

# Внутрицентровое поглощение света на примесных уровнях в ИК-диапазоне

Доклад подготовила  
Петрова Наталья  
Студентка 506 группы  
Кафедры общей физики и  
молекулярной электроники  
МГУ имени М.В. Ломоносова

# Содержание

- Поглощение, связанное с примесными атомами. Виды примесей: мелкие, глубокие, эрбий. Донорные и акцепторные примеси. Внутрицентровое поглощение.
- Поглощение на свободных носителях в легированных полупроводниках. Спектры ИК-поглощения GaAs p-типа.
- Поглощение носителями, связанными на донорах и акцепторах. Спектры поглощения. Фототермическая ионизационная спектроскопия. Энергия связи.
- Поглощение в соединениях, легированных эрбием.

# Поглощение, связанное с примесными атомами

## Примеси



**«Мелкие»** - это примеси с энергией  $W_0 < 0.1 \text{ эВ}$ , являются оптимальными. Расстояние от примесного уровня до ближайшей разрешённой зоны мало по сравнению с шириной запрещённой зоны. Мелкие уровни определяют электропроводность п/п в диапазоне  $T = 200-400 \text{ К}$



**«Глубокие»** - у них расстояние от примесного уровня до ближайшей разрешённой зоны сравнимо с шириной запрещённой зоны. Ионизируются при повышенных  $T$ , влияя на процессы рекомбинации, определяют фотоэлектрические свойства п/п.

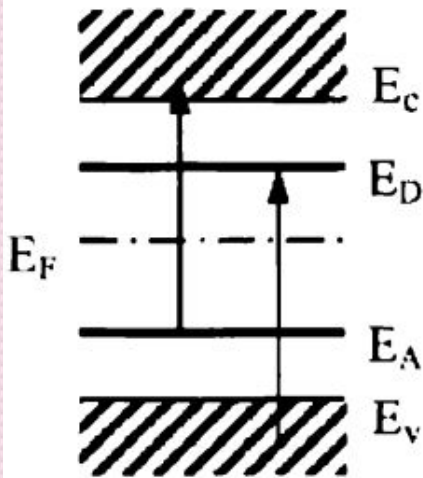


**Эрбий** - редкоземельный элемент, в ионизированном состоянии  $\text{Er}^{3+}$  может испускать фотон с длиной волны  $1,54 \text{ мкм}$ . Это происходит в результате перехода электрона внутри оболочки  $4f$  между первым возбужденным и основным состоянием.

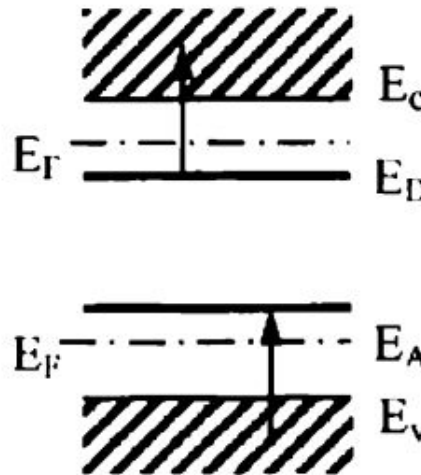
# Примесное поглощение в полупроводниках при малых концентрациях примеси

Оптические переходы в полупроводнике, содержащем донорные и акцепторные примеси с уровнями энергии  $E_d$  и  $E_a$ .

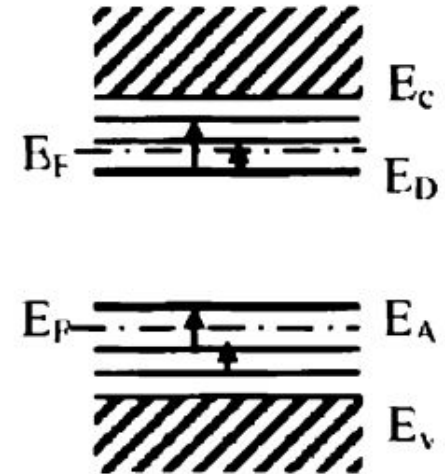
$h\nu < E_g$ , предположение: атомы примеси не взаимодействуют друг с другом и образуют узкие уровни в запрещенной зоне.



$E_f$  расположен так, что акцепторные состояния заполнены электронами (или донорные свободны), возможны переходы зона-примесь с пороговой энергией  $h\nu = E_g - E_a$  (или  $E_g - E_d$ )



Переходы зона-примесь с пороговыми энергиями  $h\nu = E_a$  (или  $E_d$ )



Примесь может образовывать состояния с набором уровней, включая основное и возбужденные => возможны внутрицентровые переходы. В этом случае в спектре поглощения обычно наблюдается система узких линий, переходящих в более широкую

# Поглощение на свободных носителях в легированных полупроводниках

## Выражение Друде для свободных носителей

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{4\pi N_c e^2}{4\pi\epsilon_0 m^* (\omega^2 + i\omega\gamma_c)}$$

$N_c$ ,  $e$  и  $m^*$  — плотность, заряд и эффективная масса свободных носителей соответственно,  $1/\gamma_c$  — их время рассеяния, связанное с феноменологическим временем рассеяния  $\tau$ .

$\epsilon_{\infty}$  — диэлектрическая постоянная

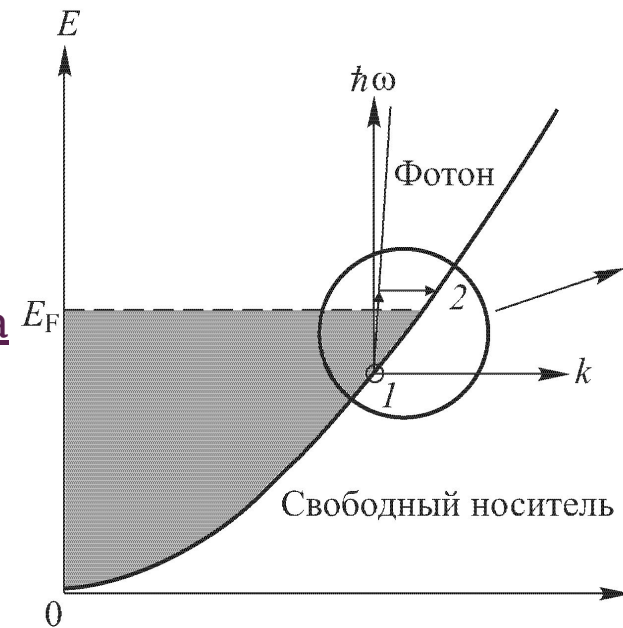
Реальная и мнимая части:

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_{\infty} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_c^2} \right),$$

$$\epsilon_i(\omega) = \frac{\epsilon_{\infty} \omega_p^2 \gamma_c}{\omega(\omega^2 + \gamma_c^2)},$$

$$\omega_p^2 = 4\pi N_c e^2 / (4\pi\epsilon_0 m^* \epsilon_{\infty}),$$

Схематическое изображение процесса поглощения (внутризонного) на свободных носителях вблизи уровня Ферми.



# Коэффициент поглощения на свободных носителях

$$\alpha_c(\omega) = \frac{\epsilon_{\infty} \omega_p^2 \gamma_c}{n_r c (\omega^2 + \gamma_c^2)},$$

$n_r$  - реальная часть коэффициента преломления,  $c$  - скорость света.

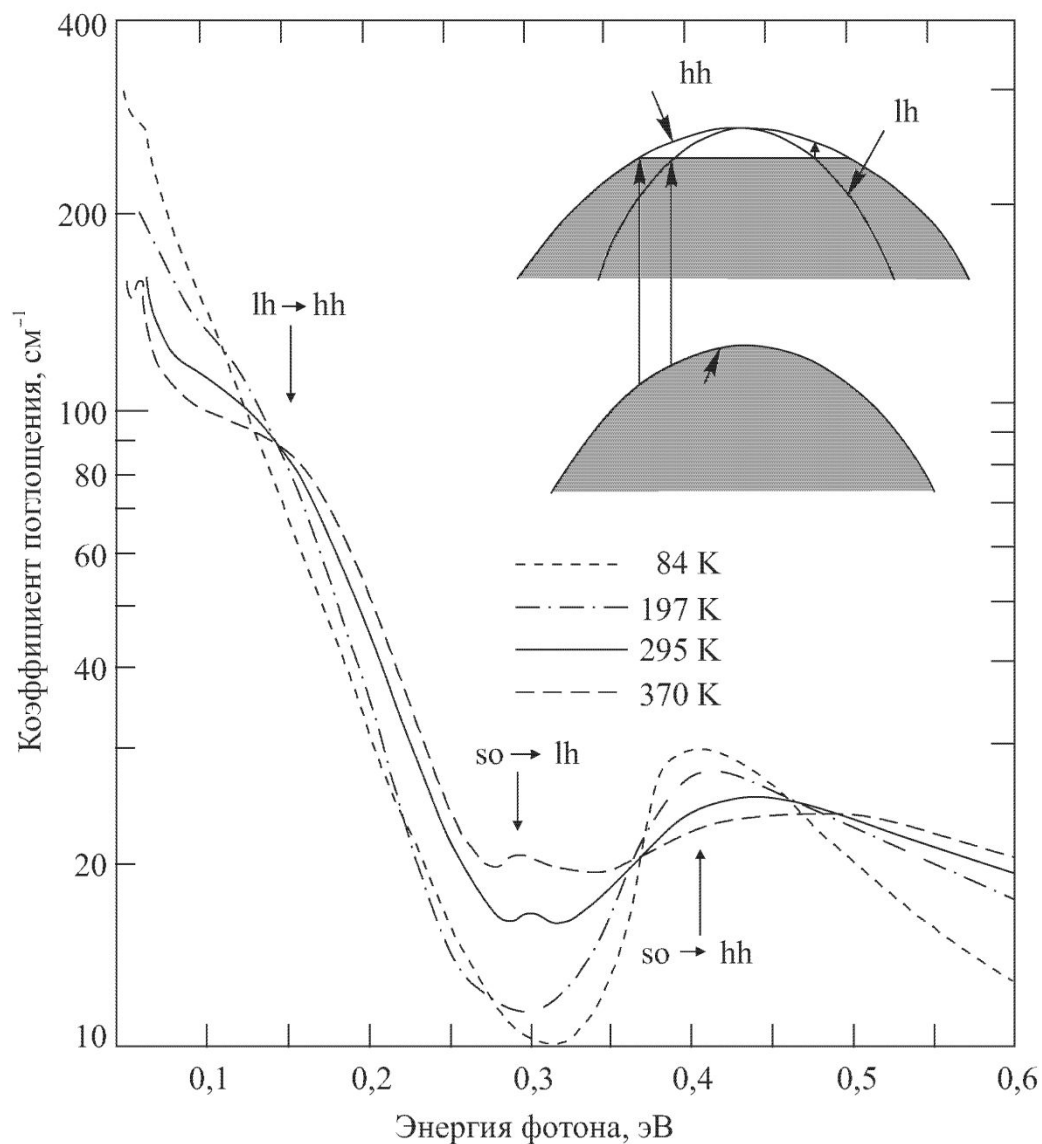
При низких частотах  $\omega \ll \gamma_c$  :

$$\alpha_c = \frac{4\pi N_c e^2}{4\pi \epsilon_0 n_r c m^* \gamma_c}.$$

Сравнивая коэффициент поглощения с электрической проводимостью  $\sigma$  :

$$\alpha_c = \frac{4\pi \sigma}{n_r c}$$

# Спектры инфракрасного поглощения GaAs p-типа



На вставке показаны два внутризонных (начальное и конечное состояния электрона находятся в одной и той же зоне) перехода между спин-отщепленной дырочной зоной (so) и зонами тяжелых (hh) и легких (lh) дырок в полупроводниках типа алмаза и цинковой обманки с p-типом легирования.

Три широких пика при 0,15; 0,31 и 0,42 эВ - переходы легкие дырки  $\rightarrow$  тяжелые дырки, спин-отщепленная дырочная зона  $\rightarrow$  легкие дырки, спин-отщепленная дырочная зона  $\rightarrow$  тяжелые дырки

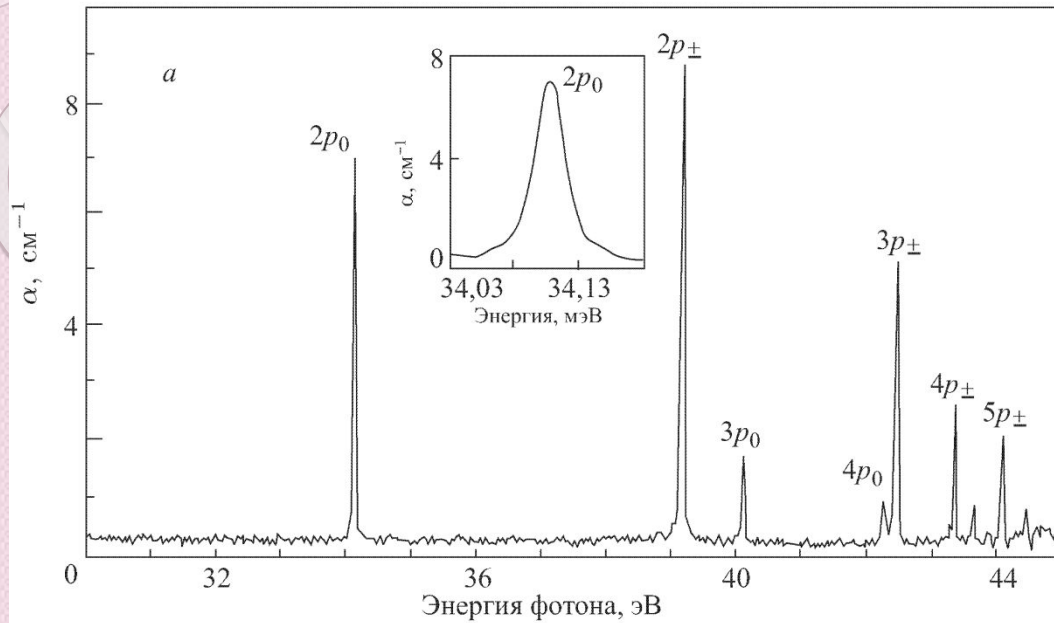
# Поглощение носителями, связанными на донорах и акцепторах

Мелкие доноры и акцепторы в полупроводниках типа алмаза и цинковой обманки ведут себя в какой-то мере подобно «атомам водорода в твердом теле». Хорошо известно, что атом водорода может поглощать электромагнитное излучение при электронных переходах между его квантованными уровнями. Эти переходы приводят к возникновению серий резких линий поглощения, известных как серии Лаймана, Бальмера, Пашена и др. в спектрах атомарного водорода.

По аналогии с атомом водорода, электрон на донорном атоме или дырка на акцепторном атоме могут быть возбуждены оптически из одного связанного состояния в другое. Очевидно, что эти переходы будут подчиняться правилам отбора, подобным правилам отбора в атоме водорода, т.е. электрические дипольные переходы будут разрешены между состояниями с  $s$ - и  $p$ -симметрией (т.е. когда разница между квантовыми числами углового момента  $\Delta l$  равна единице), но запрещены между состояниями с одинаковой симметрией.

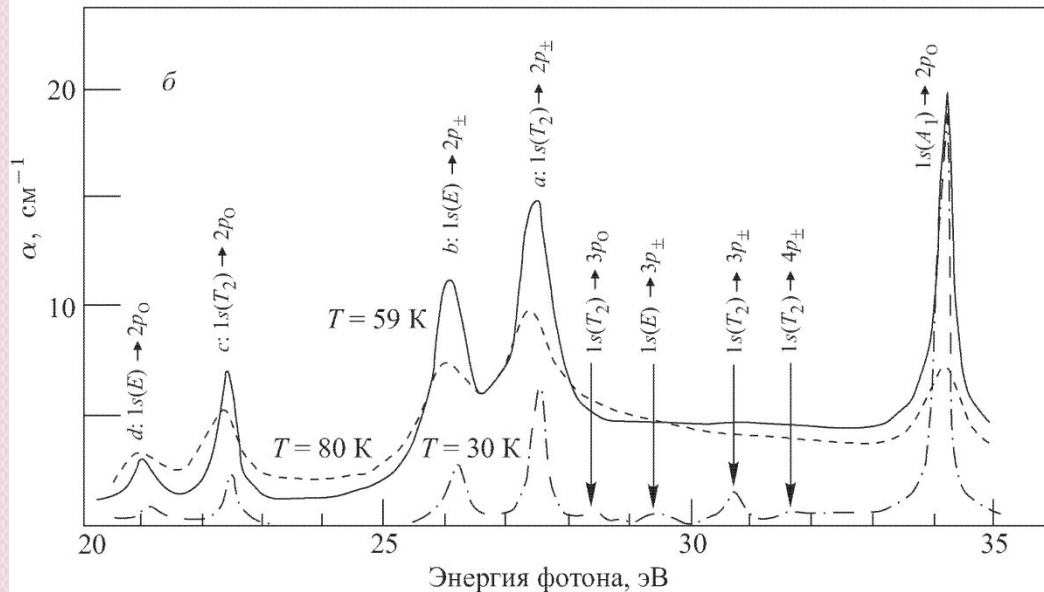


# Спектр поглощения доноров Р в Si



Измерения при температуре жидкого гелия в образце, содержащем около  $1,2 \cdot 10^{(-4)} \text{ см}^3 \text{ Р}$ .

На вставке показана линия  $2p_0$  с растянутой горизонтальной шкалой;



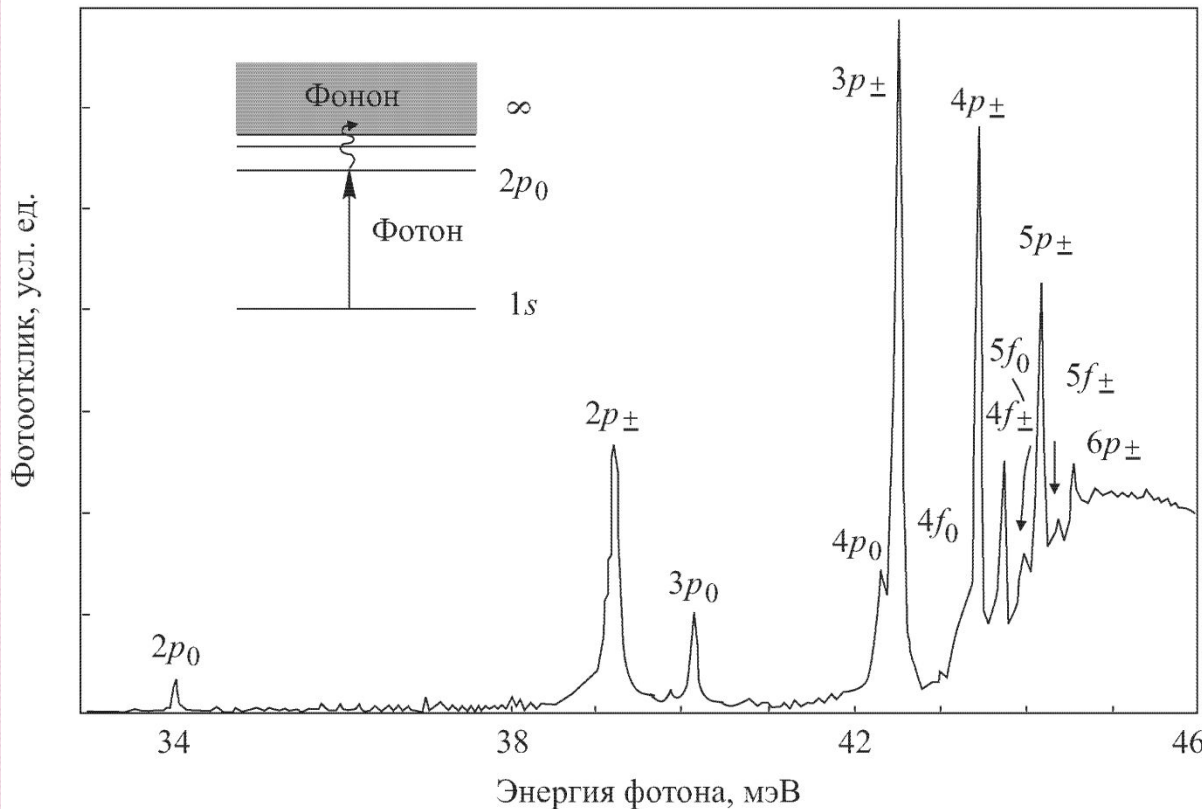
Измерения при температуре между 30 и 80 К в образце, содержащем

$5,2 \cdot 10^{(-4)} \text{ см}^3 \text{ Р}$

# Фототермическая ионизационная спектроскопия (ФТИС)

Основной процесс – фотопроводимость с участием фононов

## Спектр ФТИС легированного фосфором Si



ФТИС может чувствовать примеси при концентрациях всего  $10^8 \text{ см}^{-3}$  !

На вставке: схематическое изображение процесса фототермической ионизации.

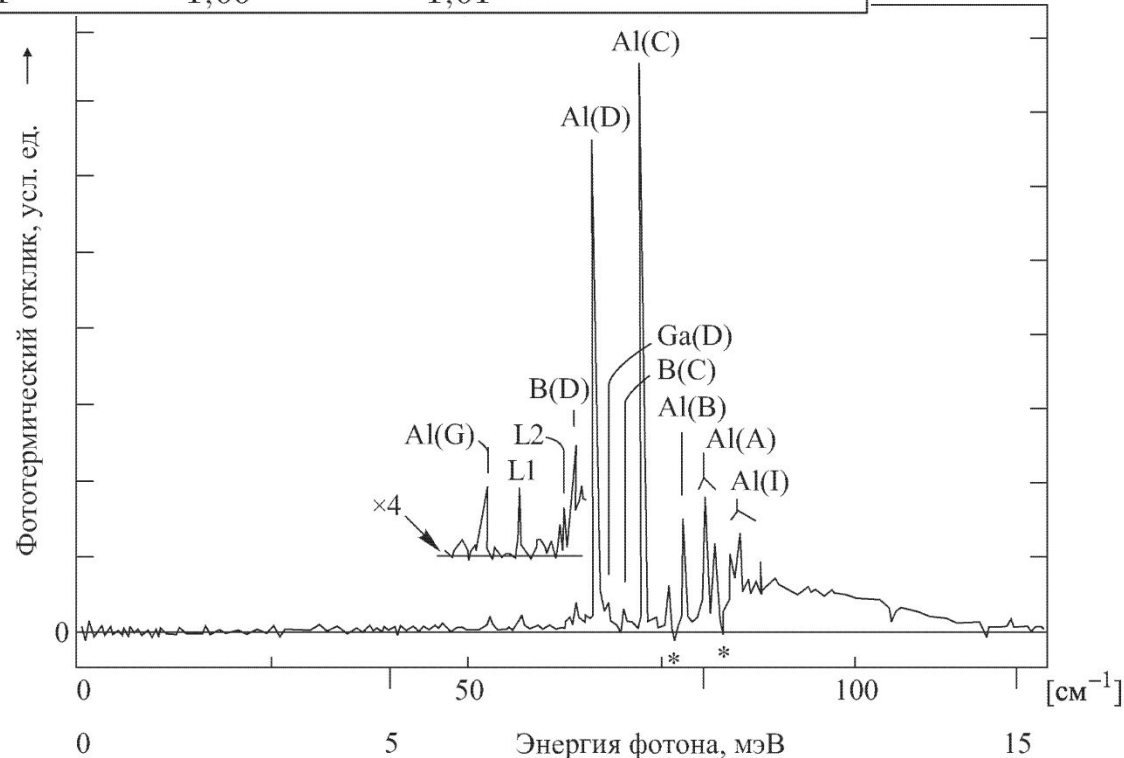
На рисунке: спектр ФТИС для концентрации в Si доноров P  $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

# Спектр ФТИС сверхчистого р-Ge при 8К

Энергии связи акцепторов группы III в Ge, определенные методом ФТИС. Предполагается, что энергия уровня  $2\Gamma_8^-$  (пик D) равна теоретическому значению [6.47] 2,88 мэВ [6.101]

Пик	Энергия связи, мэВ					
	B	Al	Ga	In	Tl	Теория
G	4,61	4,65	4,58	4,57	4,52	4,58 ( $1\Gamma_8^-$ )
E	3,27		3,3	3,54	3,57	
D	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88 ( $2\Gamma_8^-$ )
C	2,14	2,13	2,13	2,10	2,13	2,13 ( $1\Gamma_7^-$ ) 2,11 ( $3\Gamma_8^-$ )
a	1,76			1,76	1,78	
B	1,49	1,48	1,48	1,48	1,5	1,48 ( $4\Gamma_8^-$ ) 1,22 ( $5\Gamma_7^-$ )
A*	1,16	1,13	1,15	1,15	1,14	1,14 ( $2\Gamma_7^-$ ) 1,13 ( $6\Gamma_8^-$ )
A'	1,03	1,00	1,01	1,00	1,01	

Средняя  
концентрация  
акцепторов  
 $10^{10} \text{ см}^{-3}$



# Поглощение в соединениях, легированных эрбием (Er)

- Эрбий является редкоземельным элементом, который в ионизированном состоянии  $\text{Er}^{3+}$  может испускать фотон с длиной волны 1,54 мкм. Это происходит в результате перехода электрона внутри оболочки 4f между первым возбужденным состоянием и основным состоянием.
- Перспектива использования такой люминесценцией связано с тем что длина волны испускаемого фотона попадает в область тах пропускания оптических волноводов на основе оксида Si. При введении ионов эрбия в кремниевую матрицу необходимое возбуждение может быть достигнуто за счет носителей исходного материала. При этом последующий переход в невозбужденное состояние может привести к эмиссии света атомного типа в узкой области спектра.
- Er-легированный кремний идеально подходит для дальнейших фундаментальных исследований, связанных с квантово-электродинамическими эффектами при спонтанном излучении.
- Оптимальная оптическая производительность наблюдается в Er-имплантированных  $\text{Al}_2\text{O}_3$  канальных волноводах.
- В  $\text{LiNbO}_3$ , был обнаружен новый метод, использующий высокие концентрации Er с использованием быстрого термического отжига.
- В кремниевых p-n диодах, легированных Er, наблюдается электролюминесценция при комнатной температуре на 1.54 мкм

## Спектр обратного резерфордского рассеяния в пленке $\text{Al}_2\text{O}_3$ , легированной Er на подложке $\text{SiO}_2$

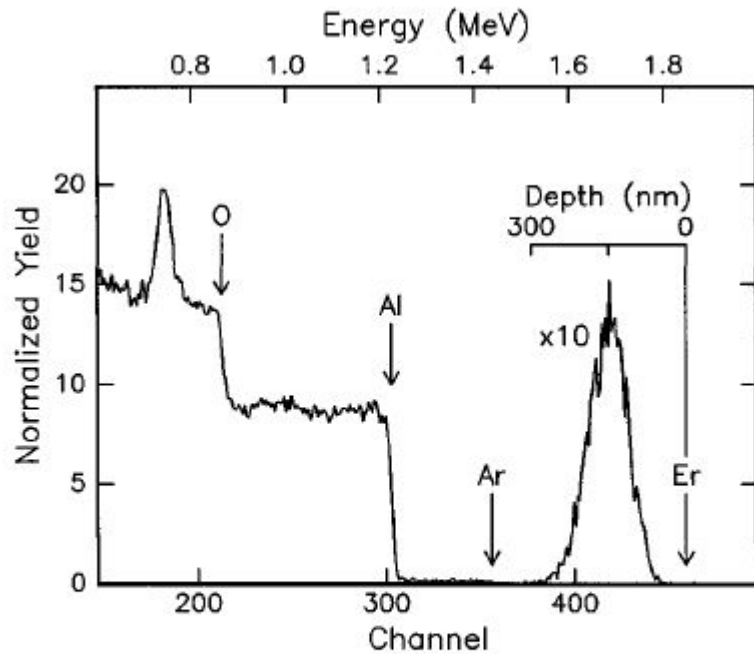


FIG. 27. Rutherford backscattering spectrum of an Er-implanted ( $2.3 \times 10^{15}$  Er/cm<sup>2</sup>, 800 keV)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film on a  $\text{SiO}_2$  buffer layer on Si. (From Ref. 60.)

## Модель возбуждения и девозбуждения Er в Si

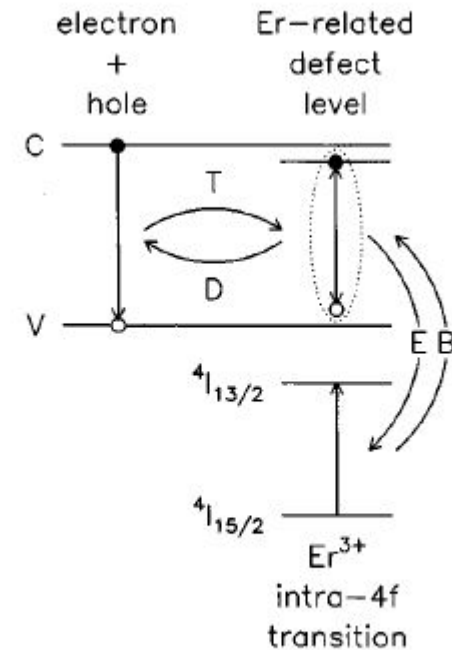


FIG. 57. Model for the excitation and deexcitation of Er in Si.

# Фотолюминесценция пленки $\text{SiO}_2$ , легированной Er при комнатной температуре

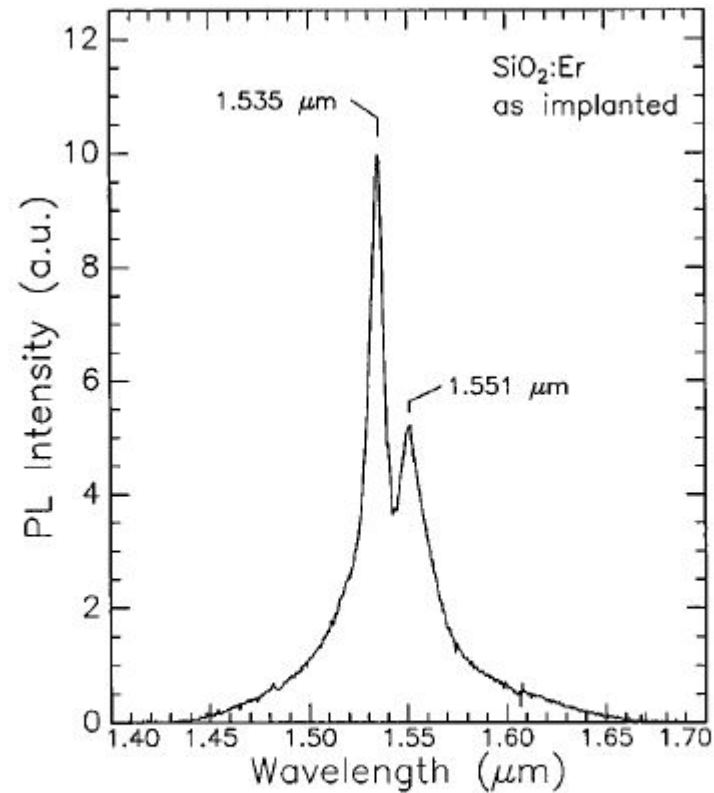


FIG. 5. Room-temperature PL spectrum for an Er-implanted ( $5 \times 10^{15}$  Er/cm<sup>2</sup>, 3.5 MeV, peak concentration 0.1 at. %)  $\text{SiO}_2$  film on a Si substrate. ( $\lambda_{\text{pump}} = 488$  nm, pump power = 250 mW, spectral resolution = 1 nm, from Ref. 15.)



**Спасибо за внимание!**