

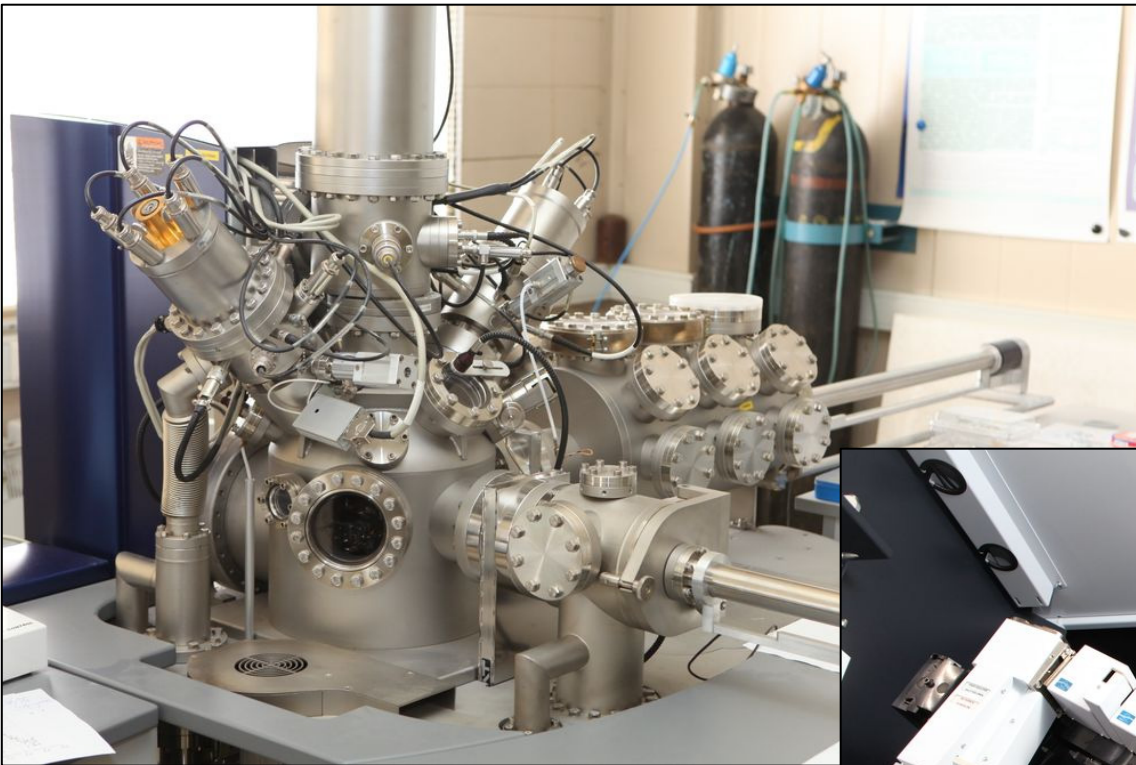
# **Совместное использование методов рентгенодифракционного анализа и масс-спектрометрии вторичных ионов для диагностики многослойных структур на основе $A_3B_5$ и SiGe**

**Работа поддержана Минобрнауки России, проект RFMEFI60714X0071**

**Докладчик: Юнин П.А., аспирант 3-го года обучения, м.н.с. ИФМ РАН**

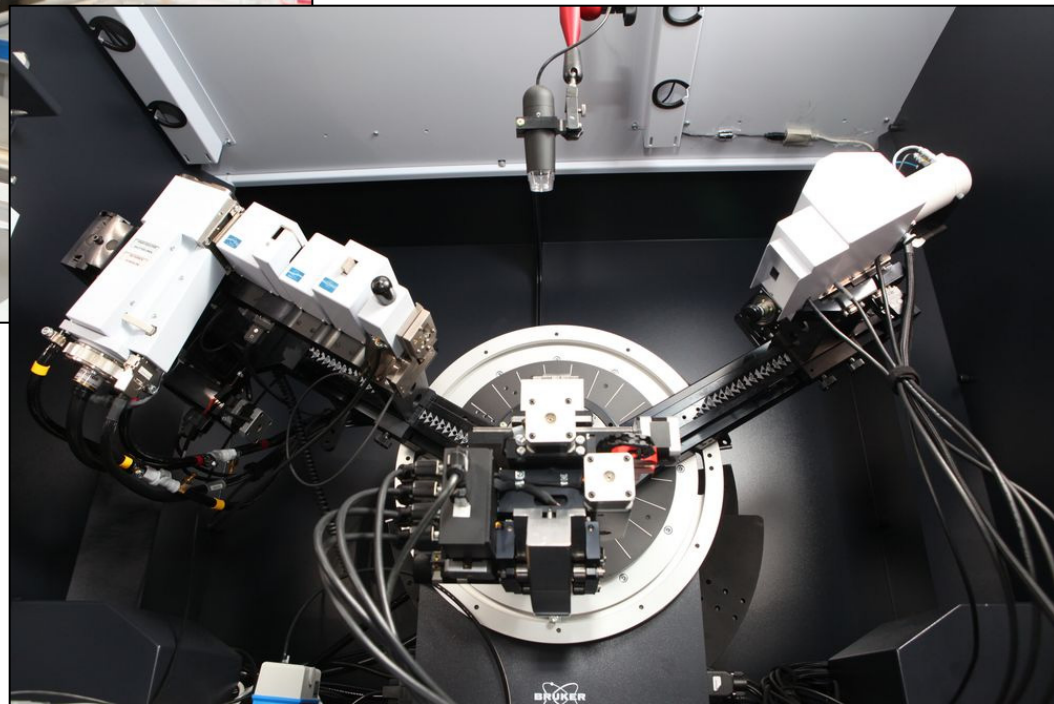
**Научный руководитель: Дроздов Ю.Н., д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН**

# Вторично-ионная масс-спектрометрия & Рентгеновская дифрактометрия

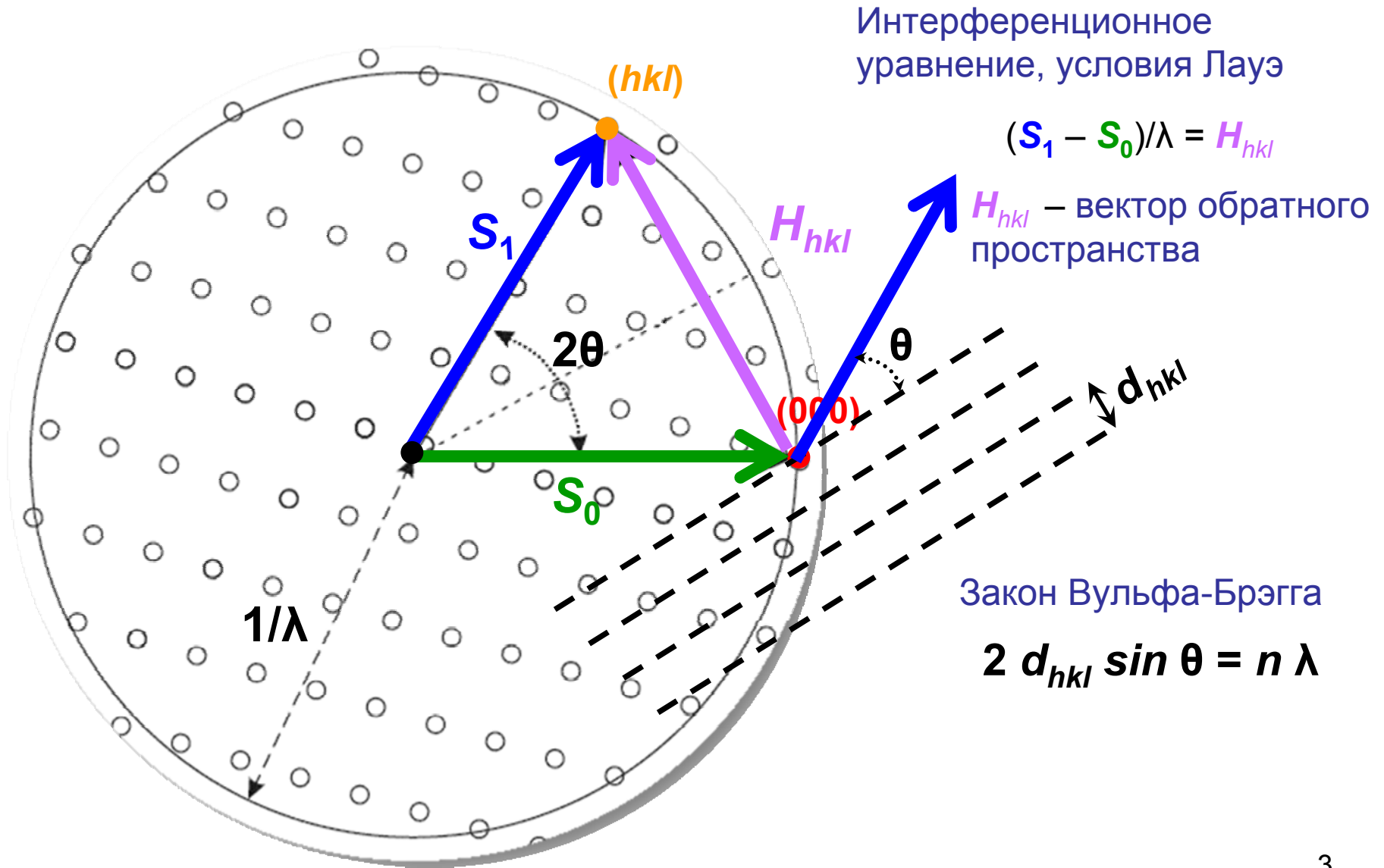


Масс-спектрометр вторичных ионов TOF.SIMS-5, 2007 г.

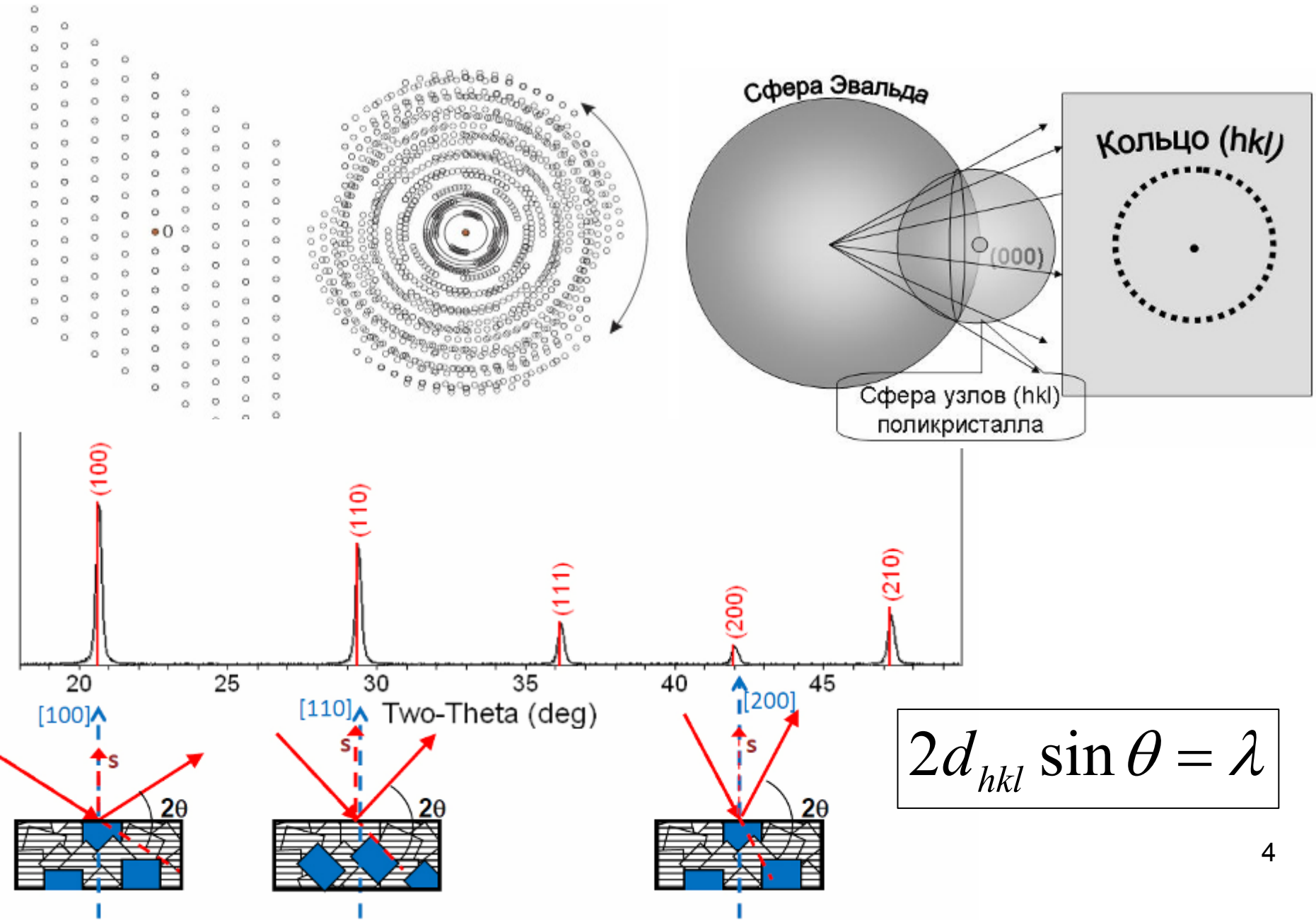
Рентгеновский дифрактометр  
Bruker D8 Discover, 2011 г.



# Сфера Эвальда, условия Лауэ

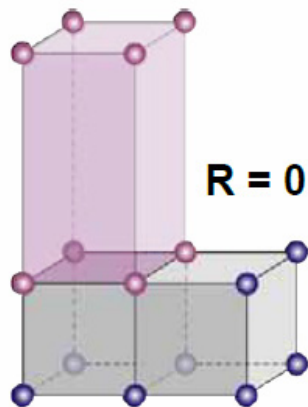
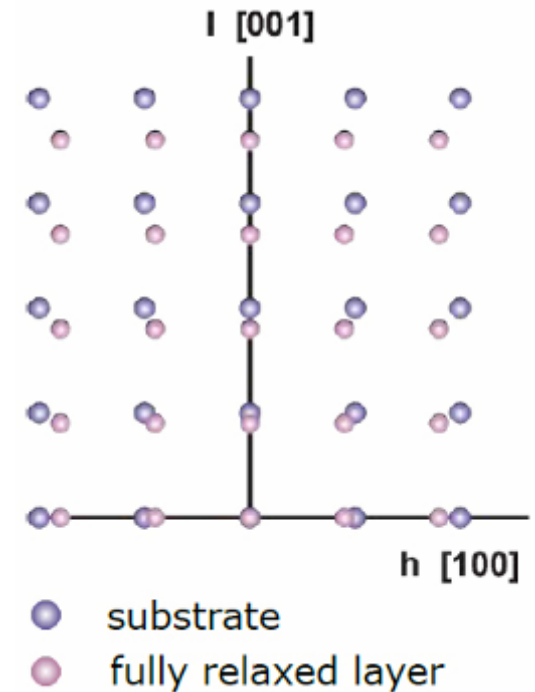
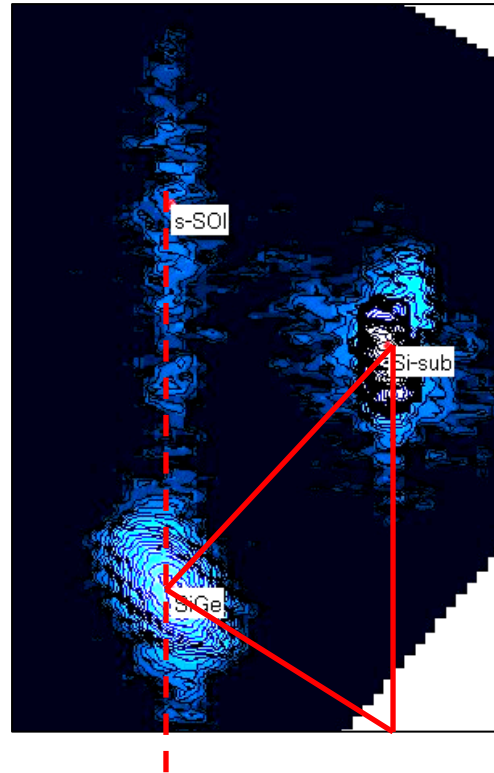
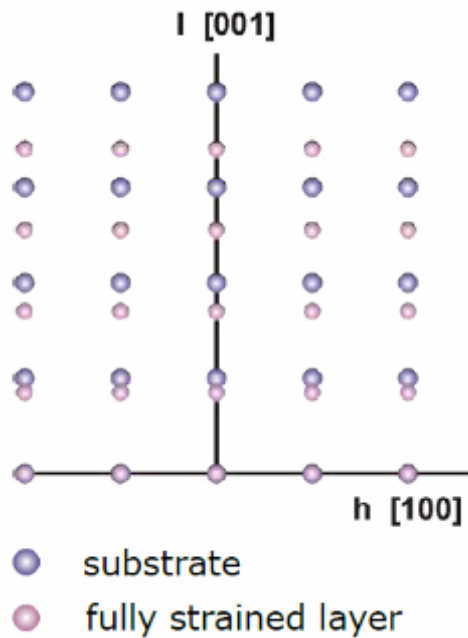


# Дифракция на поликристаллическом образце

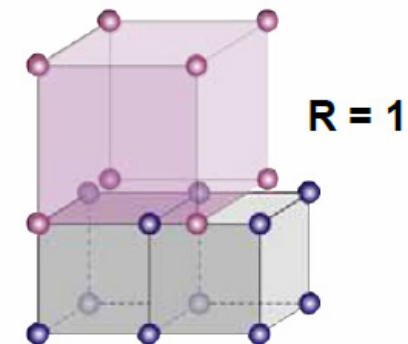


$$2d_{hkl} \sin \theta = \lambda$$

# Дифракция на гетероэпитаксиальных структурах

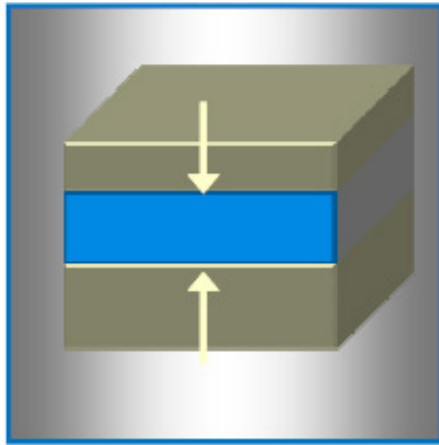


$$R = \frac{a_{layer}^{in-plane} - a_{substrate}}{a_{layer}^{relaxed} - a_{substrate}}$$

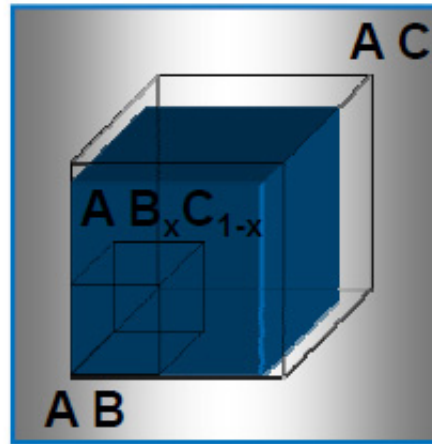




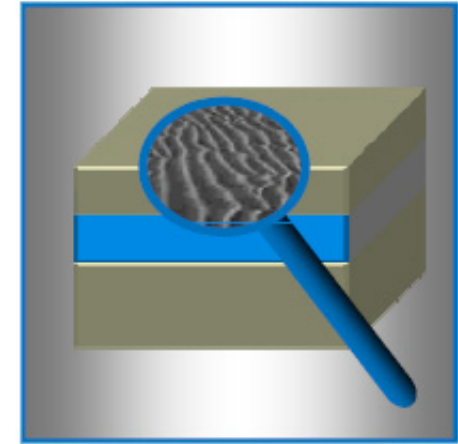
# XRR: определяемые параметры



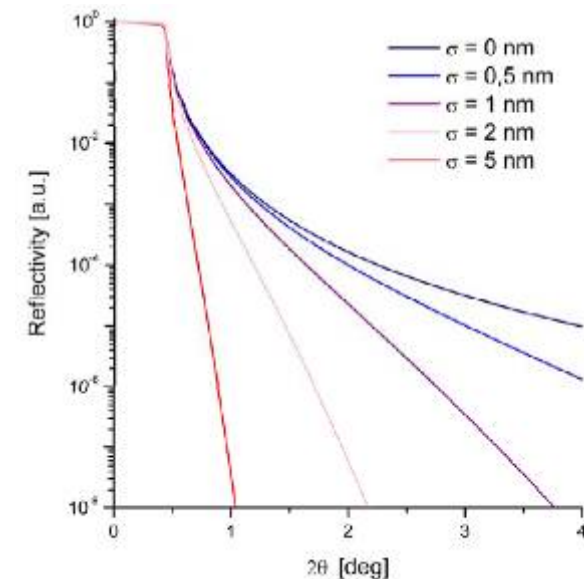
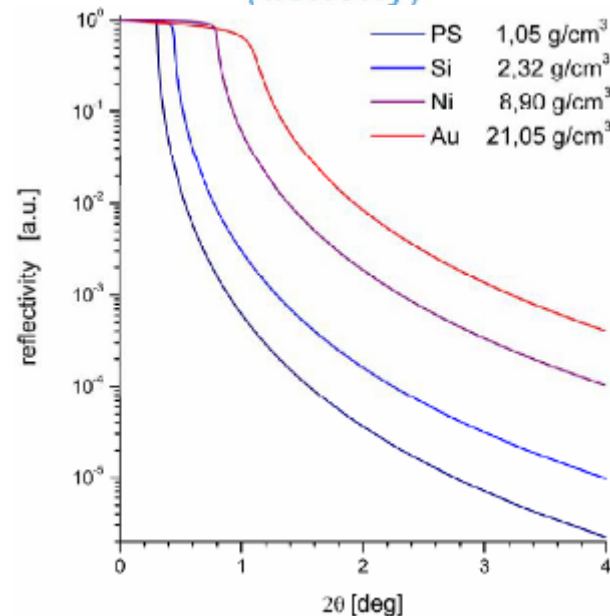
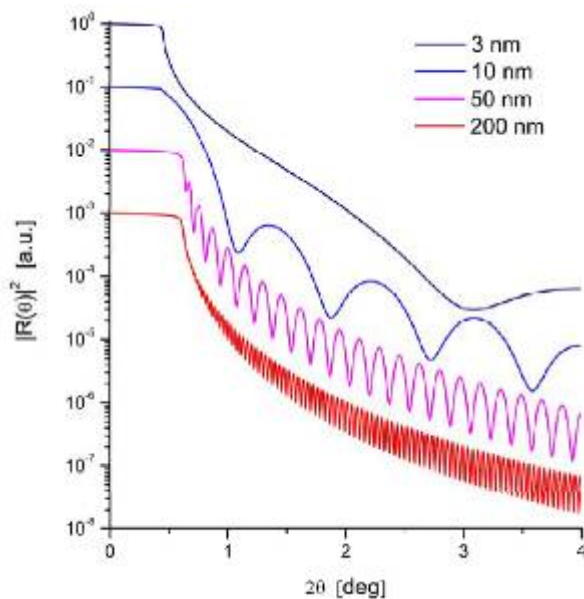
Layer thickness



Chemical  
Composition  
(density)



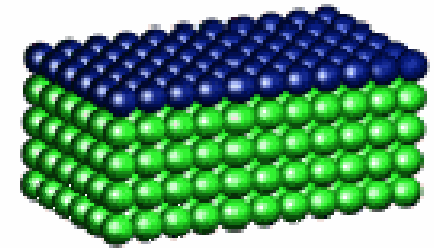
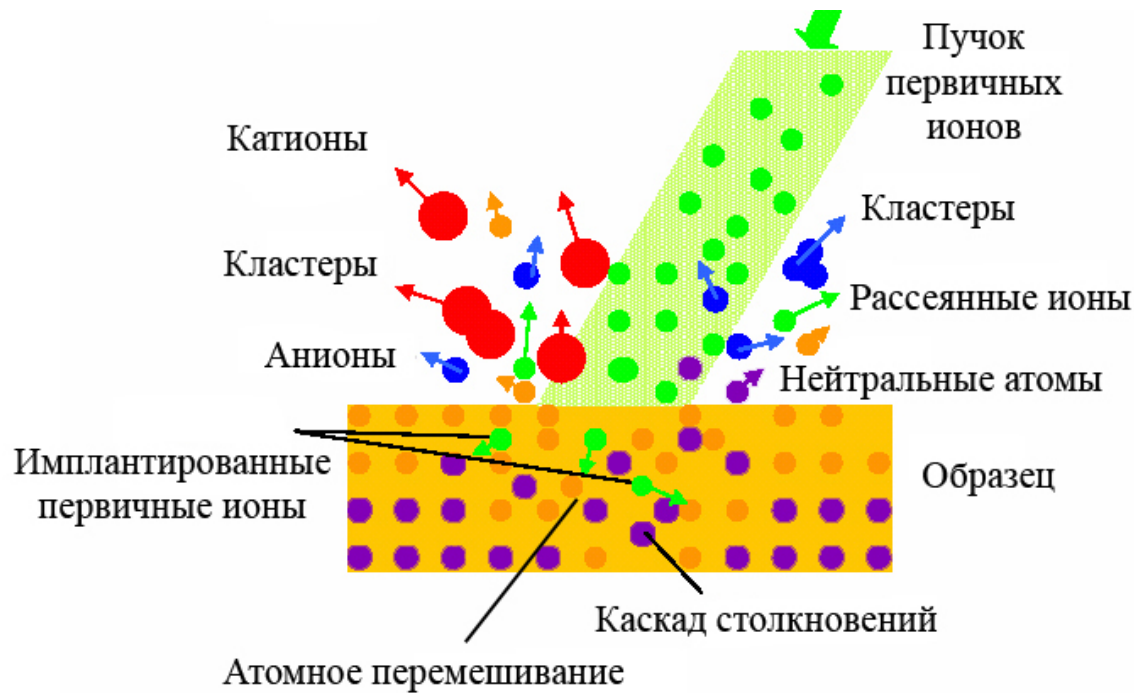
Roughness



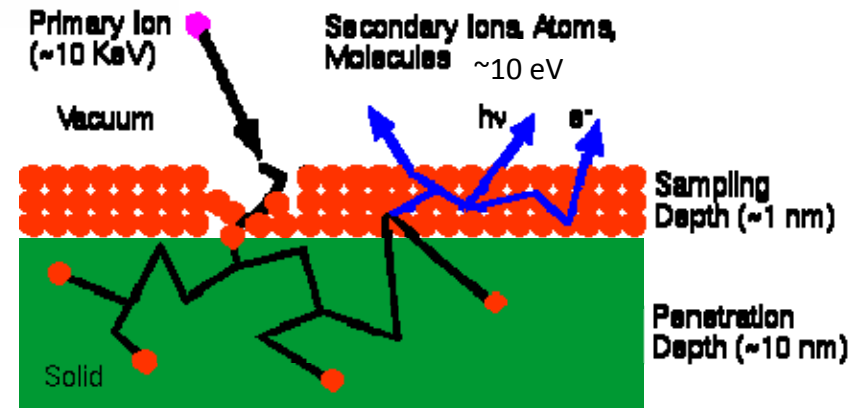
# Дифракционные методы: итог

- Метод чувствует градиент плотности (XRR) или параметра решетки (XRD)
- Чувствительность к кристаллическим фазам, но не элементам (!) – фазовый анализ
- Дифракционный метод – структурная информация, периодичность и ее нарушения
- Косвенные измерения, ограничения на диапазон измеряемых значений
- Нетривиальная обратная задача, отсюда ограничение на «сложность» анализируемых структур – требуется начальная модель
- Усреднение по площади (1-10 мм<sup>2</sup>)

# Вторично-ионная масс-спектрометрия



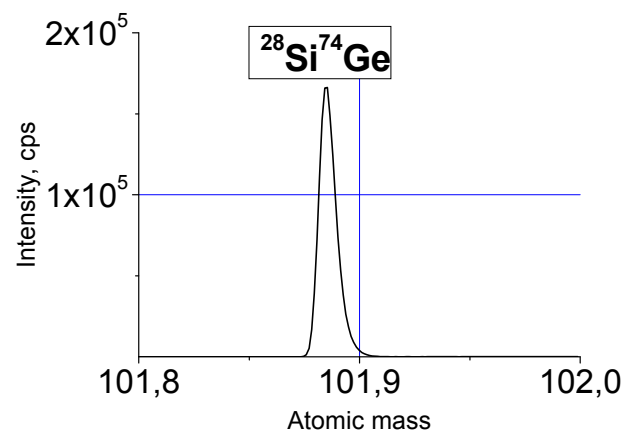
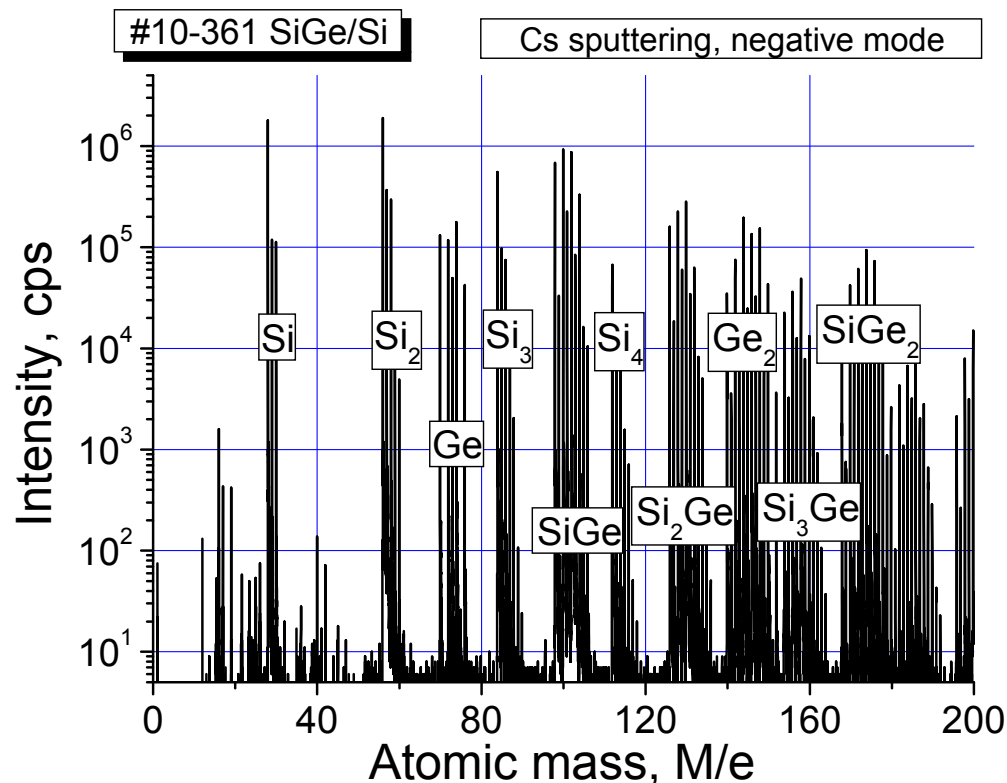
Физическое распыление материала образца и регистрация распыленных ионизованных атомов и кластеров





# Исходная информация в ВИМС: масс-спектр

Распыление ионами Cs, отрицательная мода регистрации

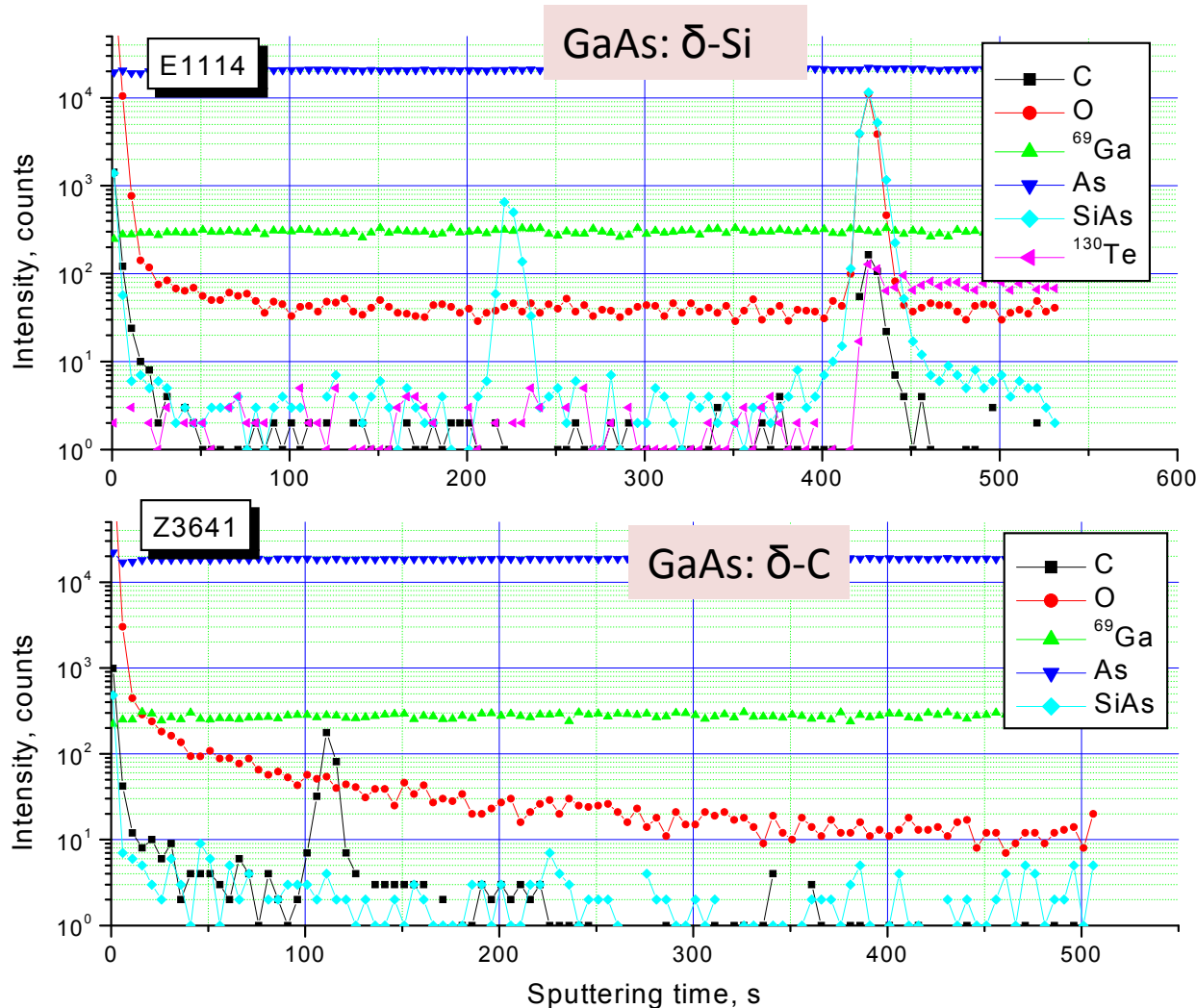


Распыление ионами Cs,  
положительная мода регистрации

Si, Ge, Cs, CsSi, CsGe, Cs<sub>2</sub>, Cs<sub>2</sub>Si, Cs<sub>2</sub>Ge

Высокая чувствительность и  
разрешение по массе

# Послойный анализ: дельта-легирование GaAs:Si, C (исходные профили)



**Разрешение по глубине и высокая чувствительность TOF.SIMS-5 позволяют анализировать дельта-легированные слои GaAs**

$$\Delta Z \sim (L_{\text{INF}}^2 + L_{\text{MIX}}^2 + L_{\text{SR}}^2 + L_{\text{INSTR}}^2 + L_{\text{MATRIX}}^2)^{1/2}$$

# Полупроводниковые гетероструктуры

## Количественный анализ

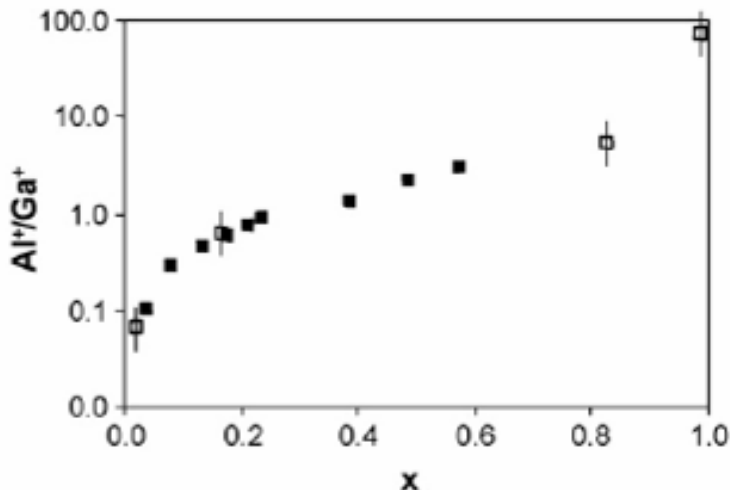
### Элементы примеси

- $N_A \leq 10^{19} \text{ ат/см}^3$
- $I_A \sim N_A$  – линейная связь, необходима только одна тест-структура для элемента

### Элементы матрицы

$I_A = F(N_A) \cdot N_A$  – нелинейная связь  
Проблема - матричные эффекты в процессах ионизации вторичных ионов

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$



### Прямой подход

- Необходимо очень много тест-структур
- Проблема калибровки
- Может быть немонотонная зависимость

# Вторично-ионная масс-спектрометрия: итог

- Элементный анализ с высокой чувствительностью
- «Прямой» метод анализа – сразу получаем качественную информацию о структуре
- Сложность количественного анализа, требуются эталоны и калибровка
- Возможность послойного анализа на большие глубины с разрешением по глубине на уровне 1-15 нм
- Искаженная информация при послойном анализе – проблема разрешения по глубине
- Разрушающий метод, размеры области анализа ~ 100 мкм
- Технологически более сложный эксперимент, относительно новый метод, отсутствие единой теории, мало отработанных методик

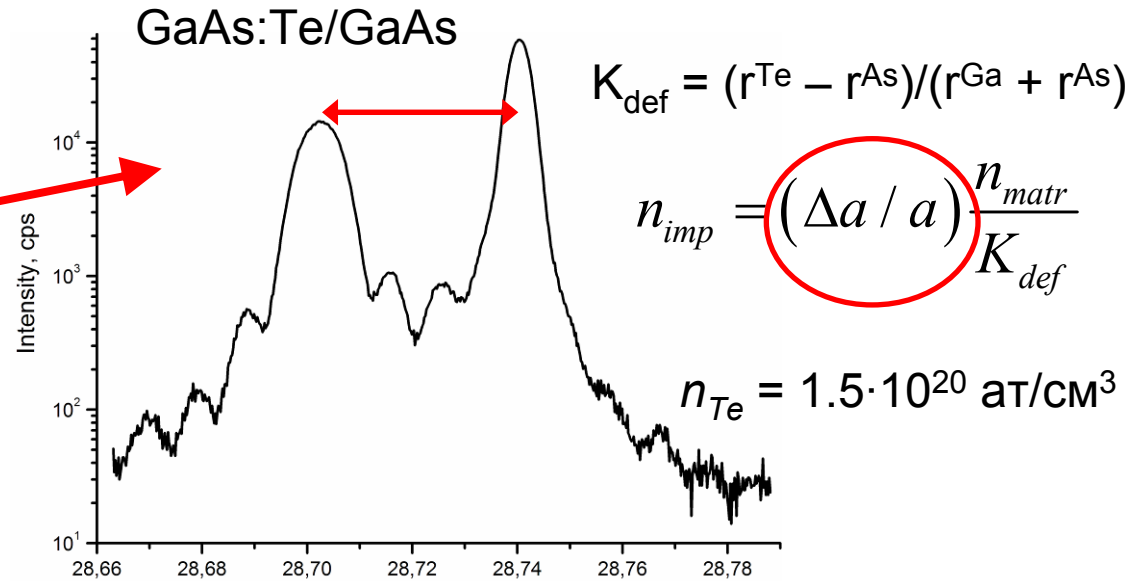
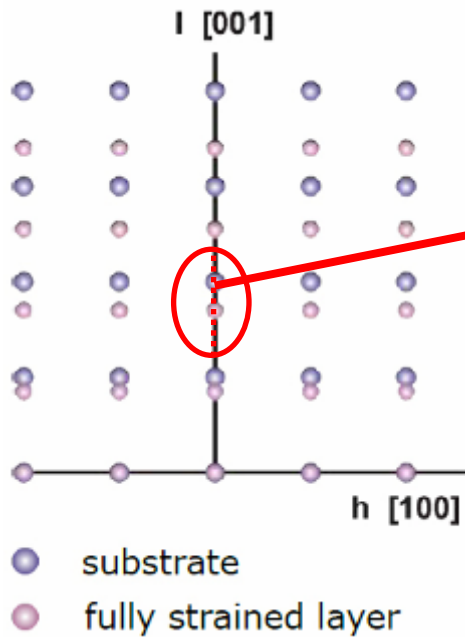
# ВИМС & РД: возможности совместного анализа

- Использование данных РД экспериментов для калибровки интенсивности и скорости распыления ВИМС
- Элементный ВИМС анализ для правильной идентификации пиков кристаллических фаз
- Перекрестная проверка результатов, контроль точности измерений. Методики совместных измерений
- Анализ различий для дополнительной характеристики образца



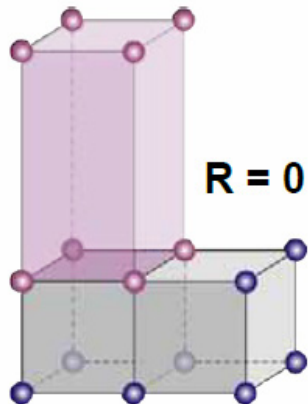
# **Использование данных РД экспериментов для калибровки интенсивности и скорости распыления ВИМС**

# Калибровка ВИМС: примесь Те в GaAs



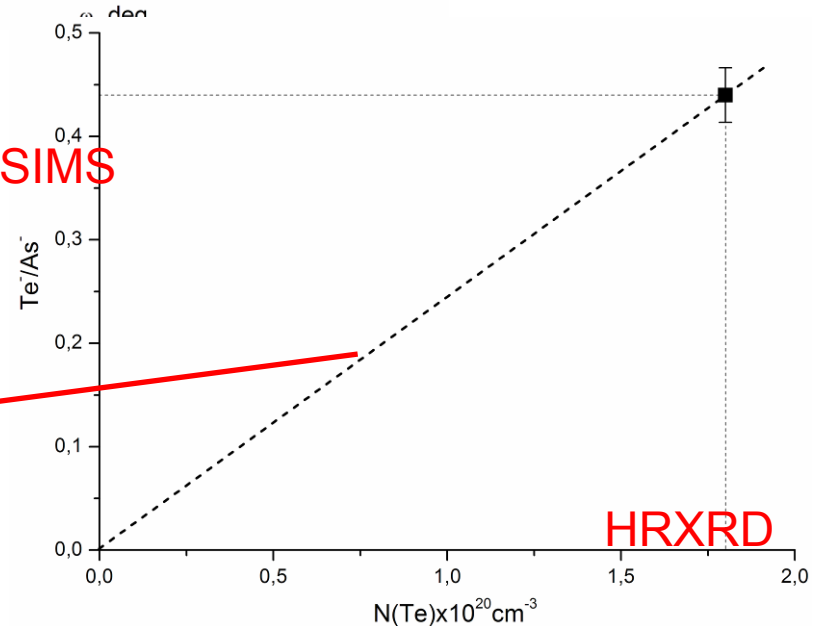
ВИМС:

$$I(Te^-) / I(As^-) = 0.44$$

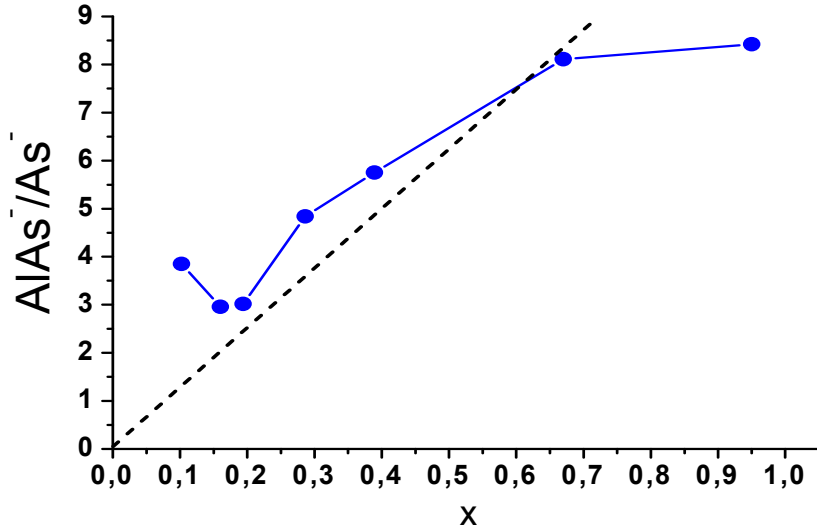


$$n_{imp} = RSF_{imp}^{matr} \times \frac{I_{imp}}{I_{matr}} n_{matr}$$

SIMS



# ВИМС: количественный анализ $Al_xGa_{1-x}As$



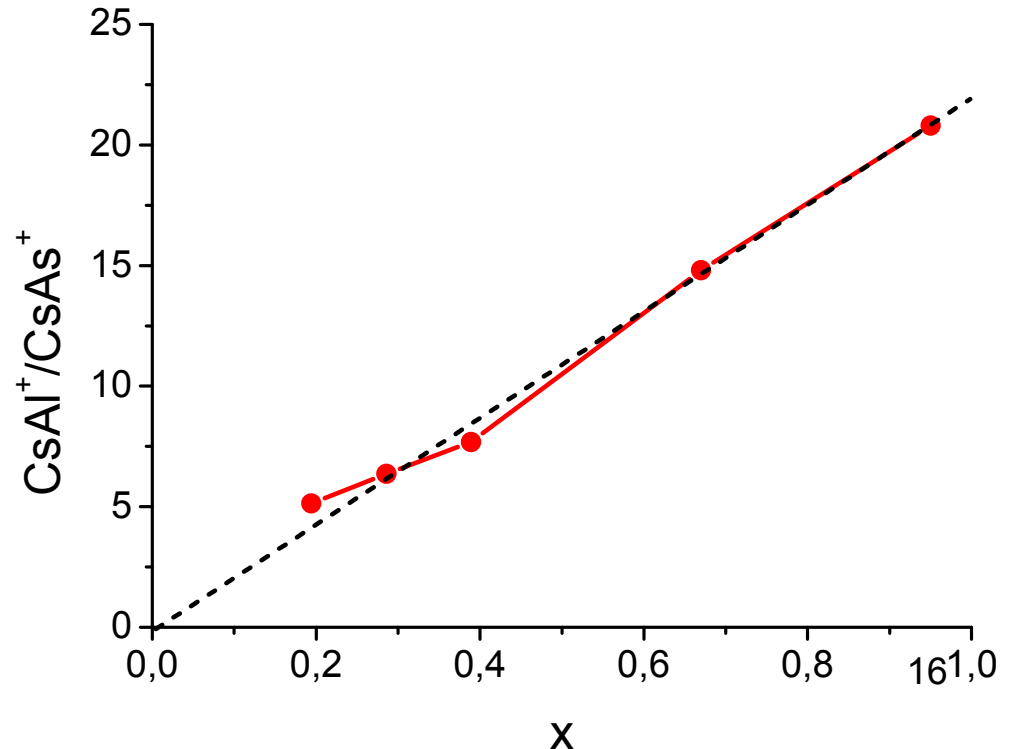
$Al_xGa_{1-x}As$

Линейность:  $CsAl^+/CsAs^+ \sim x$

## CsM методика

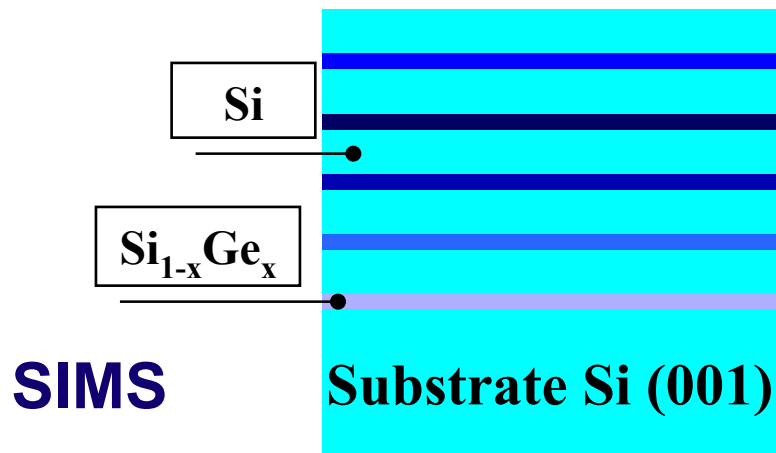
Регистрация кластерных ионов  $CsM^+$  и  $Cs_2M^+$

(Возможный механизм – ионизация имплантированного атома Cs и взаимодействие иона  $Cs^+$  и нейтрального атома  $M$  на распыляемой поверхности)



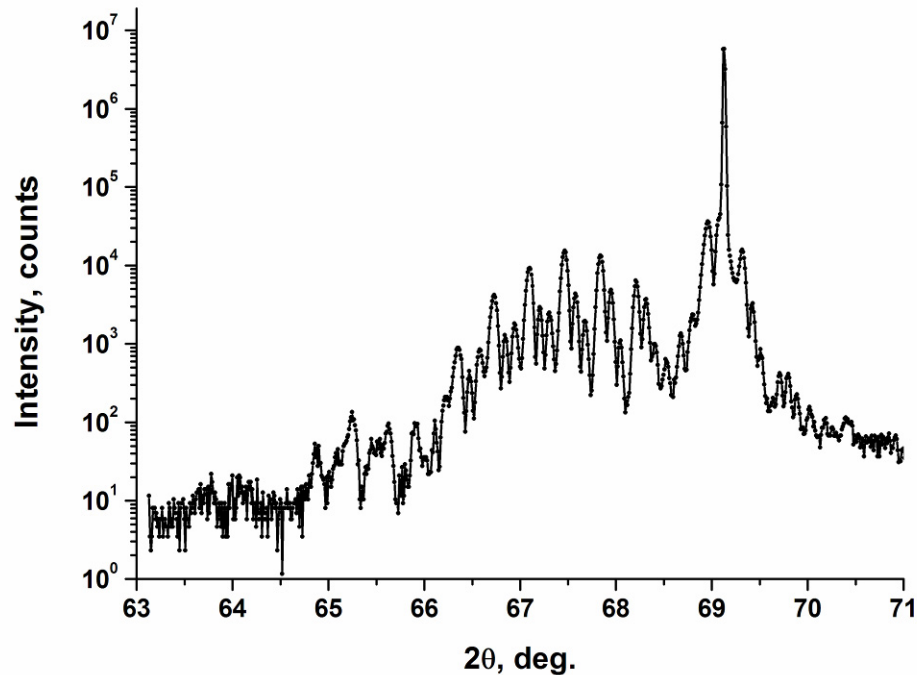
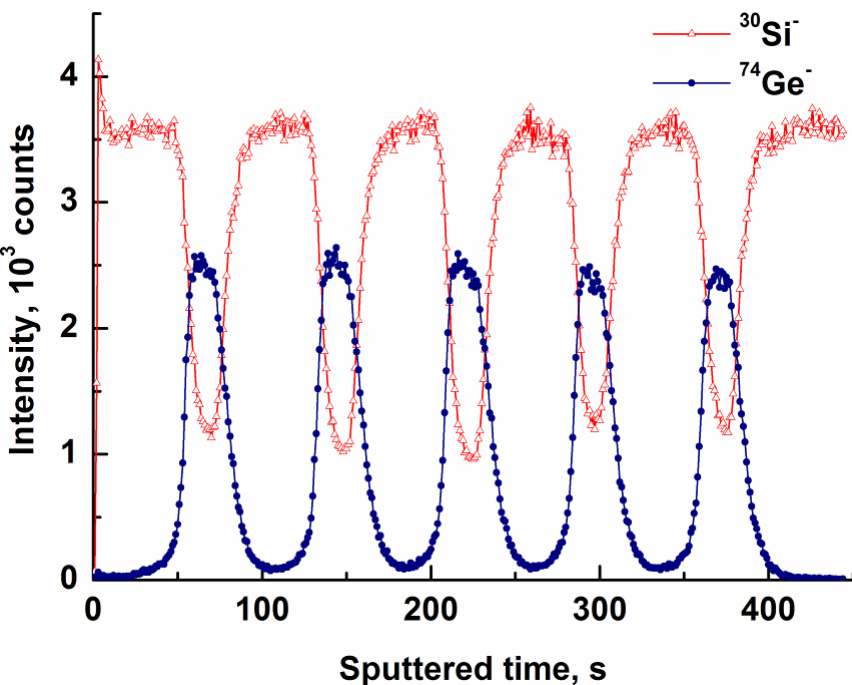
**Перекрестная проверка результатов,  
контроль точности измерений. Методики  
совместных измерений**

# Вторично-ионная масс-спектрометрия & Рентгеновская дифрактометрия: пример



10-слойная  
квазипериодическая  
структура, выращена в ИФМ  
РАН методом МПЭ

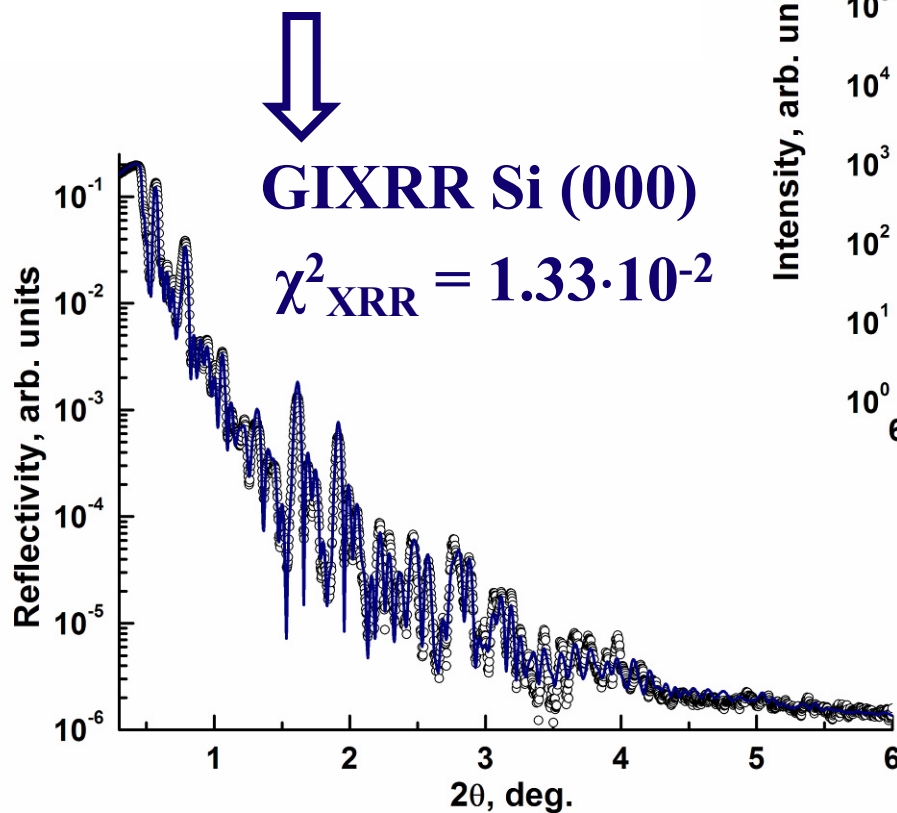
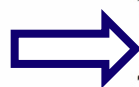
HRXRD



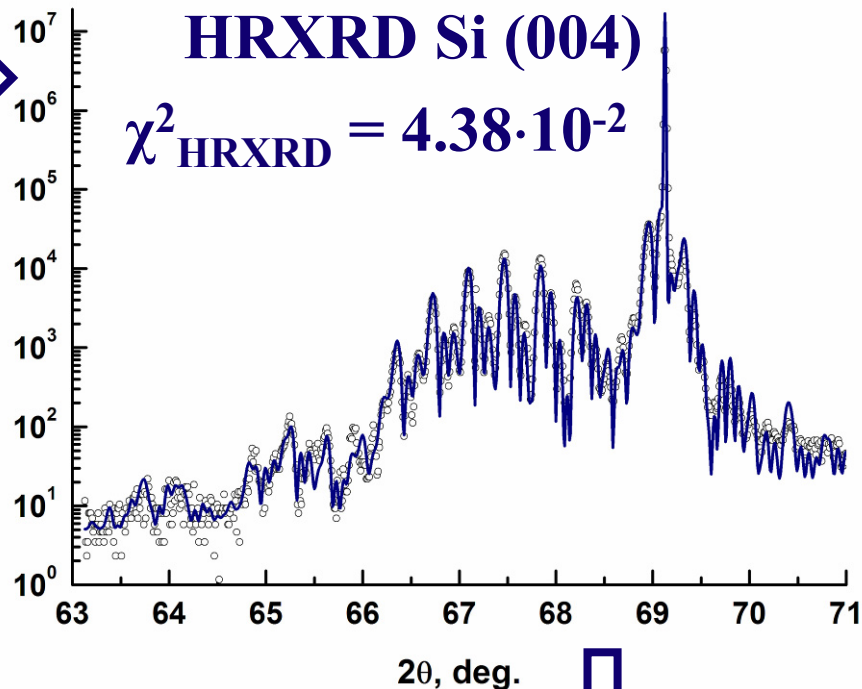


# XRR & HRXRD подгонка

Одна модель структуры для  
HRXRD и XRR симуляции

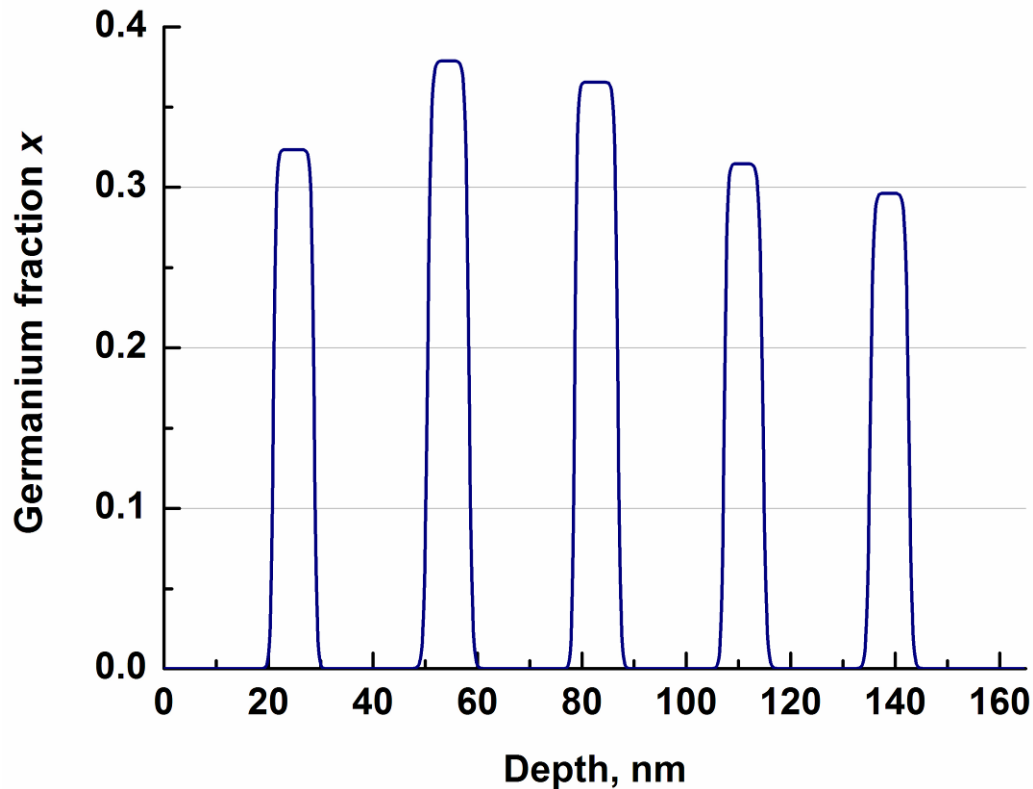


Intensity, arb. units



Состав, толщина,  
шероховатость слоев

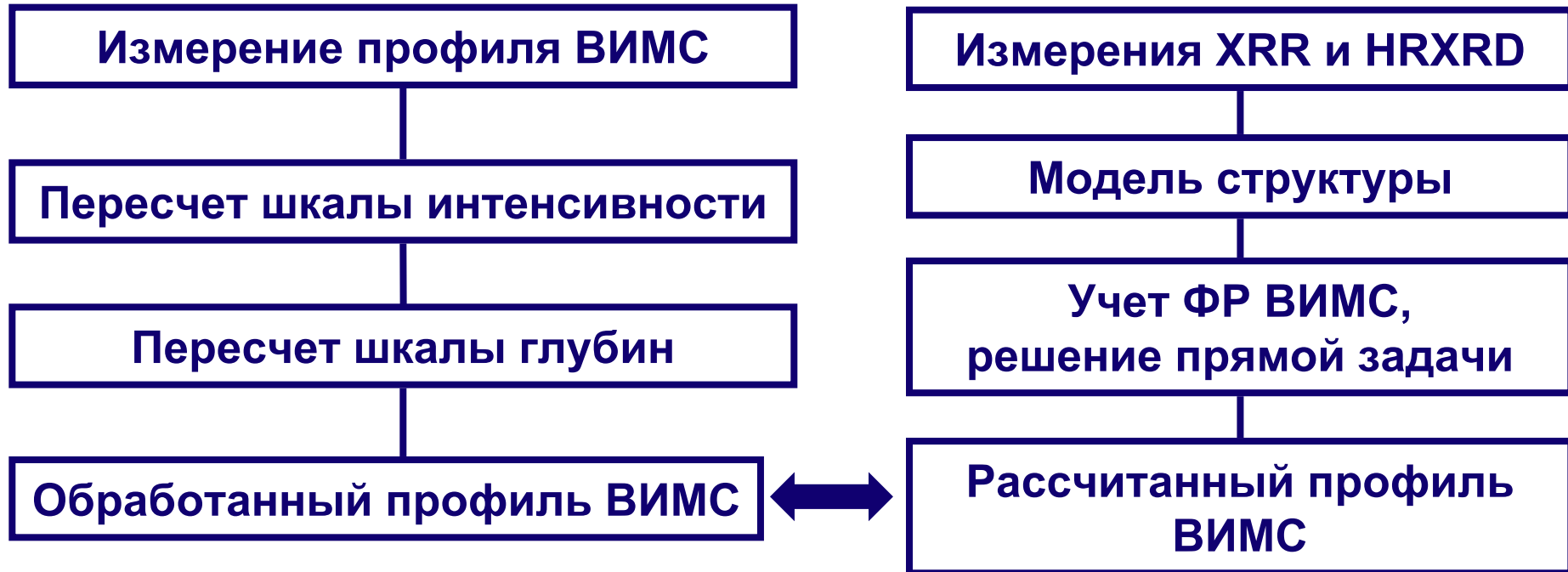
# XRR & HRXRD подгонка: модель



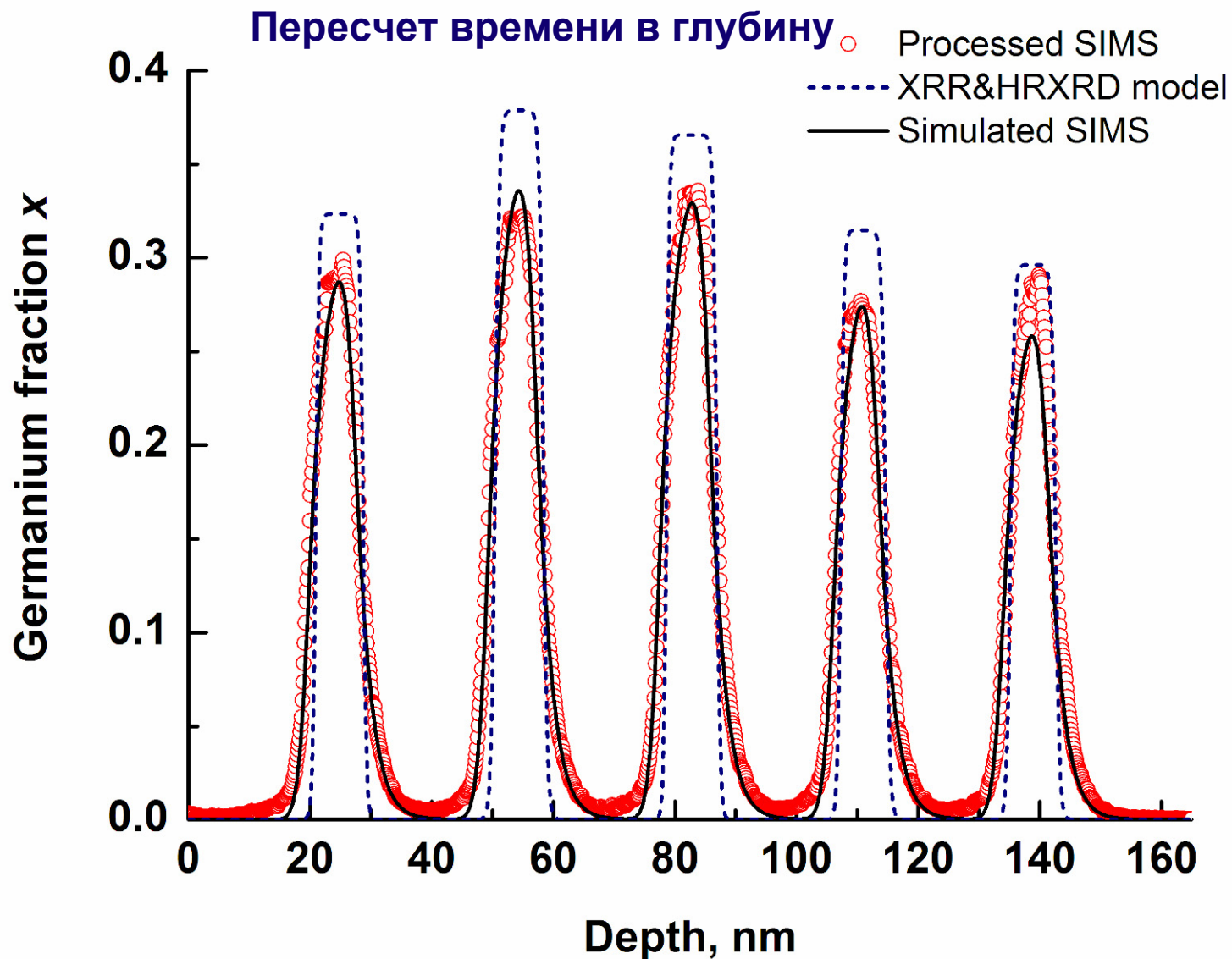
№ слоя	Слой	h, нм	$\sigma$ , нм	$x$ Ge, %
1	Si	22.5	0.8	-
2	SiGe	7.8	0.5	32
3	Si	21.8	0.5	-
4	SiGe	7.9	0.7	38
5	Si	20.3	0.6	-
6	SiGe	8.3	0.5	37
7	Si	20.4	0.6	-
8	SiGe	7.4	0.5	31
9	Si	20.6	0.7	-
10	SiGe	7.4	0.6	30
Подложка	Si	-	0.6	-

**Модель структуры, полученная из рентгеновских данных –  
истинный профиль Ge?**

# Алгоритм совместного анализа



# Обработка и сравнение результатов



# Заключение

- Совместное использование ВИМС и РД методов анализа позволяет получать дополнительную информацию – «конструктивная интерференция» результатов.
- Для этого необходимо развивать соответствующие методики анализа, четко осознавать возможности каждого из методов. Должно быть налажено взаимодействие между аналитическими группами.