



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

И.В. Осинных
ИФП СО РАН, НГУ
Новосибирск

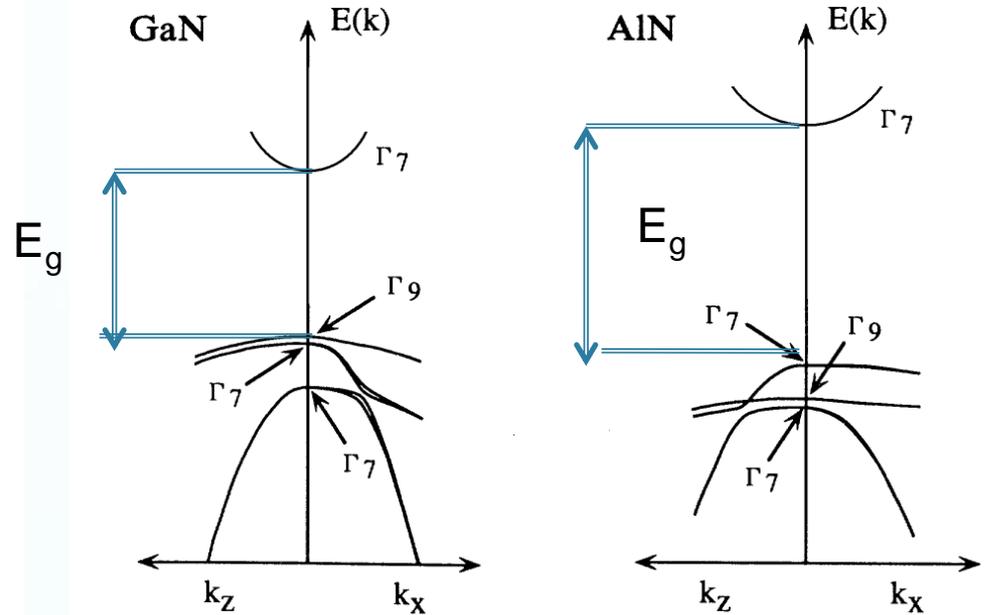
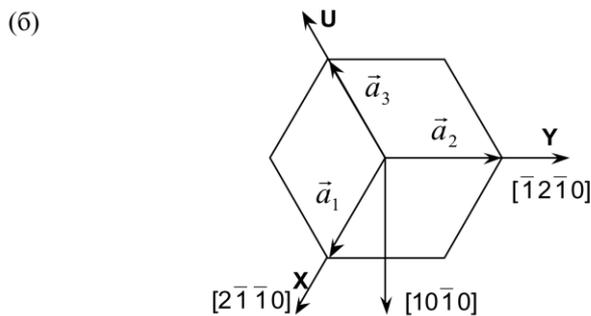
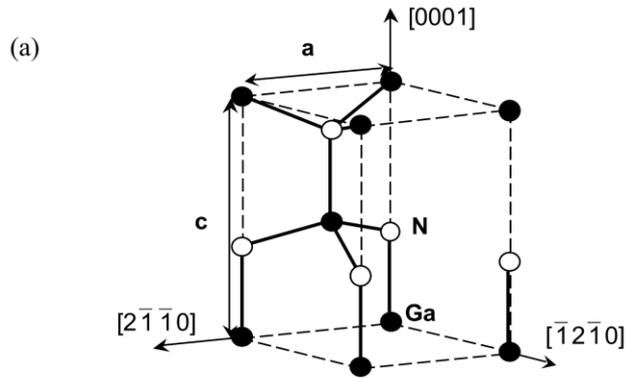


Применение нитридов металлов III группы

- ❖ 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

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

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

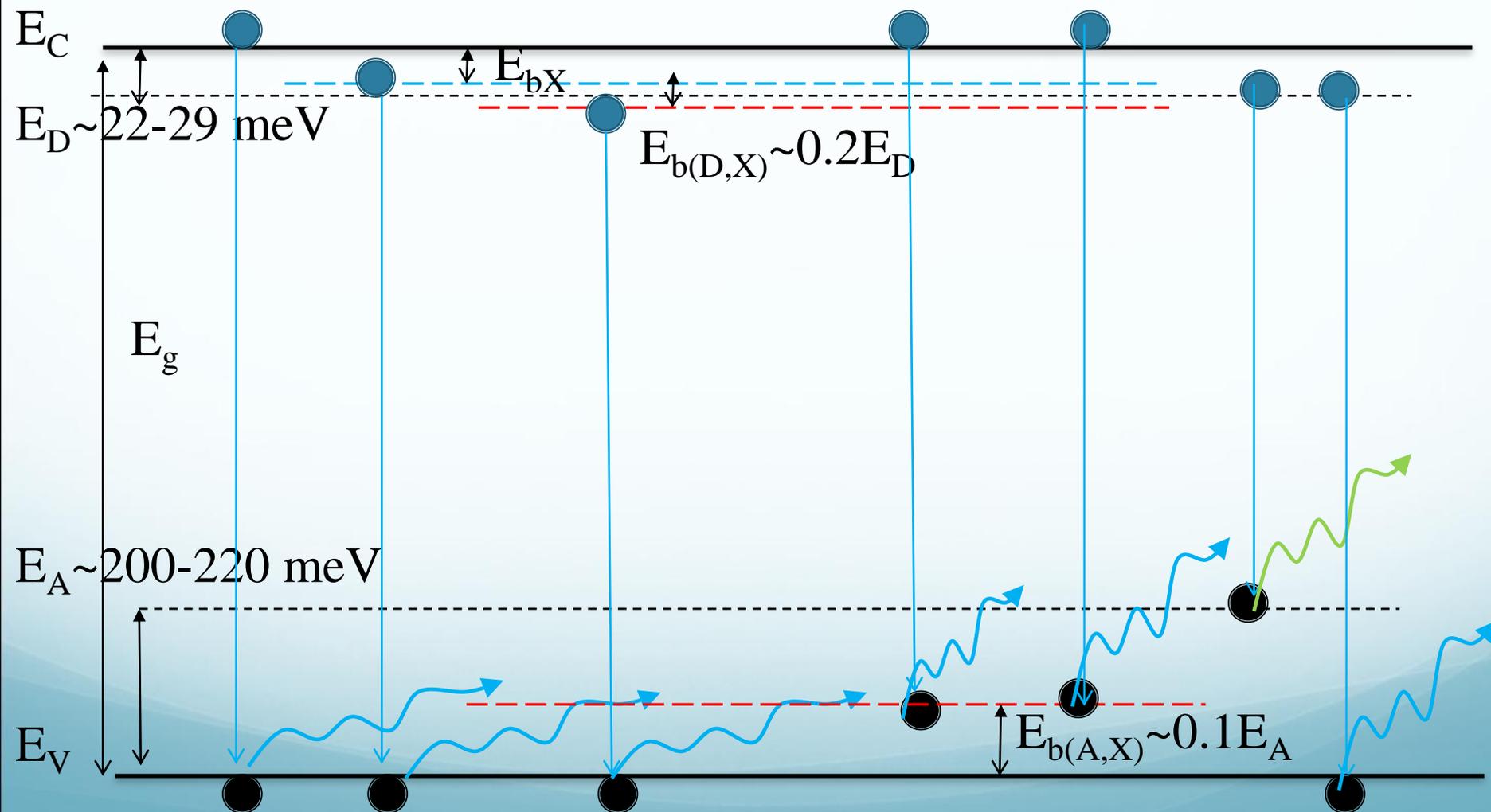
$$3.43 < E_{gAlGaN}(T = 300K) < 6.2 \text{ eV}$$

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

Параметр	AlN	GaN
a (Å)	3.112	3.189
c (Å)	4.982	5.186
u	0.382	0.377
E _g (T=0)	6.026	3.505



Доноры и акцепторы в GaN

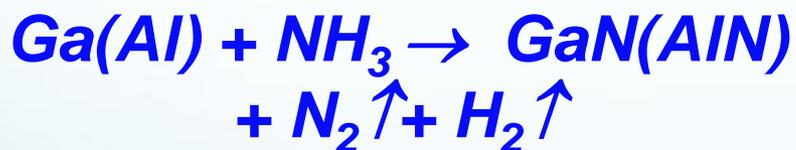




Методы эпитаксии III-нитридных гетероструктур

Молекулярно-лучевая эпитаксия

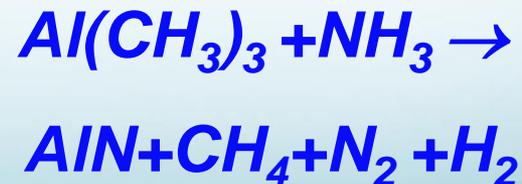
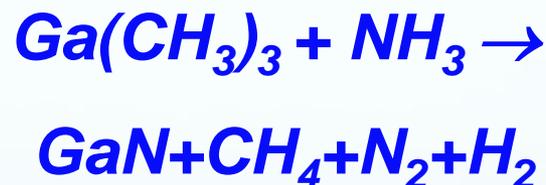
➤ Аммиачная МЛЭ



➤ рч-МЛЭ

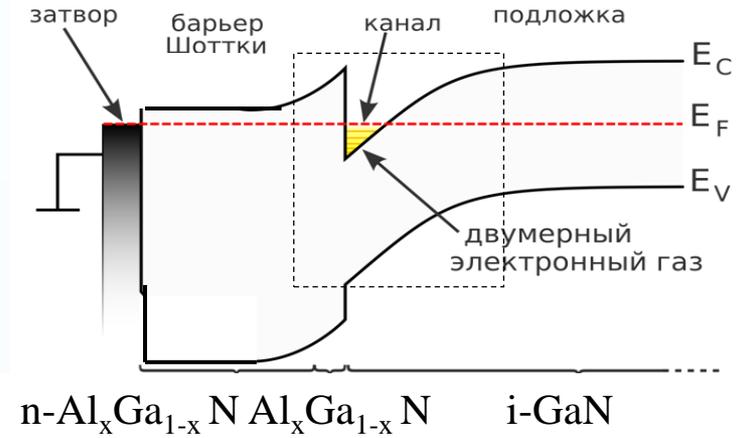
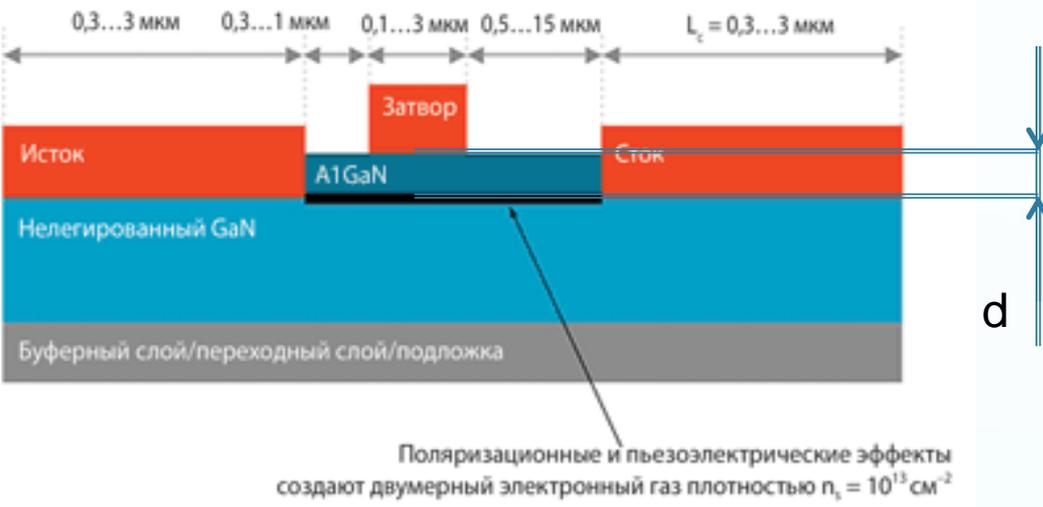


Газофазная эпитаксия





Мощные СВЧ-транзисторы



- Высокие пробивные поля 33×10^5 В/см в GaN в сравнении с 4×10^5 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 $dE_c > 0,5$ 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

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

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



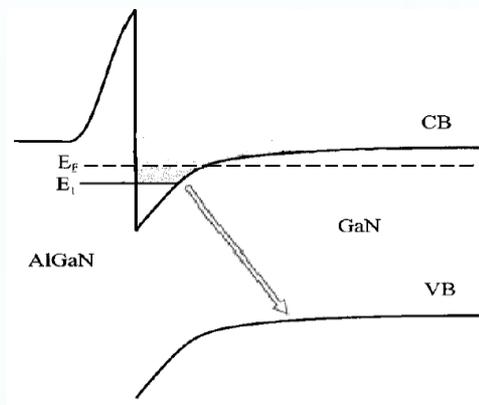
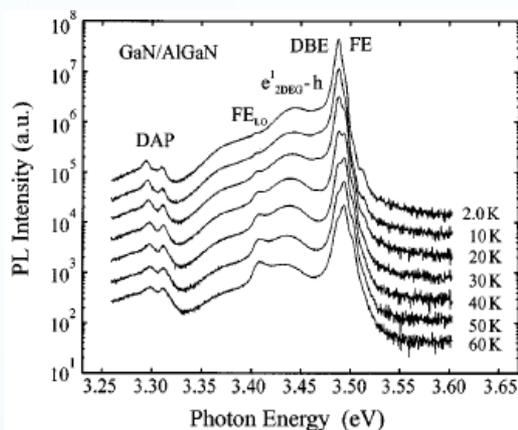
Сложности наблюдения ДЭГ



Гетероструктура



AlGaN + GaN + 2DEG



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

Разделение ДЭГ и дырок



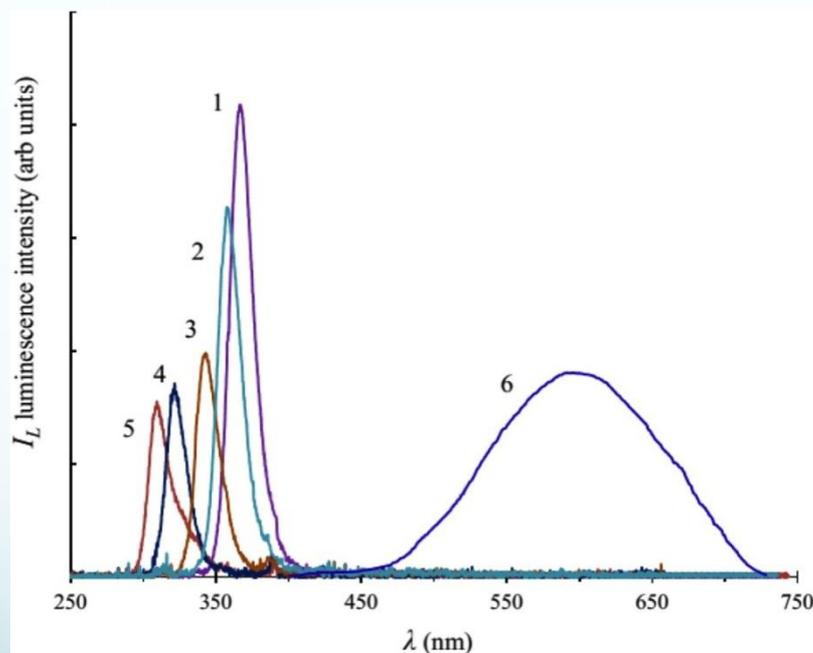
Нужна высокая мощность возбуждения



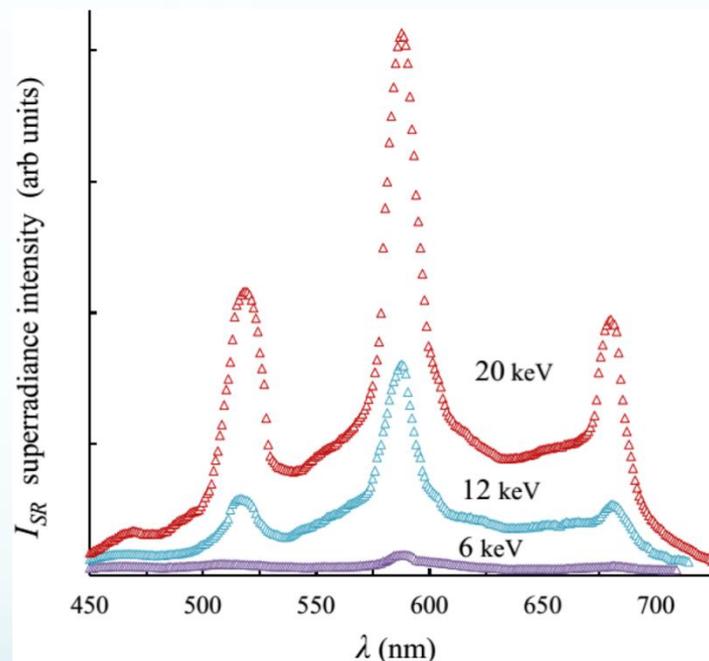
Сверхлюминесценция AlGaN ($x > 0.5$)



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.

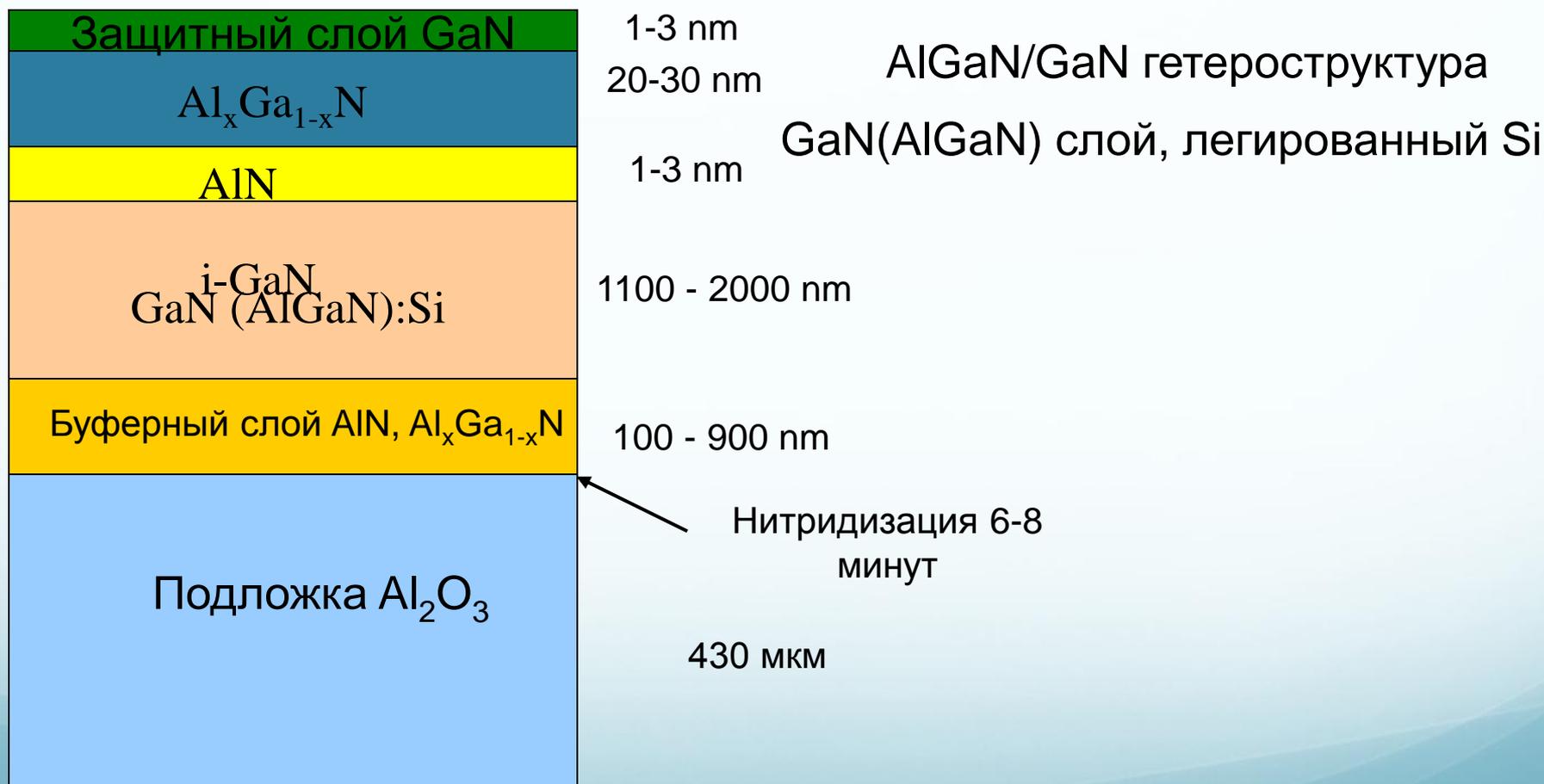


Направления работы

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

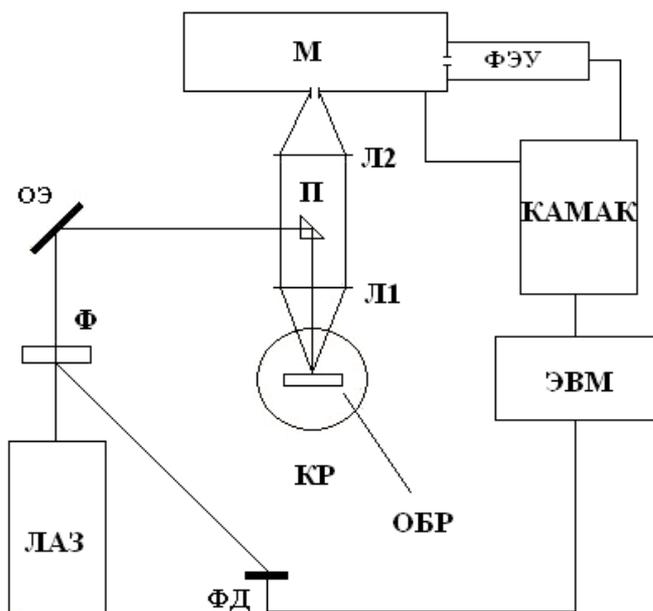


Исследуемые образцы





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

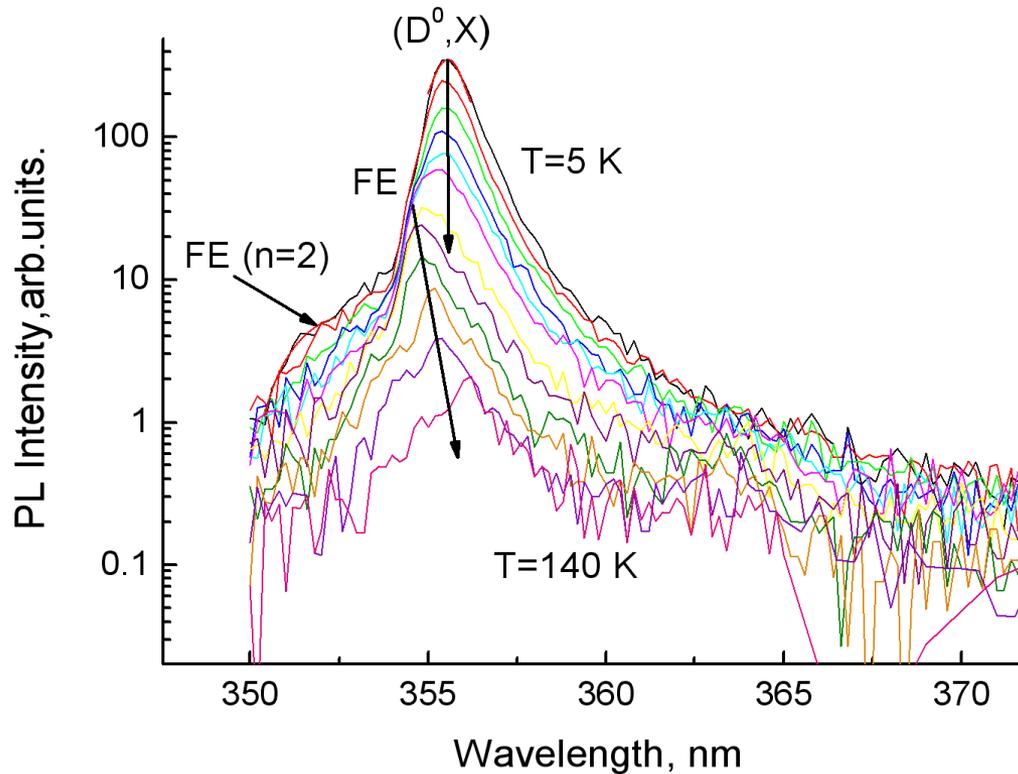


❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN

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



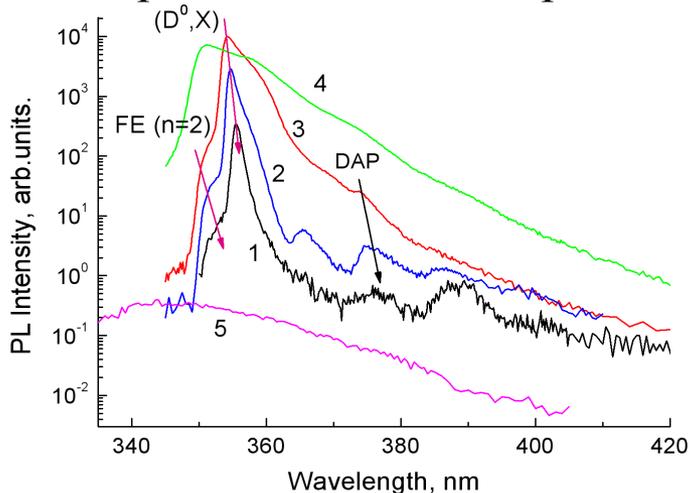
Спектры ФЛ нелегированного GaN при различных температурах



Энергия связи доноров в сильно легированных слоях GaN:Si

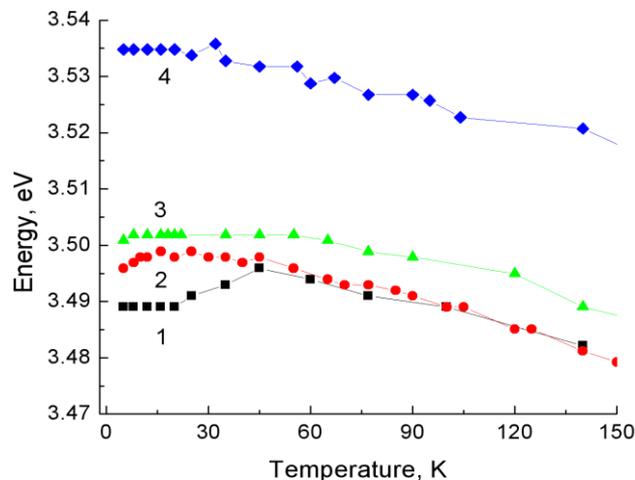


Спектры ФЛ слоев GaN при T= 5 К

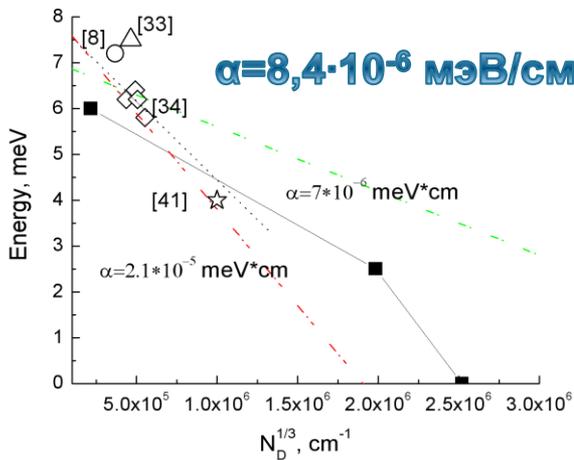


1 – i слой,
 2 - $n=3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$,
 3 - $n=1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$,
 4 - $n=5,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$,
 5 - $n=1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

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 локализуются 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**

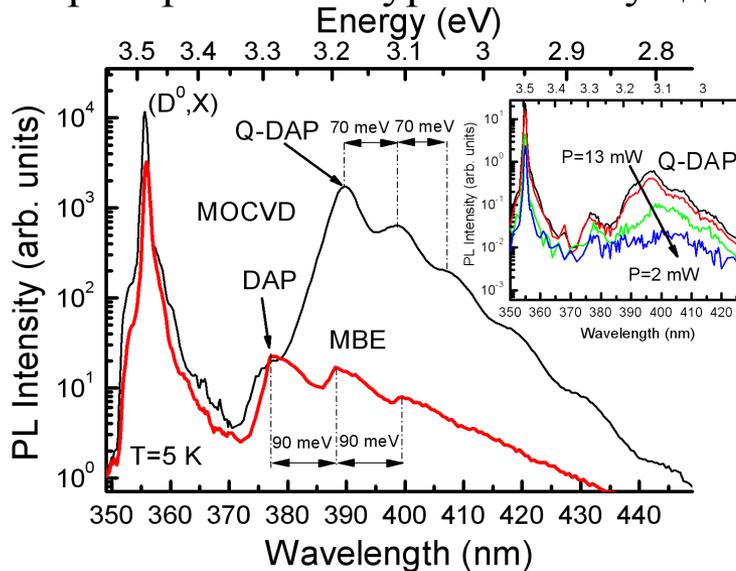
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x < 0.3$
- ❖ Краевая ФЛ AlGaN/GaN гетероструктур, выращенных методом МЛЭ с барьерным слоем разного состава.



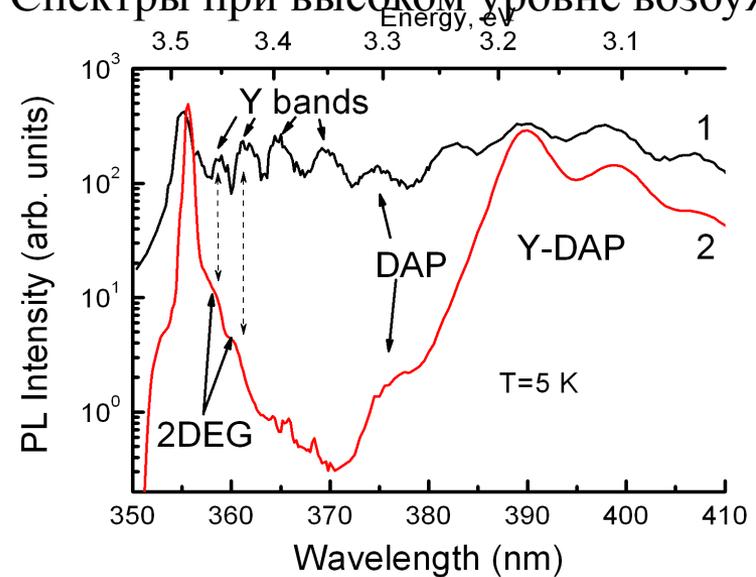
Низкотемпературные спектры ФЛ гетероструктур



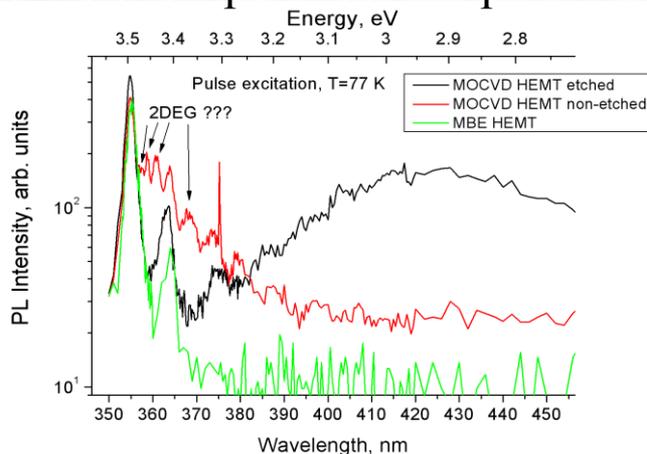
Спектры при низком уровне возбуждения



Спектры при высоком уровне возбуждения



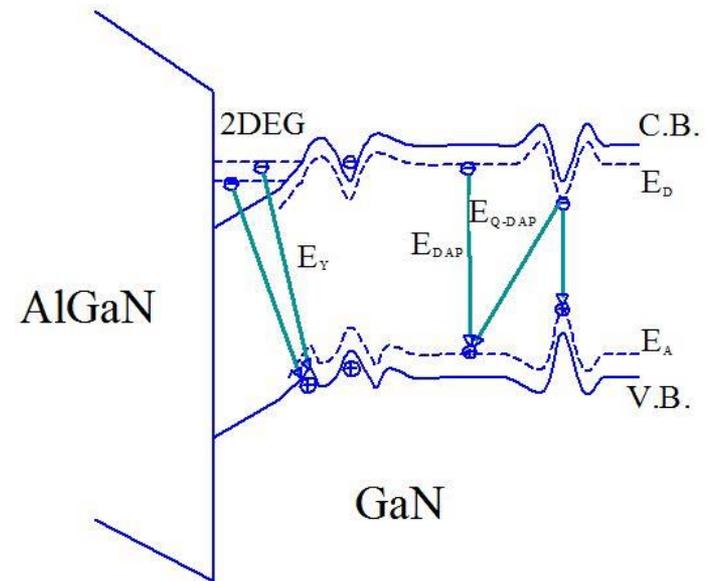
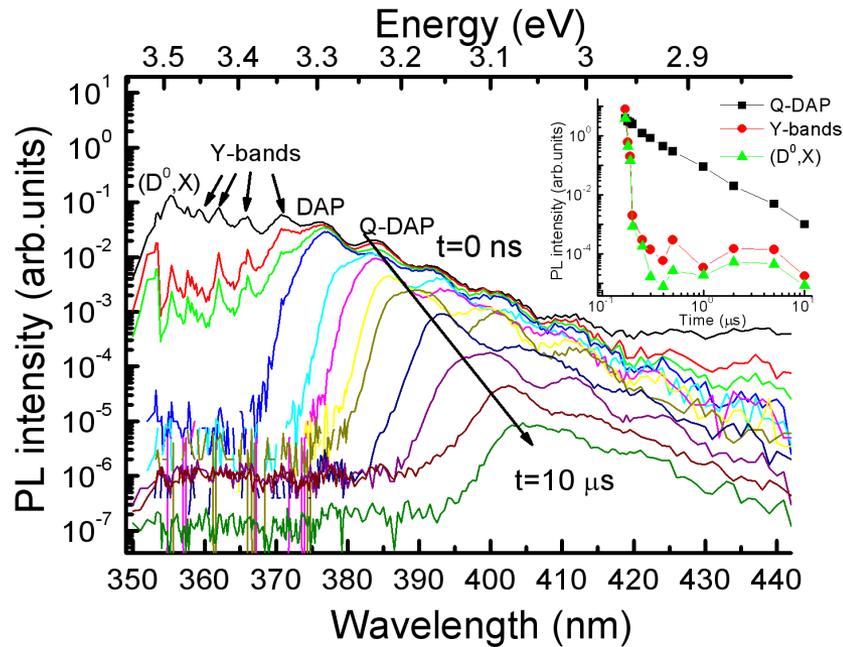
Изменение спектров после стравливания ДЭГ



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

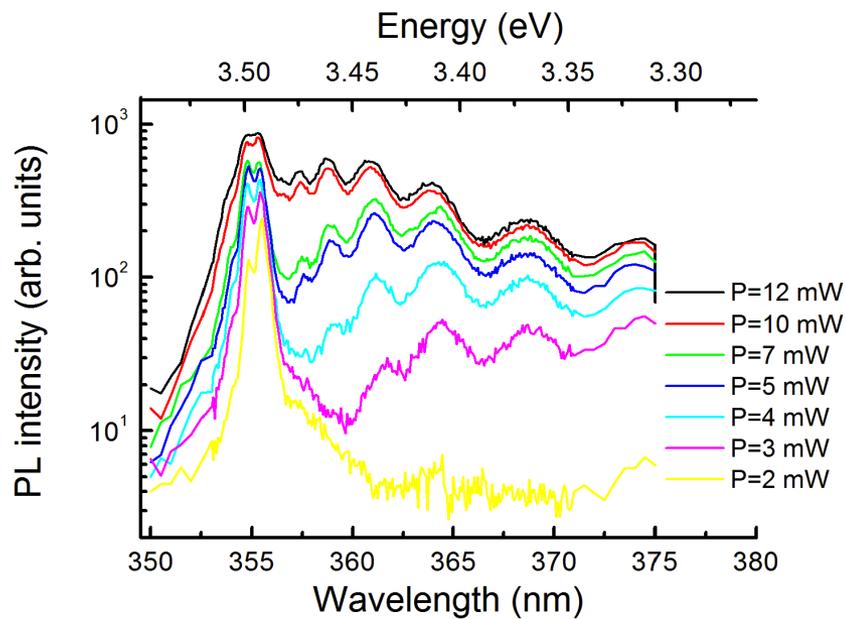
$$h\nu_{\text{DAP}} = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{\chi R}$$

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

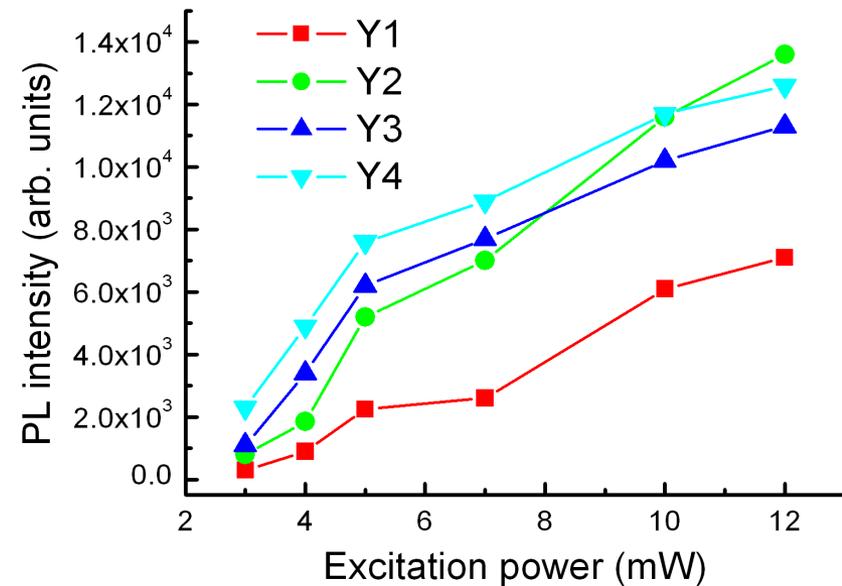


Зависимость ФЛ Y-полос от мощности возбуждения при T=5 К

Спектры ФЛ при различной мощности возбуждения



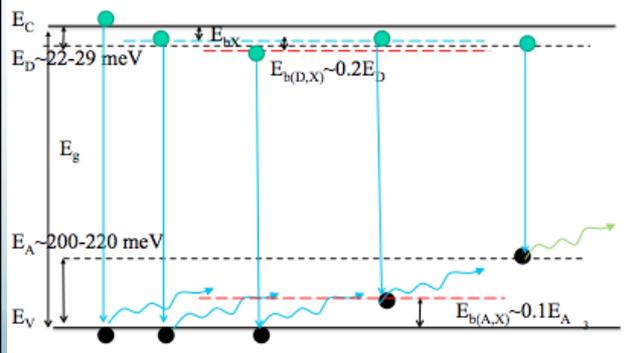
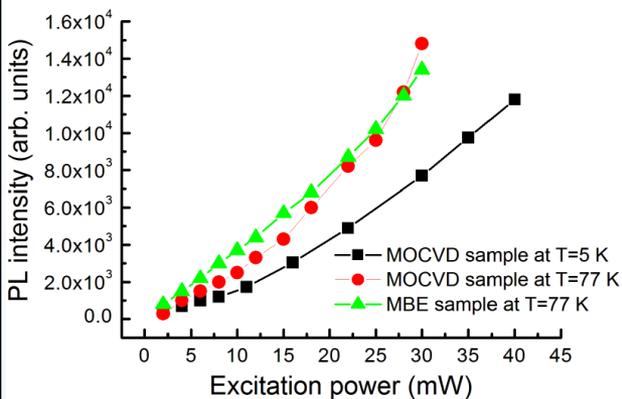
Зависимость ФЛ Y-полос от мощности возбуждения



Сначала быстрый рост, потом снижение скорости роста



Моделирование рекомбинации В AlGaIn/GaN гетероструктурах ЭКСИТОНЫ



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

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

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

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

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

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

- 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 $G=0$

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

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

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

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



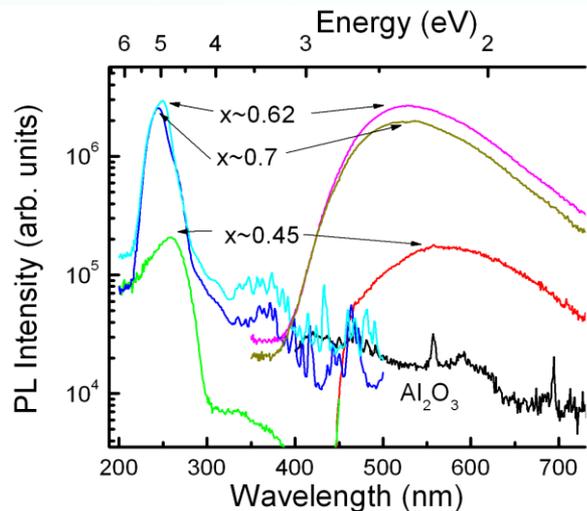
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ **Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x > 0.5$**
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x < 0.3$
- ❖ Краевая ФЛ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



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

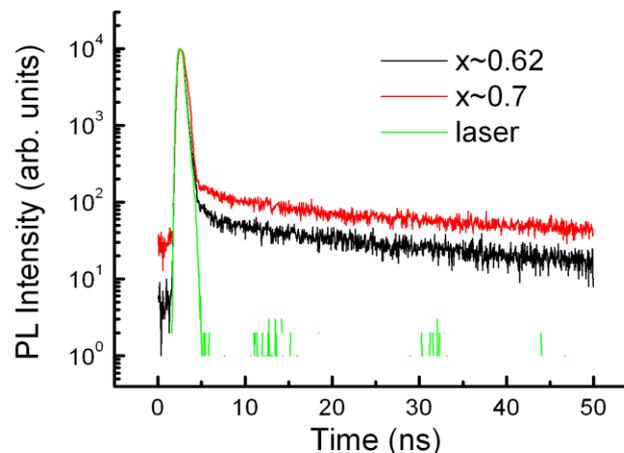


Спектры возбуждения и ФЛ



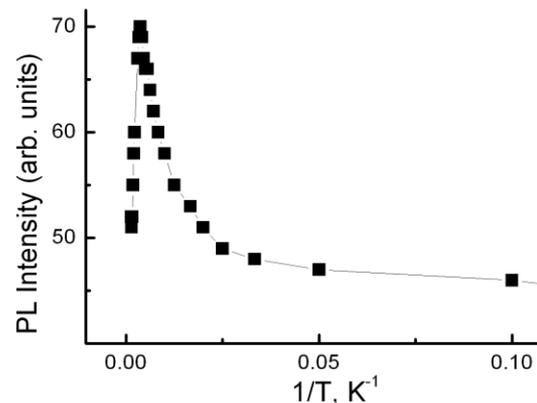
$x \sim 0.45$: полосы ФЛ буфера AlN
 $x \sim 0.6...0.7$: интенсивная СЗ полоса

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 %.



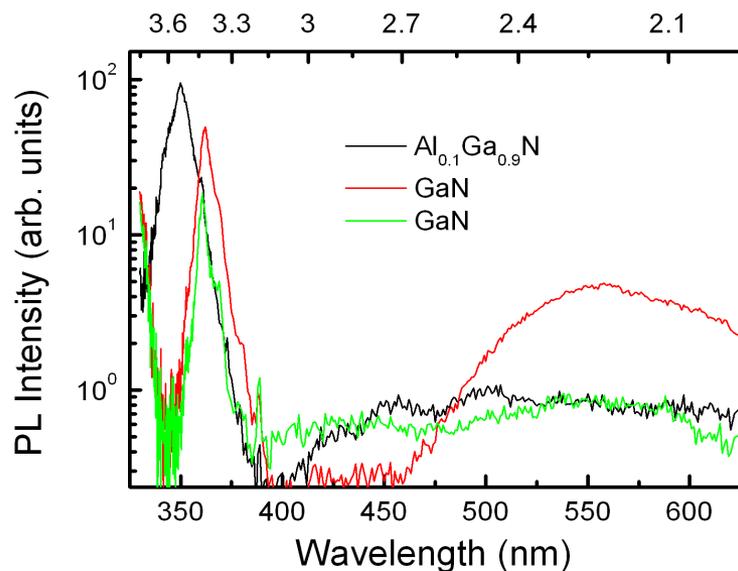
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Сине-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x < 0.3$**
- ❖ Краевая ФЛ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



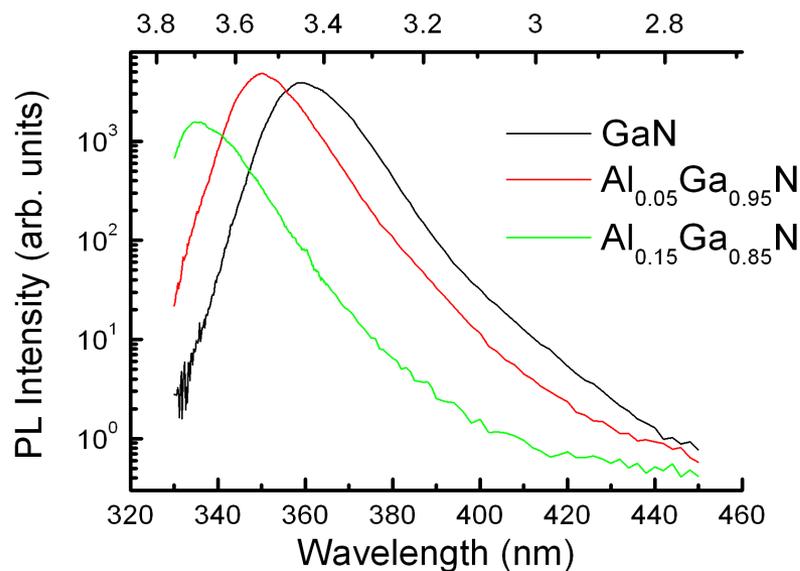
Спектры ФЛ нелегированных и сильно легированных Si слоев AlGaN



Нелегированные слои



Легированные слои



T=300 K

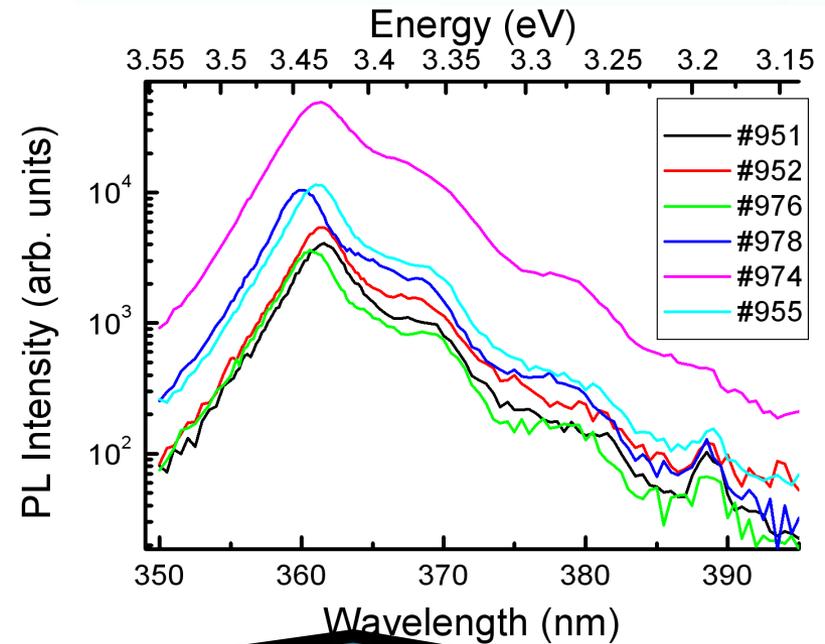
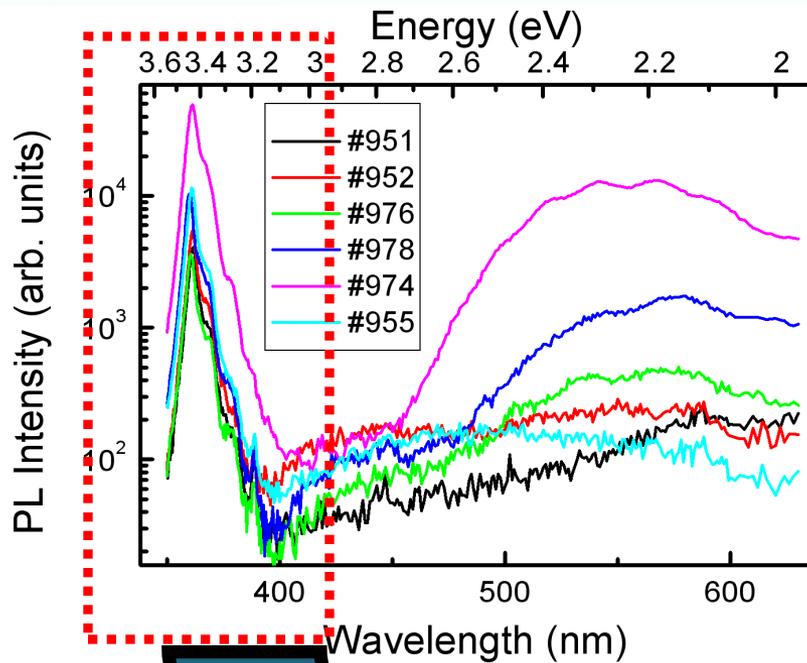


- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев GaN
- ❖ Подвижная полоса в AlGaN/GaN гетероструктурах, выращенных методом MOCVD
- ❖ Синие-зеленая полоса ФЛ слоев сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x > 0.5$
- ❖ Краевая ФЛ сильно легированных кремнием слоев AlGaN с $x < 0.3$

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



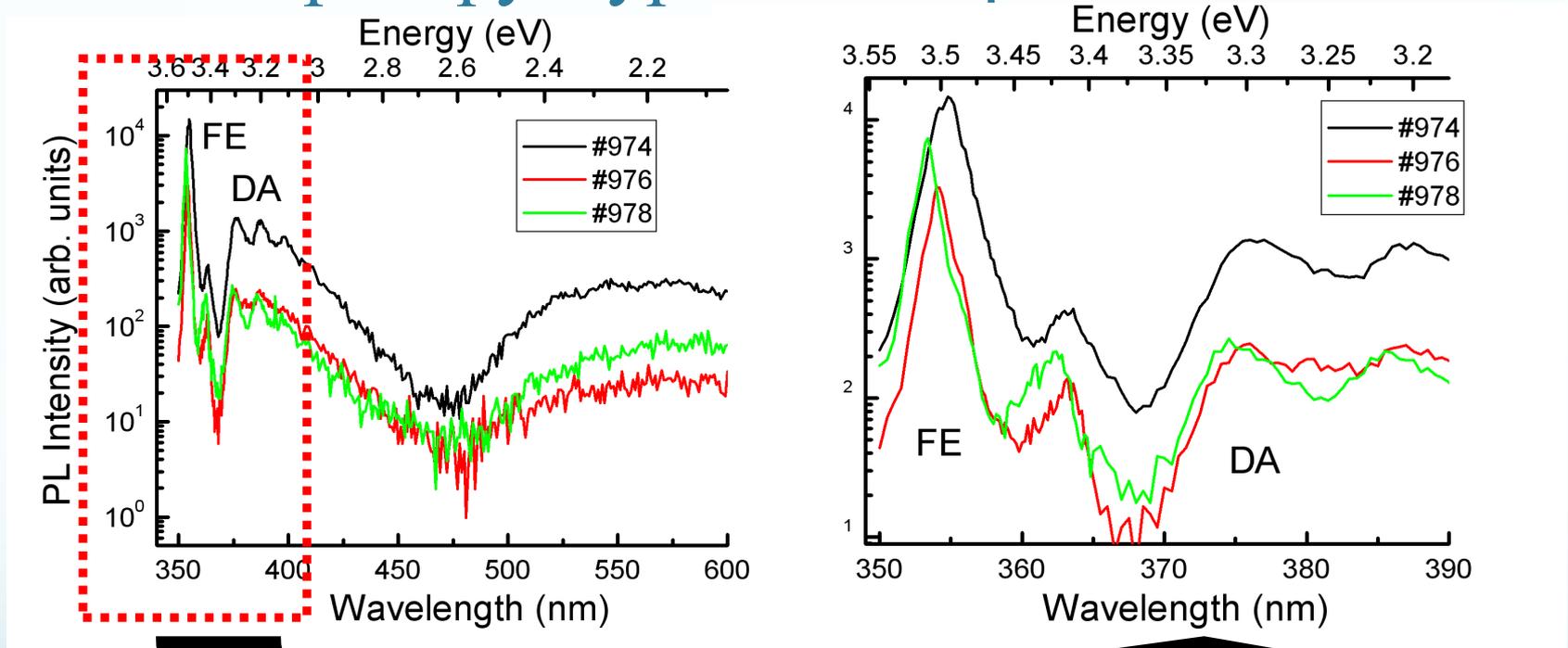
Спектры краевой ФЛ AlGaIn/GaN, AlN/GaN гетероструктур и GaN при T=300 К.



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



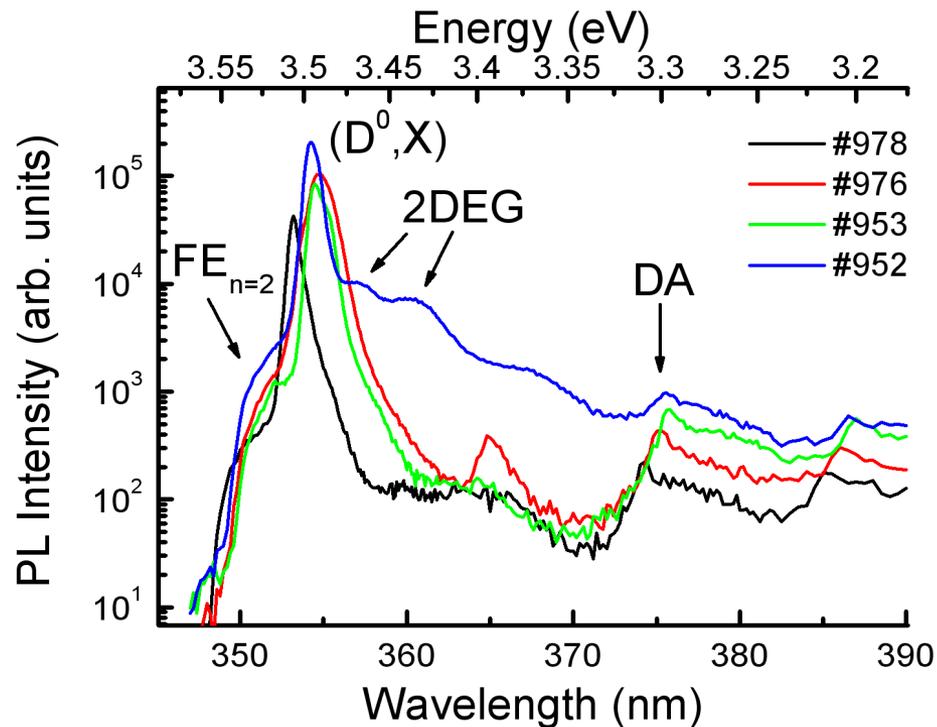
Спектры краевой ФЛ AlN/GaN гетероструктур и GaN при T=77 К.



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



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



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

$$E_{(D,X)} - E_{DA} \approx 192 \text{ мэВ для } 976$$

$$E_{(D,X)} - E_{DA} \approx 196 \text{ мэВ для } 978$$

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

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