

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

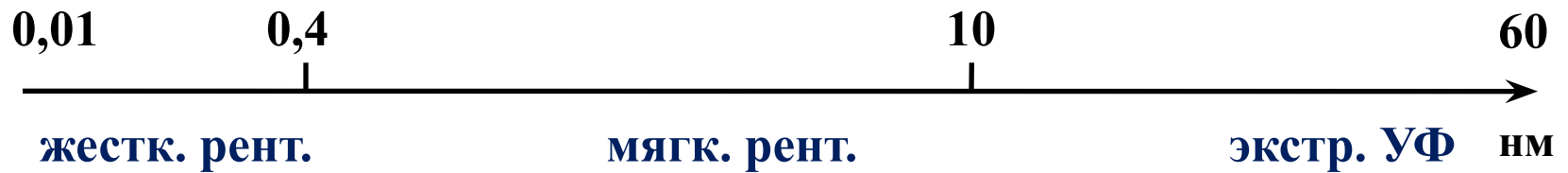
2. Многослойные зеркала

3. Методы синтеза многослойных структур

4. Основные характеристики зеркал

1.1. Особенности рентгеновского излучения

Рентгеновский и ЭУФ диапазон



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

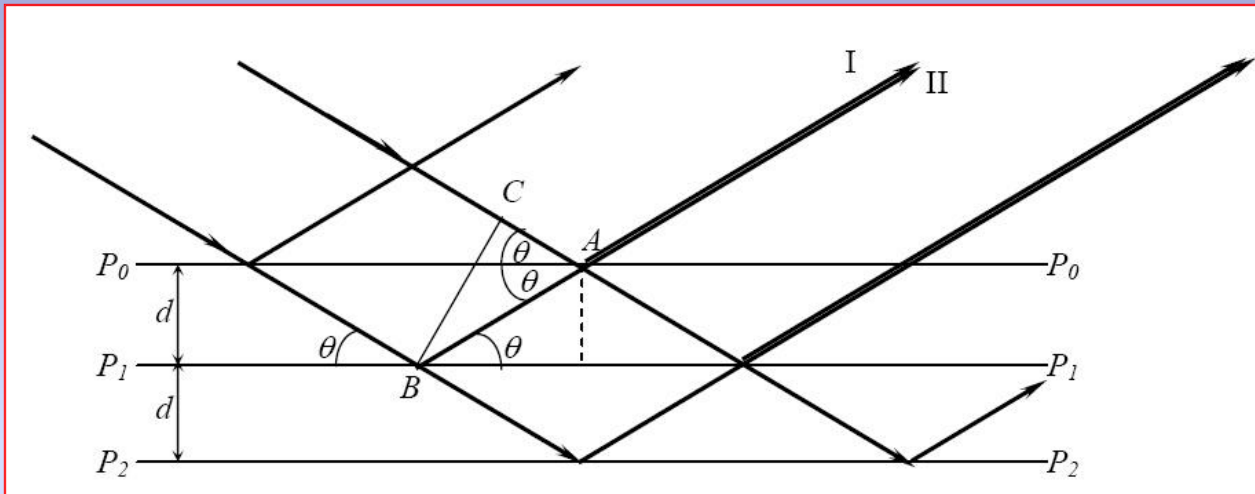
- 1) Создание преломляющей оптики затруднено.
- 2) Коэффициенты отражения при больших углах скольжения малы.

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:**
 $2d \cdot \sin\theta = n\lambda$

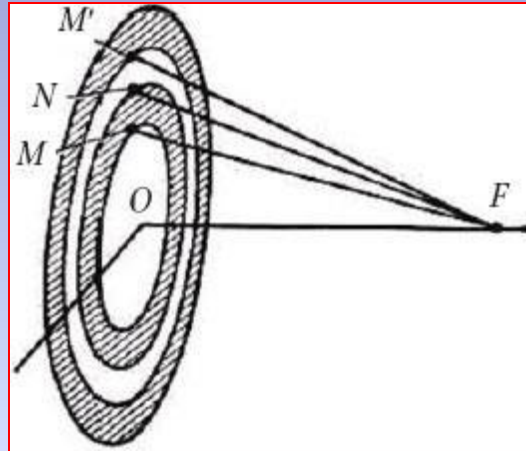
Достоинство:

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:

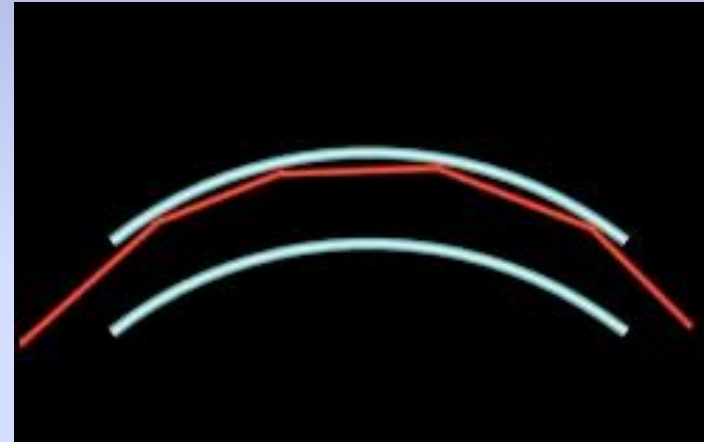
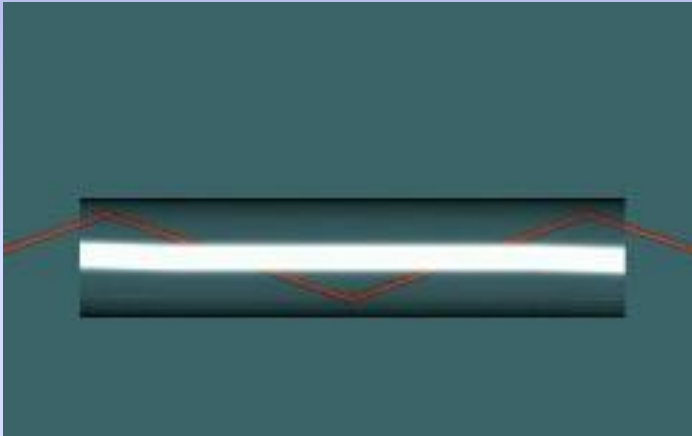
Высокое пространственное разрешение

Недостатки:

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

«Линзы» Кумахова

Принцип: многократное полное внешнее отражение от стенок



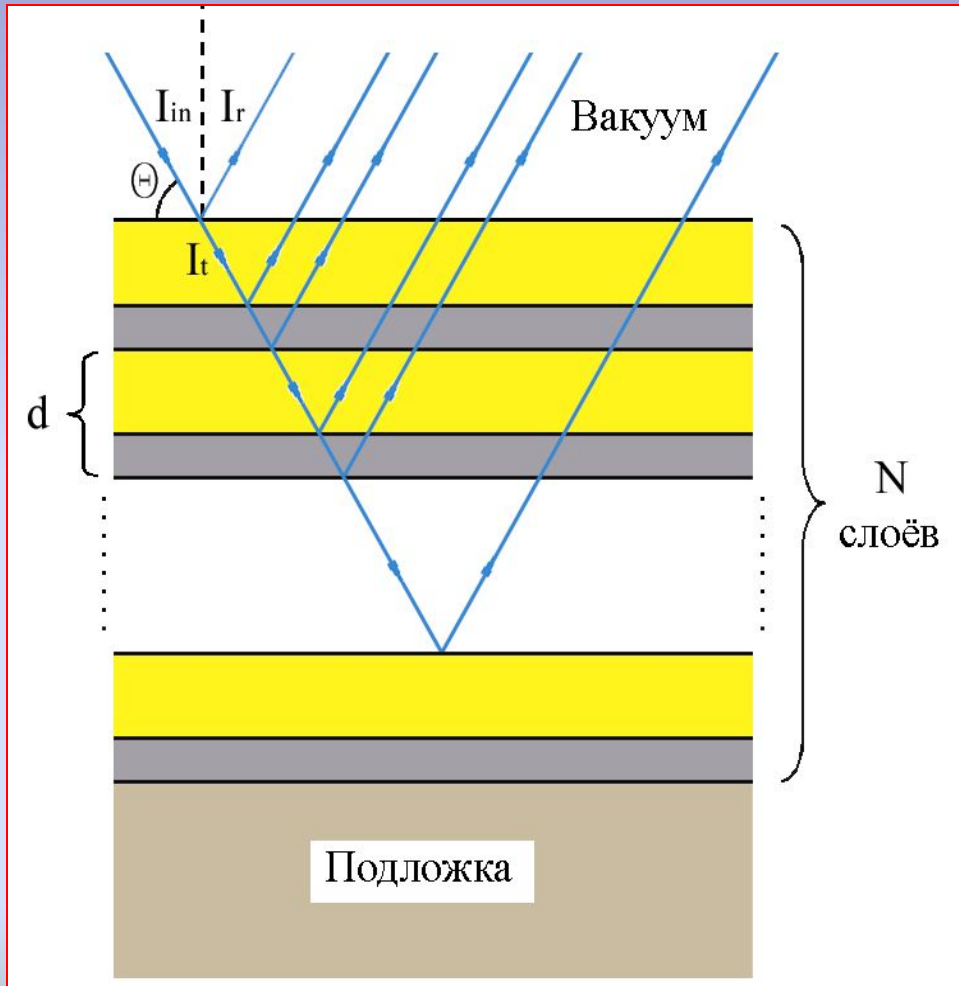
Достоинство:

Нет ограничения на апертуру – высокая светосила

Недостатки:

- Полихроматичность
- Угловой разброс выходного излучения

2. Многослойные зеркала



Принцип:
интерференция волн,
отражённых от границ
раздела материалов

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

$$d = h_1 + h_2$$

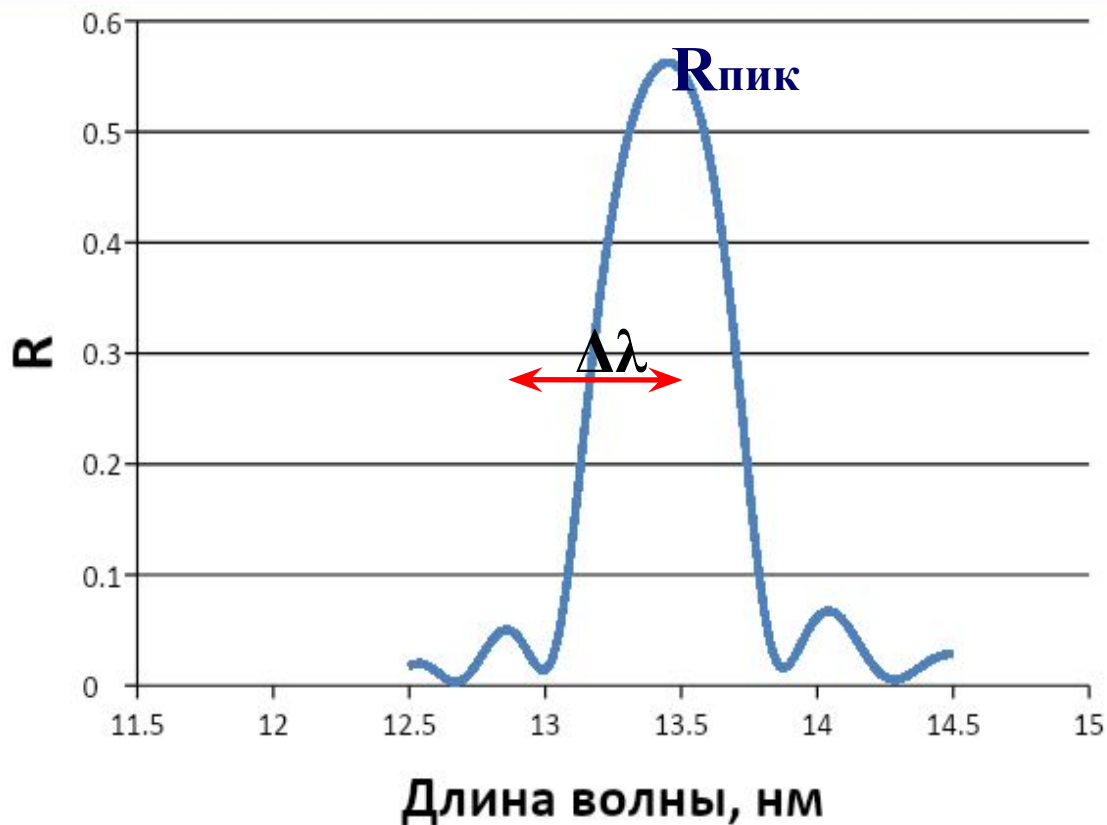
$$d \approx 0.7 \div 30 \text{ нм}$$

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

$$N \sim 10 \div 1000$$

Отражательные характеристики МЗ

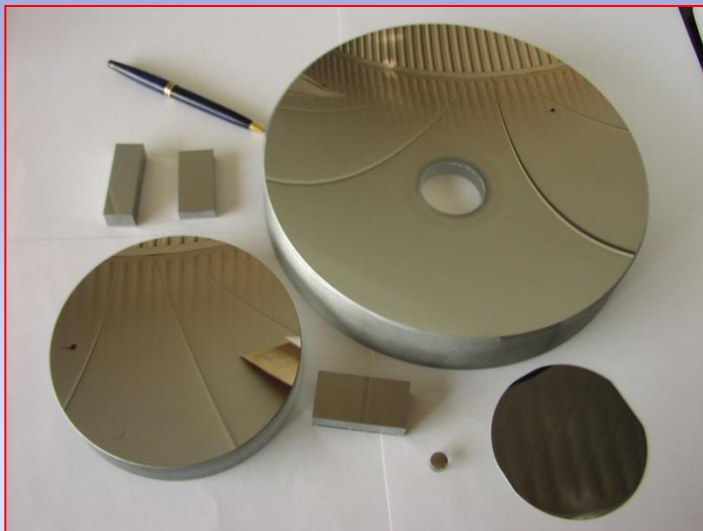
Для заданного угла падения



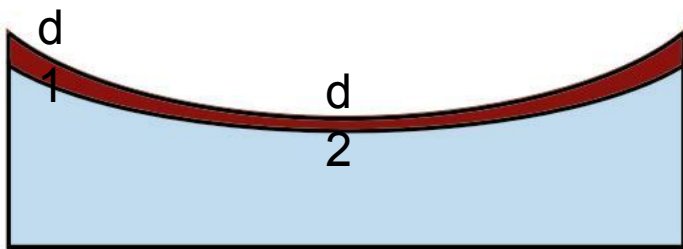
Первостепенно:
 $R(\lambda)$ в
окрестности
рабочей λ ($R_{\text{пик}}$,
 $\Delta\lambda$)

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

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**

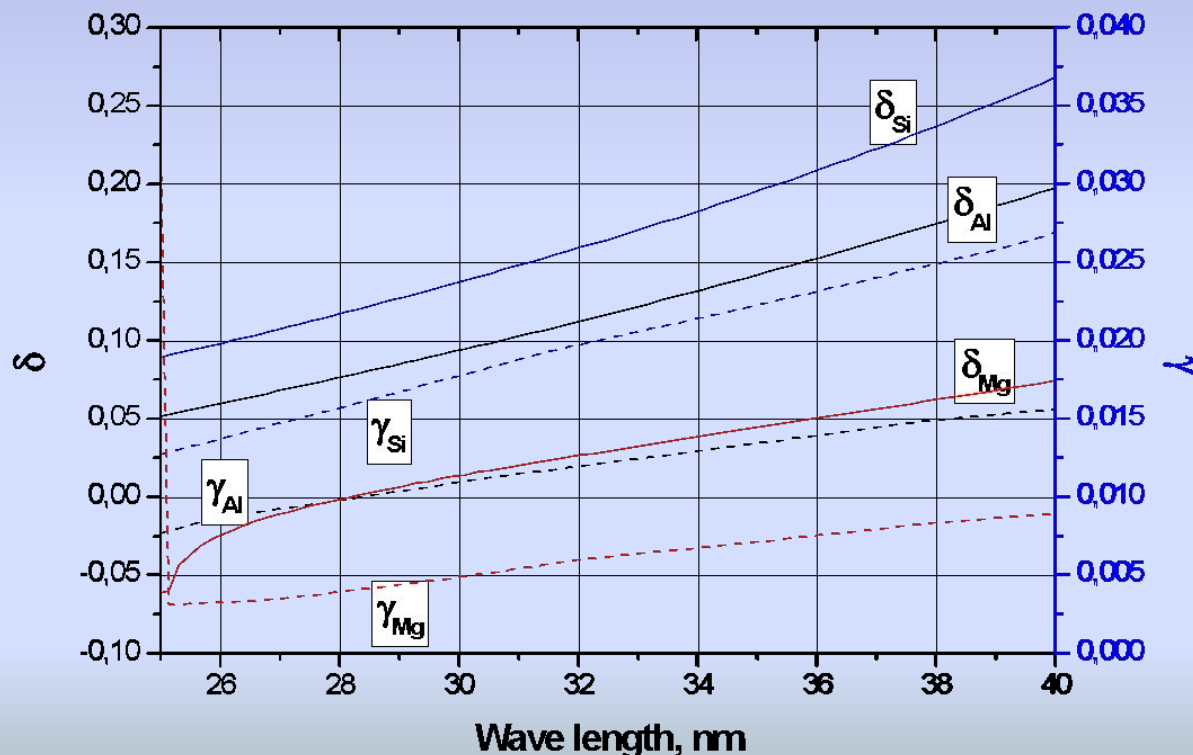
Выбор материалов

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

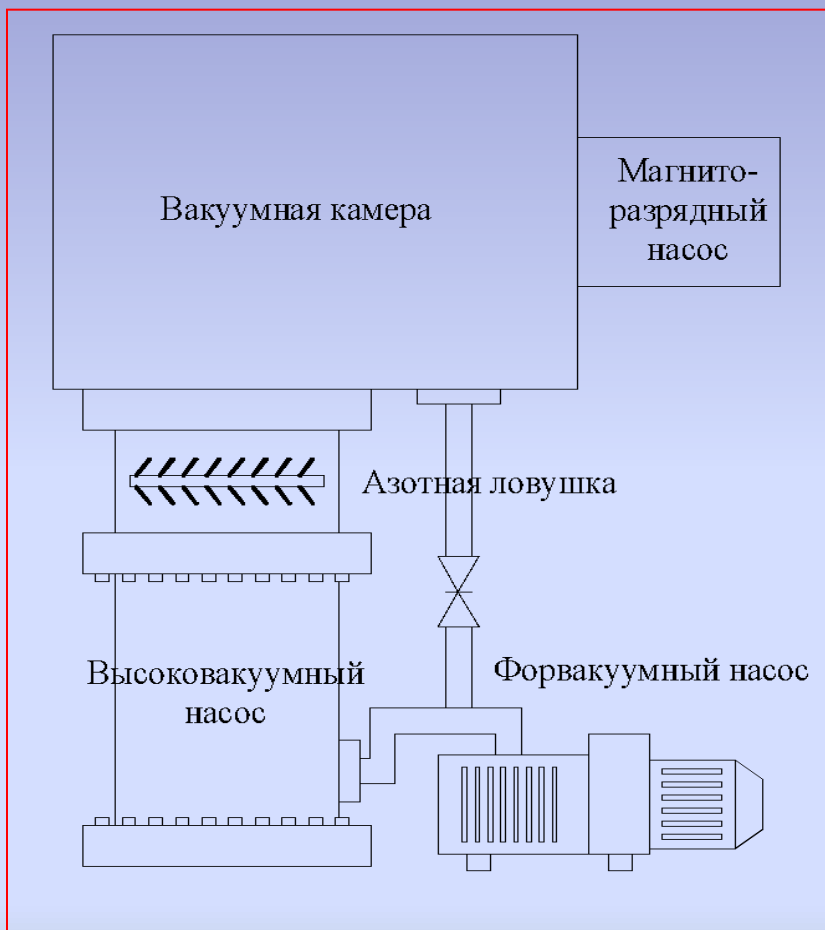
Преимущества: точное решение для периодических и аperiodических структур

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

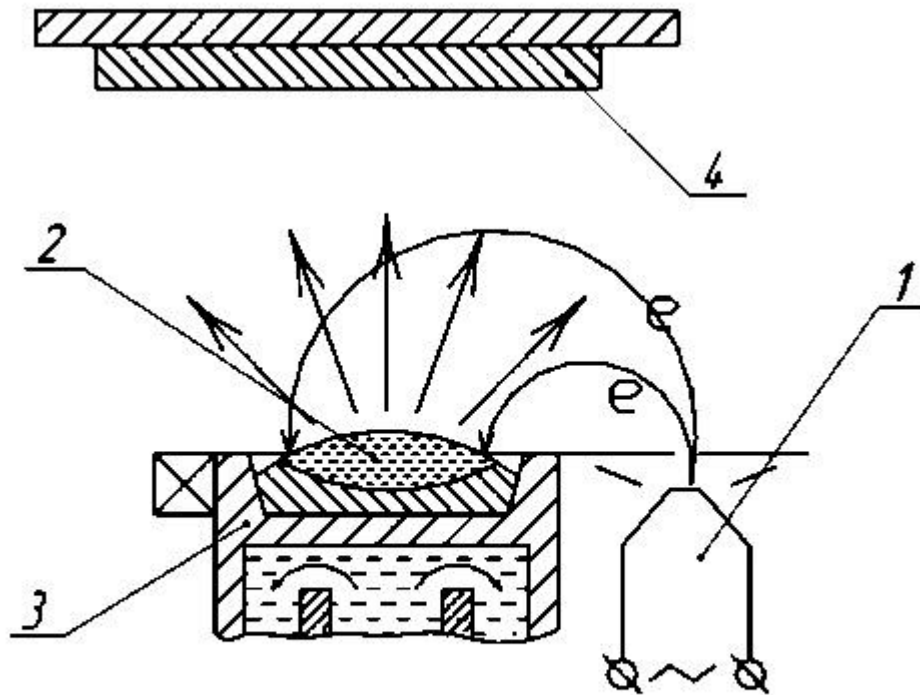
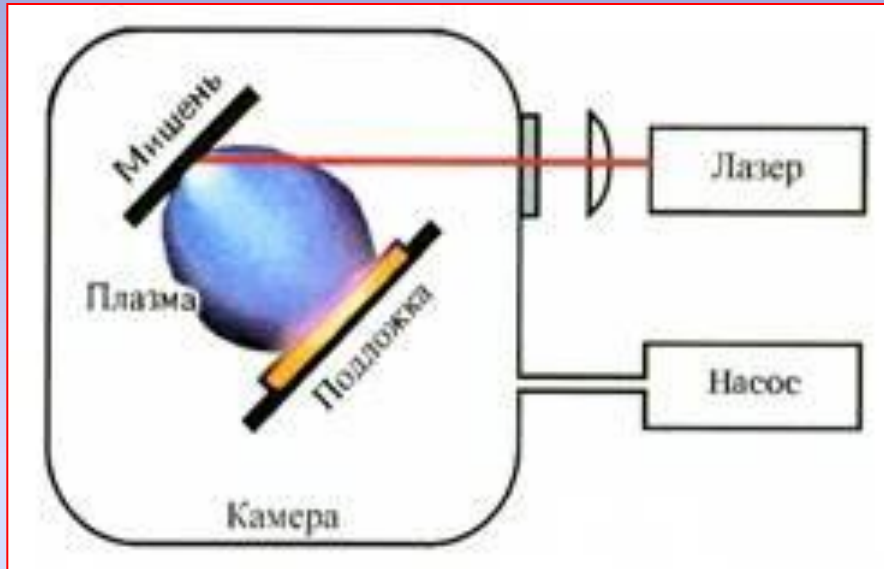


Схема электронно-лучевого испарения

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)

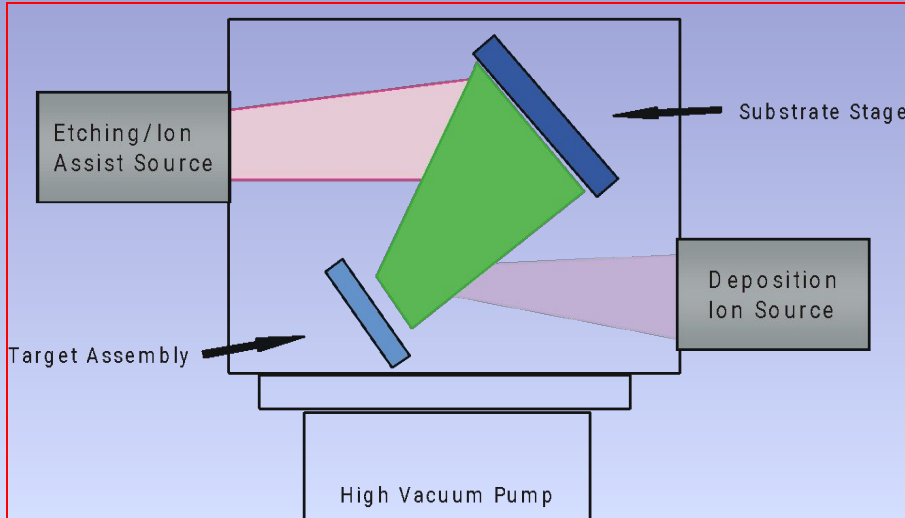
Высокая стабильность толщины осажденной пленки

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

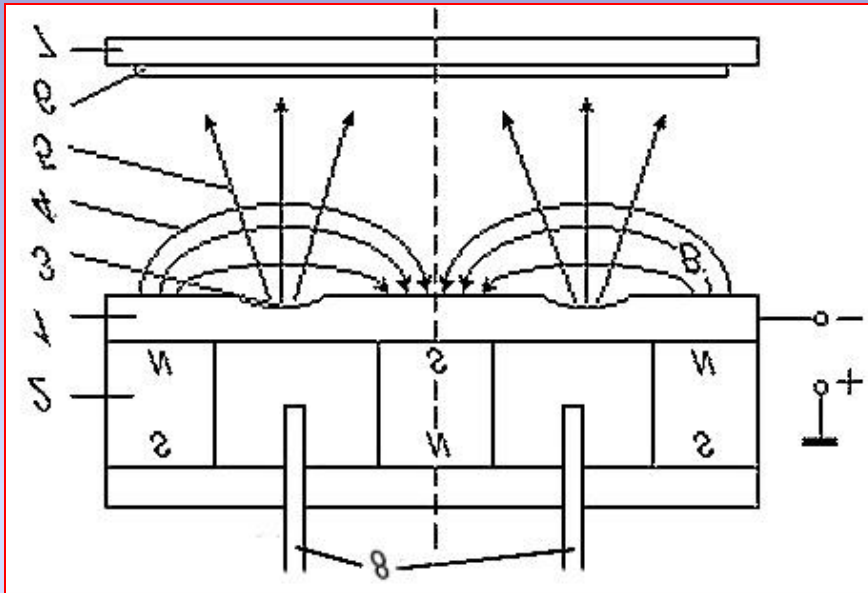
Достоинства:

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:

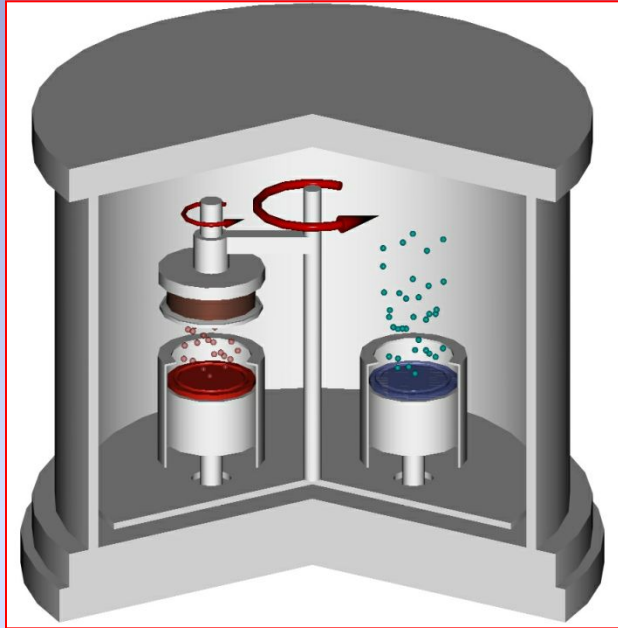
Высокая стабильность толщины осажденной пленки

Оптимальная энергия осажденных частиц

Недостатки:

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

Магнетронное напыление: установка

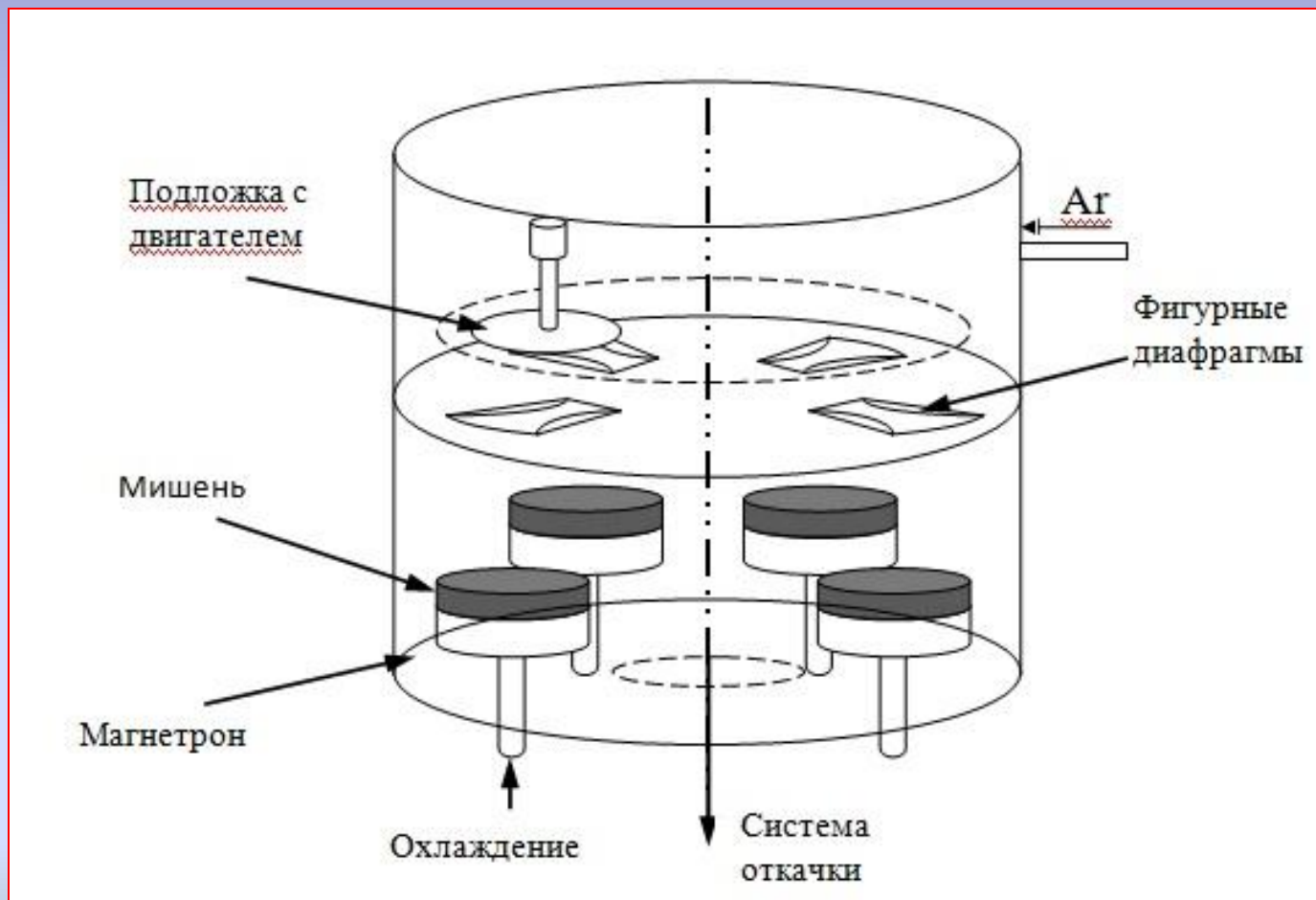


Установки в ИФМ РАН:

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

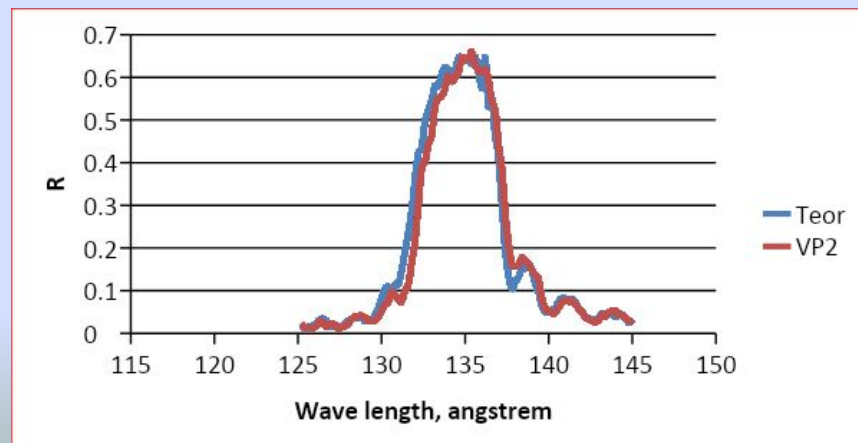
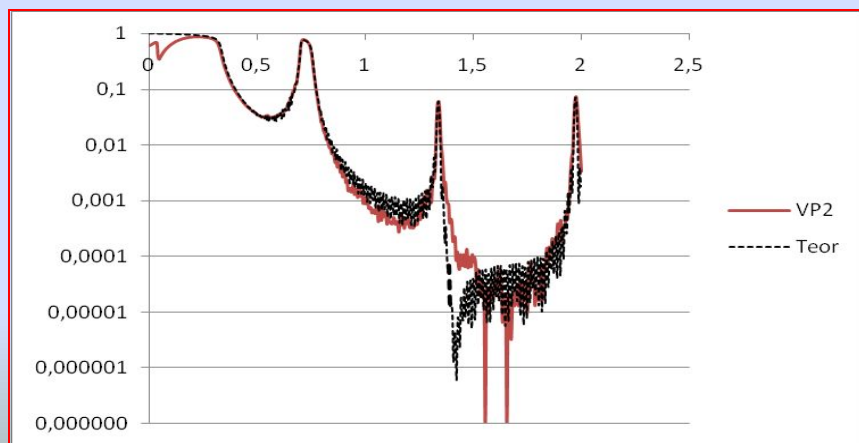
4. Измерение характеристик



Мягк. рент.
и ЭУФ



Жест. рент.
 $\lambda=0,154$ нм



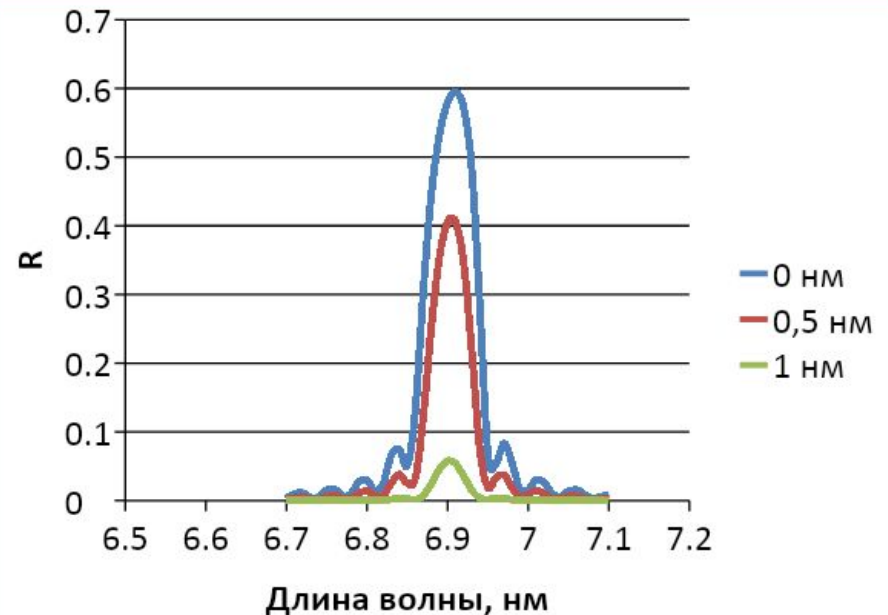
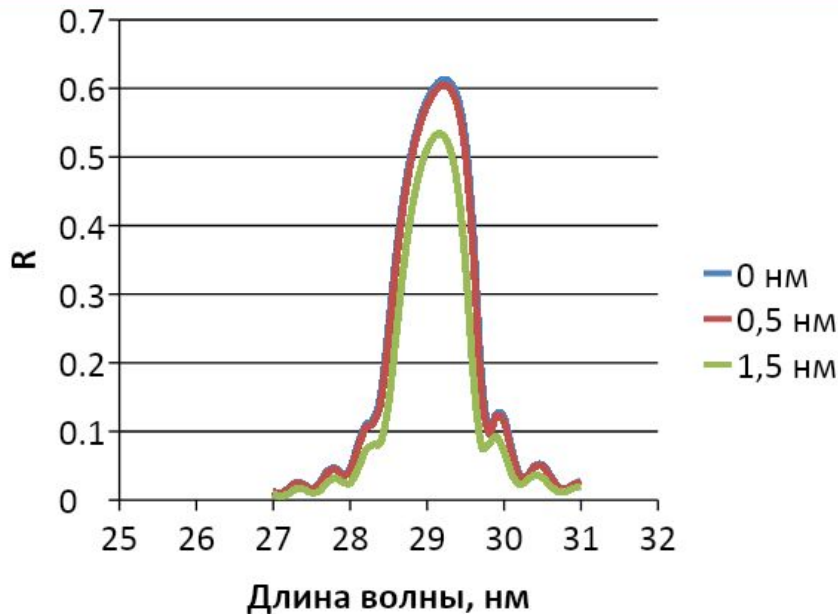
Влияние межслоевой шероховатости

Учёт шероховатости σ :

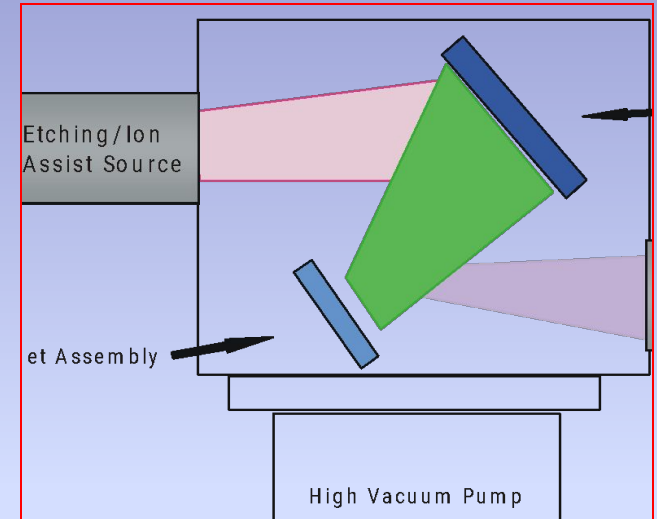
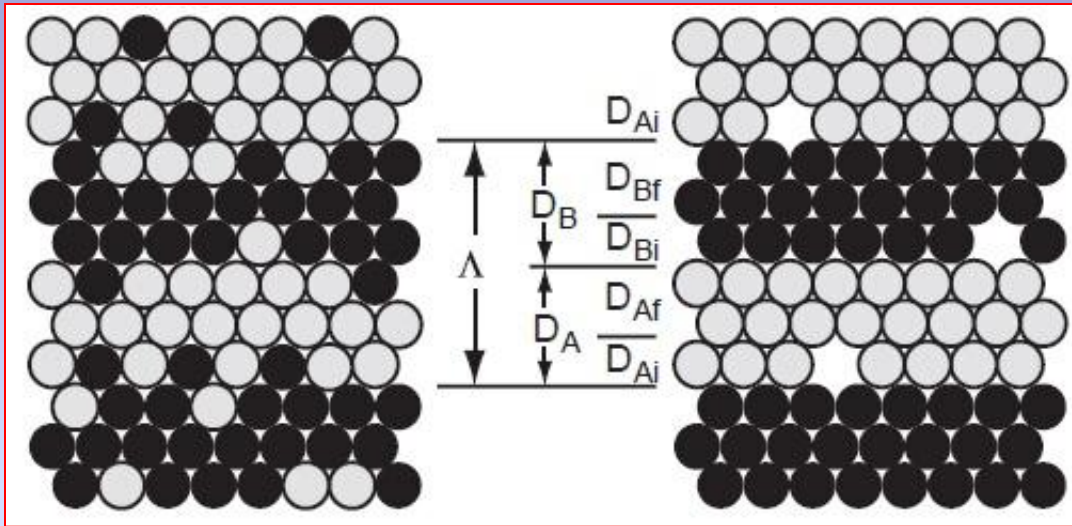
$$R = R_{id} \exp(-4\pi^2 n^2 \sigma^2 / d^2)$$

МЗ Mg/Si $d=15$ нм

МЗ La/B4C $d=3.5$ нм



Межслоевая шероховатость



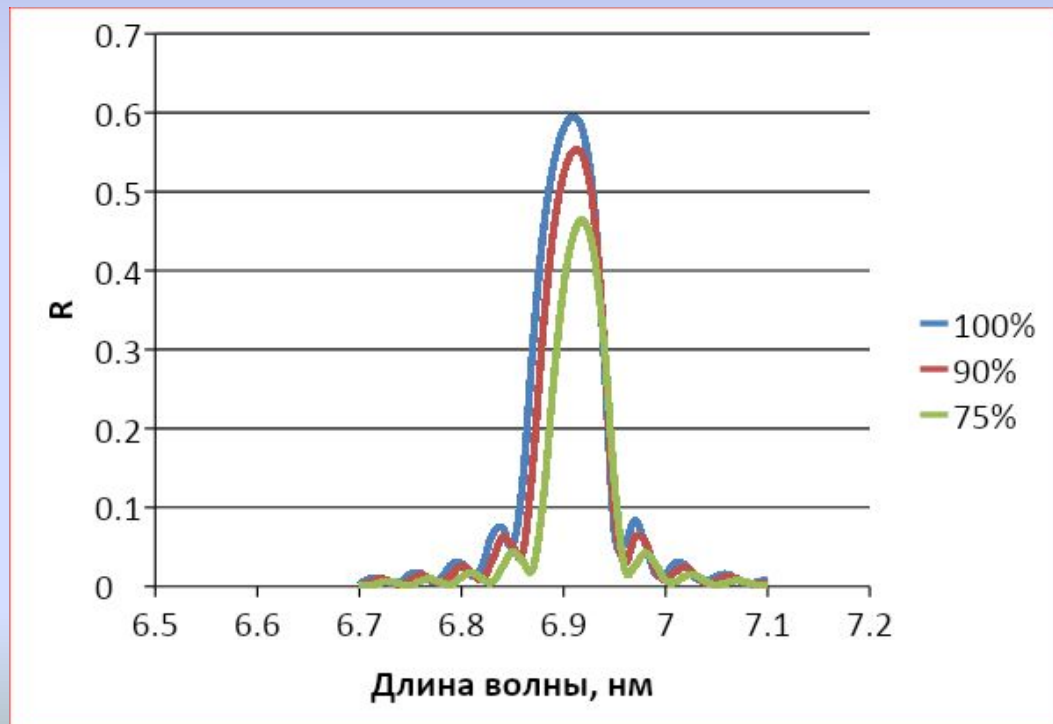
Методы:

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

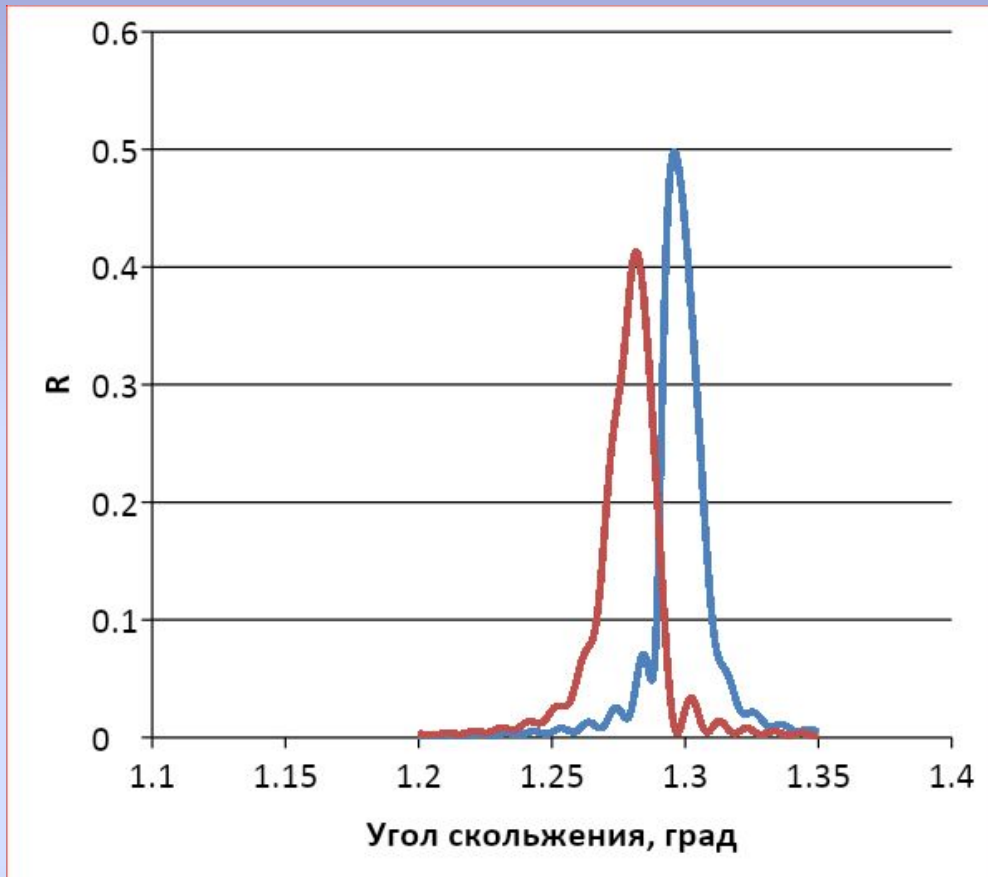
Влияние плотности плёнок

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

Зависимость R от ρ La для M3 La/B4C



Влияние неперодичности 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

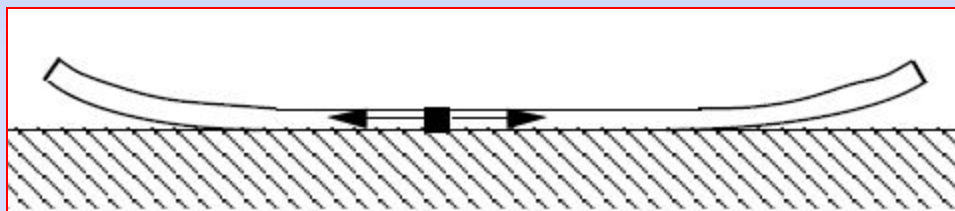
- Выбор материалов
- Расчёт отражательных характеристик
- Синтез структур
- Измерение характеристик, определение истинных параметров
- **Коррекция технологического процесса**
- **Финальный синтез**

Внутренние напряжения в МЗ

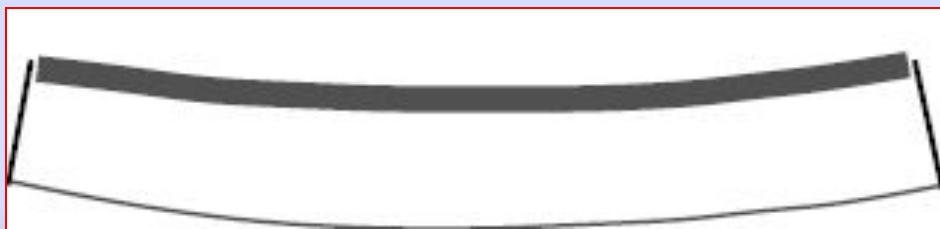
Негативные последствия



Отслаивание плёнки

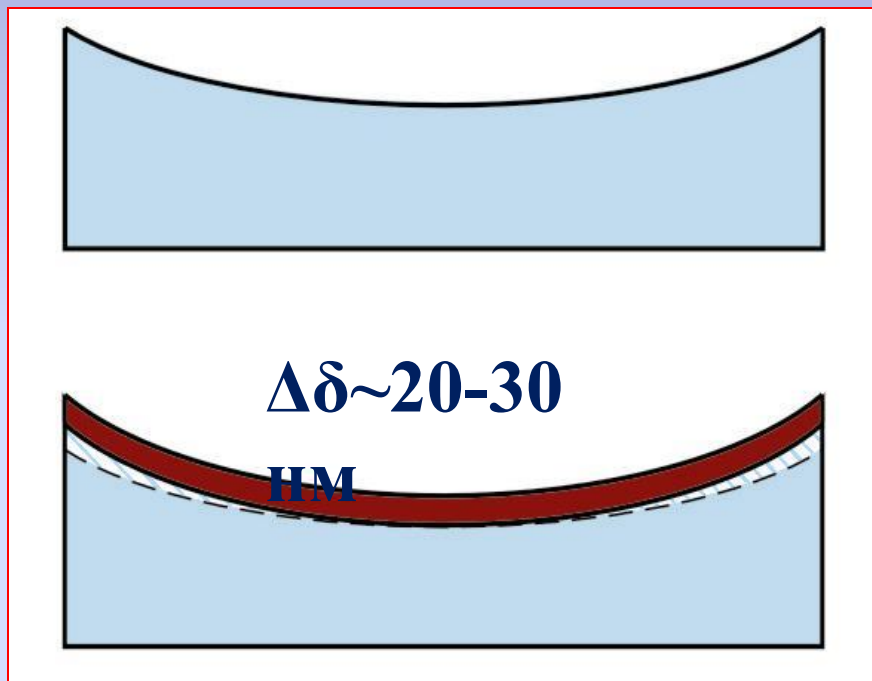


**Скручивание при
стравливании**



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