

Использование рентгеновской дифрактометрии на различных этапах создания полупроводниковых структур

Семинар подготовлен в рамках проекта Минобрнауки России RFMEFI60714X0071

Докладчик: Юнин П.А., аспирант 4-го года обучения, м.н.с. ИФМ РАН

Научный руководитель: Дроздов Ю.Н., д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН

Bruker D8 Discover в ИФМ РАН

Фокусирующая оптика –
параболическое зеркало
Гёбеля для линейного
фокуса или
поликапиллярная линза
для точечного

Монохроматоры
2xGe(220)ACC или
4xGe(220)

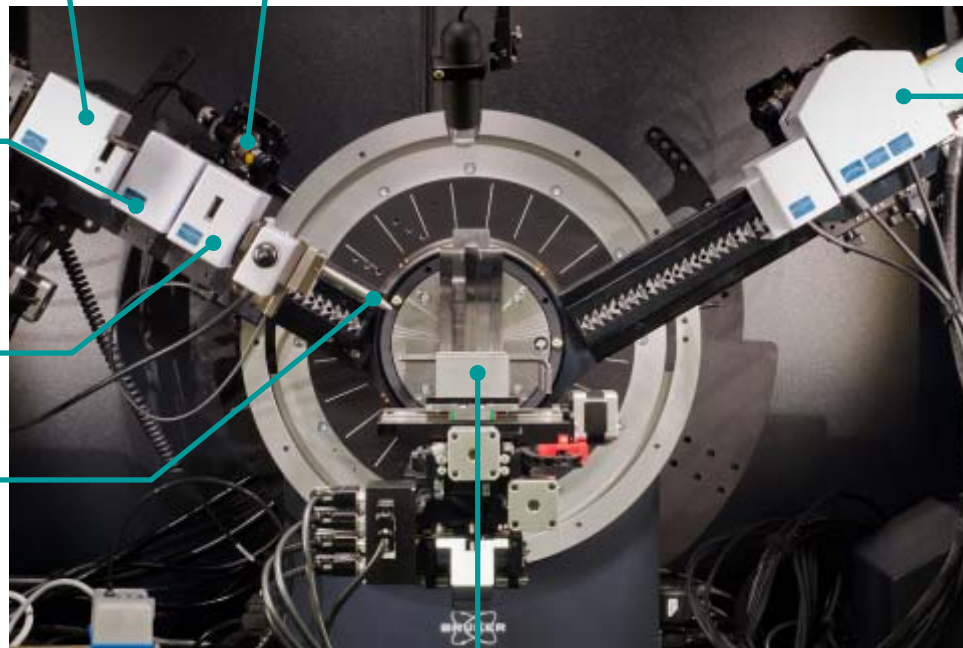
Щели 0,1 – 2 мм

Коллиматор
пучка до 0,3 мм

Система позиционирования
образца – 2 лазера и
видеокамера

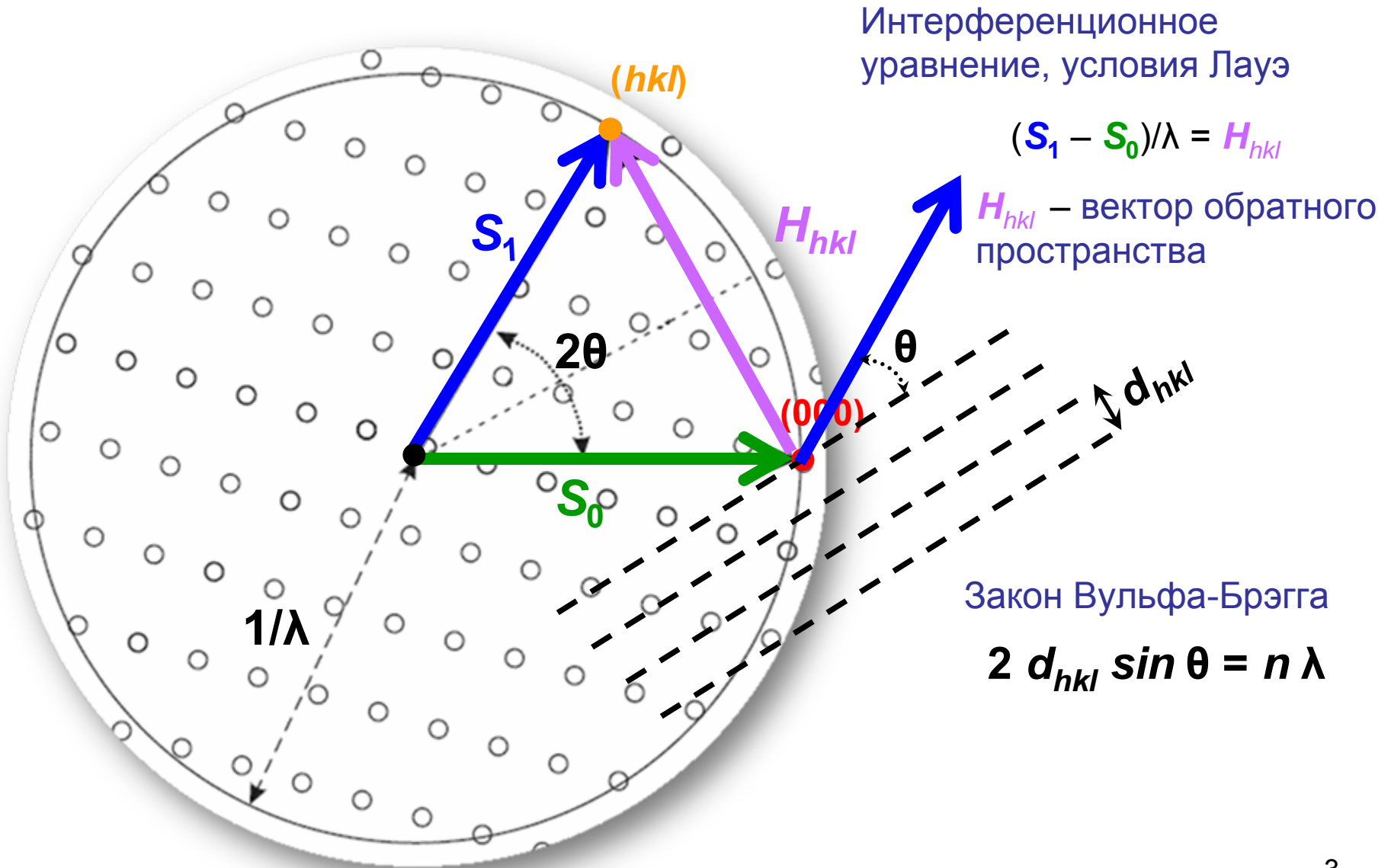
Детекторы – 0D
сцинтиляцион-
ный или PSD
2° 192 канала

Блок Pathfinder:
переменная
щель / щель
Соллера 0,2° /
анализатор
3xGe(220)



Эйлера подвеска 5 степеней свободы
+ Tilt stage 2 степени свободы +
2 степени свободы гониометра θ_1 и θ_2

Сфера Эвальда, условия Лауэ

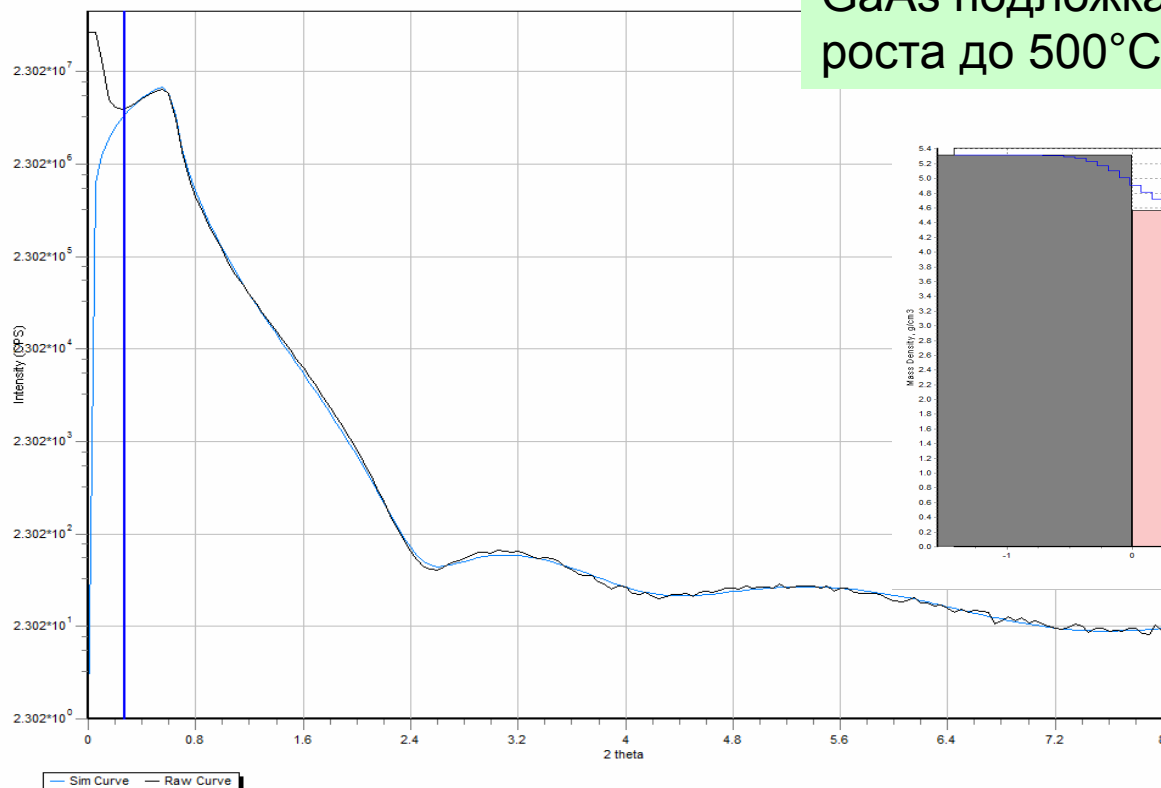


Типичные прикладные задачи метода РД

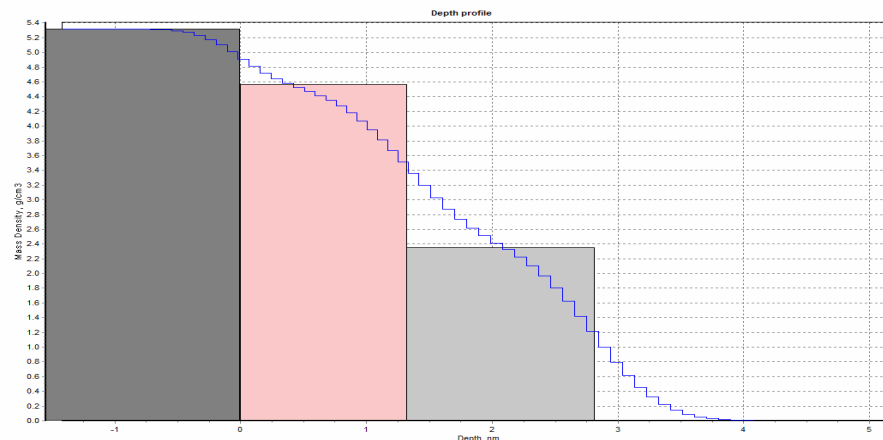
- **Подложки:** контроль кристаллического качества, ориентации
- **Эпитаксиальные слои:** кристаллическое качество, мозаичность, блочность, двойникование
- **Эпитаксиальные слои:** легирование, состав твердых растворов, толщины, упругие напряжения
- **Тонкие пленки (пассивация, диэлектрики, магнитные, сверхпроводящие):** толщины, шероховатость, плотность
- **Контроль технологических операций:** осаждения, травления контактных слоев, их отжига

Готова ли подложка для эпитаксии?

E1246

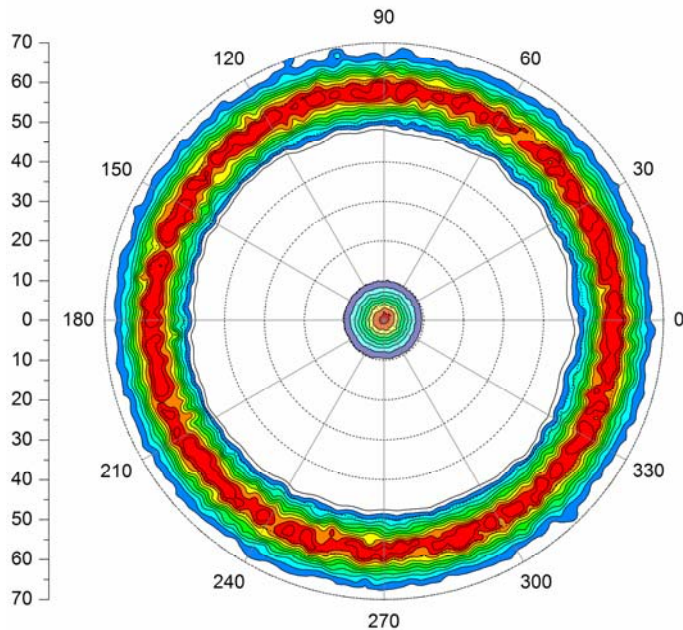


GaAs подложка после нагрева в камере роста до 500°C и извлечения в атмосферу

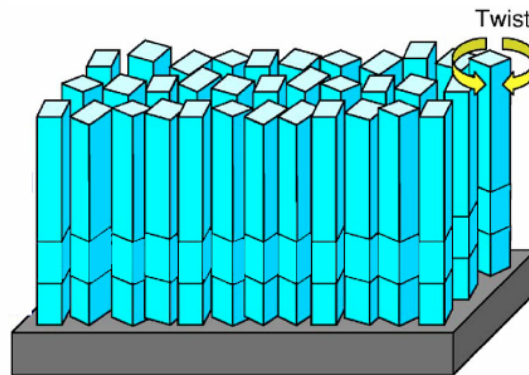


№	Material	Thickness, nm	Roughness, nm	Density, g/cm ³
1	GaAsO	1.5	0.4	2.3
2	GaAsO	1.3	0.5	4.6
SUB	GaAs	-	0.3	5.3

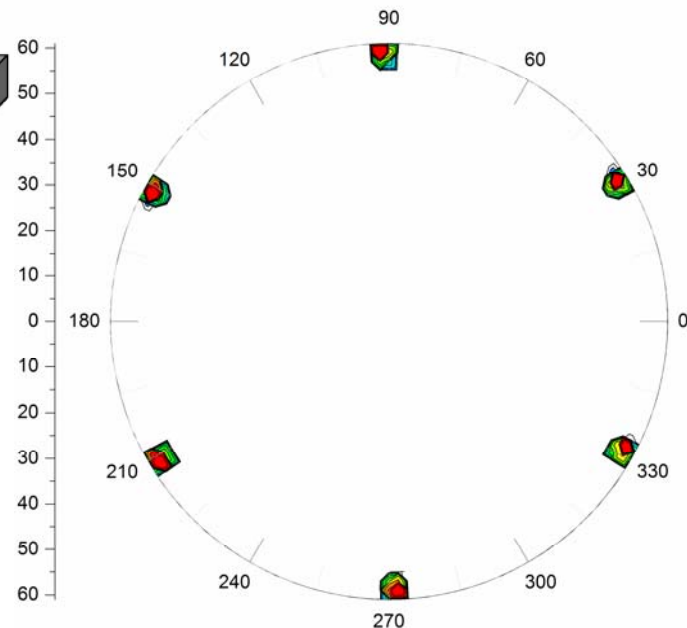
А был ли рост эпитаксиальным?



Полюсная фигура для отражений (0002) и (11-22) слоя **GaN на поликре.** Осевая текстура (0001) с углом разориентации оси (001) $\Delta\omega = 10^\circ$ и изотропным распределением ориентаций (10-10) и (01-10) в плоскости

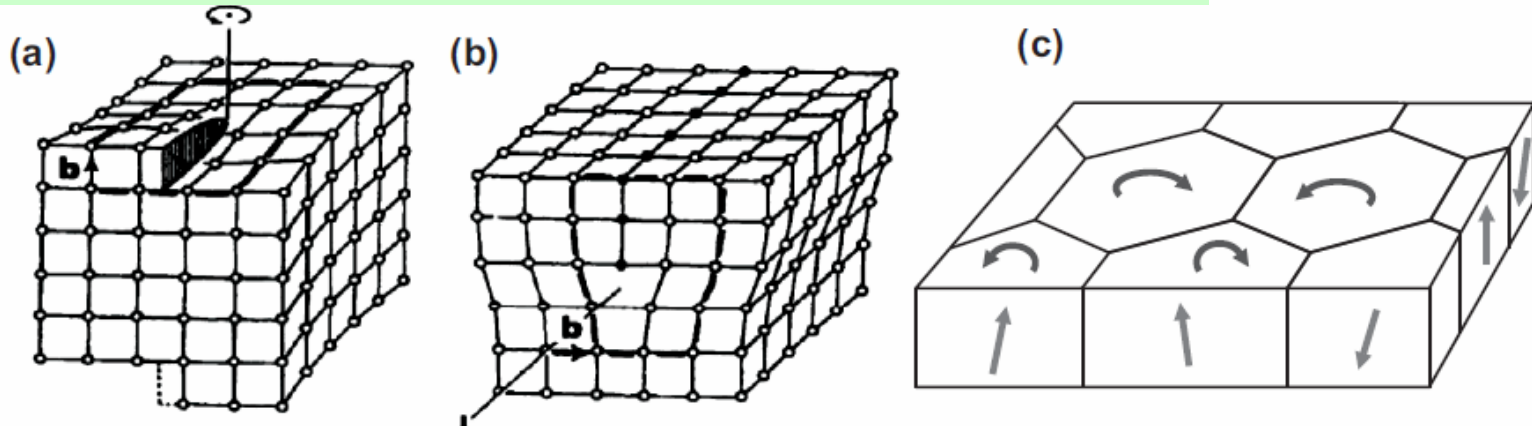


Полюсная фигура для отражения (11-22) эпитаксиального слоя **GaN на сапфире** – видно 6 пиков, появляющихся через 60° по углу ϕ , для GaN(0004) $\Delta\omega = 0.2^\circ$

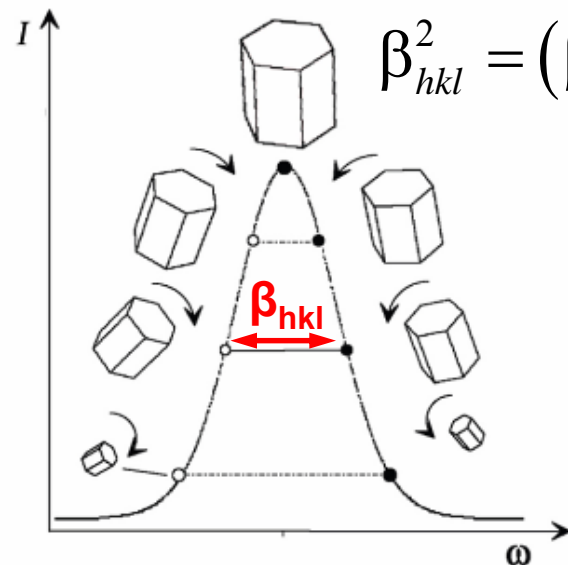


Контроль кристаллического качества слоев: мозаичный кристалл

Краевые и винтовые дислокации в мозаичном кристалле



Разориентация блоков между собой – tilt и twist компоненты



$$\beta_{hkl}^2 = (\beta_{tilt} \cos \psi)^2 + (\beta_{twist} \sin \psi)^2$$

$$\beta_{tilt} = \beta_{0004}, \psi(0004) = 0$$

$$\beta_{twist} = \sqrt{\frac{\beta_{10-12}^2 - \beta_{0004}^2 \cos^2 \psi}{\sin^2 \psi}}, \psi(10-12) = 43^\circ$$

$$N_{screw}^{edge} = \frac{\beta_{tilt}^{twist2}}{2\pi \ln(2) b_{screw}^{edge2}}$$

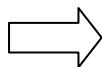
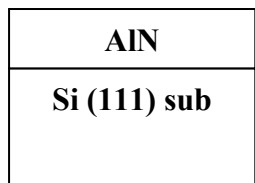
Для GaN

$$b_{screw} = c = 5.185 \text{ \AA}$$

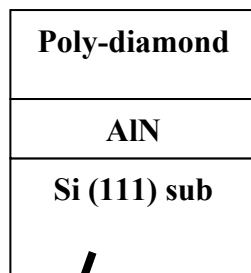
$$b_{edge} = a = 3.189 \text{ \AA}$$

Контроль кристаллического качества GaN/алмаз

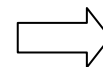
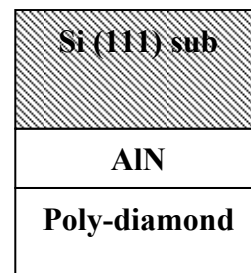
1



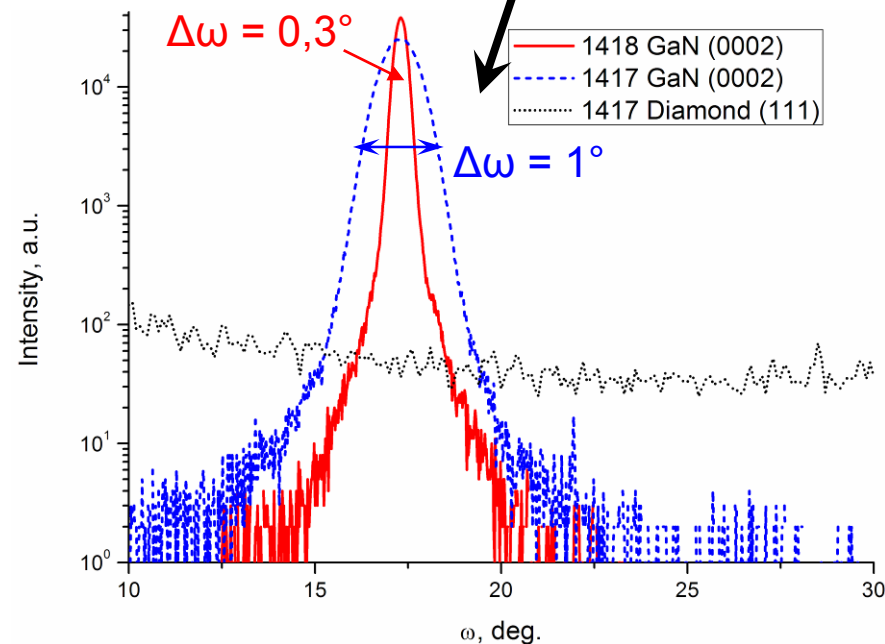
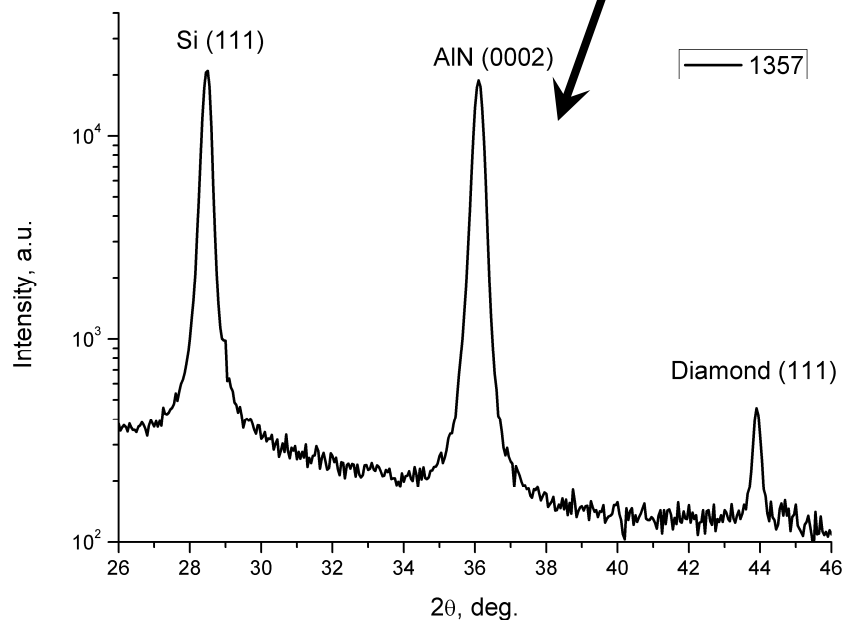
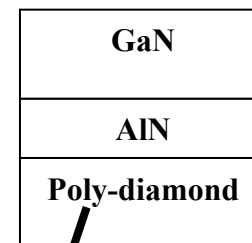
2



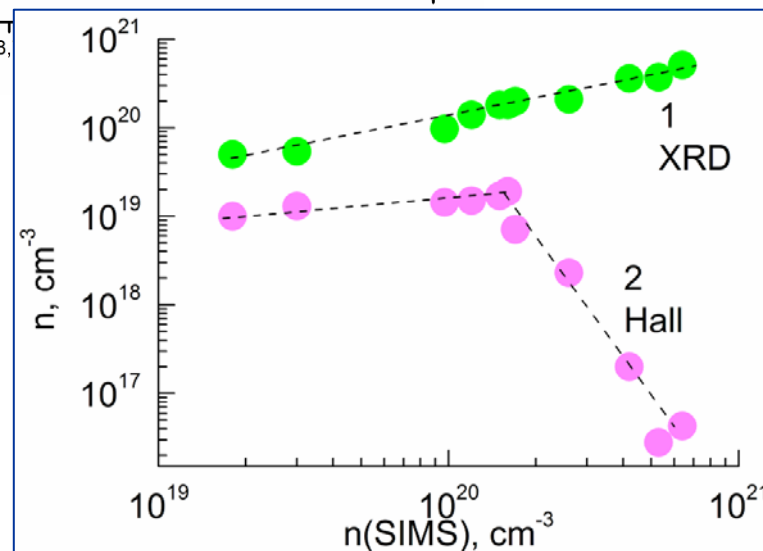
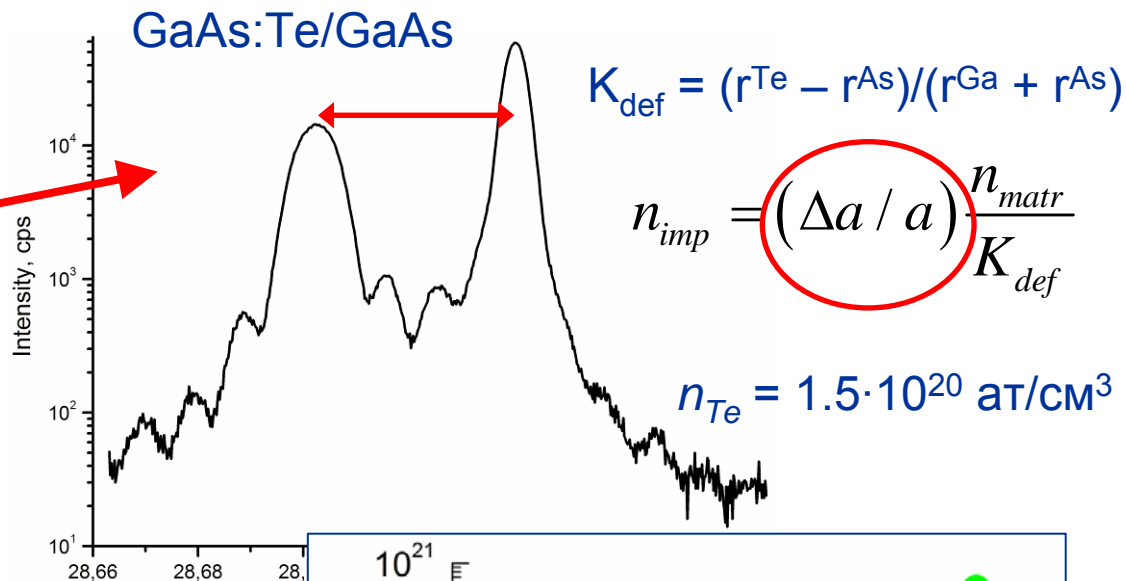
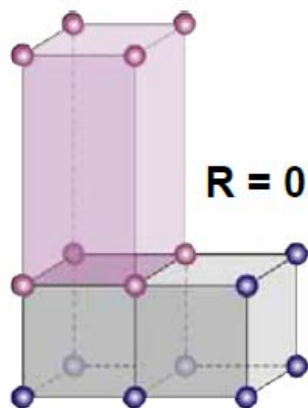
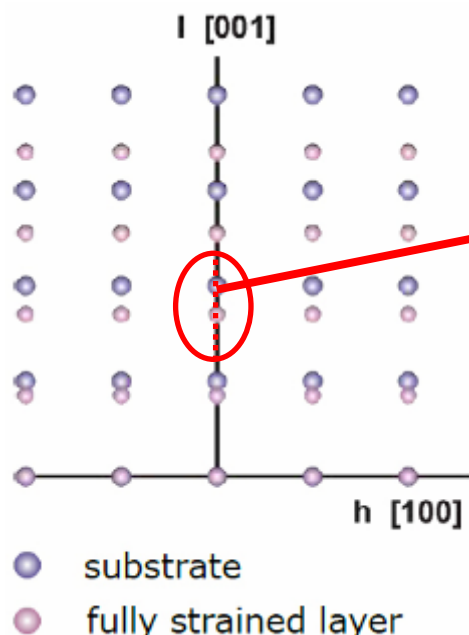
3



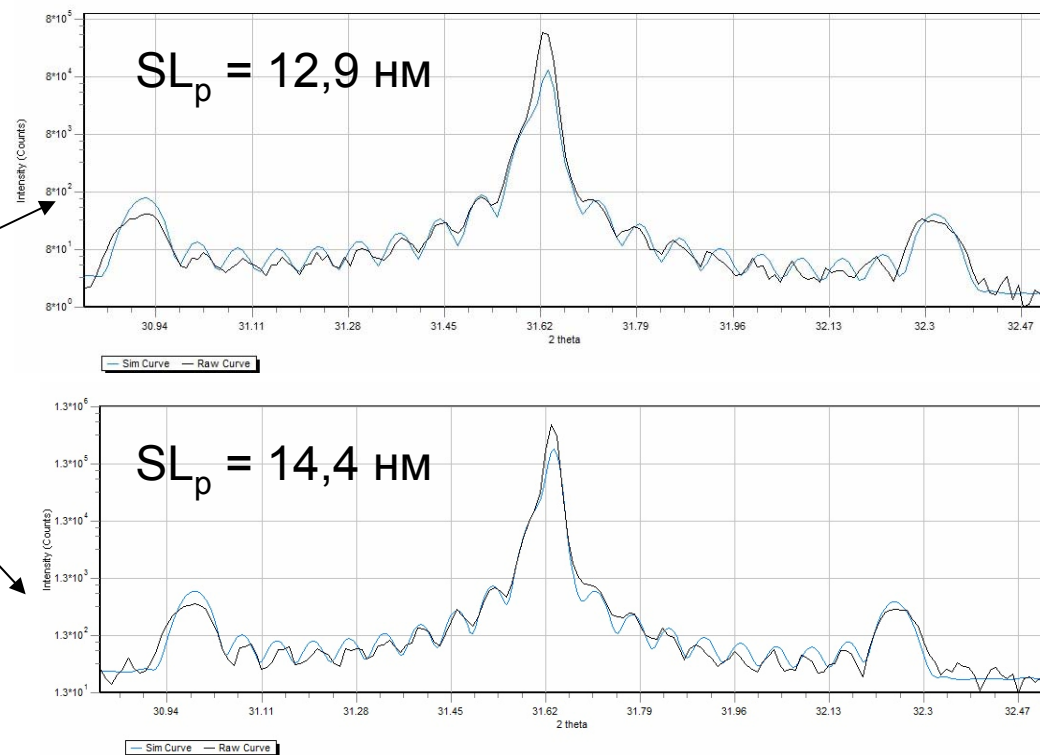
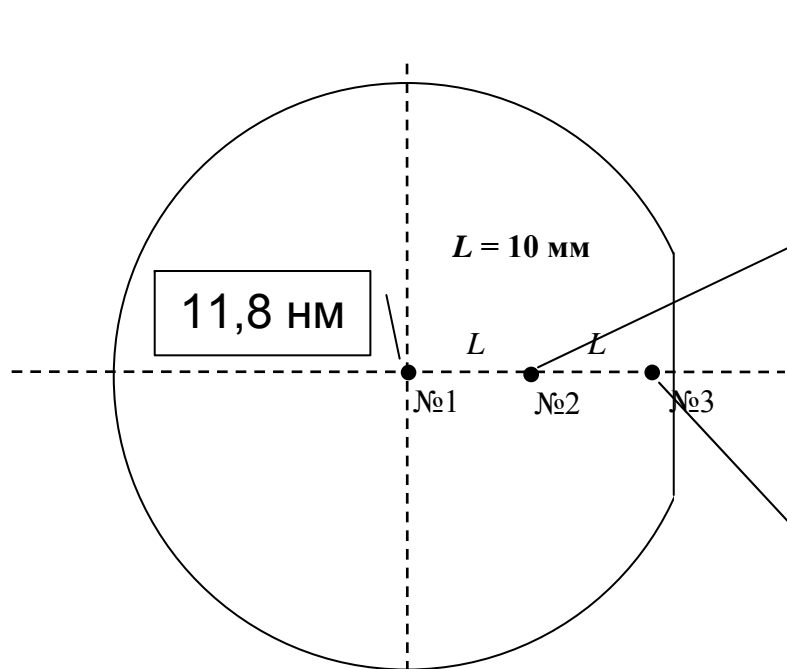
4



Анализ гомоэпитаксиальных слоев GaAs:Te



Гетероэпитаксиальные структуры: GaAs/AlGaAs сверхрешетка



Спектр сателлитных пиков вблизи отражения (002) GaAs для сверхрешетки $10 \times [\text{AlGaAs}/\text{GaAs}]$. Спектры дифракции регистрировались еще в 2 точках – с отступом 10 мм от центра к краю с базовым срезом. К краю структуры период СР растет.

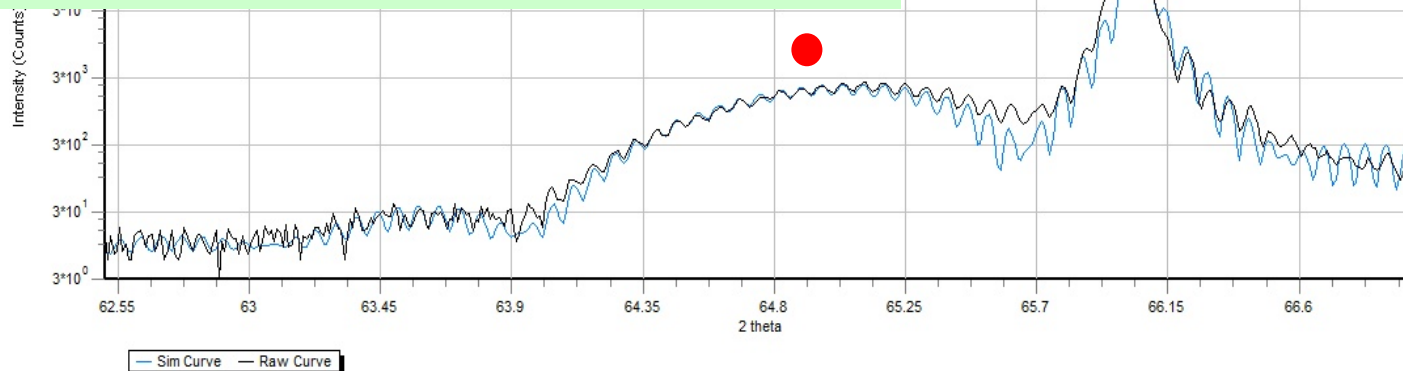
Гетероэпитаксиальные структуры: InGaAs квантовая яма

InGaAs слой

положение пика – состав слоя (13%)

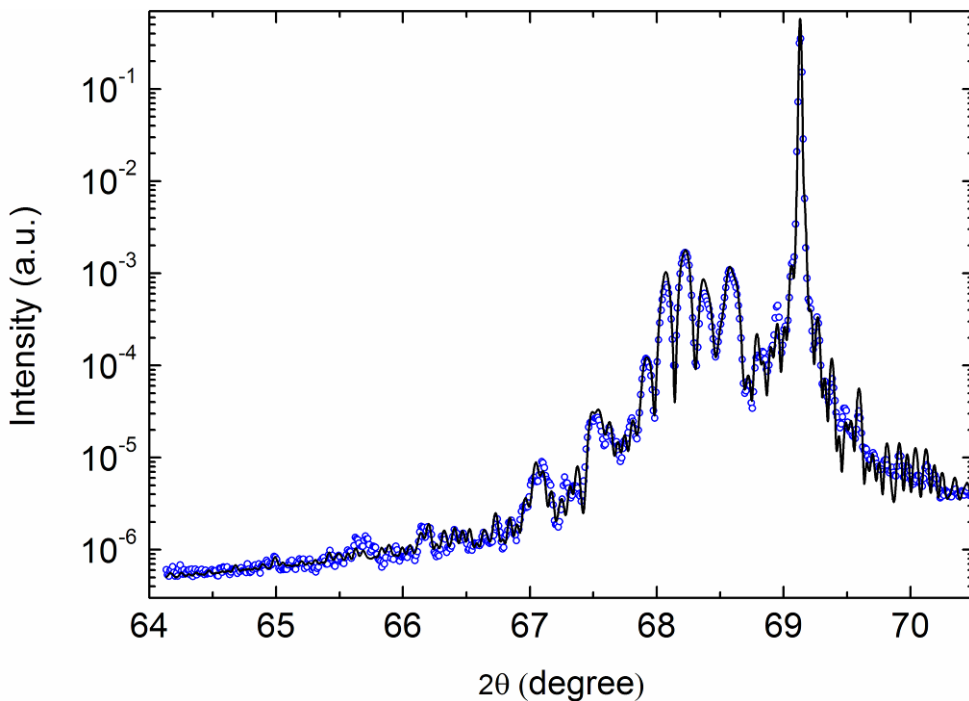
ширина и осцилляции – толщина (12 нм)

GaAs подложка +
верхние слои (147 нм)



Слой материала InGaAs дает дополнительный сдвиг фаз при дифракции. Формируется отдельный пик по положению и ширине которого определяют состав и толщину слоя InGaAs. Частые осцилляции возникают от вышележащих слоев. По их частоте определяется суммарная толщина вышележащих AlGaAs и GaAs слоев. Наличие осцилляций говорит об отсутствии релаксации и свидетельствует о хорошем качестве структуры и резкости гетеропереходов.

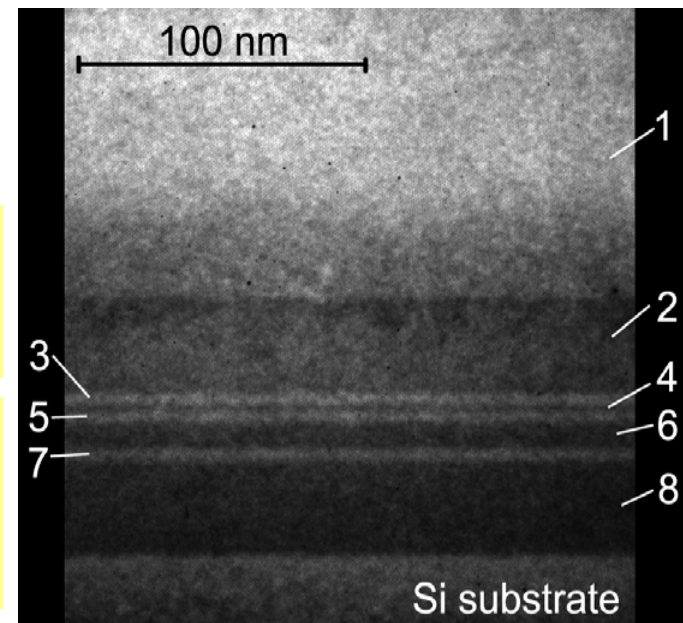
Гетероэпитаксиальные SiGe структуры резонансно-туннельных диодов



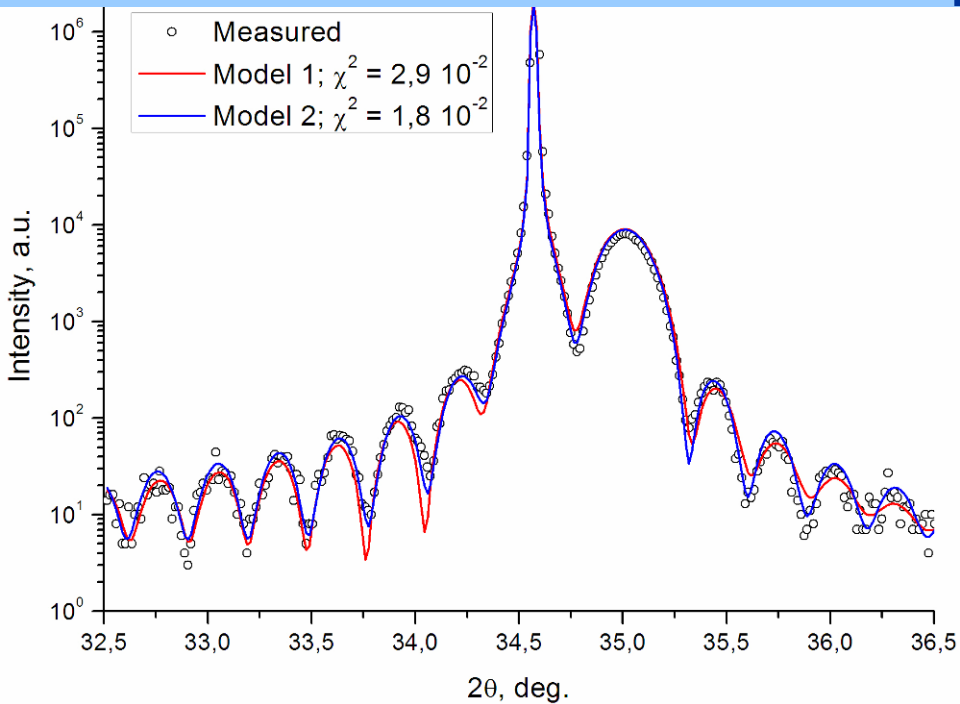
№	$h, \pm 1 \text{ нм}$	$x \text{ Ge}, \pm 0,5 \%$
1	98.8	0
2	31.4	14.4
3	3.7	0
4	2.1	14.4
5	3.7	0
6	8.8	14.4
7	3.7	0
8	31.4	14.4

Юнин П.А., Дроздов Ю.Н., Дроздов М.Н., Новиков А.В., Юрасов Д.В., Захаров Н.Д., Королев С.А. «Использование связанных параметров в рентгенодифракционном анализе многослойных структур с учетом времени роста слоев», ЖТФ, 2014, т. 84, вып. 3, с. 94-98

R.K. Zhukavin, N.A. Bekin, D.N. Lobanov, Y.N. Drozdov, P.A. Yunin, M.N. Drozdov, D.A. Pryakhin, E.D. Chhalo, D.V. Kozlov, A.V. Novikov, V.N. Shastin, Coulomb centers assisted tunneling in a δ -doped triple barrier SiGe heterostructure, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 57 (2014) 42-46.

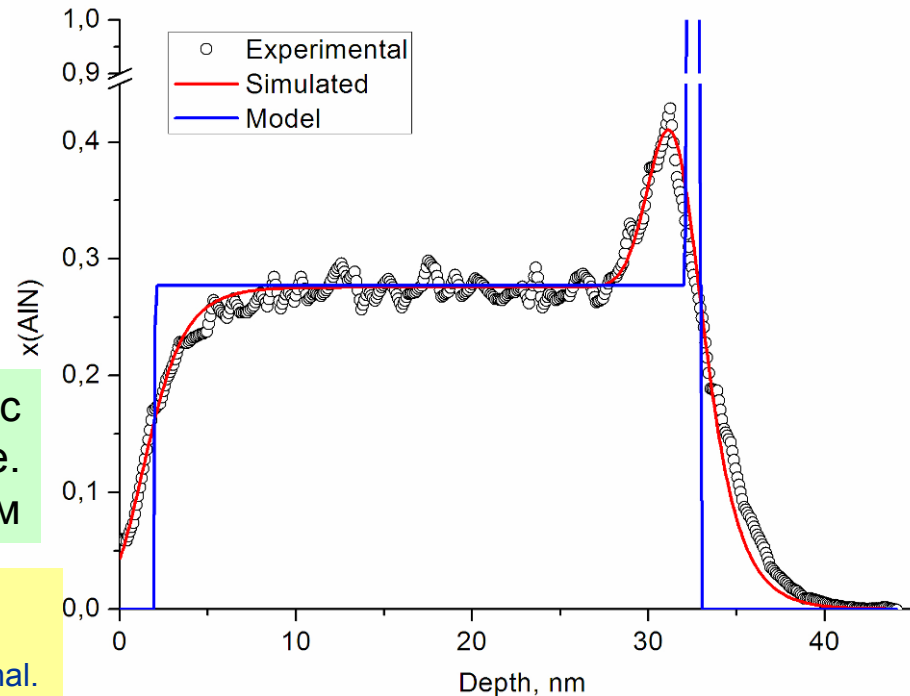
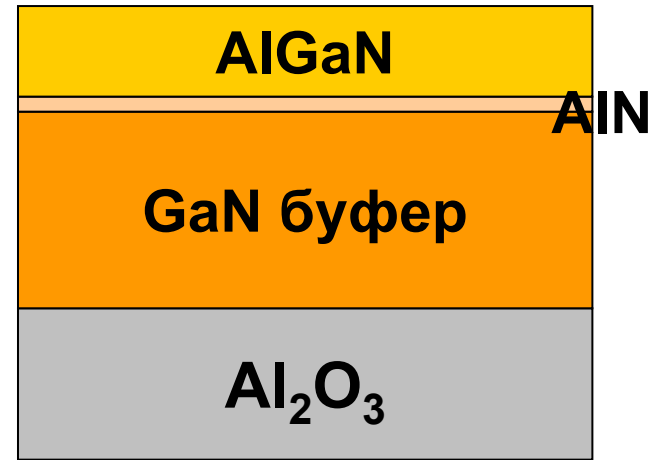


Диагностика толщины и состава слоев AlGaN в HEMT структурах



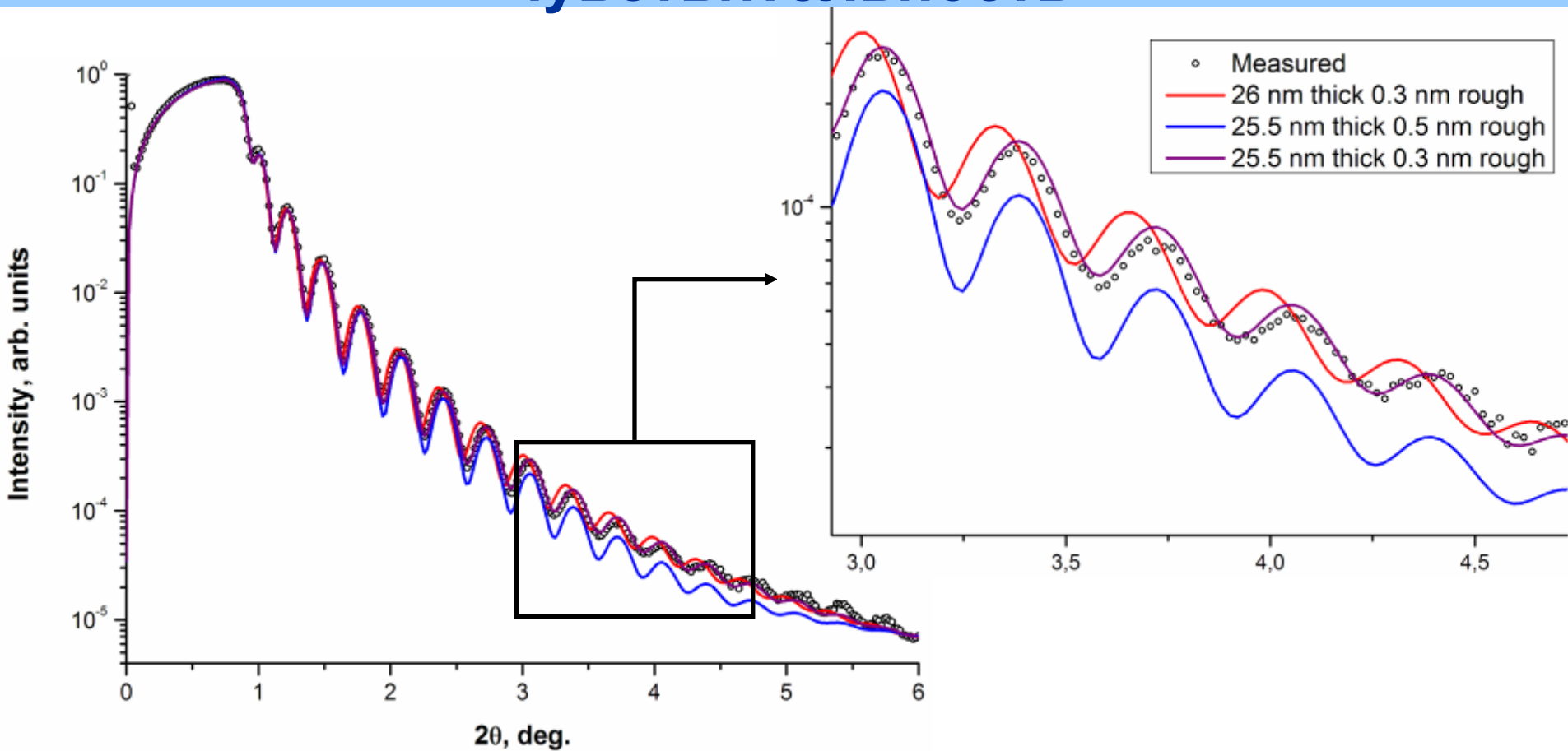
Модель 1 – без подслоя AlN
Модель 2 – подслой AlN 0,8 нм
AlGaN – 30 нм, 27%

Реконструкция профиля AlN – подгонка с
учетом функции разрешения по глубине.
Толщина AlN – 1,2 нм



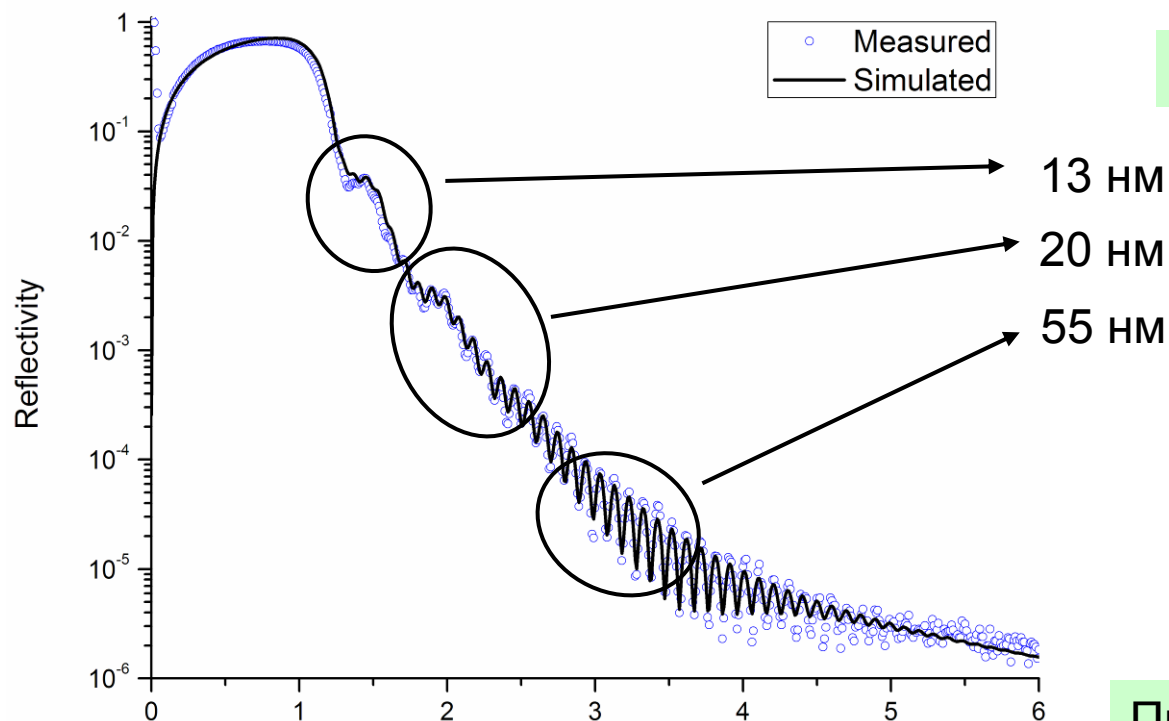
P. Yunin, Yu. Drozdov, M. Drozdov, O. Khrykin, V. Shashkin,
Quantitative SIMS depth profiling of Al in AlGaN/AlN/GaN HEMT
structures with nanometer-thin layers, submitted to Surf. Interface Anal.

Рефлектометрия металлических слоев: чувствительность

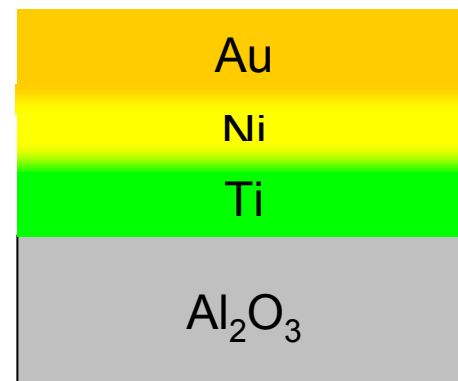


N	Материал	Толщина, нм	Ширина интерфейса, нм	Плотность г/см ³
1	Mo	25.5	0.3	10.6
SUB	Si	-	0.9	2.33

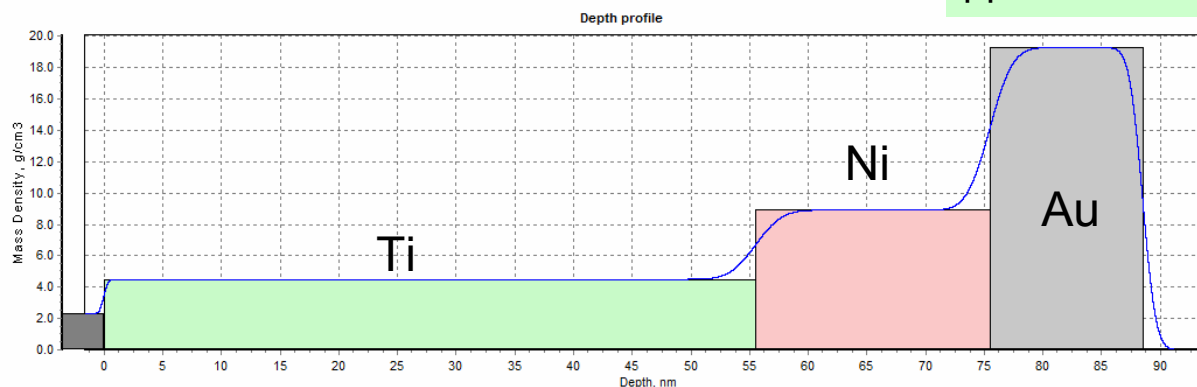
Нанесение контактных металлических слоев



Au/Ni/Ti/Si-substrate

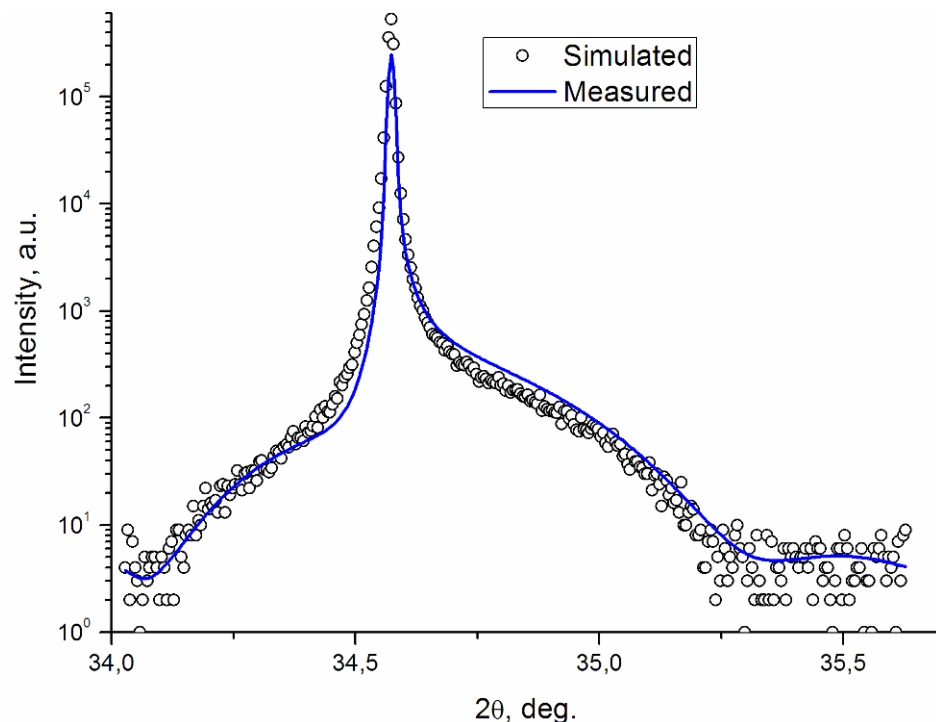


Профиль плотности из XRR данных

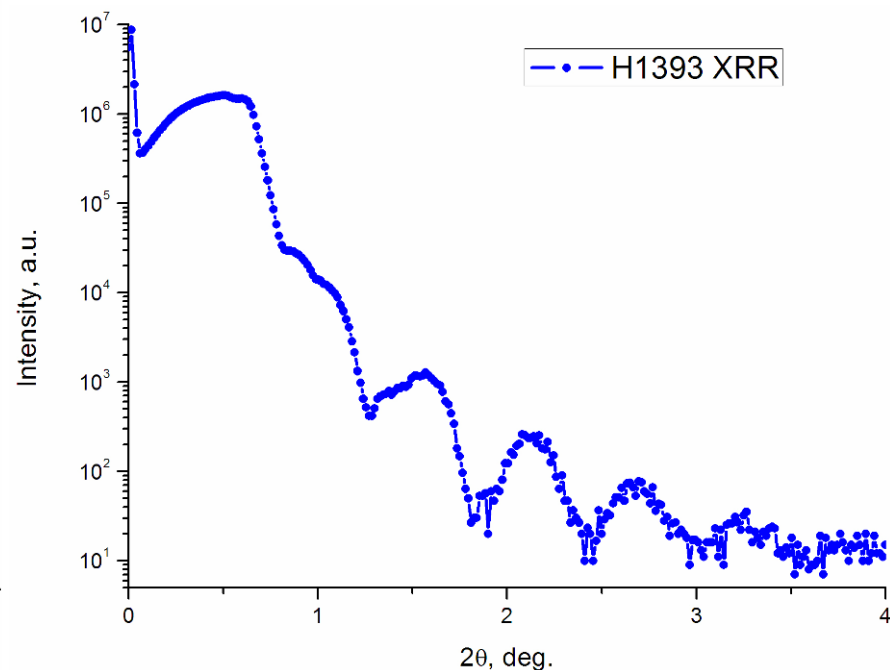


In situ пассивация HEMT структур на основе GaN CVD нитридом кремния

На установке MOCVD эпитаксии структур на основе GaN в ИФМ РАН реализован метод *in situ* пассивации транзисторных структур диэлектрическими слоями Si_3N_4 . Контроль параметров структур с пассивацией – XRD и XRR методами.



XRD измерения: AlGa_N 18% AlN, толщина 18 нм

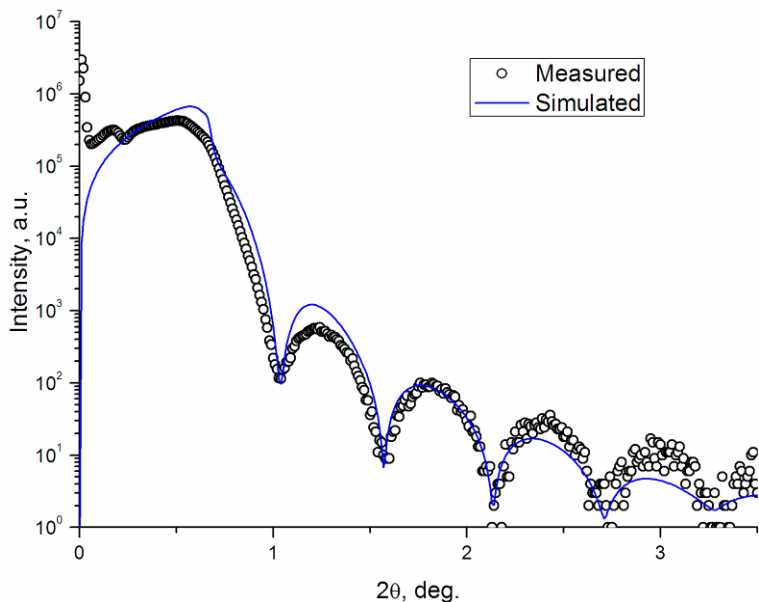


XRR измерения с учетом XRD данных
 Si_3N_4 толщина 12 нм,
шероховатость $\sigma = 1$ нм

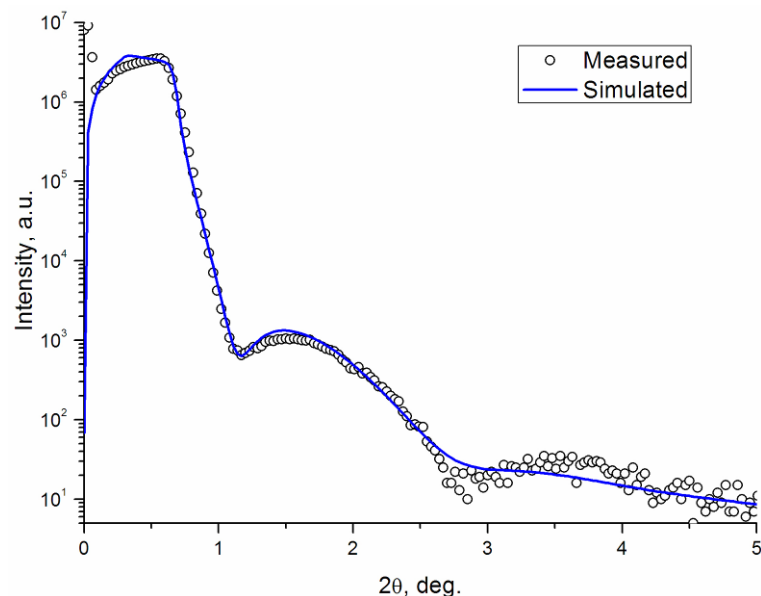
П.А. Юнин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, С.А. Королев, А.И. Охапкин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, Слои Si_3N_4 для *in situ* пассивации транзисторных структур на основе GaN, ФТП, 2015, Т. 49, вып. 11, с. 1469-1472

Контроль операций травления пассивирующего слоя Si_3N_4

Травление структур с пассивирующими диэлектрическими слоями также контролируется методом XRR. Данный пример – калибровка скорости травления нитрида кремния на PlasmaLab 80.



Si_3N_4 *in situ* пассивация – до травления
толщина 15 нм,
шероховатость $\sigma = 2$ нм



Si_3N_4 *in situ* пассивация – после травления
толщина 5 нм,
шероховатость $\sigma = 1$ нм