

# **Синтез и основные характеристики многослойных зеркал рентгеновского и ЭУФ диапазонов**

**Семинар студентов и аспирантов ИФМ РАН**

**Докладчик            Полковников В.Н.**

# План выступления

## **1. Рентгеновское излучение.**

### **Рентгенооптические элементы**

## **2. Многослойные зеркала**

## **3. Методы синтеза многослойных структур**

## **4. Основные характеристики зеркал**

# 1.1. Особенности рентгеновского излучения

## Рентгеновский и ЭУФ диапазон



- $\lambda = 0.01 - 60 \text{ нм}$
- $|1 - \varepsilon| \approx 10^{-6} \div 10^{-1}$
- $\text{Im } \varepsilon \neq 0 \rightarrow \text{поглощение}$
- $\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma, \quad \delta, \gamma \ll 1$

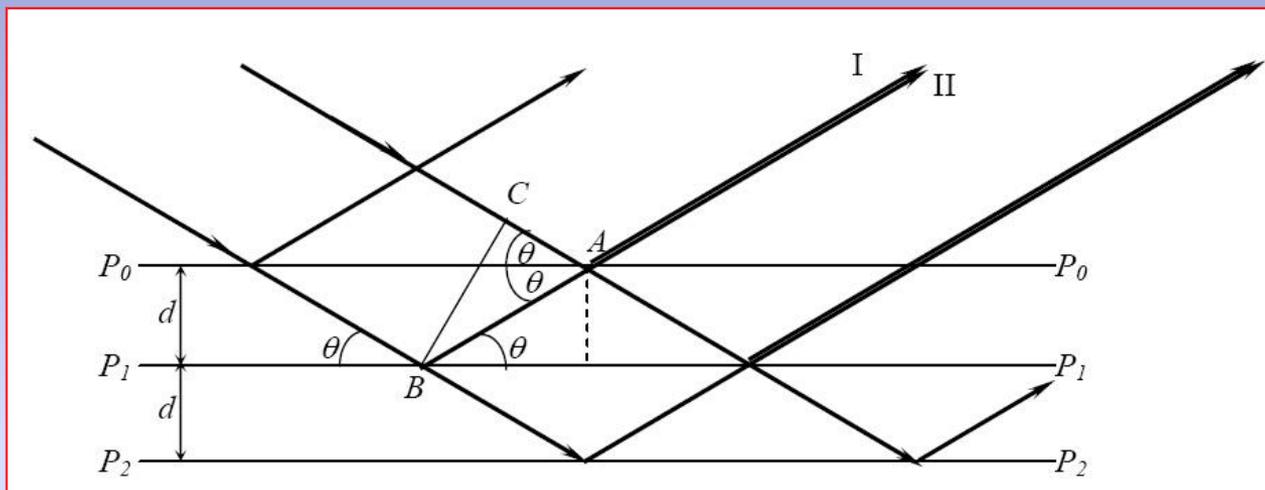
- 1) Создание преломляющей оптики затруднено.
- 2) Коэффициенты отражения при больших углах скольжения малы.

## 1.2. Элементы рентгенооптики

**Элементы для управления рентгеновскими пучками (распространение, направление, угловые и спектральные характеристики)**

- **Кристаллы**
- **Зонные пластинки**
- **«Линзы» Кумахова**
- **Многослойные структуры**
  - **Зеркала**
  - **Фильтры**
  - **Поляризаторы**

# Кристаллы



**Условие  
Вульфа-  
Брэгга:**  
 $2d \cdot \sin\theta = n\lambda$

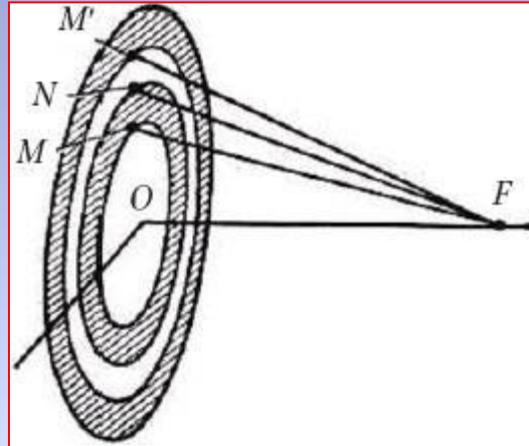
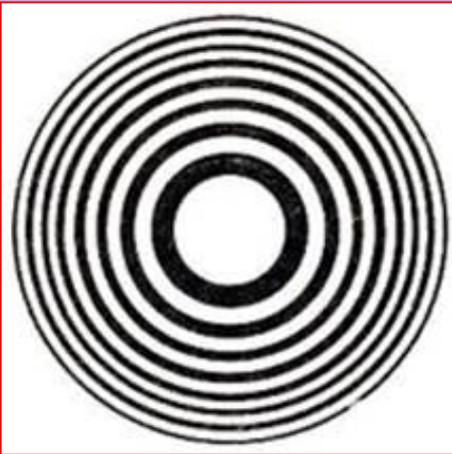
## **Достоинство:**

Сочетание высоких  $R$  с высокой селективностью  $E/\Delta E$

## **Недостатки:**

- Зачастую высокая  $E/\Delta E$  является недостатком
- $2d$  ограничивает спектральный диапазон применения (ограничение сверху – единицы нанометров)

# Зонные пластинки



**Фокусирующий  
элемент, аналог  
линзы**

**Чередующаяся последовательность прозрачных  
и непрозрачных кольцевых зон Френеля**

**Достоинство:**

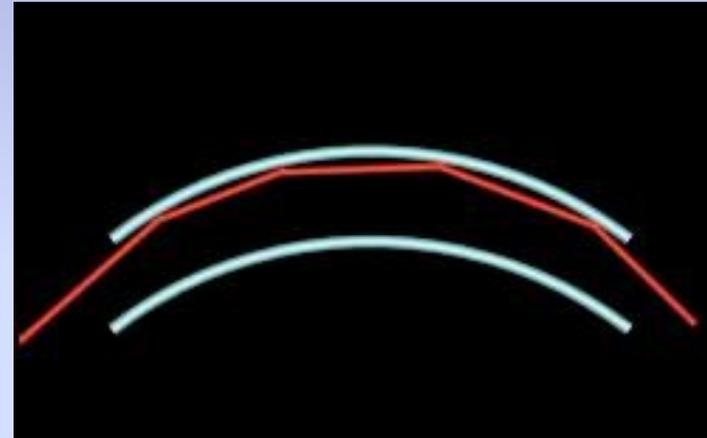
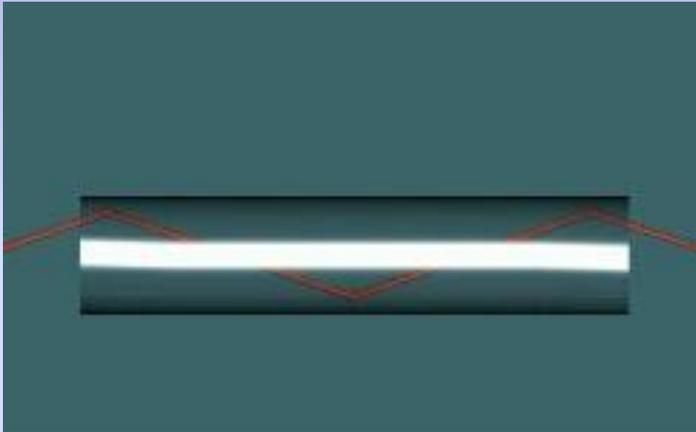
**Высокое пространственное разрешение**

**Недостатки:**

- **Короткий фокус**
- **Ограниченный спектральный диапазон применения**

# «Линзы» Кумахова

**Принцип:** многократное полное внешнее отражение от стенок



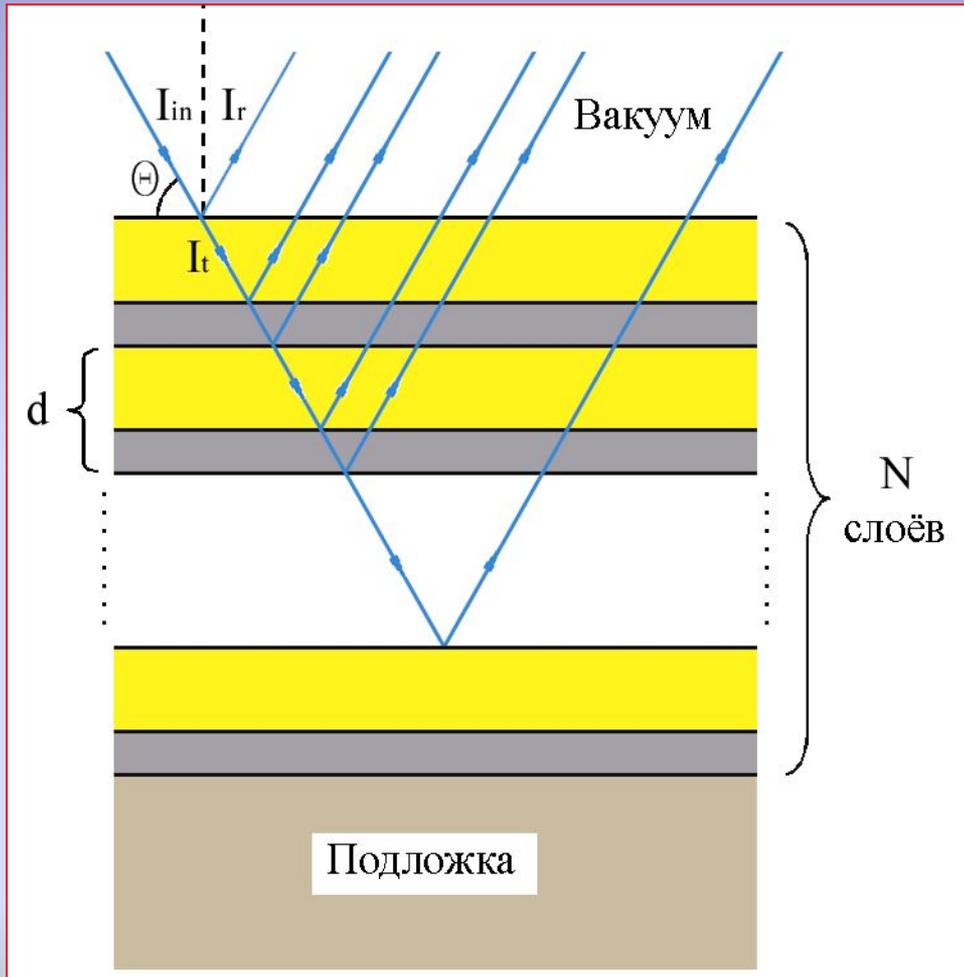
**Достоинство:**

Нет ограничения на апертуру – высокая светосила

**Недостатки:**

- Полихроматичность
- Угловой разброс выходного излучения

## 2. Многослойные зеркала



**Принцип:**  
интерференция волн,  
отражённых от границ  
раздела материалов

$$2d \sin \theta = m\lambda$$

$$d = h_1 + h_2$$

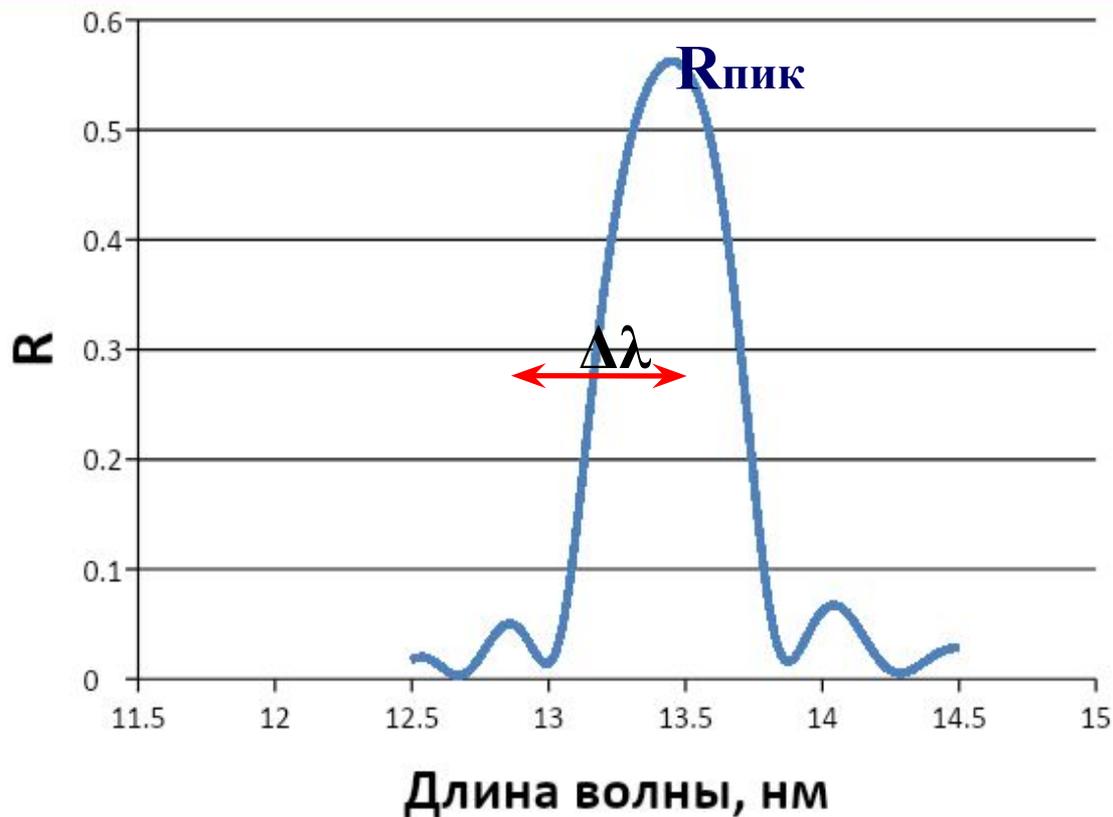
$$d \approx 0.7 \div 30 \text{ нм}$$

$$h_{\min} = 0.3 \div 0.6 \text{ нм}$$

$$N \sim 10 \div 1000$$

# Отражательные характеристики МЗ

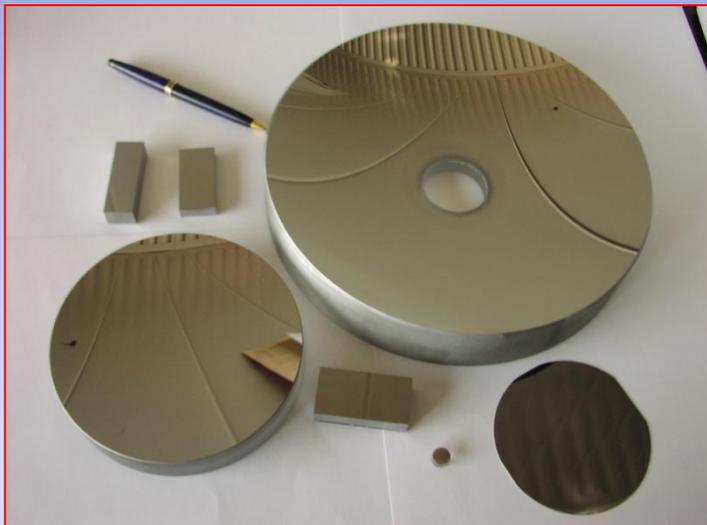
Для заданного угла падения



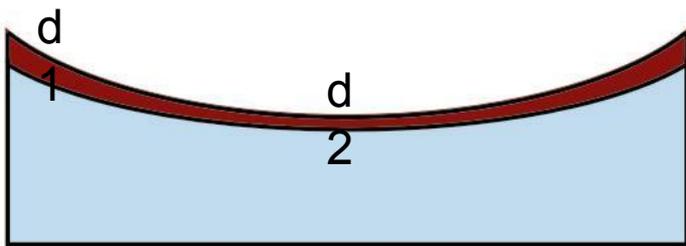
**Первостепенно:**  
 $R(\lambda)$  в  
окрестности  
рабочей  $\lambda$  ( $R_{\text{пик}}$ ,  
 $\Delta\lambda$ )

**Второстепенно:**  
 $R(\lambda)$  во всём  
диапазоне  $\lambda$

# Характеристики МЗ как элемента оптики



**Система подложка + покрытие**  
**Плоская или с кривизной**  
**Линейные размеры ~ 5-300 мм**  
**С постоянным распределением периода по площади или с изменяющимся**  
**Сохранение формы**



**Для систем с кривизной распределение периода, как правило, необходимо**

# Разработка и синтез МЗ

- **Выбор материалов**
- **Расчёт отражательных характеристик**
- **Синтез структур**
- **Измерение характеристик, определение истинных параметров**
- **Коррекция технологического процесса**
- **Финальный синтез**

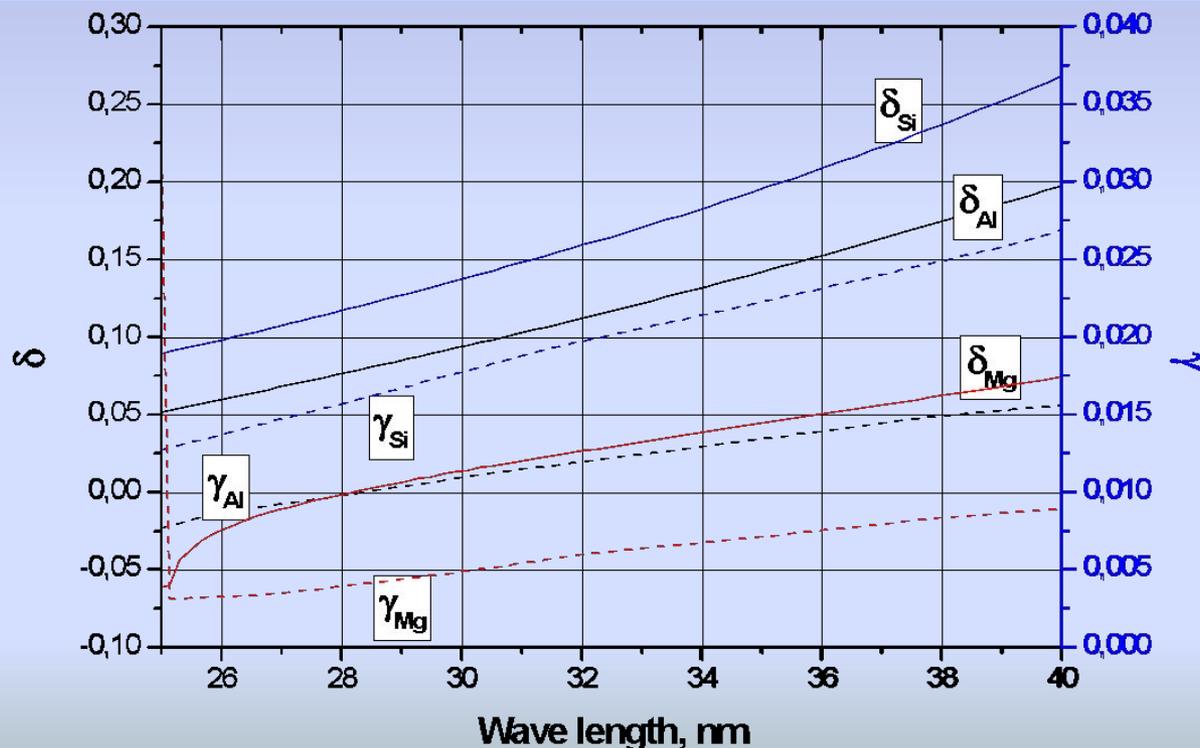
# Выбор материалов

## 1. Выбор базового материала

**$Im(\epsilon_1)$  минимальна**

## 2. Выбор контрастного материала

**$|Re(\epsilon_2 - \epsilon_1)| / Im(\epsilon_2)$  максимально**



$$\epsilon = 1 - \delta + i\gamma$$

**$\lambda = 32$  нм**

**1 – Mg**

**Отношение:**

**Пара Mg/Al – 3,8**

**Пара Mg/Si – 6,8**

# Расчёт характеристик

## 1. Приближённый метод медленных амплитуд

$$|\varepsilon_2 - \varepsilon_1| \ll 1$$

**Преимущества:** рецепт выбора материалов и параметров структуры,  $R = f(\varepsilon_2 - \varepsilon_1, d, \beta)$

**Недостатки:** неточное решение, решение вдали от брэгговских пиков отсутствует, только для периодических структур

## 2. Точный метод рекуррентных соотношений

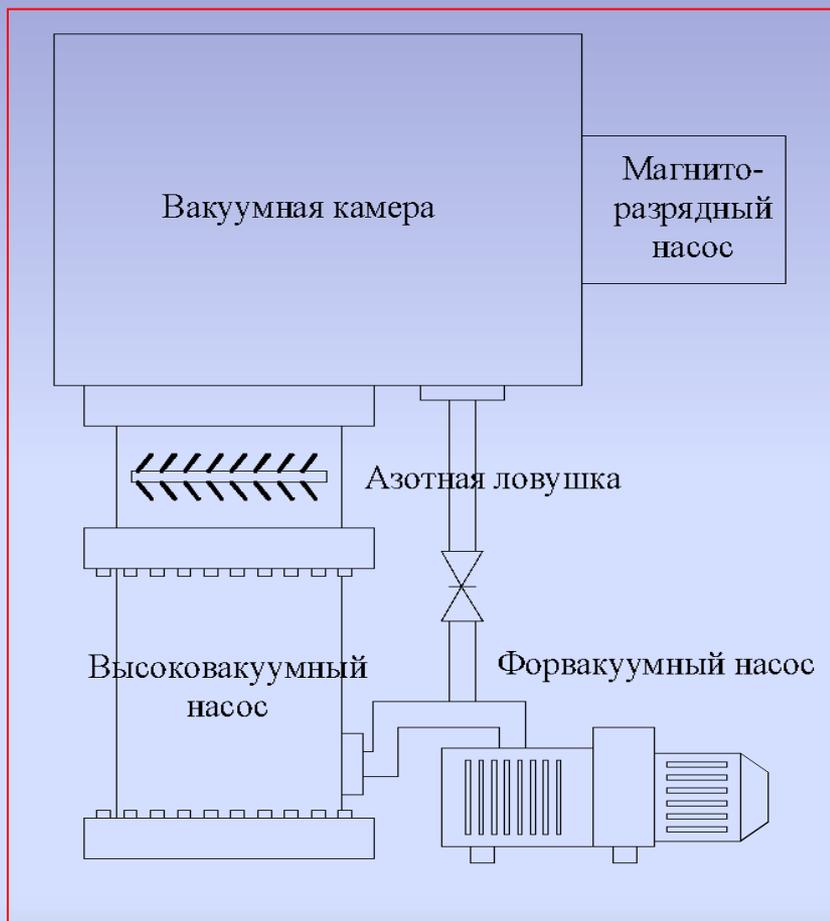
**Преимущества:** точное решение для периодических и аperiodических структур

**Недостатки:** нет рецепта выбора материалов, оптимизация параметров подгонкой,  
 $R = f(\delta_1, \gamma_1, \delta_2, \gamma_2, d, \beta)$

# Разработка и синтез МЗ

- Выбор материалов
- Расчёт отражательных характеристик
- Синтез структур**
- Измерение характеристик, определение истинных параметров
- Коррекция технологического процесса
- Финальный синтез

## 3.1. Вакуумный объём



**Технология синтеза наноструктур начинается с вакуума!**

**Приемлемое давление остаточных газов:**

$$P \sim 7 \div 8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$$

**Основной вклад – водяные пары**

# Электронно-лучевое испарение

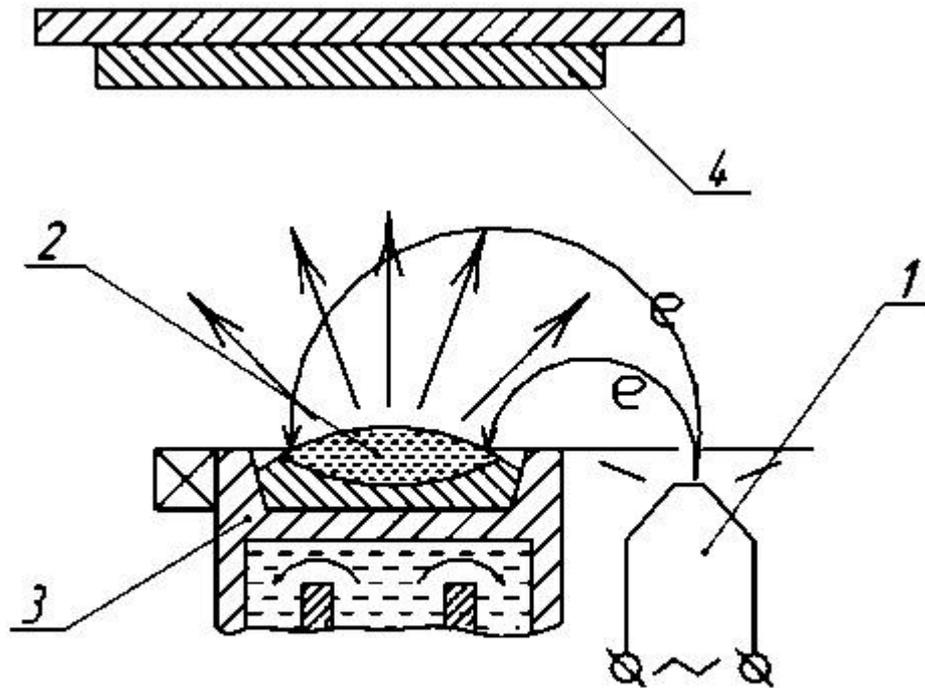
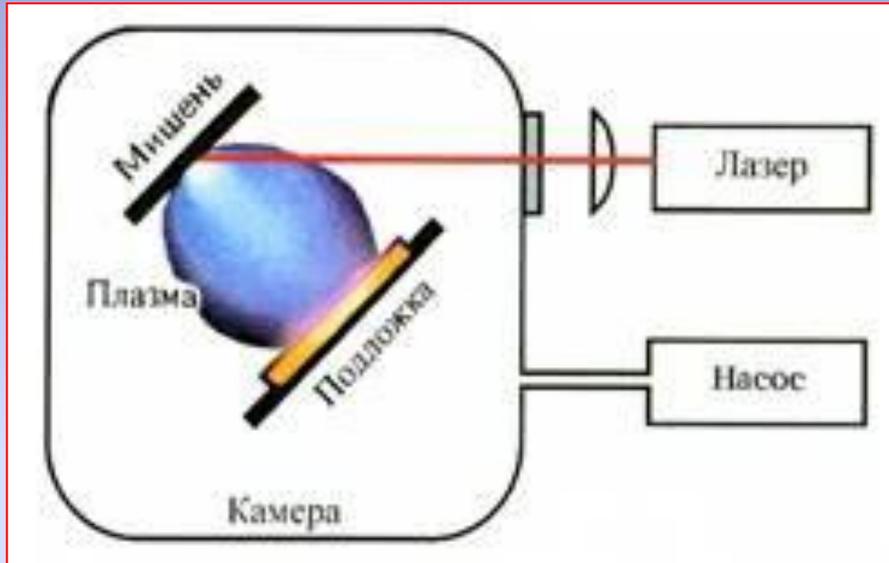


Схема электронно-лучевого испарения

**Принцип:** нагрев мишени пучком электронов, испарение и конденсация на подложке

**Недостатки:** низкая стабильность потока испаренного вещества; низкая энергия частиц испаренного вещества

# Импульсно-лазерное напыление



**Принцип:** использование лазерного излучения для «выбивания» материала с поверхности мишени с последующим его осаждением на подложку

## **Достоинства:**

Высокая скорость осаждения ( $v \approx 10^4 \div 10^5$  нм/сек)

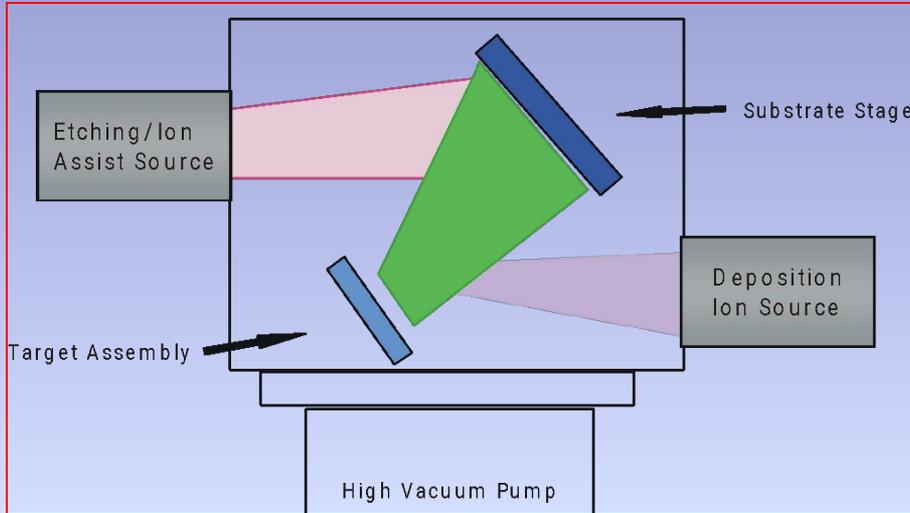
Высокая стабильность толщины осажденной пленки

Высокая энергия осажденных частиц

## **Недостатки:**

Зачастую высокая энергия частиц является недостатком

# Ионно-пучковое напыление



**Принцип:** использование пучка ионов для распыления материала мишени с последующим осаждением его на подложке

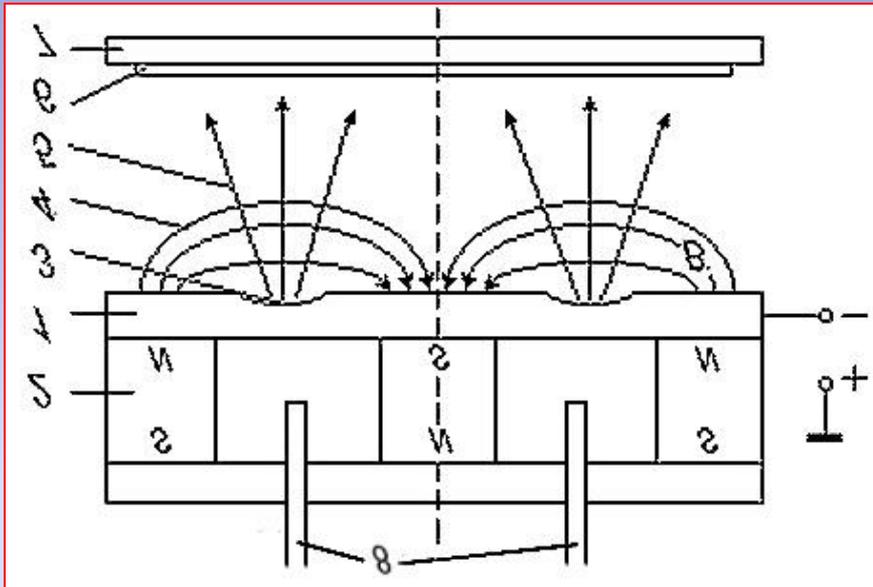
## **Достоинства:**

**Высокая стабильность толщины осажденной пленки**  
**Широкий диапазон энергий распыляющих ионов (от десятков эВ до нескольких кэВ)**

**Применение для бомбардировки атомов нескольких сортов**

**Возможно распыление практически любых материалов**

# Магнетронное напыление: магнетрон



**Принцип:** ионы плазмы устремляются к мишени, находящейся под отрицательным потенциалом и выбивают атомы материала; магнитное поле повышает эффективность разряда

## **Достоинства:**

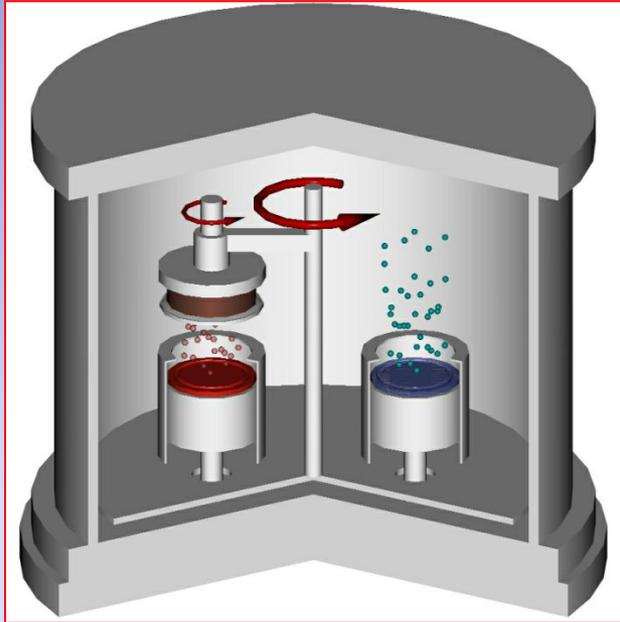
Высокая стабильность толщины осажденной пленки

Оптимальная энергия осажденных частиц

## **Недостатки:**

Узкий диапазон энергии бомбардирующих ионов (200-400 эВ); затруднено распыление магнитных мишеней

# Магнетронное напыление: установка

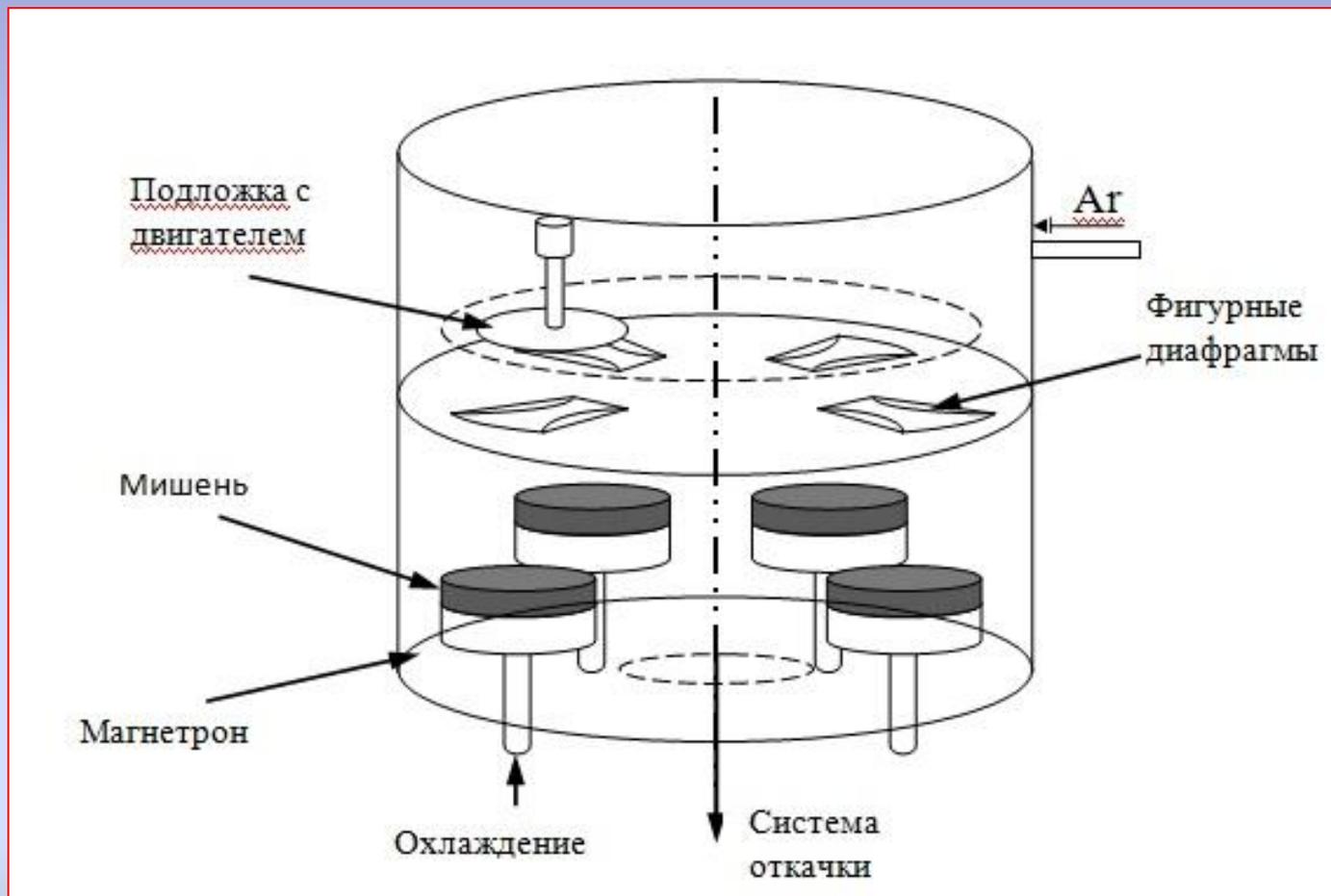


## **Установки в ИФМ РАН:**

**2-х, 4-х и 6-ти магнетронные – распыление до 6 материалов в одном технологическом цикле.**

**Линейные размеры подложек до 300 мм. Точность нанесения покрытий лучше 0,5% (период 7 нм – лучше 0,035 по всей площади подложки и вглубь структуры)**

# Магнетронное напыление: процесс



# Разработка и синтез МЗ

- Выбор материалов
- Расчёт отражательных характеристик
- Синтез структур
- Измерение характеристик, определение истинных параметров
- Коррекция технологического процесса
- Финальный синтез

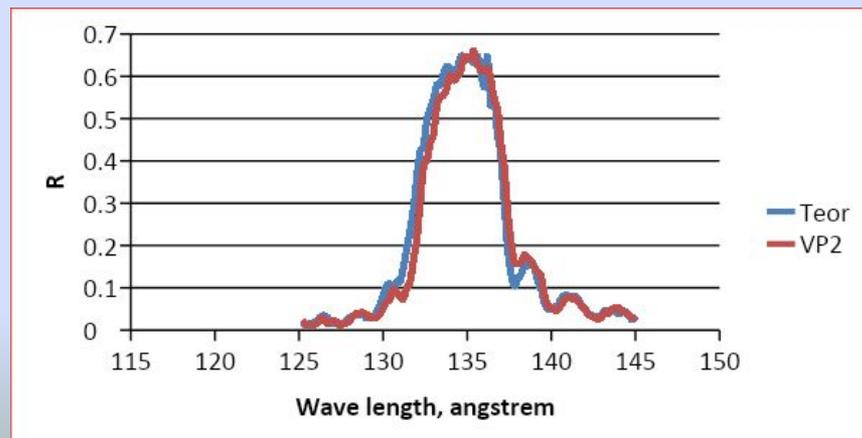
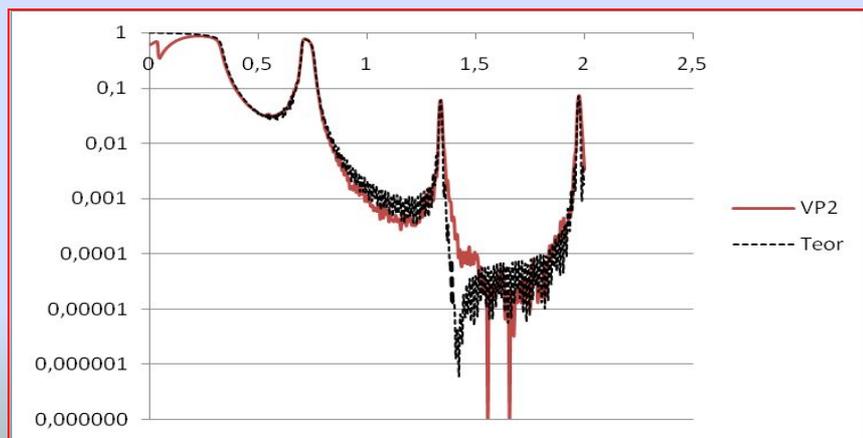
# 4. Измерение характеристик



Мягк. рент.  
и ЭУФ



Жест. рент.  
 $\lambda=0,154$  нм



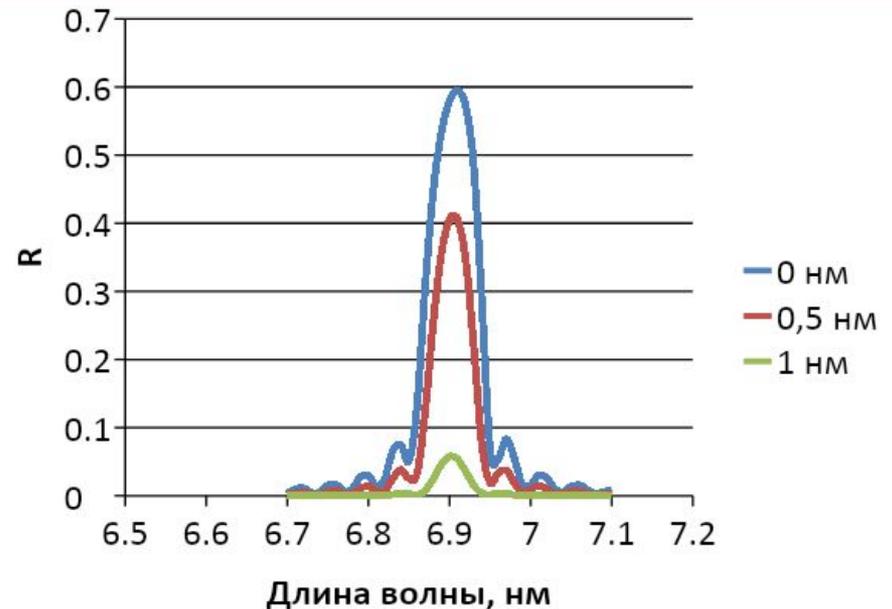
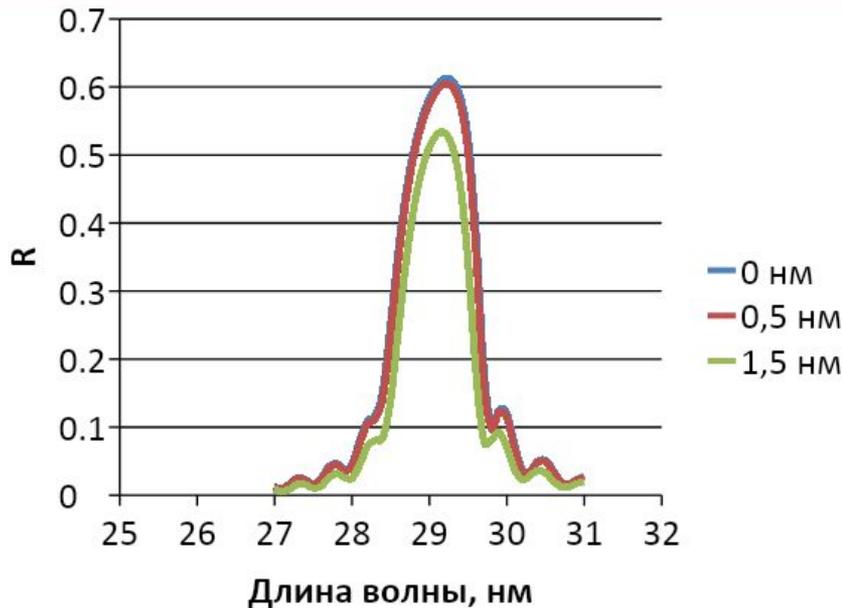
# Влияние межслоевой шероховатости

Учёт шероховатости  $\sigma$ :

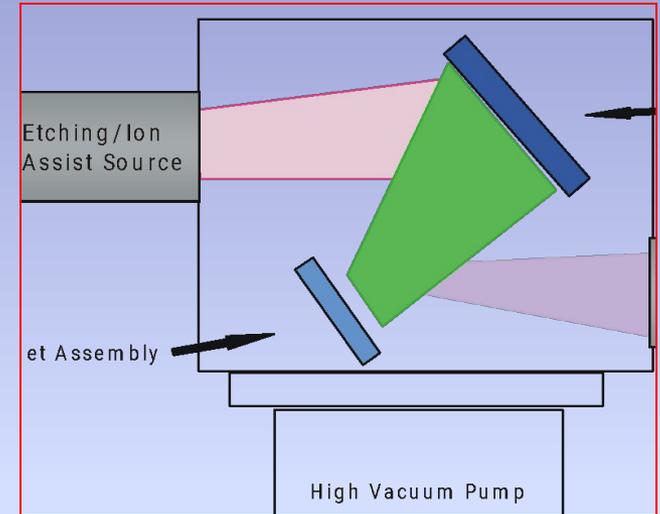
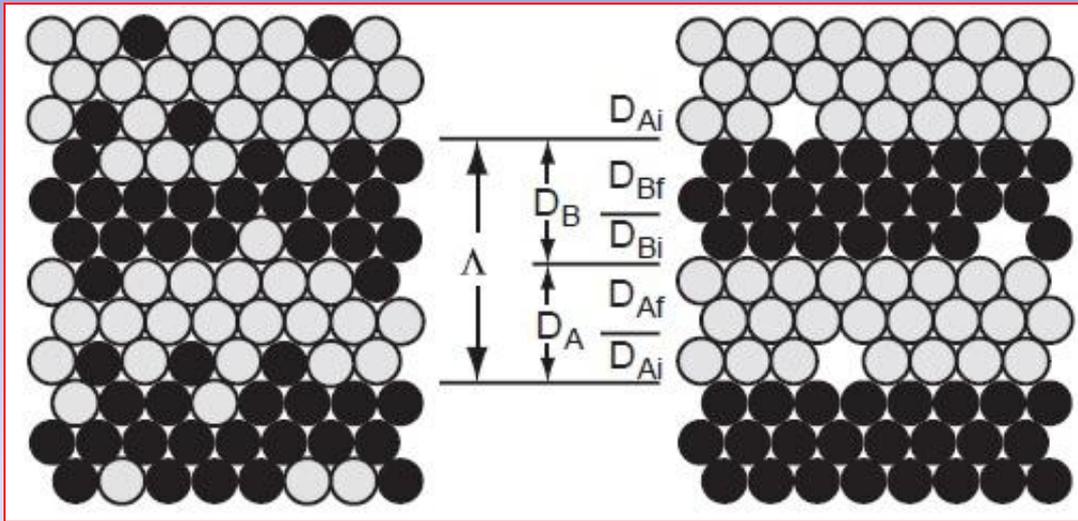
$$R = R_{id} \exp(-4\pi^2 n^2 \sigma^2 / d^2)$$

МЗ Mg/Si  $d=15$  нм

МЗ La/B4C  $d=3.5$  нм



# Межслоевая шероховатость



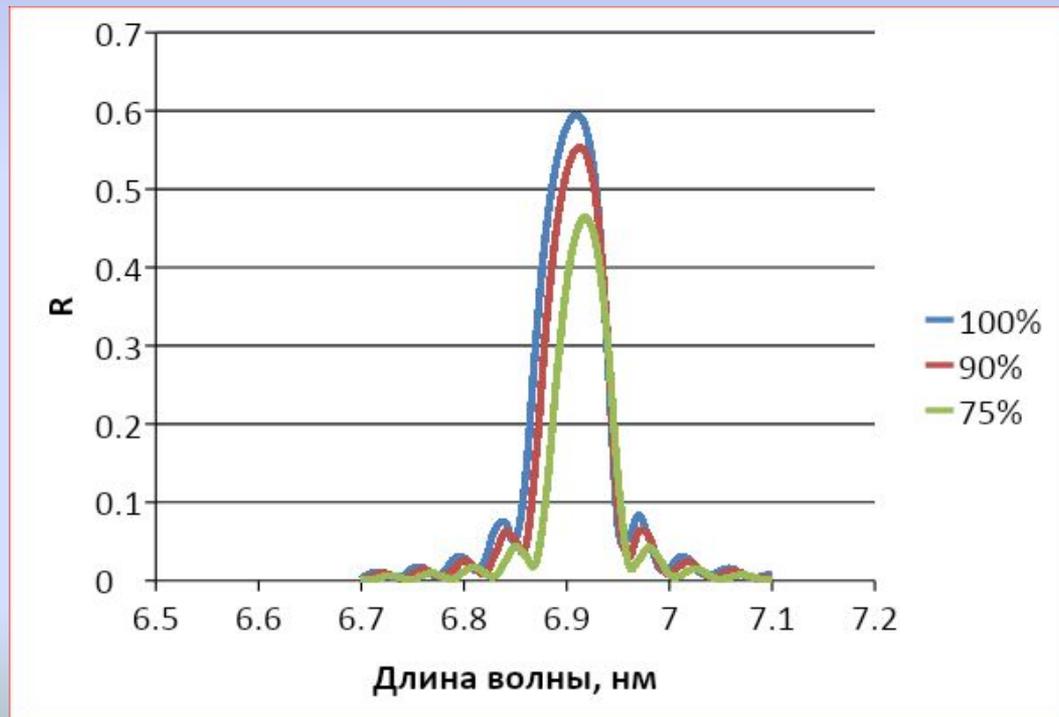
## Методы:

1. Вариация энергии распыляющих ионов
2. Осаждение барьерных слоев
3. Ионное ассистирование и полировка

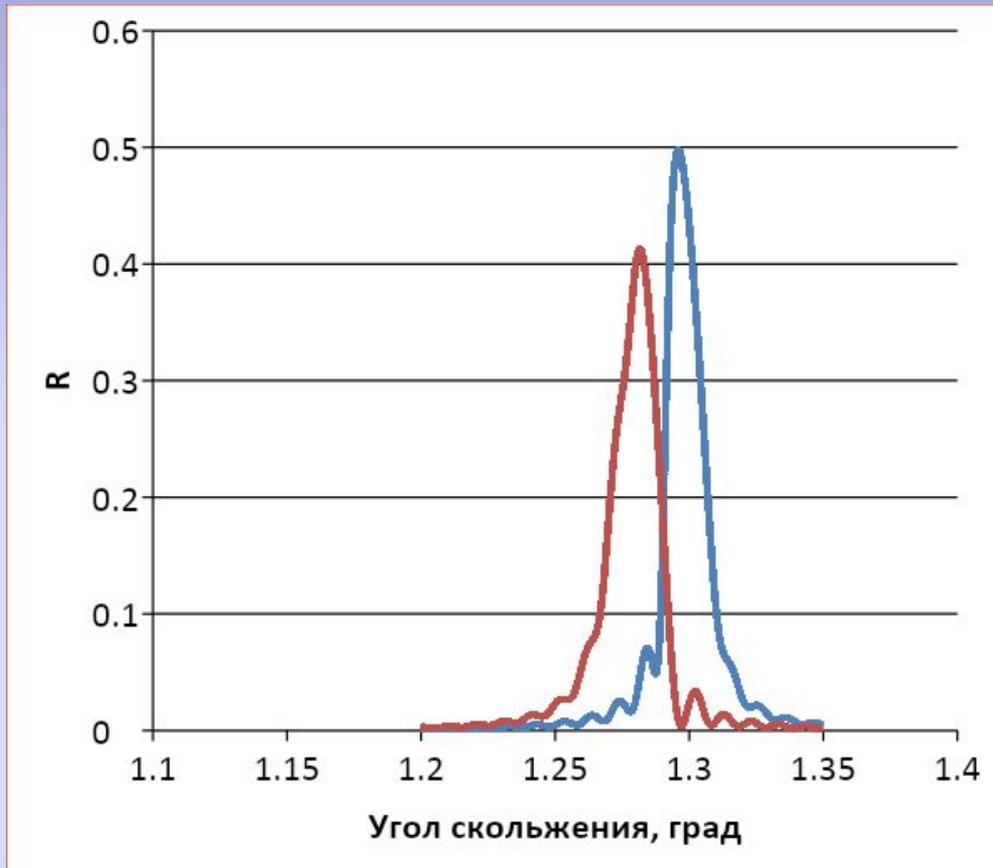
# Влияние плотности плёнок

Поскольку  $\varepsilon=f(\rho)$ , то  $R=F(\rho)$

Зависимость  $R$  от  $\rho$  La для M3 La/B4C



# Влияние неперIODичности структуры



Сравнение 1-го брэгговского пика ( $\lambda=0,154$  нм) для периодического МЗ La/B4C  $d=3,5$  нм и МЗ с линейным уходом периода от 3,5 нм до 3,57 нм

# Разработка и синтез МЗ

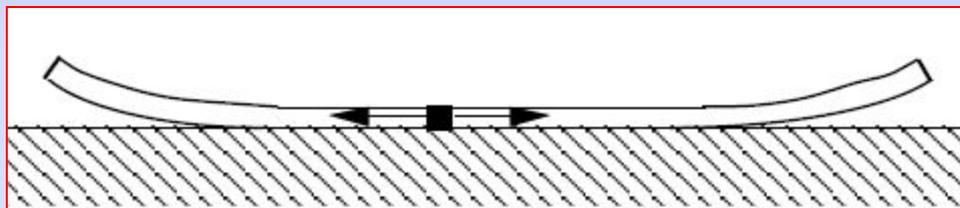
- Выбор материалов
- Расчёт отражательных характеристик
- Синтез структур
- Измерение характеристик, определение истинных параметров
- **Коррекция технологического процесса**
- **Финальный синтез**

# Внутренние напряжения в МЗ

## Негативные последствия



**Отслаивание плёнки**

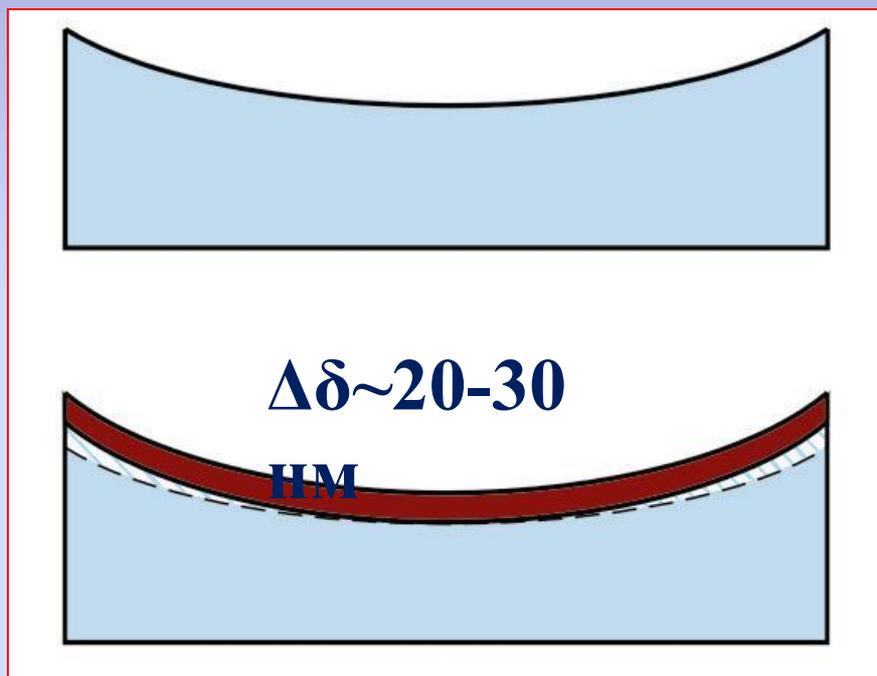


**Скручивание при  
стравливании**



**Деформация подложки**

# Внутренние напряжения в МЗ



**Требование:** точность формы поверхности элемента схемы **0,3-0,6 нм**

Осаждённое на подложку МЗ может привести к искажению формы на **десятки нм!**

**Спасибо за внимание**