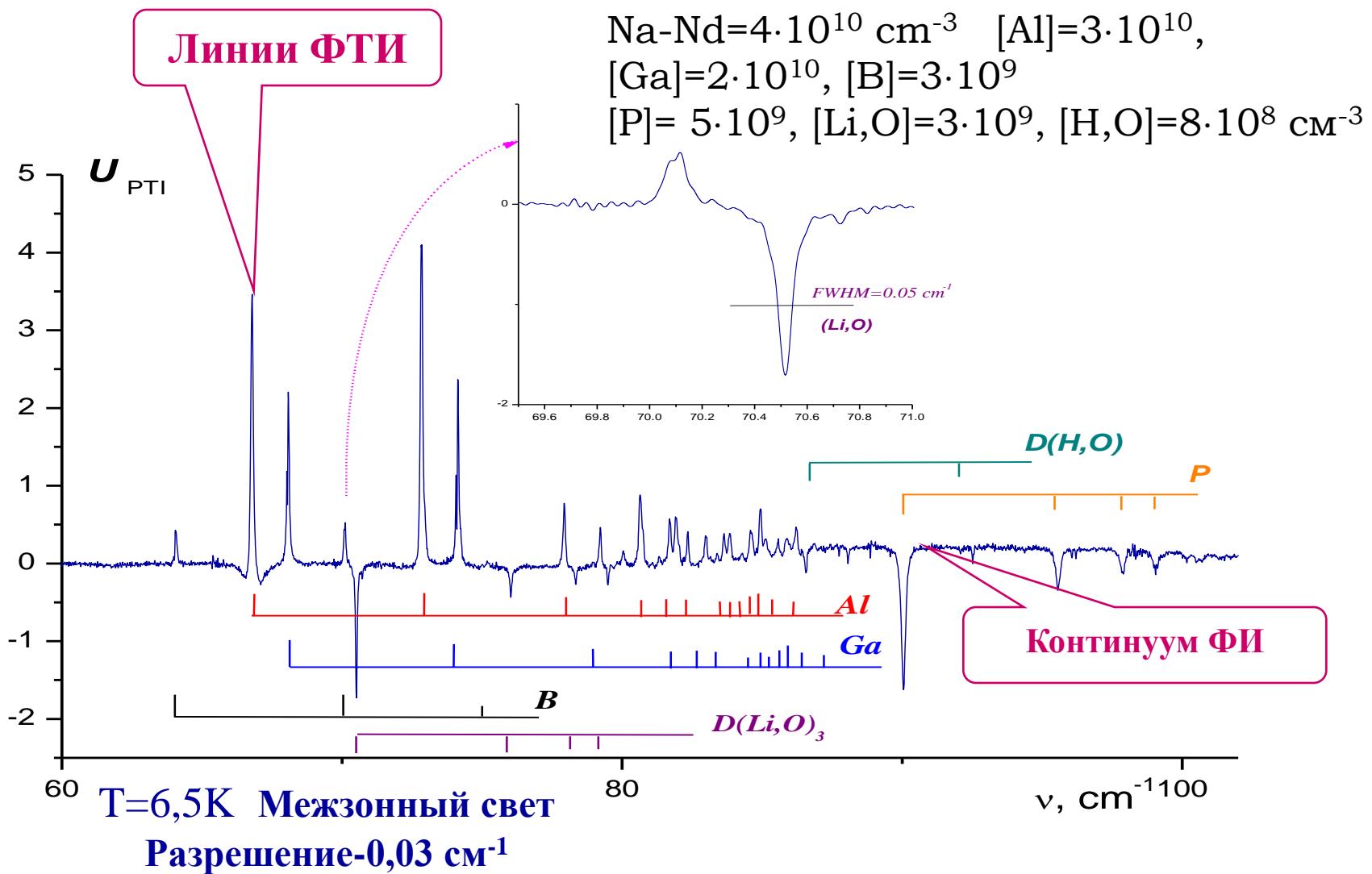
$\Delta f$  – полоса усилителя

$n_1 = \beta/\alpha$  ( $\approx 10^8 \text{ см}^{-3}$  для Ge с мелкими примесями)

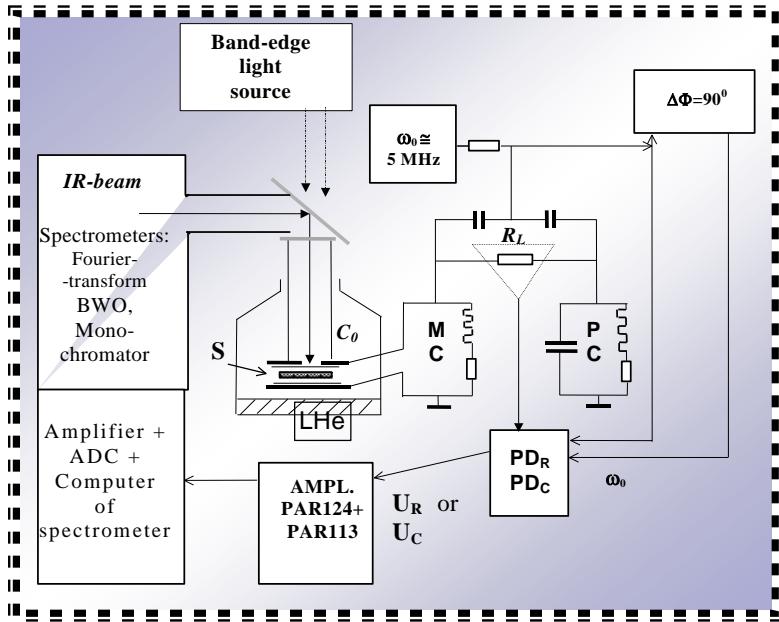
$\alpha n N^+ = \beta N^0$   $N, N^+$  и  $N^0$  – концентрация основной примеси, ионизированной и нейтральной (основной примеси),  $n$  – концентрация свободных носителей

Ш.М. Коган, Т.М. Лифшиц, Известия АН СССР. Т.42(6) 1978

# Спектр ФТИ примесей в p-Ge



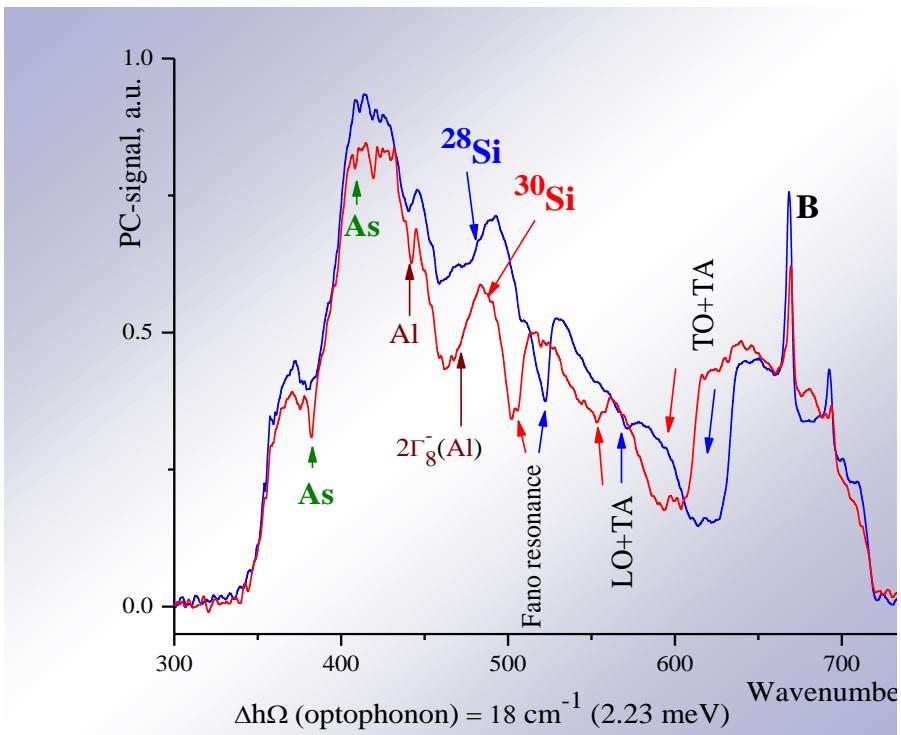
# ФТИС без контактов



**S**-sample; **MC**, **PC**-measuring and phase-shifting circuits;

$PD_{R,C}$ - two phase detectors for registration of the resistive and reactive components of the complex admittance of capacitor  $C_0$  with a sample.

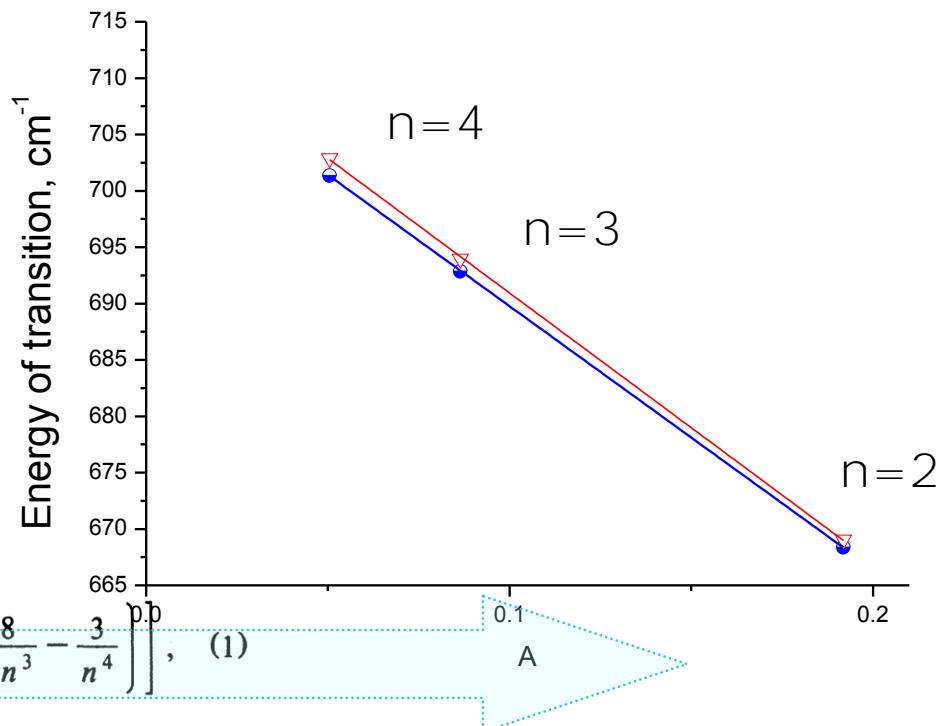
Photoconductivity Spectra  
of  $^{28}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$



# Изотопический сдвиг энергии переходов в резонансные состояния Si

PC, а.и.

Wavenumber, cm<sup>-1</sup>



$$h\nu = E_I^* - \left( \frac{m_{SO}^*}{m_0} \right) \left( \frac{R_H}{\epsilon^2} \right) \left[ \frac{1}{n^2} - \lambda \left( \frac{8}{3n^3} - \frac{3}{n^4} \right) \right], \quad (1)$$

where

$$\lambda = \left( \frac{2(B^2 + C^2/5)}{A^2} \right) \left( \frac{m_{SO}^*}{m_0} \right) \left( \frac{R_H}{\epsilon^2 \Delta_0} \right) = 0.396,$$

and  $R_H = 13.6$  eV is the ionization energy of hydrogen atom.  $m_{SO}^*/m_0$  and  $\epsilon$  are the hole effective mass of the split-off band and the dielectric constant, while  $A$ ,  $B$ , and  $C$  are the valence-band parameters and  $\Delta_0$  is the spin-orbit splitting of the valence bands of silicon, respectively. The

# Изотопический эффект для резонансных состояний в monoSi

	Энергия перехода из основного состояния, см <sup>-1</sup> (энергия связи, meV)			
Изотопный состав.	GS( $1\Gamma_8^+$ ) $\rightarrow$ 2P'	GS( $1\Gamma_8^+$ ) $\rightarrow$ 3P'	GS( $1\Gamma_8^+$ ) $\rightarrow$ 4P	GS( $1\Gamma_8^+$ ) $\rightarrow$ Отщепле- нная валентная зона $\Gamma_7^+$
$^{28}\text{Si}$	$668.37 \pm 0.03$ (5.532)	$692.84 \pm 0.03$ (2.498)	$701.34 \pm 0.07$ (1.444)	$712.988(52)$ (88.390(6)) 712.9 [11]
$^{30}\text{Si}$	$669.03 \pm 0.05$ 5.656 meV	$693.97 \pm 0.09$ 2.564 meV	$702.89 \pm 0.16$ 1.458 meV	$714.65(13)$ 88.605(16) meV
Энергия $^{30}\text{Si}$ - энергия $^{28}\text{Si}$	0.66	1.13	1.55	1.662 (0.206)

# Оценки изотопического сдвига в приближении эффективной массы

$$E_B = Ry \cdot m^*/\epsilon_0^2,$$

$-0.27 \text{ cm}^{-1}$  for B

$-0.038 \text{ cm}^{-1}$  for P

$$\Delta\epsilon_0 = AM^{-1/2}[1 + 2n_B(\langle\omega\rangle/T)],$$

$$\delta E_B = -0.43 \text{ cm}^{-1} \text{ for both B and P},$$

PHYSICAL REVIEW B 68, 121201(R) (2003)

## Dependence of the ionization energy of shallow donors and acceptors in silicon on the host isotopic mass

D. Karauskaj, T. A. Meyer, and M. L. W. Thewalt

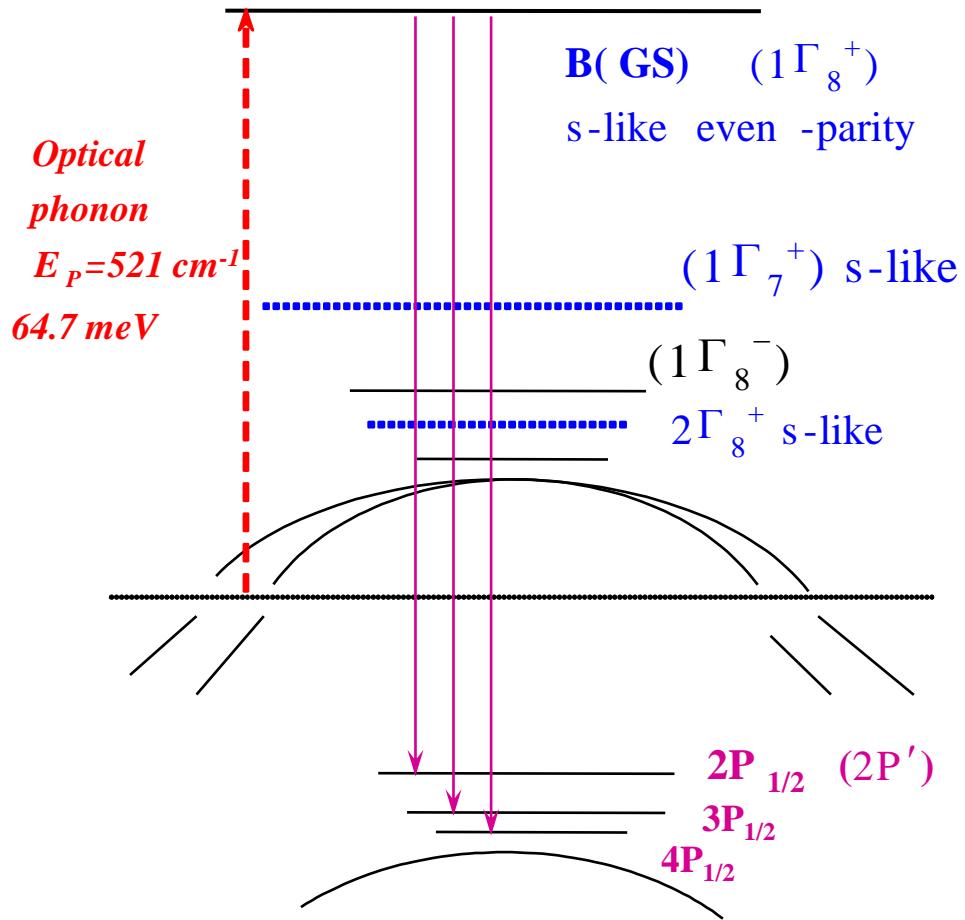
*Department of Physics, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada V5A 1S6*

M. Cardona

*Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, D-70569 Stuttgart, Germany*

(Received 23 May 2003; published 16 September 2003)

# Спектр акцепторных состояний в Si



$$E_B(\text{GS}^{30}\text{Si}) - E_B(\text{GS}^{28}\text{Si}) = 0.73 \text{ cm}^{-1} \text{ (B)}$$

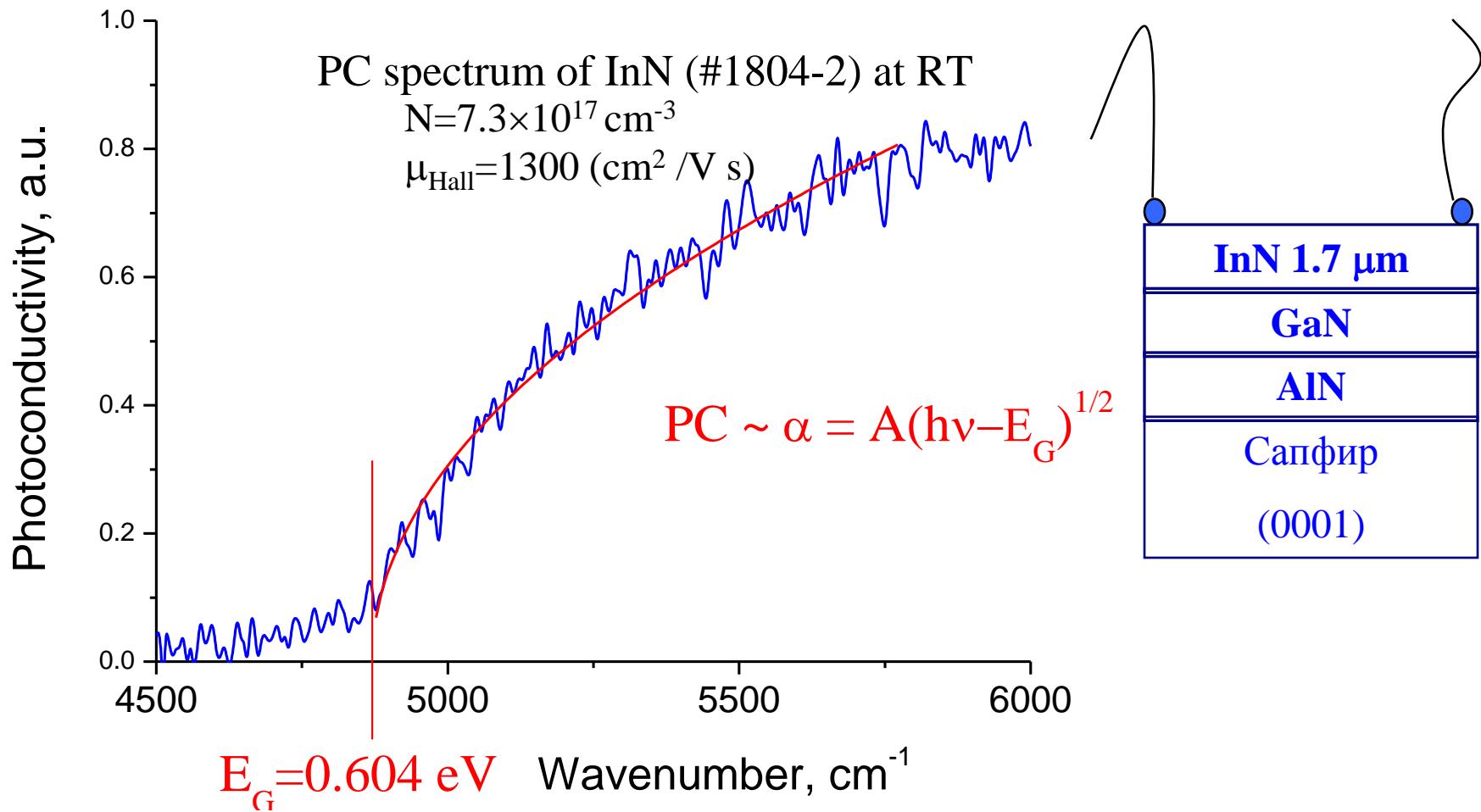
D.Karaiskaj PRB 2003

Для спин-  
отщепленной подзоны

$$E_B(\text{GS}^{30}\text{Si}) - E_B(\text{GS}^{28}\text{Si}) = 1.662 \text{ cm}^{-1} \text{ (B)}$$

Изотопический  
эффект  
 $0.932 \text{ cm}^{-1} = 0.116 \text{ meV}$

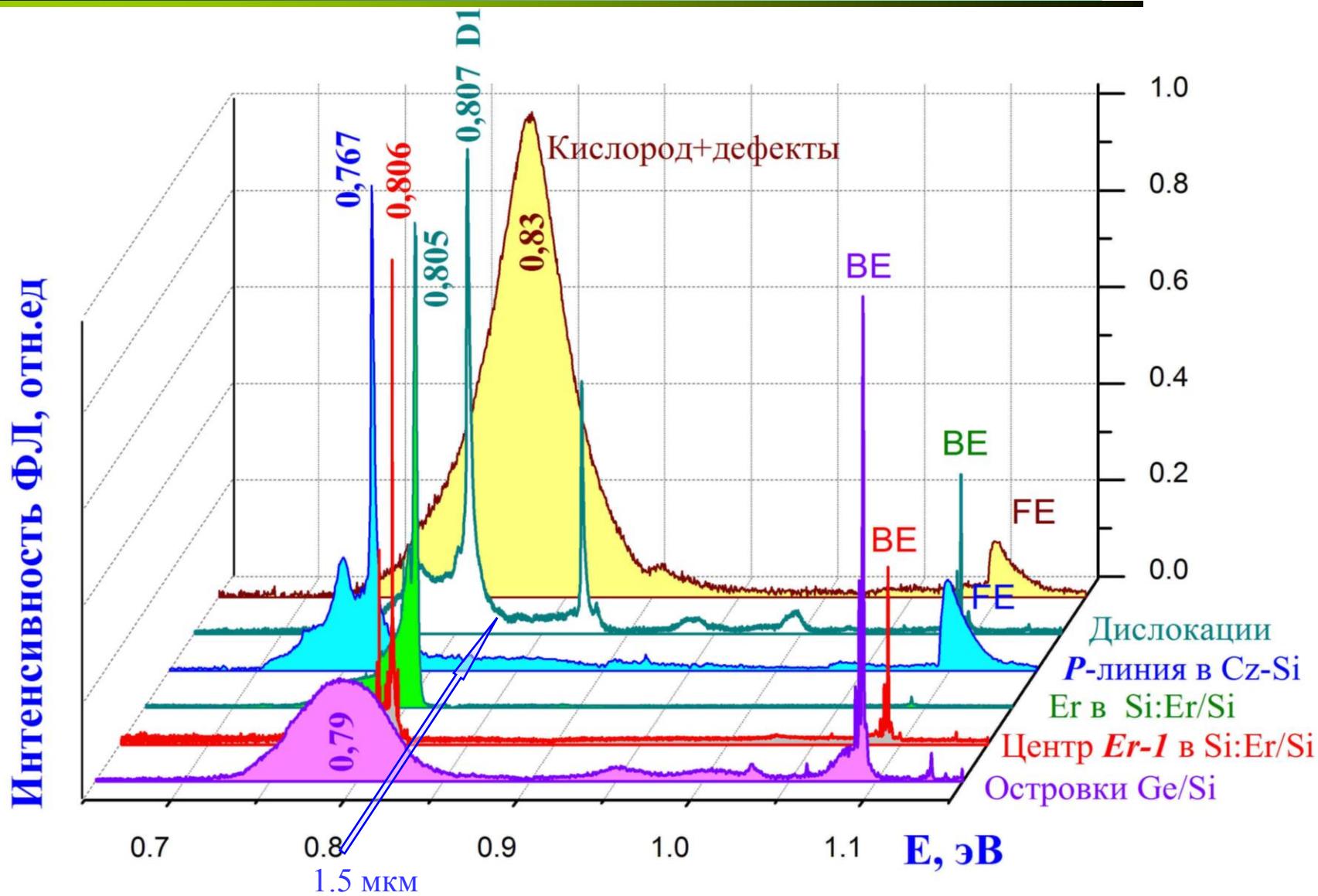
# Спектр фотопроводимости InN



# **Люминесцентная спектроскопия**

Излучающие центры  
редкоземельных элементов в Si

# Излучающие центры в кремнии и кремниевых структурах



# Энергетические уровни ионов редкоземельных элементов

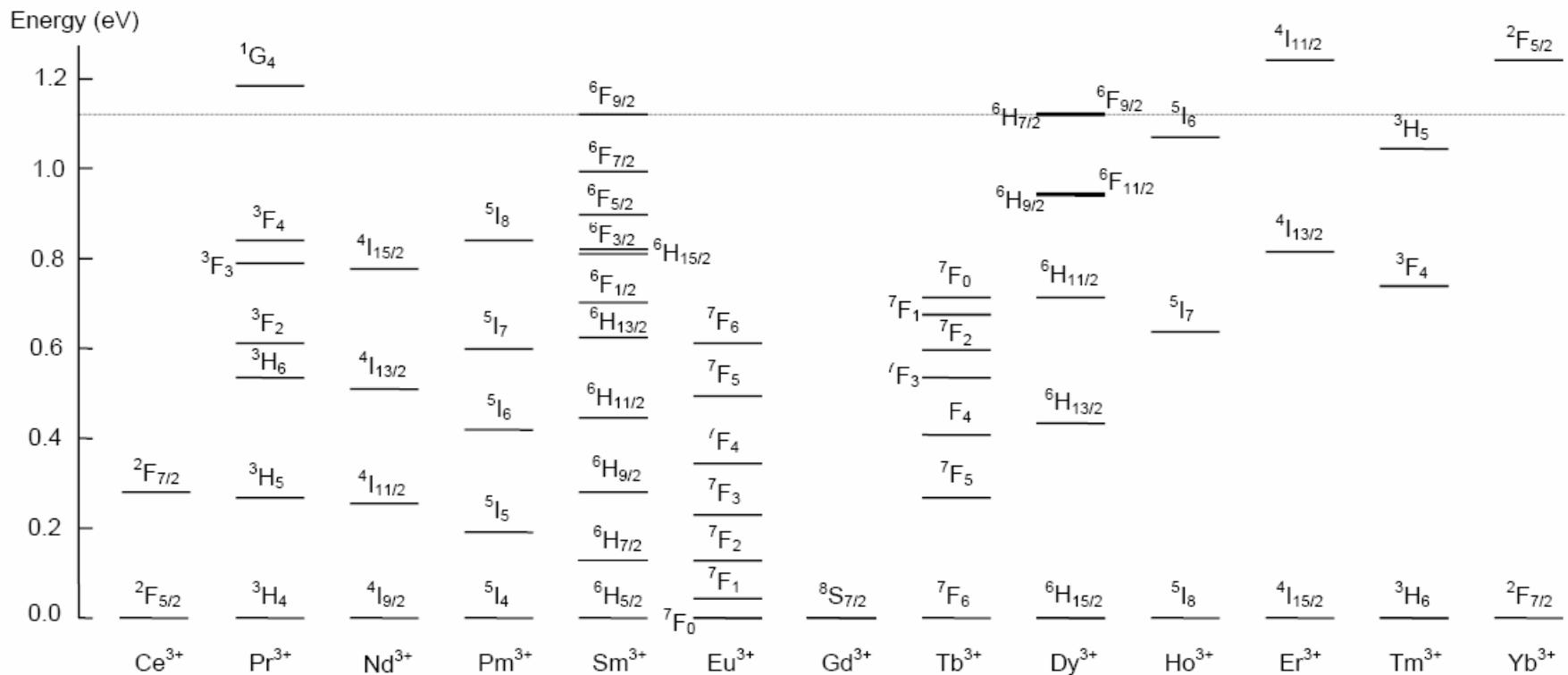
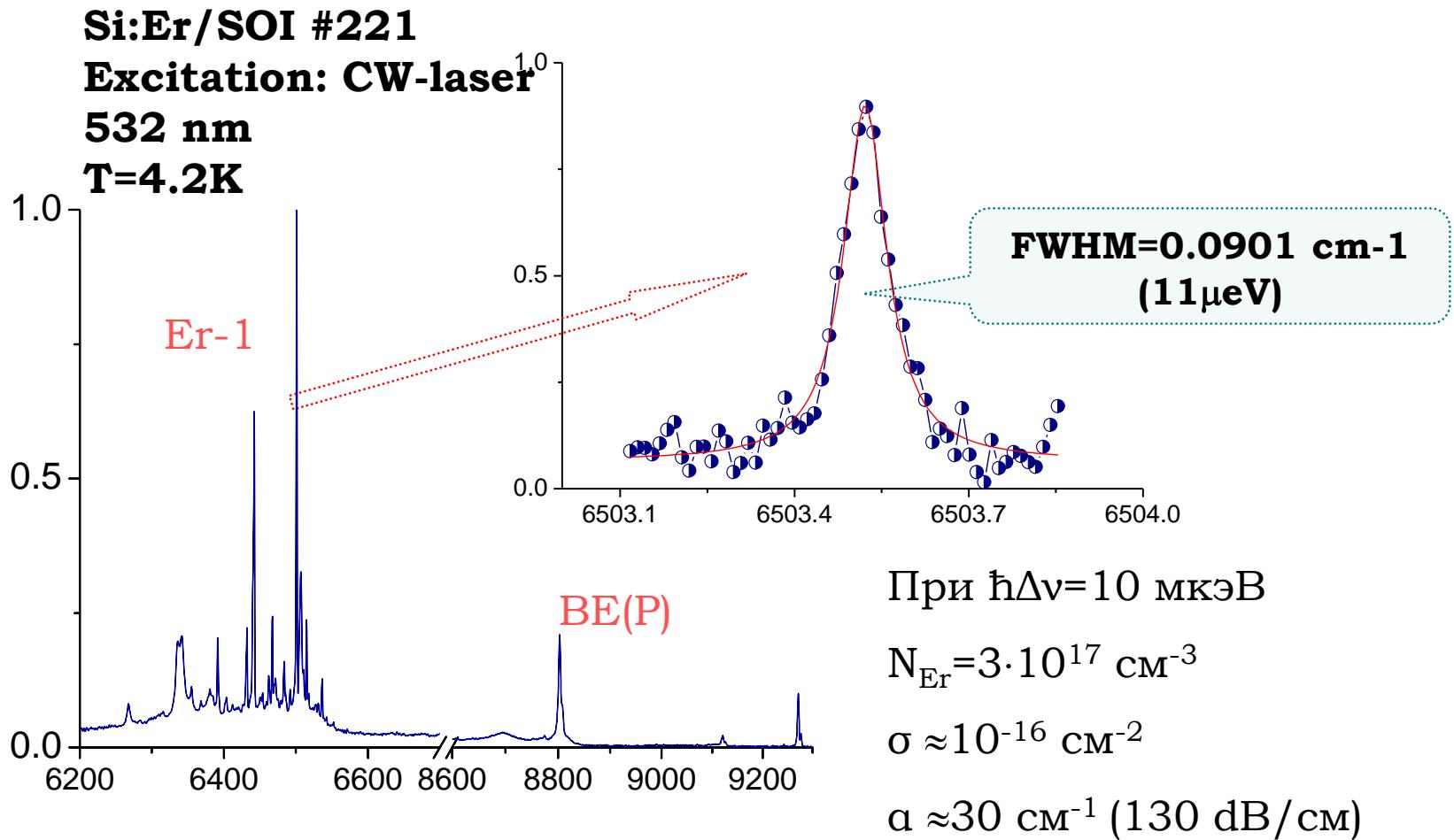


Figure 1 Schematic of energy levels of luminescent rare earth ions. Only those levels are indicated that are less than 1.2 eV from the ground state. The Si bandgap at 300 K (1.12 eV) is indicated by the dashed line. (Adapted from S. Hünfer, *Optical Spectra of Transparent Rare Earth Compounds*, (Academic, New York, 1978))

# Спектр излучения центра Er-1 в структуре Si:Er/SOI

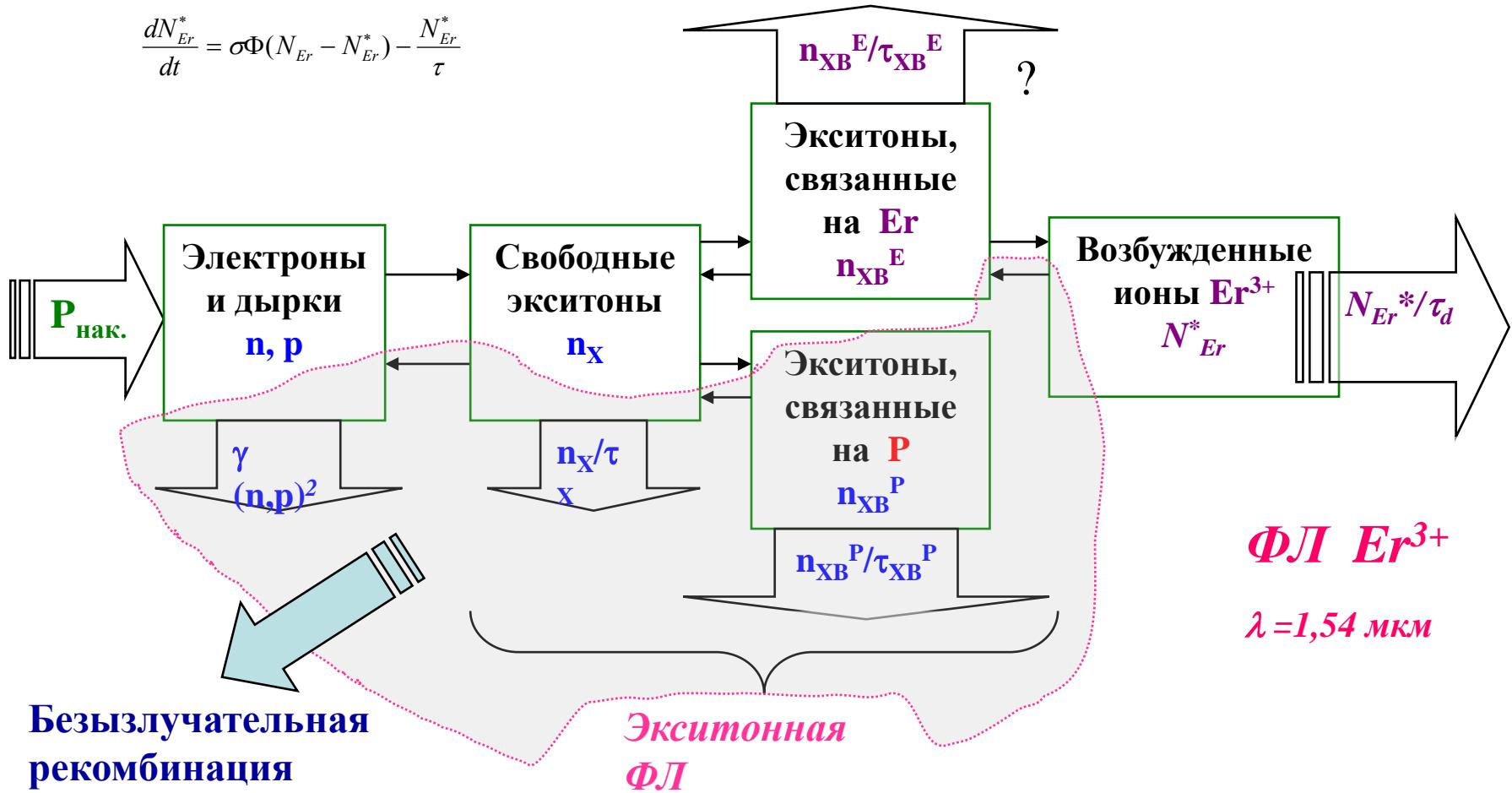


# Экситонный механизм возбуждения

**фотолюминесценции**  
 $\sigma_{\text{eff}} \sim 10^{-15} \text{ см}^2$  (в Si)       $\sigma_{\text{abs}} = 8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$  (в  $\text{SiO}_2$ )

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

$$\frac{dN_{Er}^*}{dt} = \sigma\Phi(N_{Er} - N_{Er}^*) - \frac{N_{Er}^*}{\tau}$$



# Отношение концентрации экзитонов и электронов ( $n_{ex}/n$ ) в Si

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

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

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

(D.Kane JAP 1973)

		T = 300K			T=77 K		
$r_S / r_B$	$E_{ex} / E_0$	$n$ ( $10^{16} \text{cm}^{-3}$ )	$n^*$ ( $10^{16} \text{cm}^{-3}$ )	$\frac{n_{ex}}{n}$	$n$ ( $10^{16} \text{cm}^{-3}$ )	$n^*$ ( $10^{16} \text{cm}^{-3}$ )	$\frac{n_{ex}}{n}$
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

# Конкурирующие каналы излучательной релаксации в Si

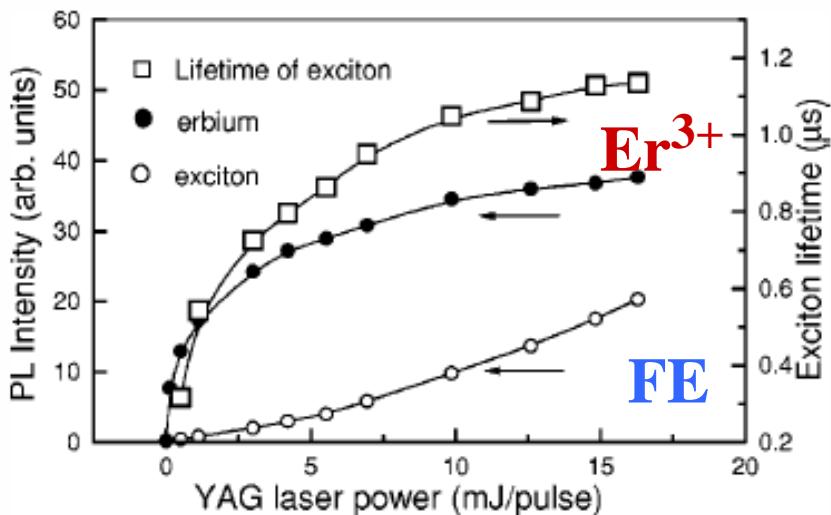


FIG. 4. Intensity of erbium and exciton photoluminescence and exciton lifetime as a function of power of pulsed Nd:YAG laser.

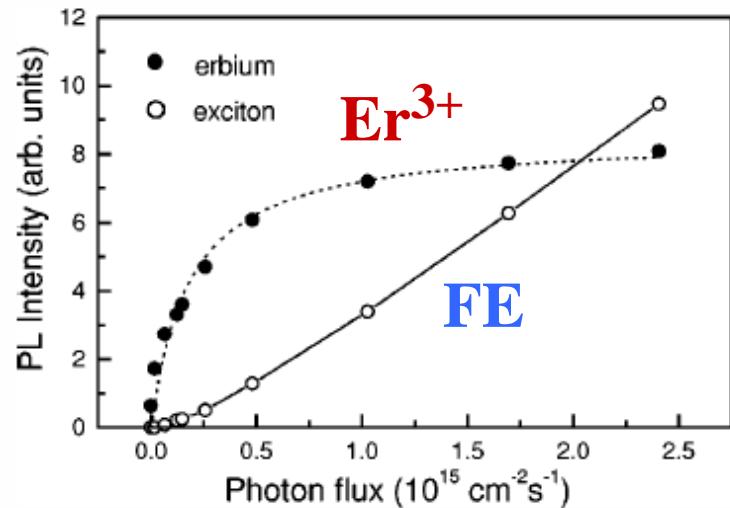


FIG. 3. Intensity of erbium and exciton photoluminescence as a function of pumping photon flux (Ar laser excitation). Dotted line is a fitting curve to Eq. (15) with  $\sigma_{\text{eff}}\tau = 5.4 \times 10^{-15} \text{ cm}^2 \text{ s}$ , solid line is a guide for eye.

PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 64, 075302

## Excitation cross section of erbium in semiconductor matrices under optical pumping

O. B. Gusev, M. S. Bresler, P. E. Pak, and I. N. Yassievich

*A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St.Petersburg, Russia*

M. Forcales, N. Q. Vinh, and T. Gregorkiewicz

# Температурная зависимость фотолюминесценции Ho в Si

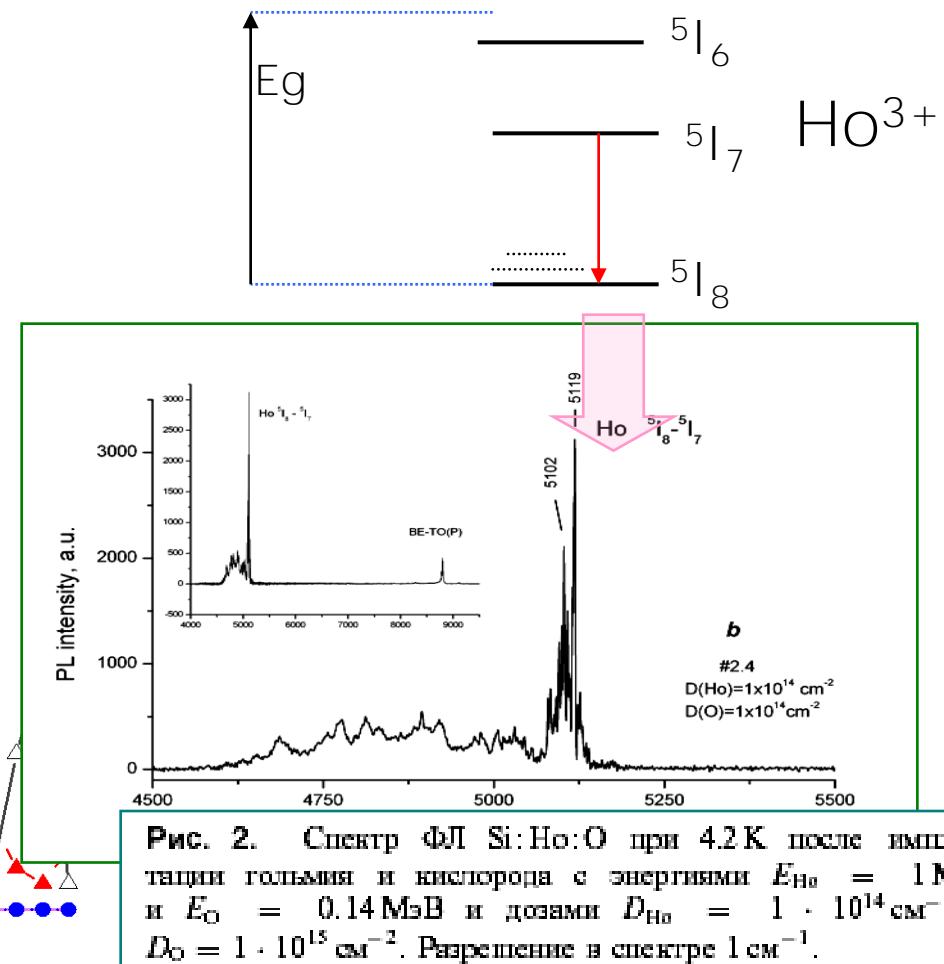
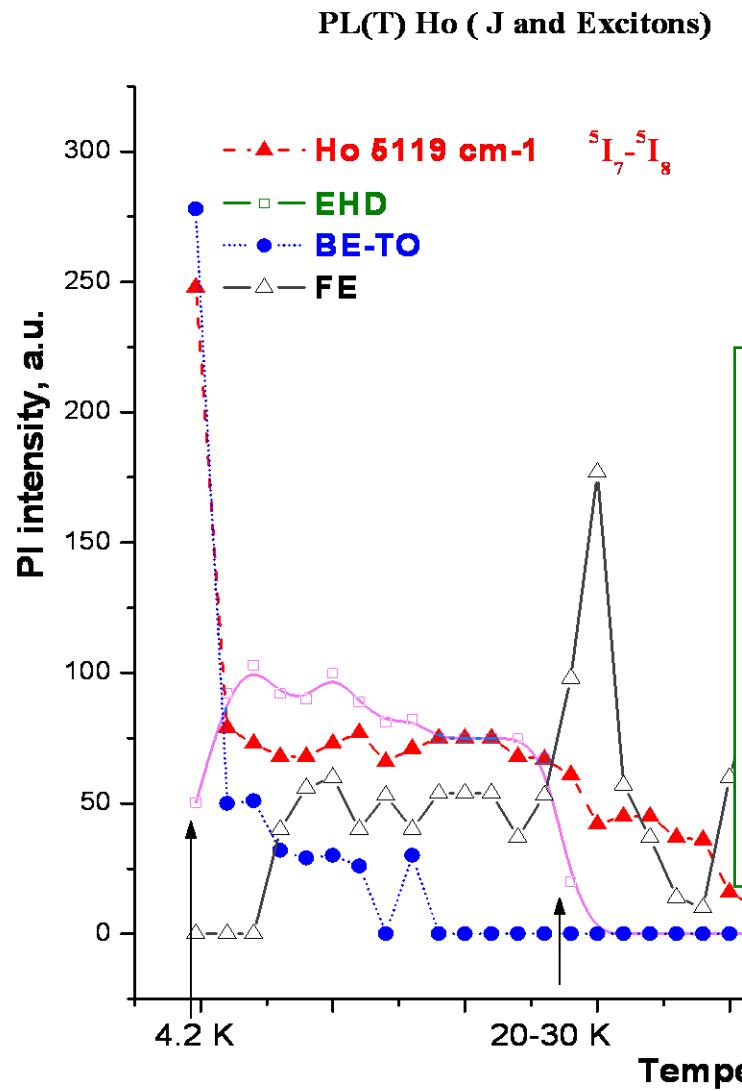
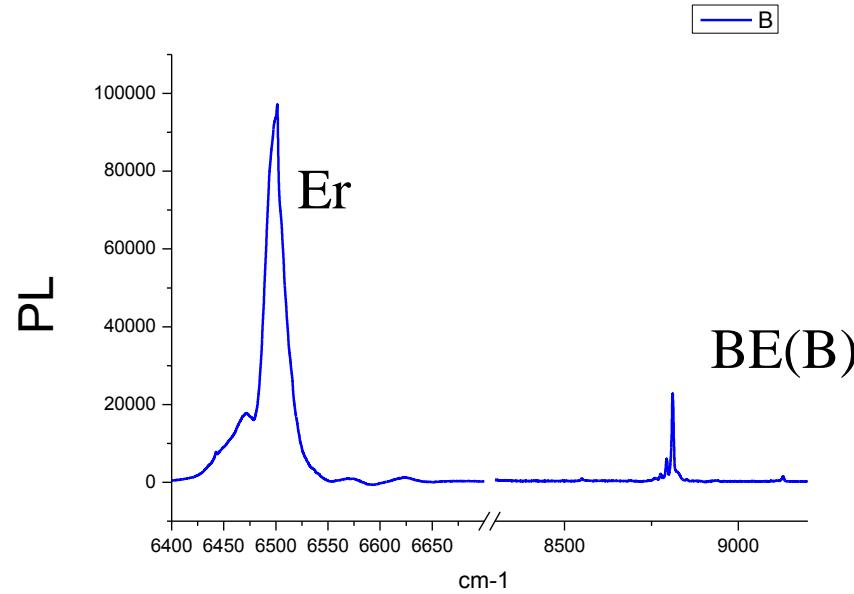
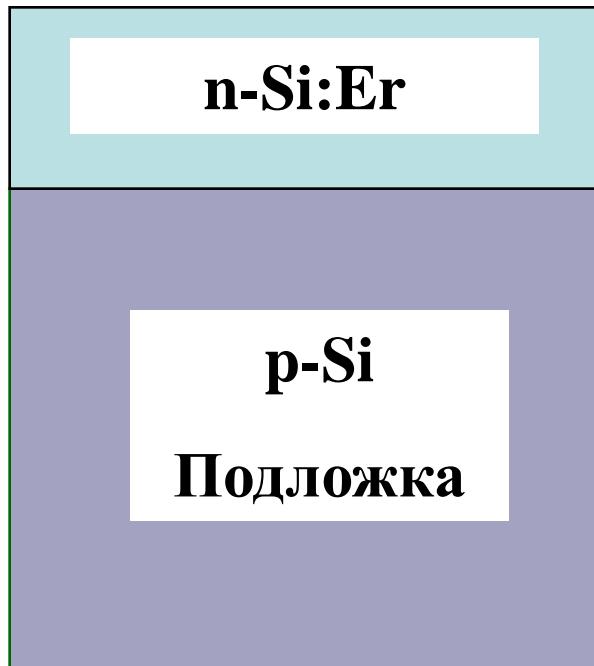


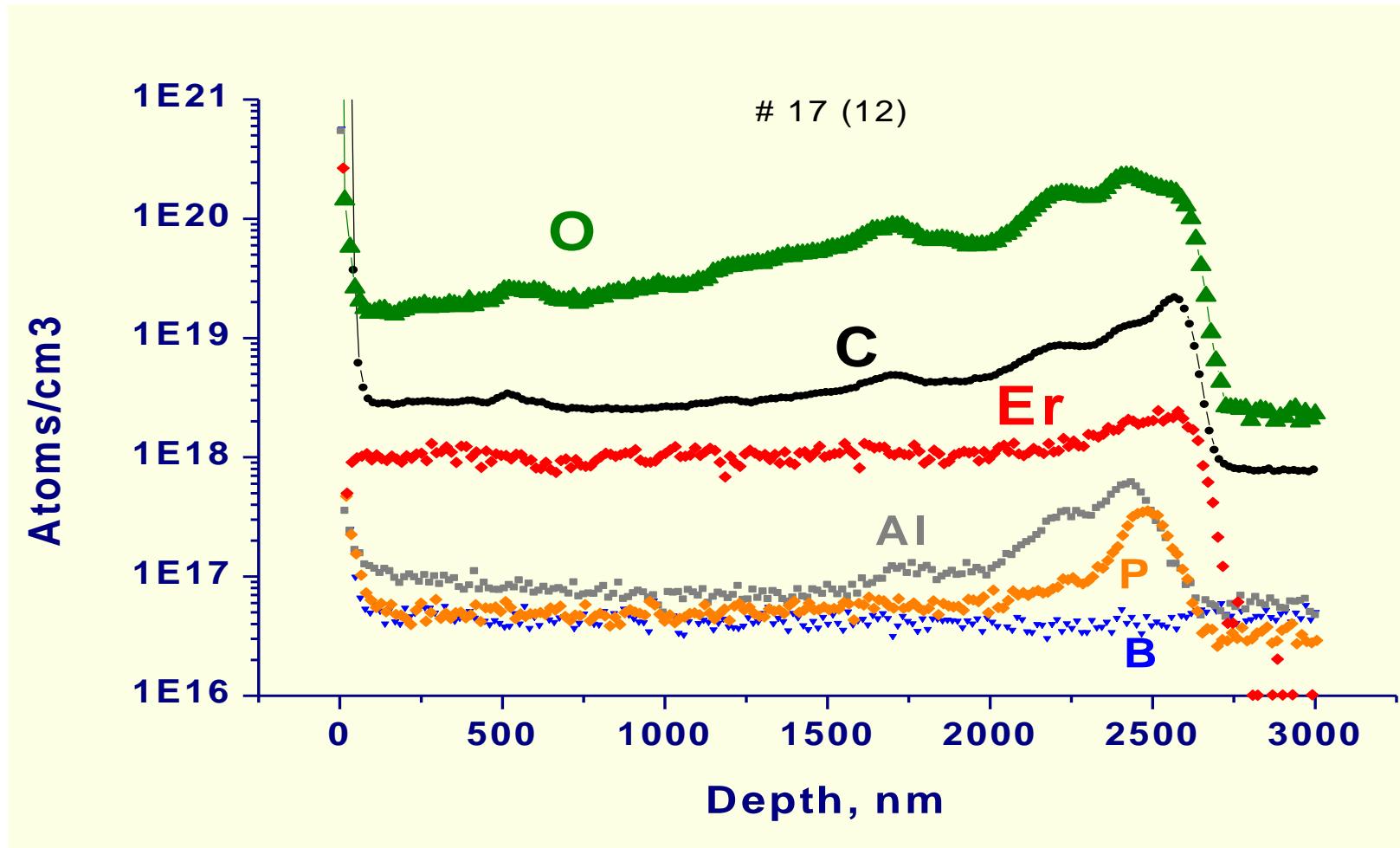
Рис. 2. Спектр ФЛ Si:Ho:O при 4.2 К после имплантации гольмия и кислорода с энергиями  $E_{\text{Ho}} = 1 \text{ МэВ}$  и  $E_{\text{O}} = 0.14 \text{ МэВ}$  и дозами  $D_{\text{Ho}} = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $D_{\text{O}} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Разрешение в спектре  $1 \text{ см}^{-1}$ .

# Экситонный механизм возбуждения люминесценции **Er**

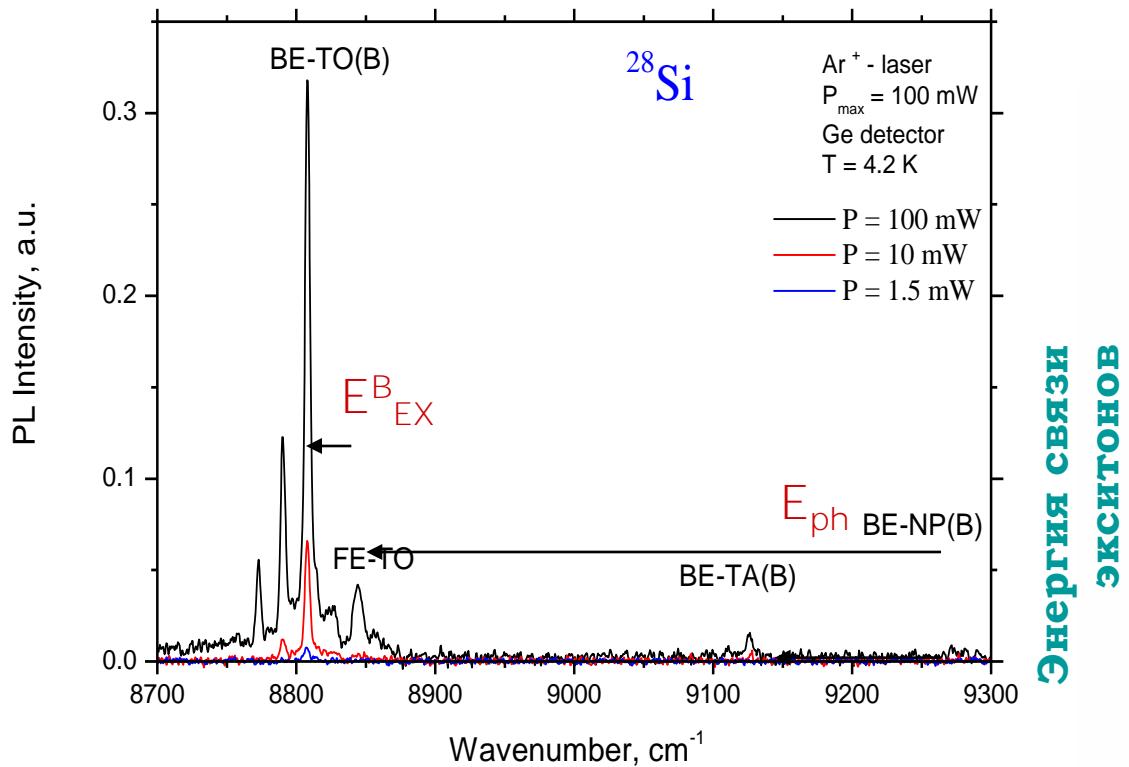


В спектре фотолюминесценции видны только линии экситона, связанного на примеси бора в подложке

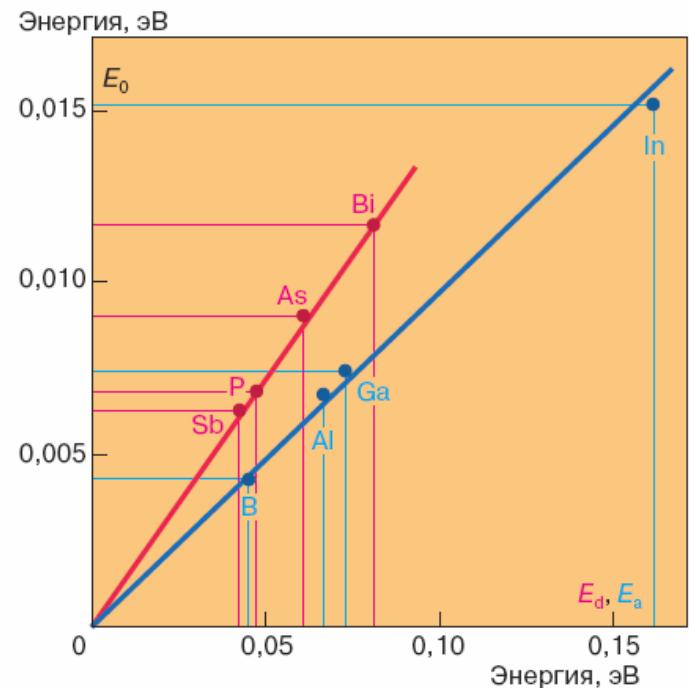
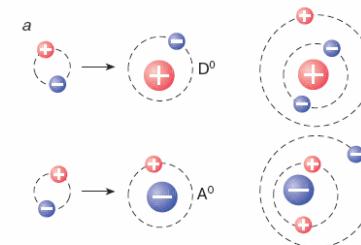
# Примесный состав структур Si:Er/Si



# Экситон-примесные комплексы



Энергия связи  
экситонов



Энергия основного  
состояния примесей