



# Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев GaN, AlGaN и гетероструктур на их основе.

***И.В. Осинных***  
***ИФП СО РАН, НГУ***  
***Новосибирск***

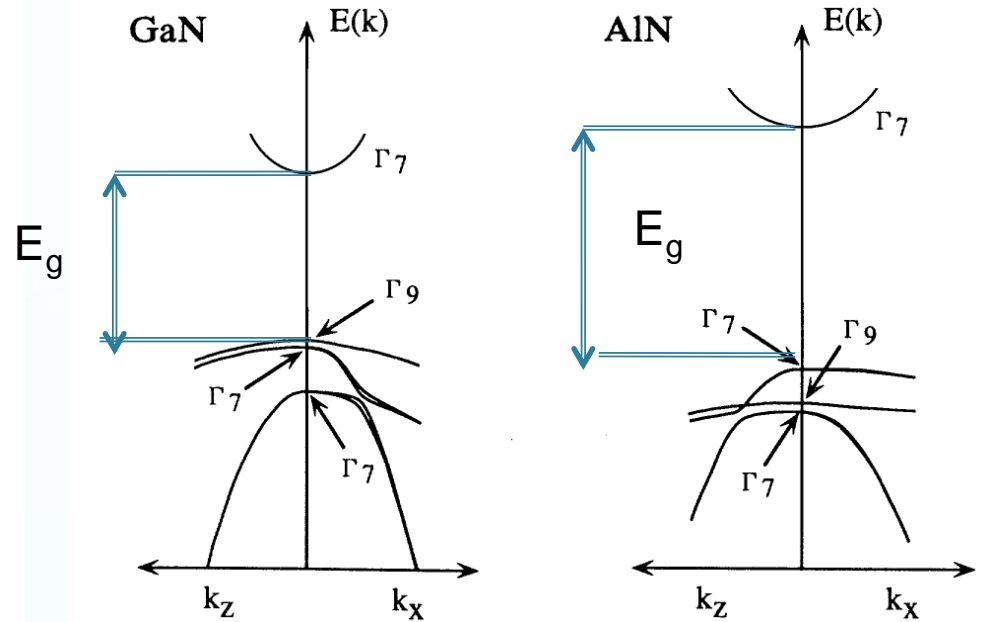
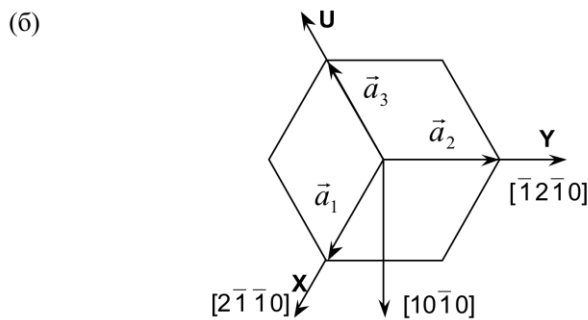
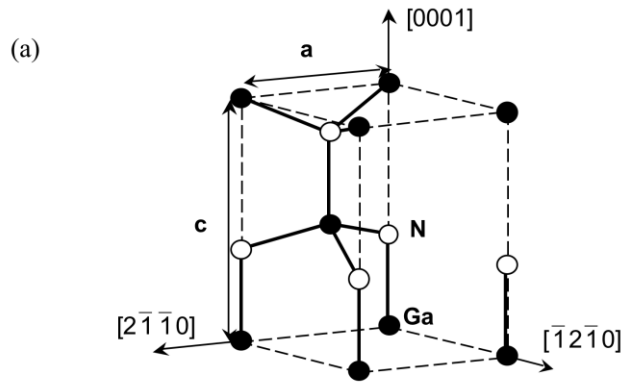


# Применение нитридов металлов III группы

- ❖ Мощные СВЧ-транзисторы
- ❖ Светоизлучающие приборы
- ❖ Резонансно туннельные диоды
- ❖ Фотодетекторы ультрафиолетового спектрального диапазона



# Структура соединений III-N



$$\underline{\Delta E_g = 26 \text{ meV/GPa} \times \Delta \sigma}$$

*Для AlGaN – по закону Вегарда*

$$a_{AlGaN} = x \times a_{AlN} + (1 - x) \times a_{GaN}$$

$$E_{gAlGaN} = x \times E_{gAlN} + (1 - x) \times E_{gGaN} - b \times x \times (1 - x)$$

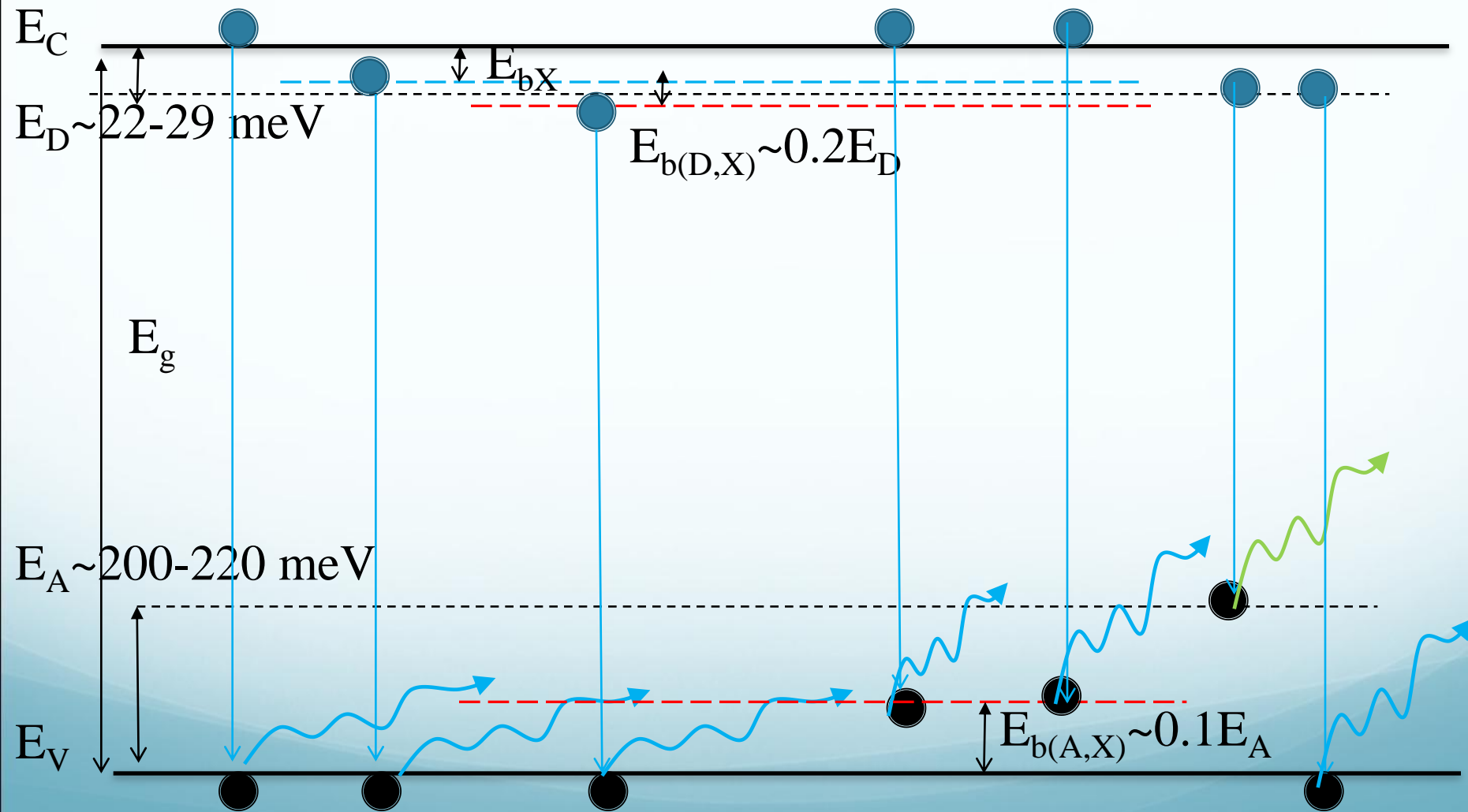
$$3.43 < E_{gAlGaN}(T = 300K) < 6.2 \text{ eV}$$

$$200 < l < 365 \text{ nm}$$

Параметр	AlN	GaN
a (Å)	3.112	3.189
c (Å)	4.982	5.186
u	0.382	0.377
E <sub>g</sub> (T=0)	6.026	3.505



# Доноры и акцепторы в GaN

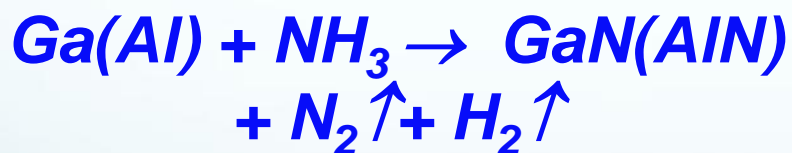




# Методы эпитаксии III-нитридных гетероструктур

## Молекулярно-лучевая эпитаксия

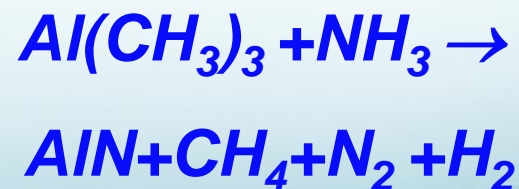
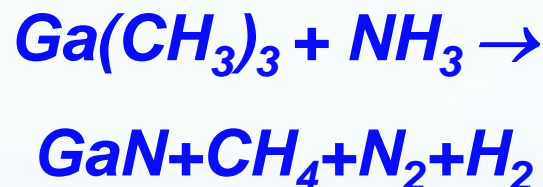
### ➤ Аммиачная МЛЭ



### ➤ рч-МЛЭ

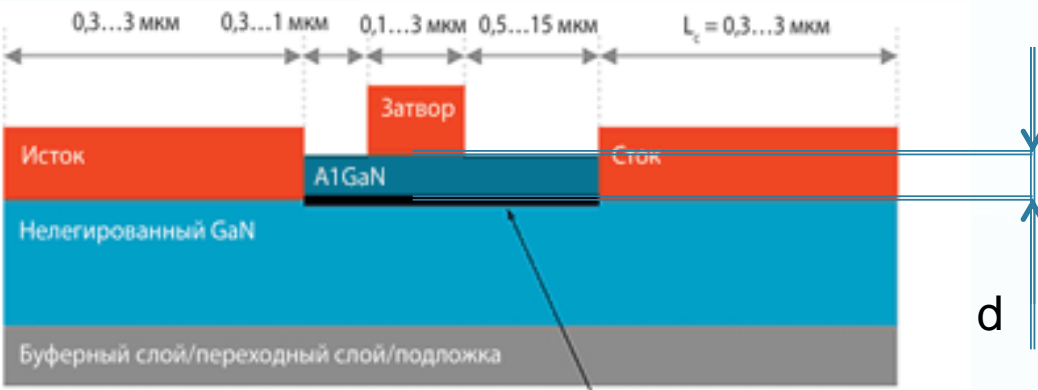


## Газофазная эпитаксия

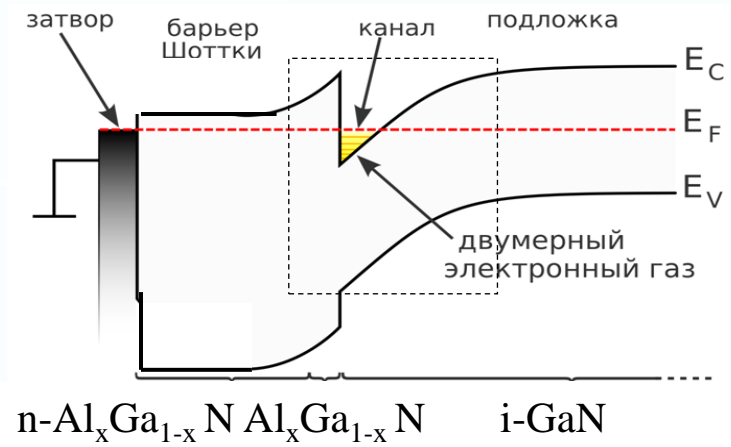




# Мощные СВЧ-транзисторы



Поляризационные и пьезоэлектрические эффекты создают двумерный электронный газ плотностью  $n_s = 10^{13} \text{ см}^{-2}$



- Высокие пробивные поля  $33 \times 10^5 \text{ В/см}$  в GaN в сравнении с  $4 \times 10^5 \text{ В/см}$  в GaAs,
- Высокий рабочий ток вследствие высокой концентрации электронов,  $n_s \sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$  в сочетании с приемлемой подвижностью электронов  $\mu \sim 10^4 \text{ см}^2/\text{В сек}$  ( $T=77\text{K}$ )  $\mu \sim 10^3 \text{ см}^2/\text{В сек}$  ( $T=300\text{K}$ )
- Большой разрыв зоны проводимости  $dE_c > 0,5 \text{ эВ}$ .
- Нет минимума в зоне проводимости по координате  $x$  в слое AlGaN,
- Большая эффективная масса электронов  $0,2 m_0$  у GaN в сравнении с  $0,067 m_0$  у GaAs

**$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$**   
 **$\text{AlN}$**

**$d = 26 \text{ нм}$**   
 **$d = 2 \text{ нм}$**



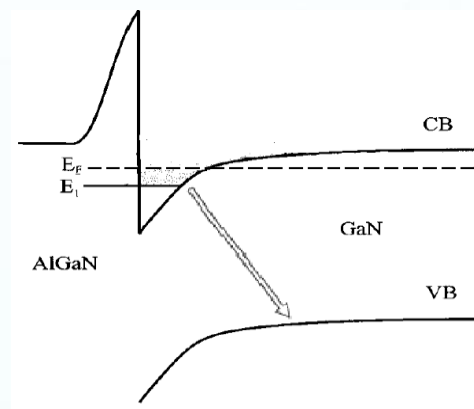
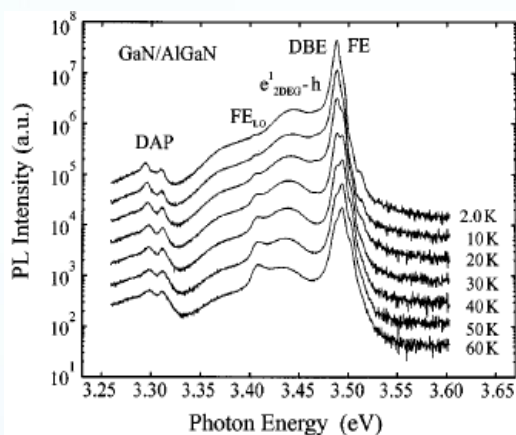
# Сложности наблюдения ДЭГ



Гетероструктура



AlGaN + GaN + 2DEG



J. P. Bergman, T. Lundström and B. Monemar, Appl. Phys. Lett, 69, 3456 (1996)

Разделение ДЭГ и дырок



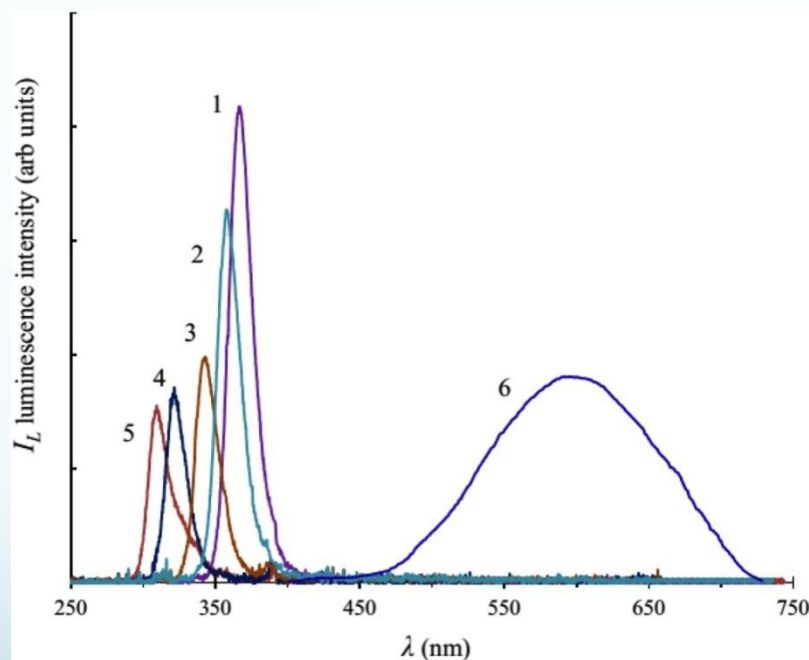
Нужна высокая мощность возбуждения



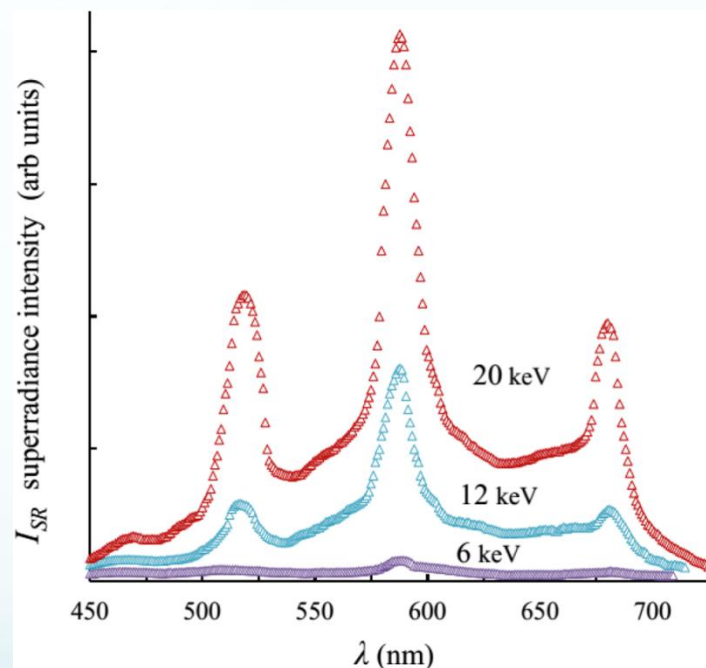
# Сверхлюминесценция AlGaN ( $x > 0.5$ )



Спектры катодoluminesценции слоев AlGaN различного состава: 1— $x=0$ ; 2— $x=0.1$ ; 3— $x=0.2$ ; 4— $x=0.28$ ; 5— $x=0.36$ ; 6— $x=0.5$ .



Изменения спектра сильно легированного кремнием слоя AlGaN с  $x=0.5$  при изменении энергии электронного пучка.



P.A. Vokhan et al, J. Appl, Phys. **116**, 113103 (2014)

*стимулированная эмиссия, усиливающаяся в планарном волноводе при прохождении света под углами, близкими к углу полного внутреннего отражения.*



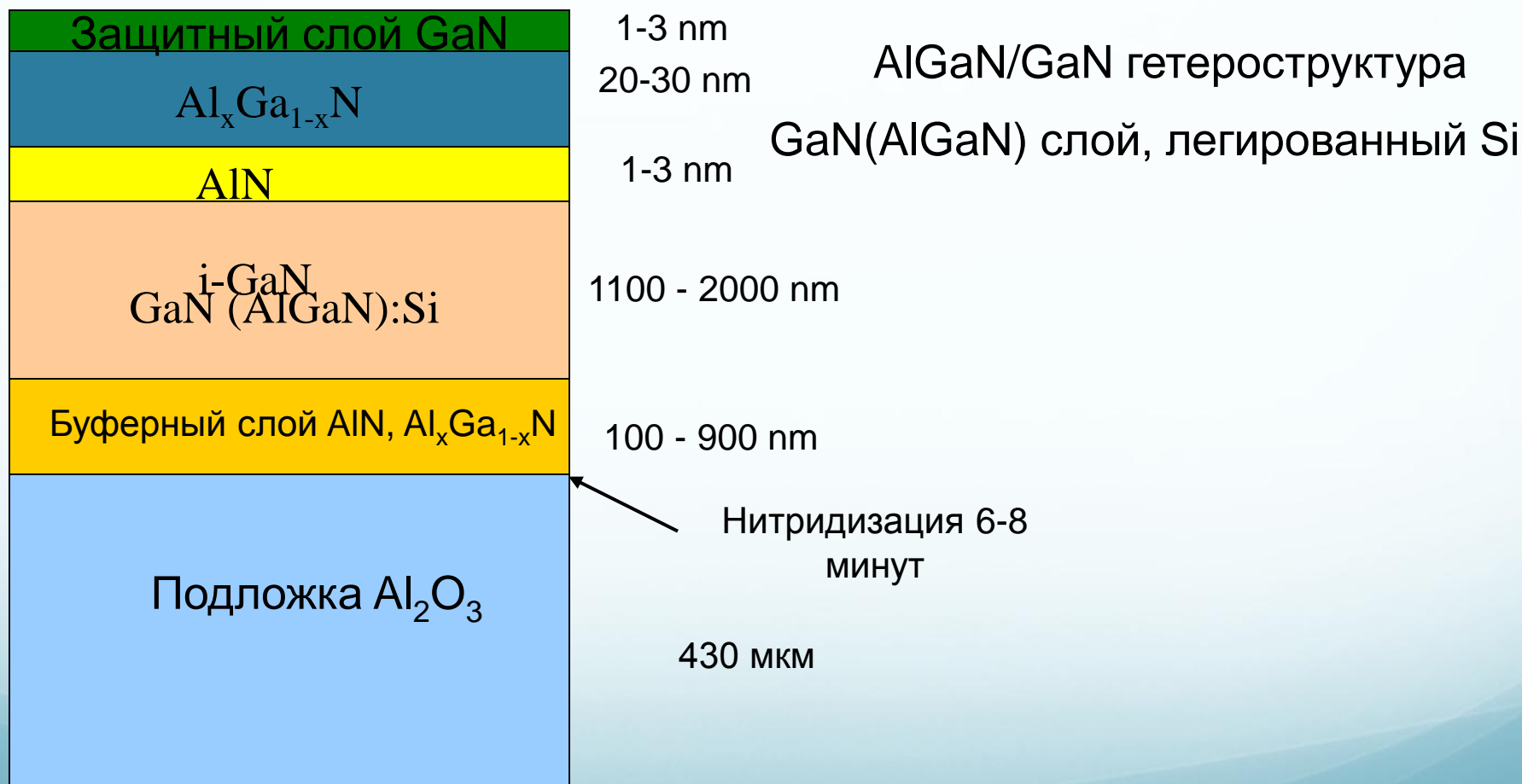


## Направления работы

- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGa<sub>N</sub> с  $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGa<sub>N</sub> с  $x < 0.3$
- ❖ Краевая ФЛ AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.

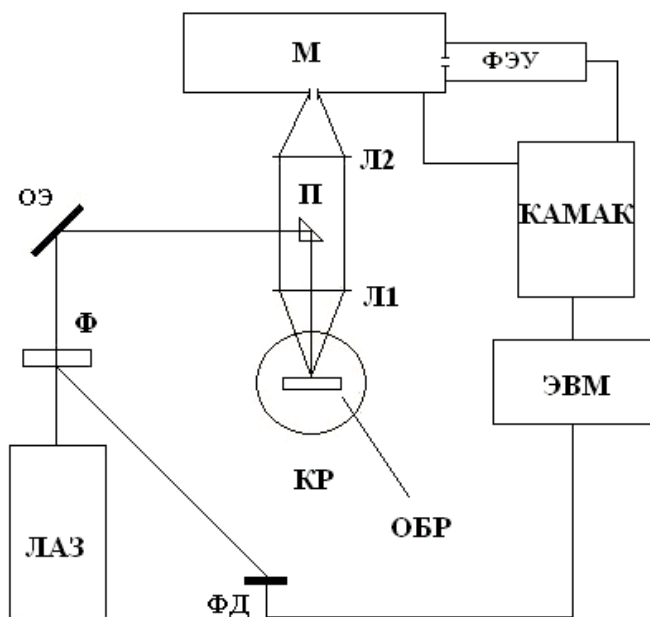


# Исследуемые образцы





# Методика эксперимента



- Стационарная ФЛ: He-Cd лазер,  $\lambda=325$  нм,  $P=10$  мВт
- Нестационарная ФЛ:  $N_2$  лазер,  $\lambda=337,1$  нм,  $P=40$  мВт, длительность импульсов 7 нс
- $T=5-300$  К

Спектры возбуждения -  
спектрофлуориметр FLS920 с 450-  
ваттной ксеноновой лампой при  $T=300$  К  
Для кинетики - лазерный диод с  $\lambda=280$   
нм и длительностью импульсов 600 пс

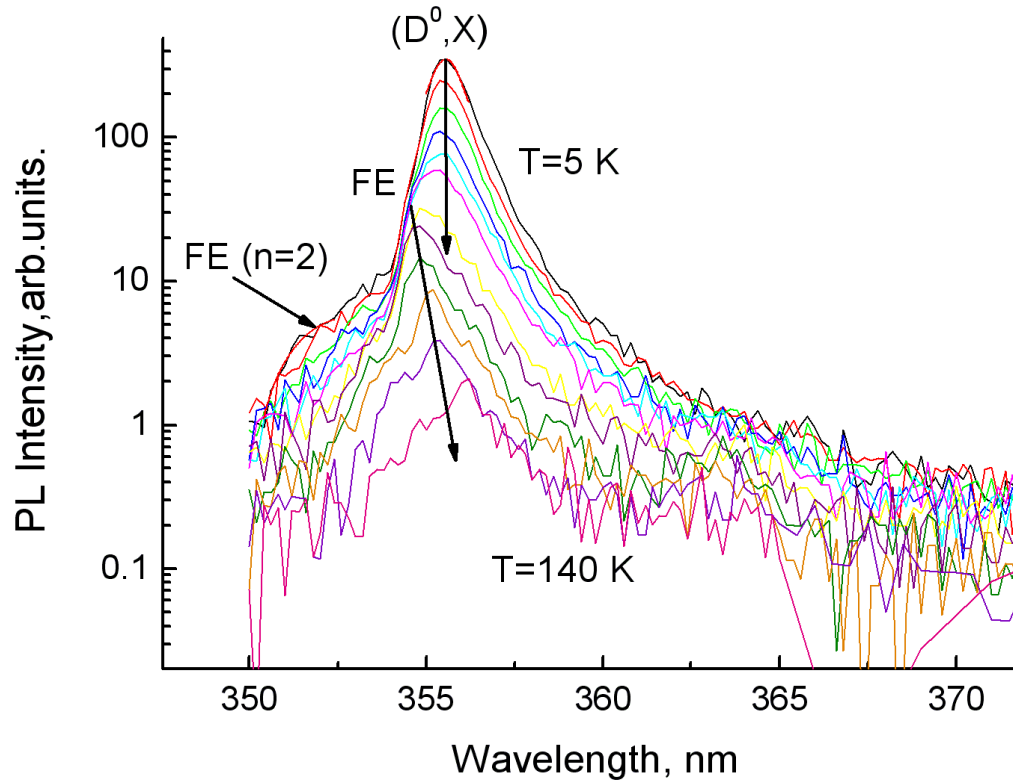


## ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN

- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Синие-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x < 0.3$
- ❖ Краевая ФЛ AlGaN/GaN гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.



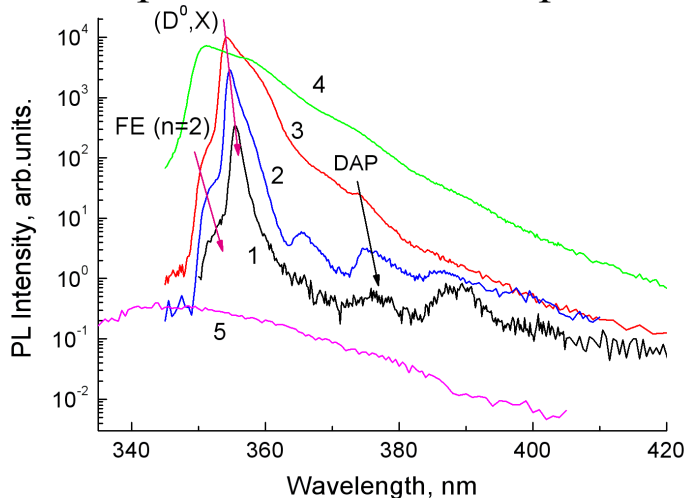
# Спектры ФЛ нелегированного GaN при различных температурах



# Энергия связи доноров в сильно легированных слоях GaN:Si

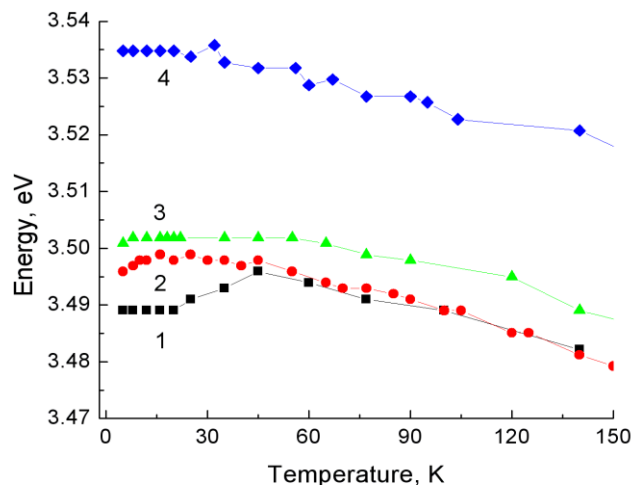


Спектры ФЛ слоев GaN при T= 5 К

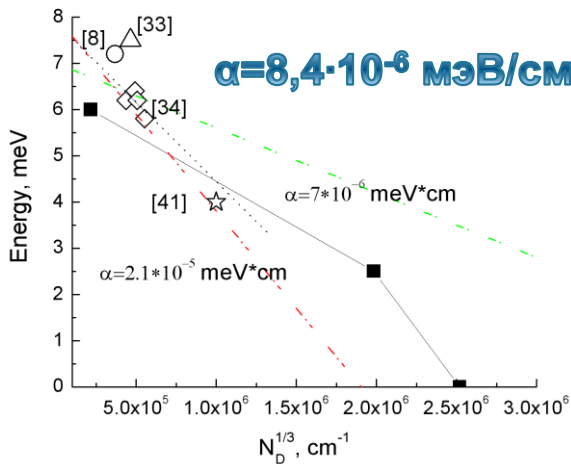


1 – i слой,  
 2 -  $n=3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  
 3 -  $n=1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  
 4 -  $n=5,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  
 5 -  $n=1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

Температурная зависимость энергетического положения пиков краевой ФЛ слоев GaN



Энергия связи ( $D^0, X$ ) комплекса



$\alpha = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ мэВ/см}^{-1}$  ← Коэффициент пропорциональности

- $n < 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – экситоны локализируются на донорах
- $n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – экситоны делокализованы
- $n > 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – свободные электроны и дырки.



❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN

## ❖ **Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD**

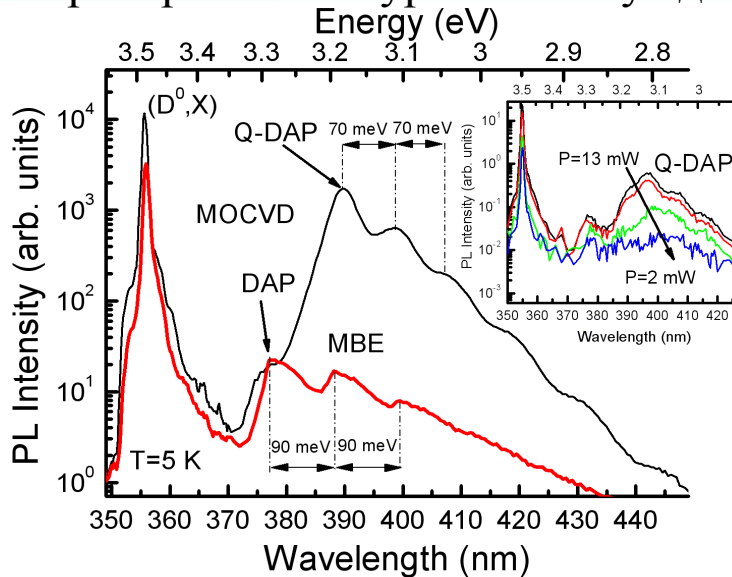
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x < 0.3$
- ❖ Краевая ФЛ AlGaN/GaN гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.



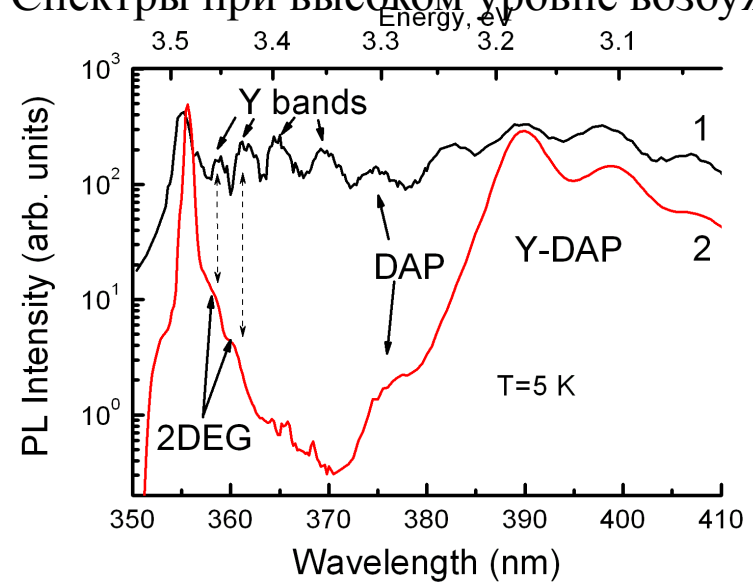
# Низкотемпературные спектры ФЛ гетероструктур



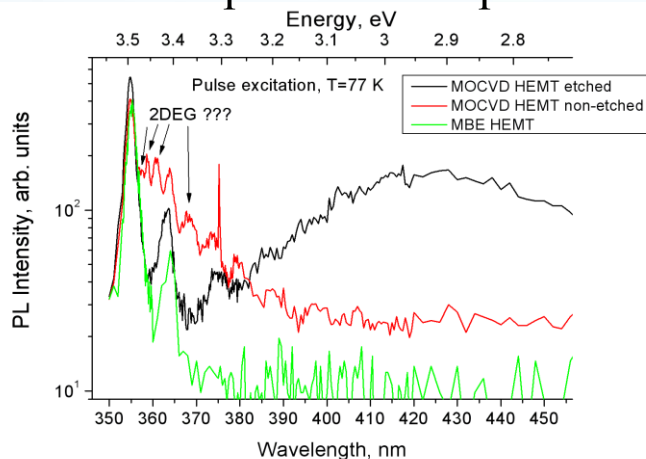
Спектры при низком уровне возбуждения



Спектры при высоком уровне возбуждения



Изменение спектров после стравливания ДЭГ

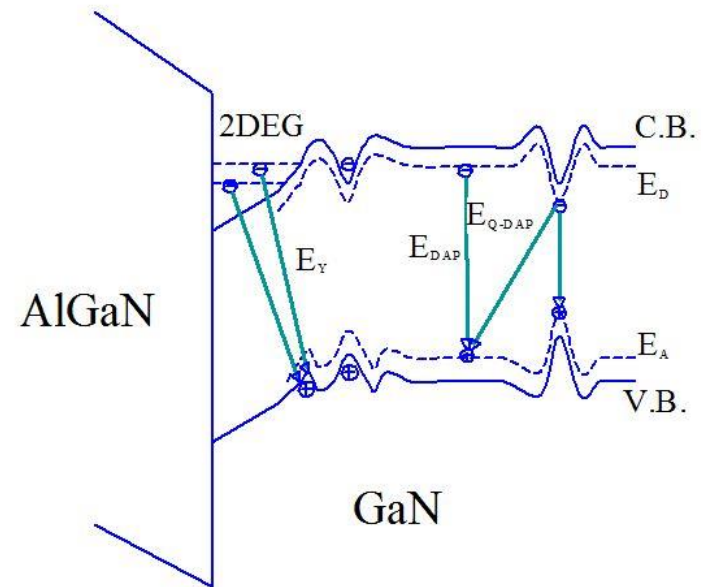
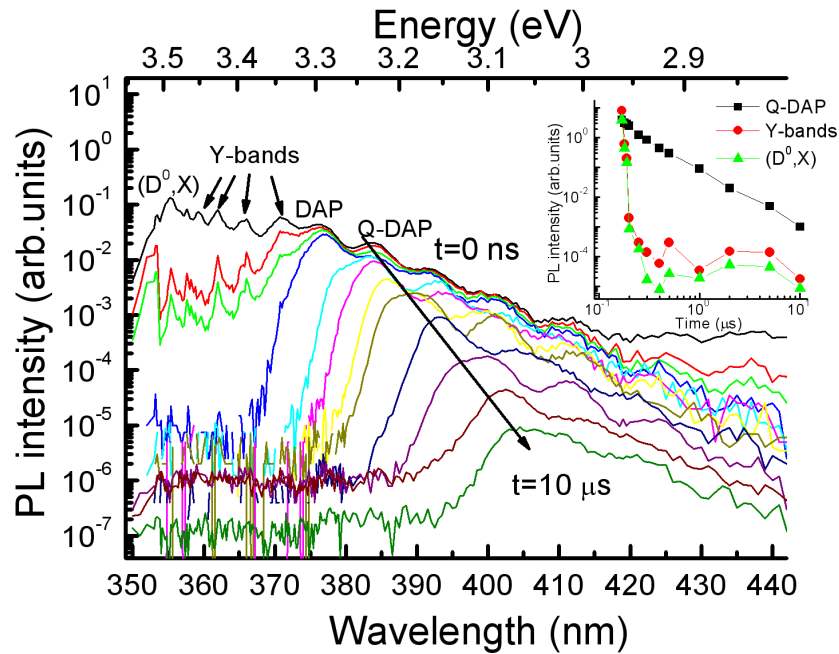


Интенсивные Y(ДЭГ)-  
полосы видны только при  
наличии Q-DAP полосы





# Долговременная кинетика Q-DAP полосы фЛ



- Быстрая кинетика экситонных и ДЭГ-полос
- Медленная кинетика Q-DAP полос
- Большой красный сдвиг Q-DAP полосы

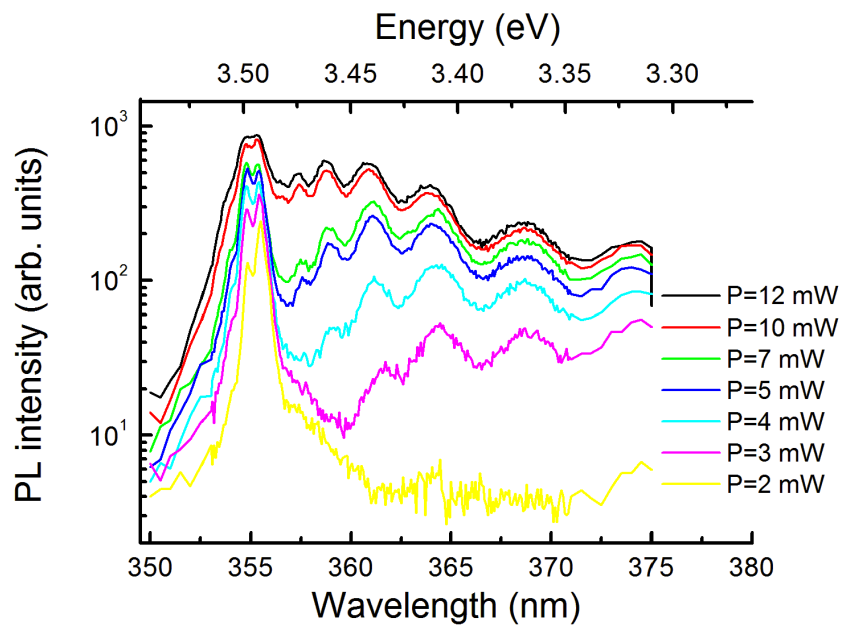
$$h\nu_{\text{DAP}} = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{\chi R}$$

$$h\nu_{\text{Q-DAP}} = E_g - (E_D + E_A) - 2\Gamma$$

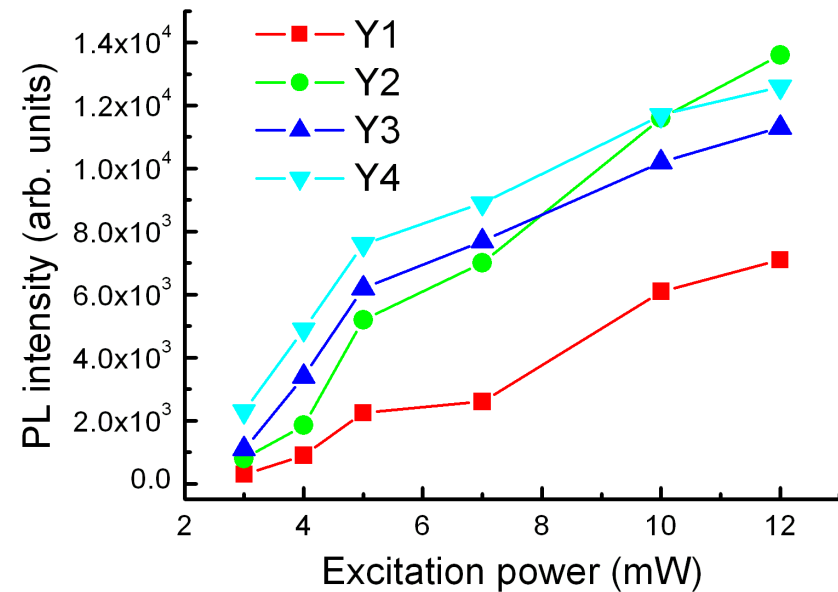


# Зависимость ФЛ Y-полос от мощности возбуждения при T=5 К

Спектры ФЛ при различной мощности возбуждения



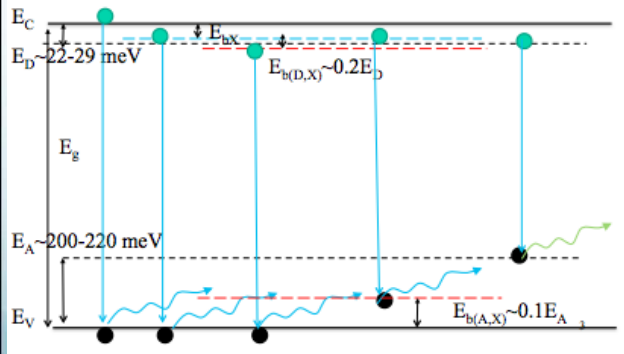
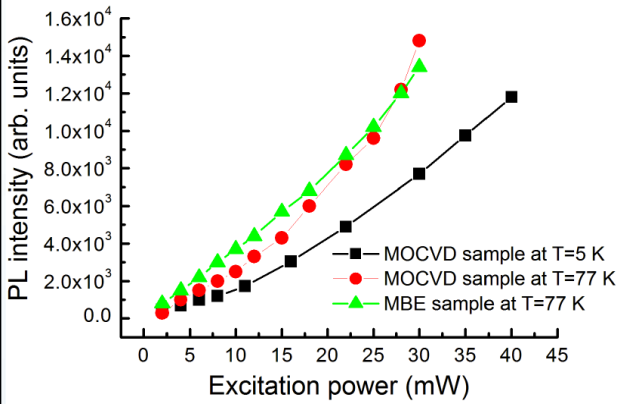
Зависимость ФЛ Y-полос от мощности возбуждения



Сначала быстрый рост, потом снижение скорости роста



# Моделирование рекомбинации В AlGaIn/GaN гетероструктурах ЭКСИТОНЫ



$$\frac{dN_{exc}}{dt} = 0 = W_{form} \cdot n \cdot p - W_{rad} \cdot N_{exc}$$

$$\frac{dn}{dt} = 0 = G + W_{deloc} \cdot N_D^0 - W_{form} \cdot n \cdot p - W_{cann} \cdot n \cdot N_T^0 - W_{loce} \cdot n \cdot (N_D - N_D^0) - W_{eA} \cdot n \cdot N_A^0$$

$$\frac{dp}{dt} = 0 = G - W_{form} \cdot n \cdot p - W_{caph} \cdot p \cdot (N_T - N_T^0) - W_{loch} \cdot p \cdot (N_A - N_A^0) - W_{hD} \cdot p \cdot N_D^0$$

$$\frac{dN_D^0}{dt} = 0 = W_{loce} \cdot n \cdot (N_D - N_D^0) - W_{deloc} \cdot N_D^0 - W_{hD} \cdot p \cdot N_D^0 - W_{DA} \cdot N_D^0 \cdot N_A^0$$

$$\frac{dN_A^0}{dt} = 0 = W_{loch} \cdot p \cdot (N_A - N_A^0) - W_{eA} \cdot n \cdot N_A^0 - W_{DA} \cdot N_D^0 \cdot N_A^0$$

$$p + (N_D - N_D^0) = n + (N_A - N_A^0) + (N_T - N_T^0)$$

- Вклад излучательной рекомбинации мал по сравнению с безызлучательной
- Изменения концентраций при включении света линейны по G
- Экситоны не делим на свободные и связанные

$$I = AG^2 + BG \sim W_{rad} \times N_{exc} + W_{hD} \times p \times N_D^0$$

$$k = \frac{A}{B} = \frac{1}{W_{caph} \times N_T(G=0)} \times \frac{1}{n(G=0) + \frac{W_{hD}}{W_{form}} N_D^0(G=0)}$$

При G=0

$$T=5 K \Rightarrow n=0, N_D^0 = N_D - N_A$$

$$T=77 K \Rightarrow n = \sqrt{N_D - N_A},$$

$$N_D^0 = N_D - N_A - n$$

**ИТОГО:** \*  $N_D - N_A = (3, 4) \times 10^{14}$  \*\*  $N_{T MBE} / N_{T MOCVD} \gg 10$



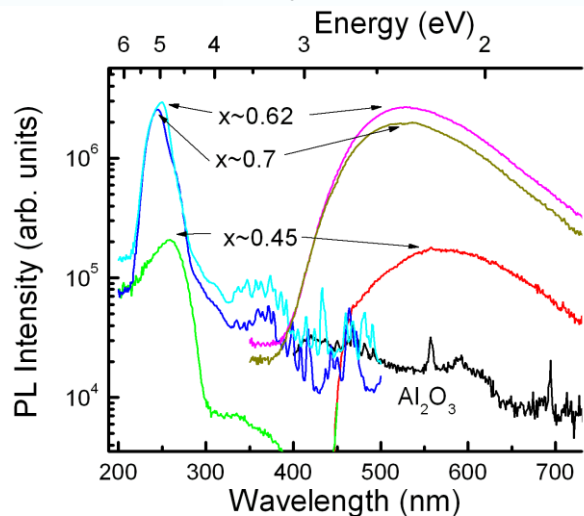
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x > 0.5$**
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x < 0.3$
- ❖ Краевая ФЛ AlGaN/GaN гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.



# Сине-зеленая полоса ФЛ AlGaN слоев с $x=0.6...0.7$

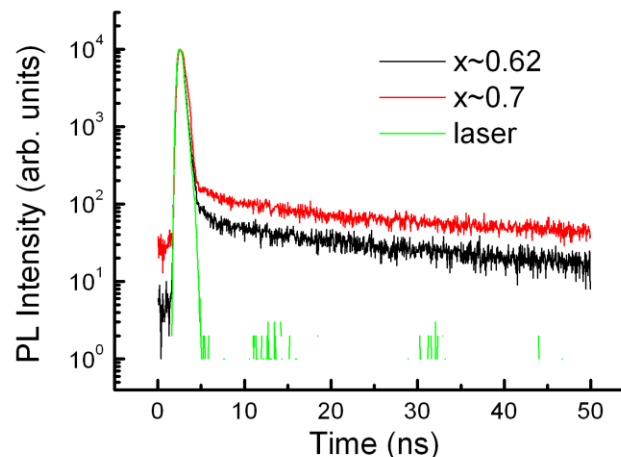


Спектры возбуждения и ФЛ



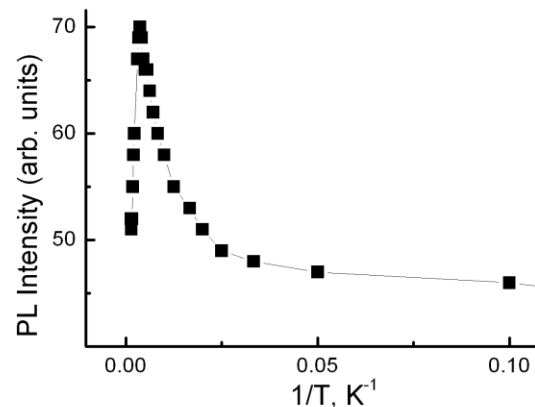
$x \sim 0.45$  : полосы ФЛ буфера AlN  
 $x \sim 0.6...0.7$ : интенсивная СЗ полоса

Кривые затухания ФЛ



$t_1 \sim 50$  пс,  $t_2 \sim 25$  нс

Температурная зависимость ФЛ образца с  $x \sim 0.62$



При повышении температуры с 5 до 750 К

1) Синий сдвиг на 0.1 эВ

2) от 5 до 270 К интенсивность выросла на величину порядка 70%,

3) при дальнейшем росте температуры интенсивность падала на 30 %.



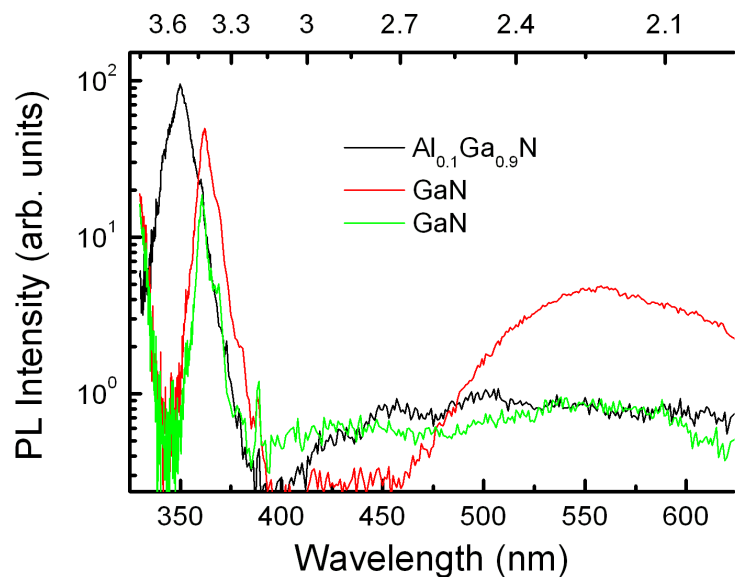
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x < 0.3$**
- ❖ Краевая ФЛ AlGaN/GaN гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.



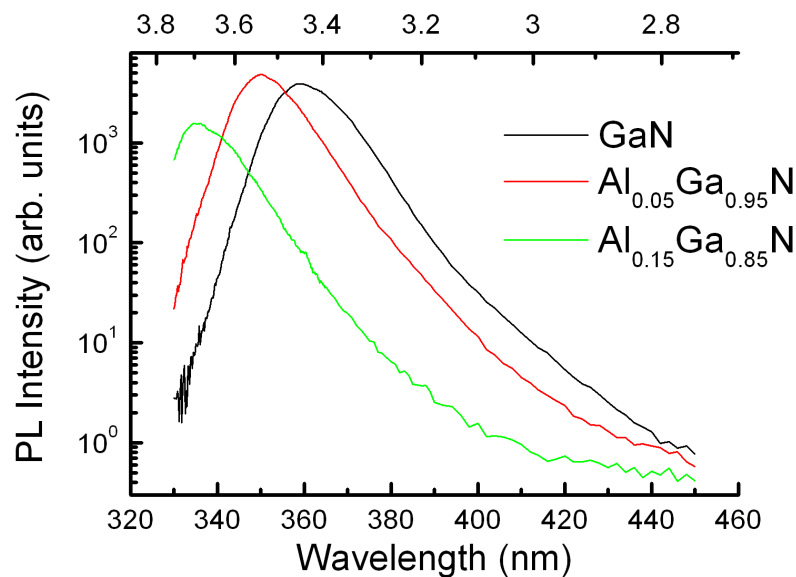
# Спектры ФЛ нелегированных и сильно легированных Si слоев AlGaN



## Нелегированные слои



## Легированные слои



T=300 K



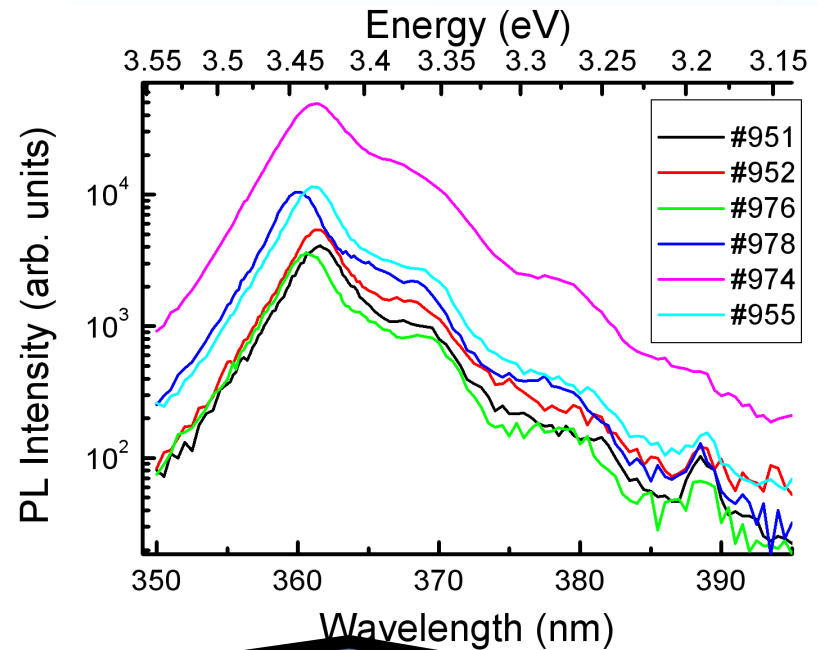
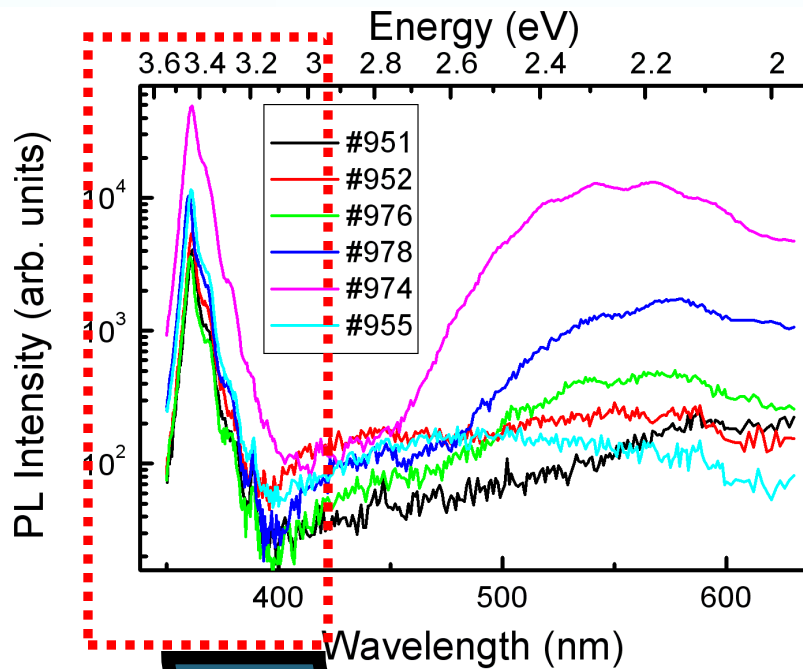
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с  $x < 0.3$

**❖ Краевая ФЛ AlGaN/GaN гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.**





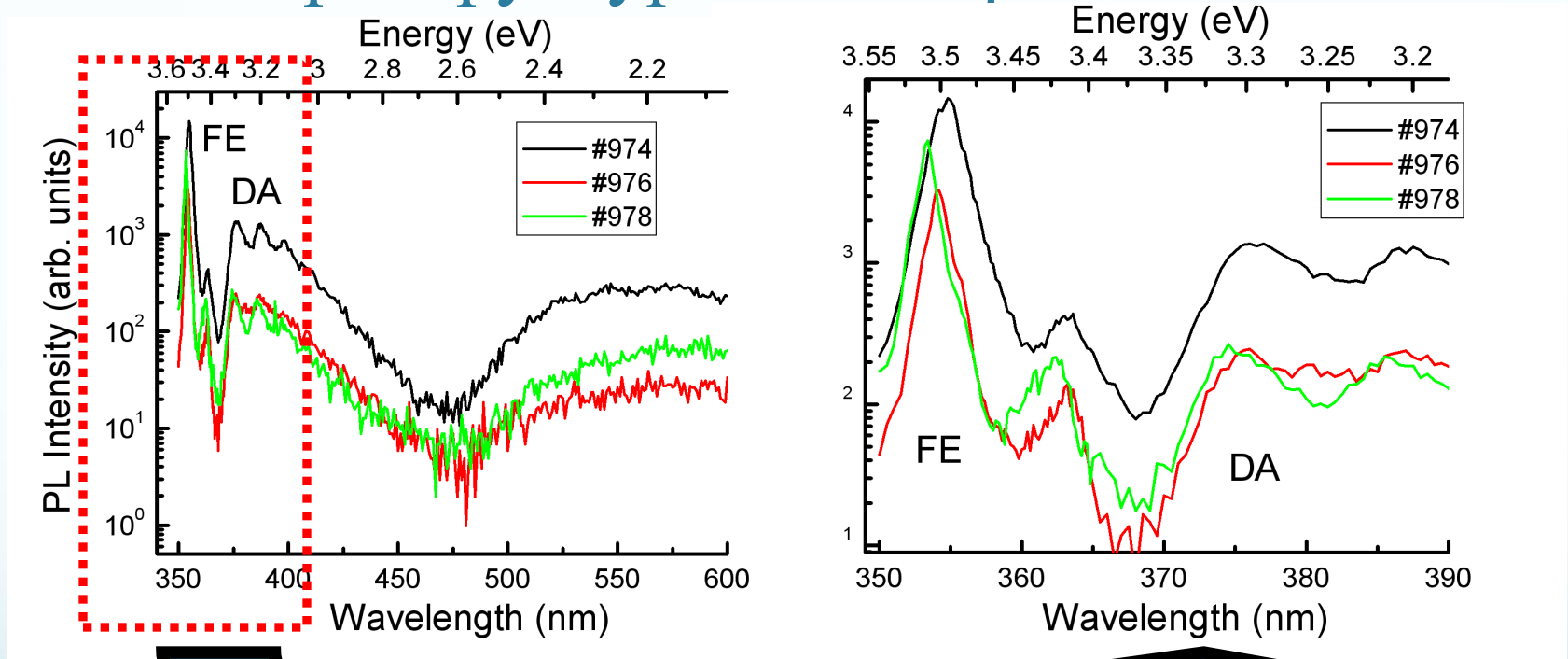
# Спектры краевой ФЛ AlGaIn/GaN, AlN/GaN гетероструктур и GaN при T=300 К.



$\Delta E \approx 5-12$  мэВ для #976 и #978 – гетероструктуры с тонким AlN барьерным слоем



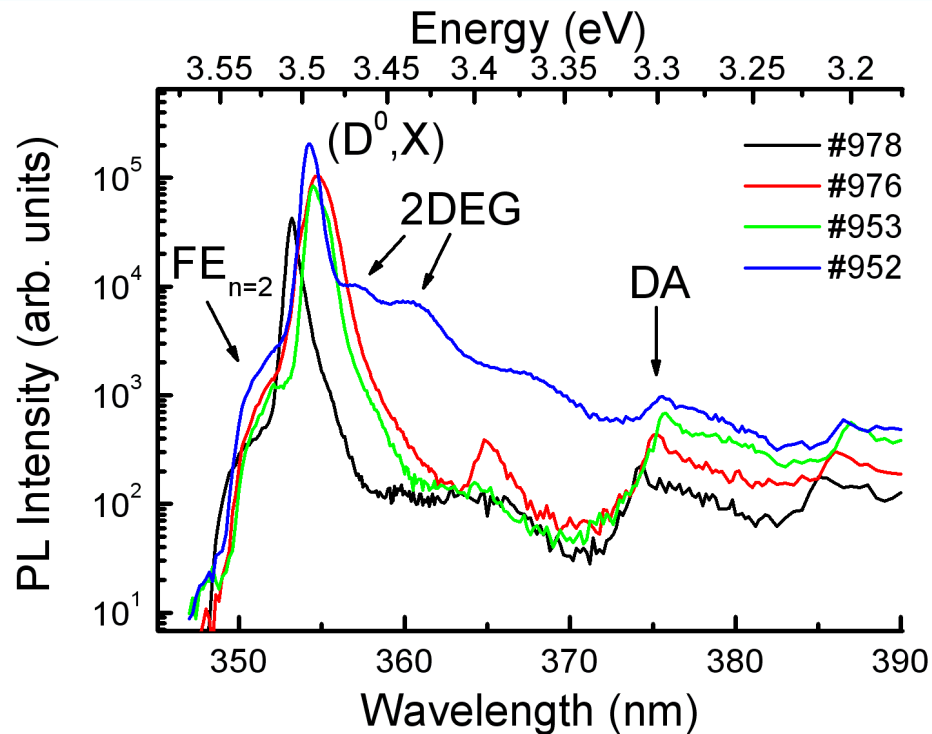
# Спектры краевой ФЛ AlN/GaN гетероструктур и GaN при T=77 К.



$E_d + E_a$  меньше примерно на 5 мэВ для 976 и 978 образцов



# Спектры краевой ФЛ AlGaIn/GaN и AlIn/GaN гетероструктур при T=5 К.



$$E_{(D,X)} - E_{DA} \approx 198 \text{ мэВ для } 952 \text{ и } 953$$
$$E_{(D,X)} - E_{DA} \approx 192 \text{ мэВ для } 976$$
$$E_{(D,X)} - E_{DA} \approx 196 \text{ мэВ для } 978$$

$$E_{(D,X)} = E_g - E_{FE} - E_{bX}$$

$$E_{DA} = E_g - (E_a + E_d) + E_{col}$$