

Санкт-Петербургский  
государственный  
университет  
Физический факультет  
Кафедра нейтронной и  
синхротронной физики

**Сыромятников Владислав Генрихович**

*Лекция 4. Нейтронные многослойные монохроматоры  
и монохроматоры-поляризаторы.  
Их использование в эксперименте.*



Уравнение Брэгга с учетом рефракции:

$$m\lambda_{mB} = 2d_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{mB}}{\lambda_{ep1}}\right)^2} + 2d_2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{mB}}{\lambda_{ep2}}\right)^2} \quad (12)$$

Коэффициент отражения нейтронного пучка от Периодической Многослойной Структуры (ПМС), состоящей из чередующихся слоев материалов  $i$  и  $j$ , для брэгговского пика  $m$ -го порядка этой ПМС в кинематическом приближении представлен следующим выражением:

$$R_m = \frac{4N^2 d^4 |F_m|^2}{m^2} \quad (13)$$

где  $N$  - число пар слоев,  $m$  - порядок брэгговского отражения,  $d$  - величин периода ПМС,

$|F_m|$  - структурный фактор бислоя.

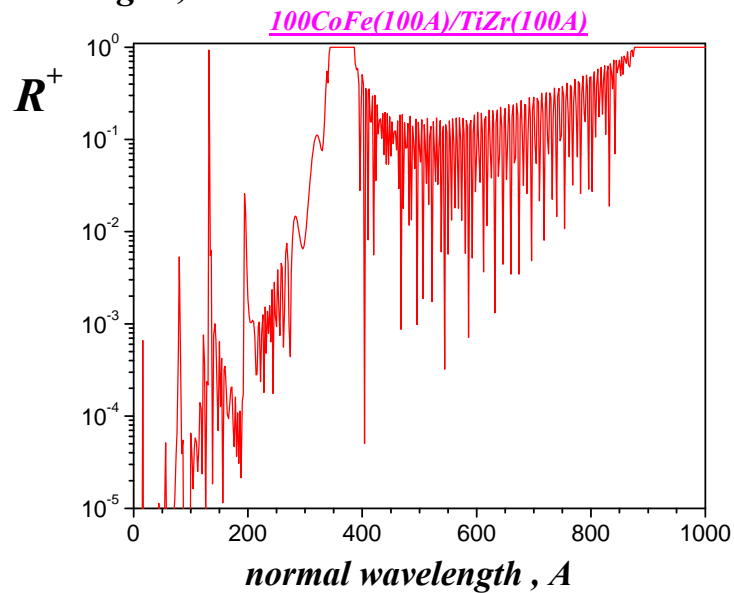
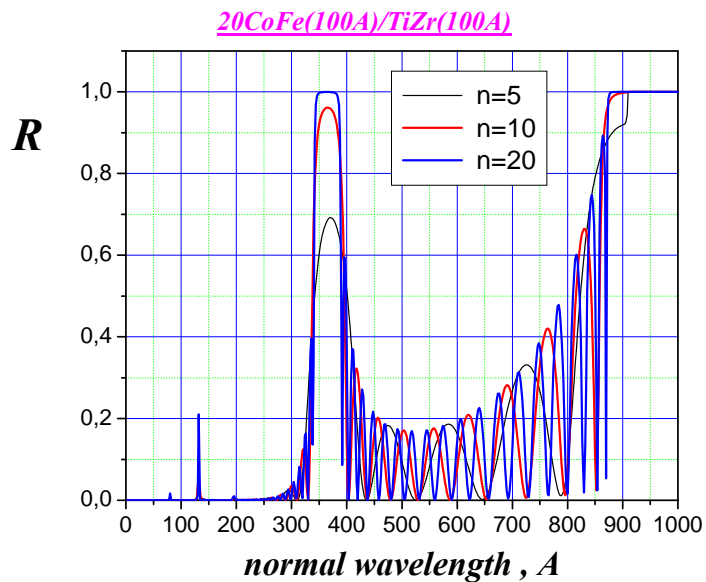
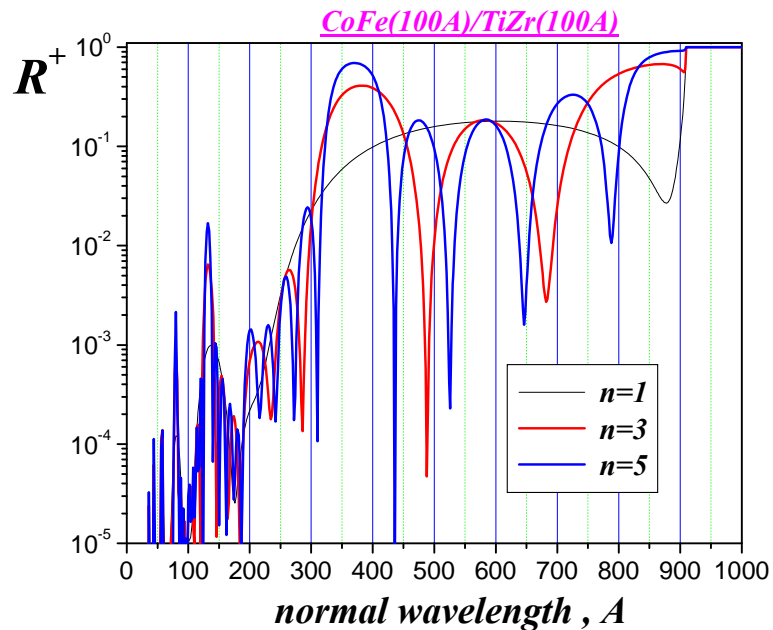
$$|F_m| = \left[ (f_i - f_j) \frac{\sin(ms\pi)}{m\pi} \right]^2 \quad (14)$$

где  $s = d_i / (d_i + d_j)$ ,  $d = d_i + d_j$ ,  $d_i$  и  $d_j$  - толщина слоя  $i$  и  $j$ ,

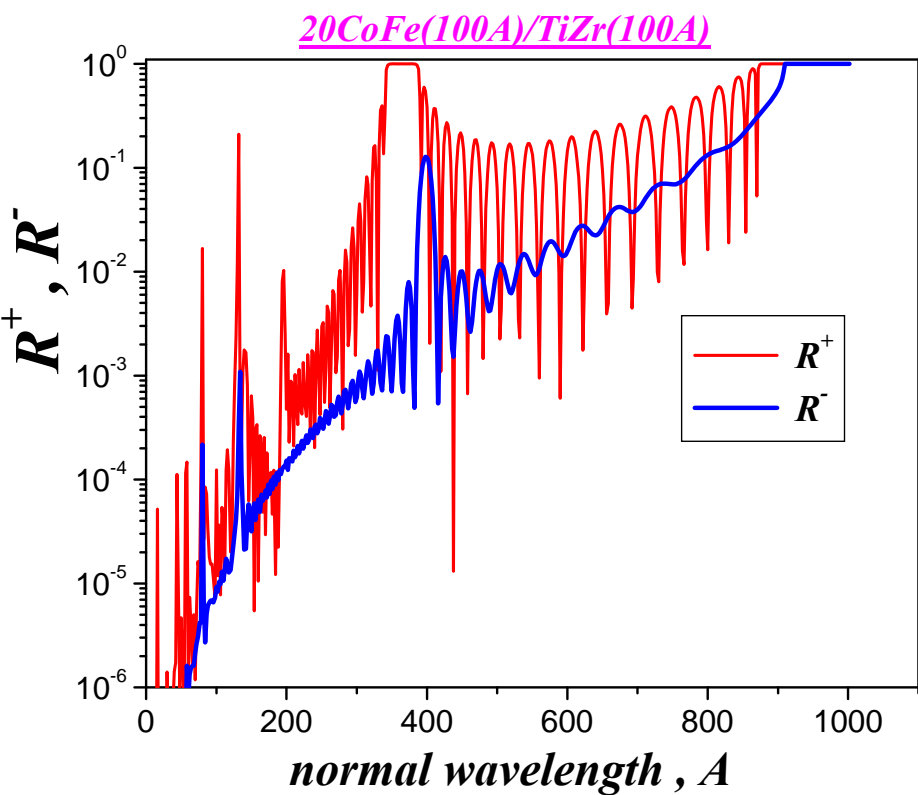
соответственно,  $f_i$  и  $f_j$  - плотности длин когерентного рассеяния слоев  $i$  и  $j$ ,

соответственно,  $f_i = (Nb)_i$ ,  $f_j = (Nb)_j$ .  $\bar{V} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} V_1^+ + \frac{d_2}{d_1 + d_2} V_2$  - средний потенциал структуры

# Периодическая структура CoFe/TiZr с разным числом пар слоев.

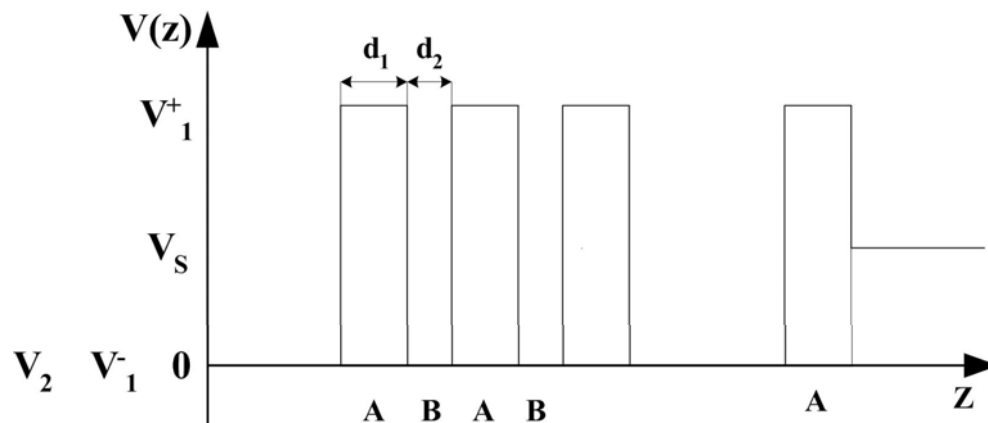


# Периодическая структура CoFe/TiZr

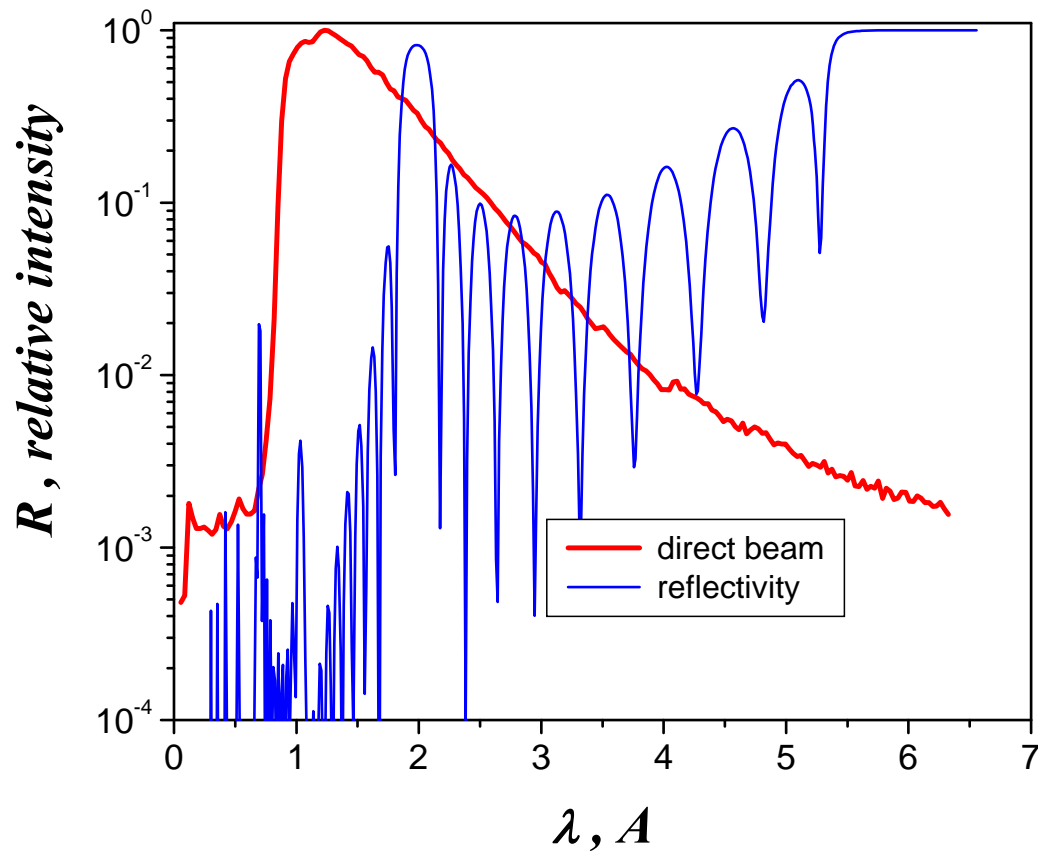


$$\lambda_B^+ = 2 \cdot d_1 \sqrt{1 - \frac{\lambda_B^{+2}}{\lambda_{zp1}^{+2}}} + 2 \cdot d_2 \sqrt{1 - \frac{\lambda_B^{+2}}{\lambda_{zp2}^{+2}}}$$

$$\lambda_B^- = 2 \cdot d_1 \sqrt{1 - \frac{\lambda_B^{-2}}{\lambda_{zp1}^{-2}}} + 2 \cdot d_2 \sqrt{1 - \frac{\lambda_B^{-2}}{\lambda_{zp2}^{-2}}}$$

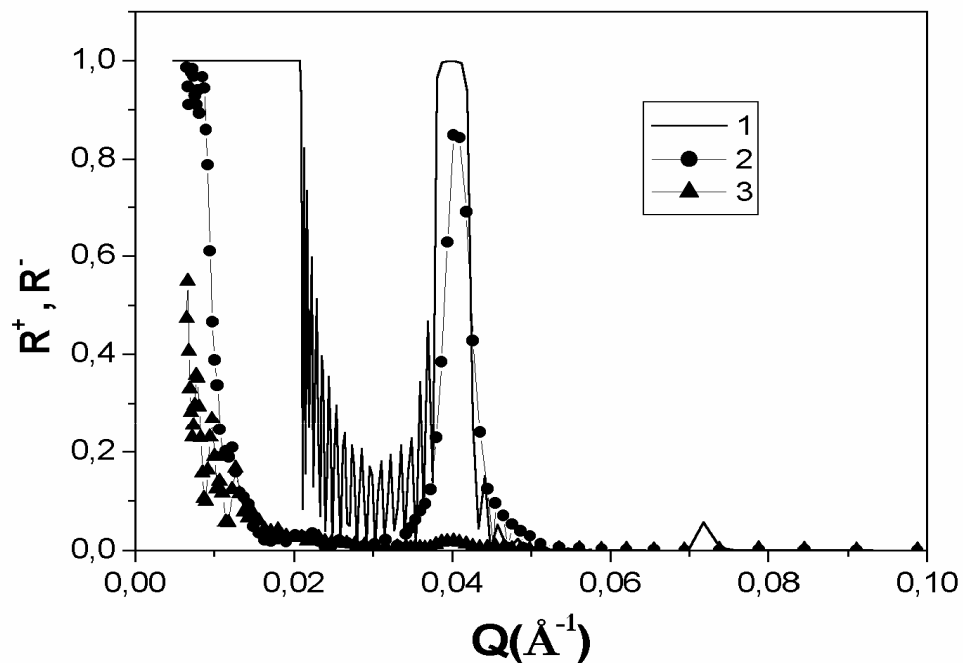
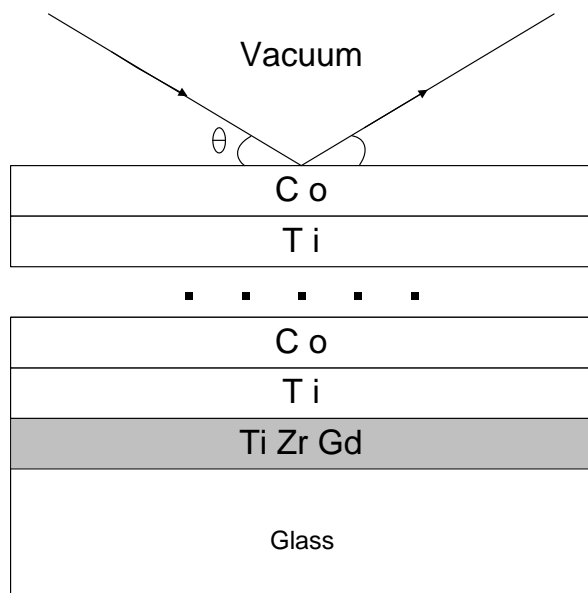


$$\bar{V} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} V_1^+ + \frac{d_2}{d_1 + d_2} V_2$$



Сдвиг края области полного отражения в область меньших  $Q$  достигается соответствующим выбором толщин слоев. При этом, как показывают расчеты, наряду с вкладом от области полного отражения, уменьшаются вклады от интерференционной области и от брэгговского пика 2-го порядка.

# Монохроматор-поляризатор на стекле

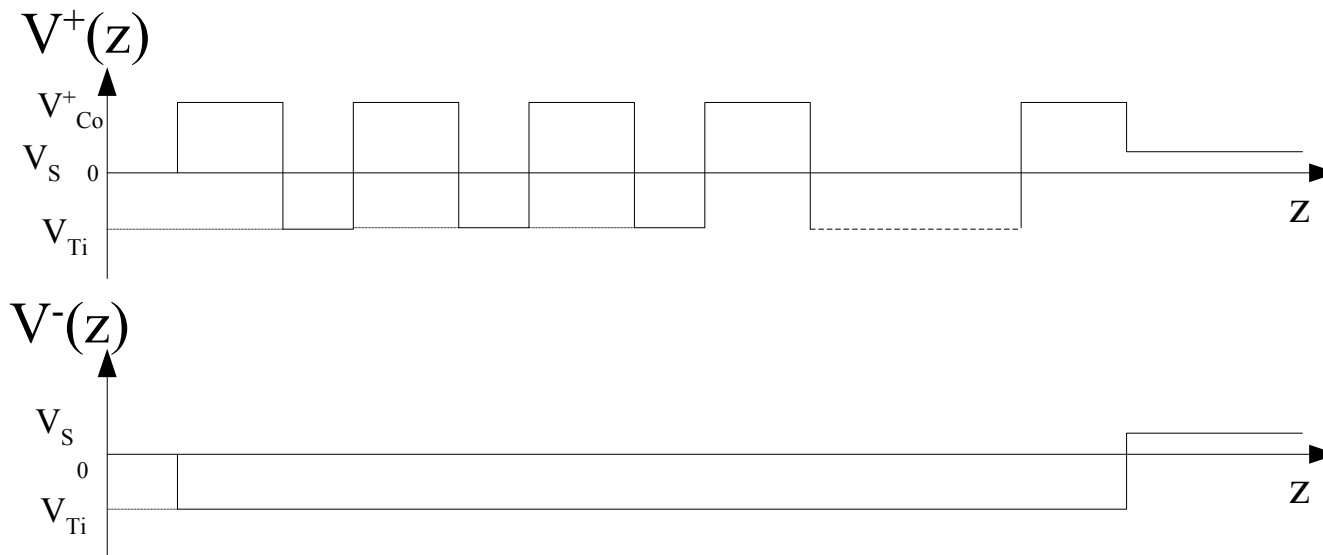


**Рис. 1.** Схема многослойного монохроматора-поляризатора Co/Ti на стеклянной подложке.

$20Co (70 \text{ Å}) Ti (90 \text{ Å})$

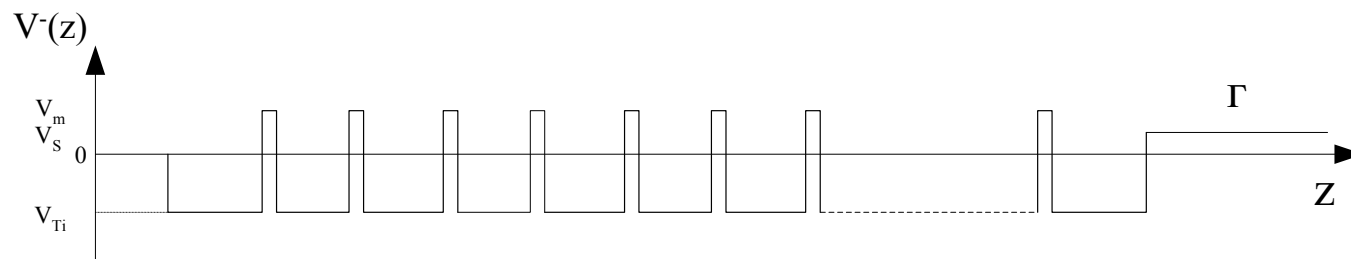
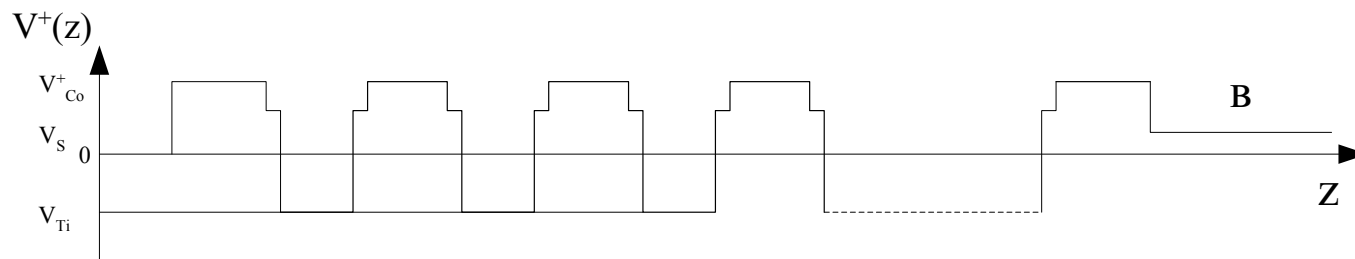
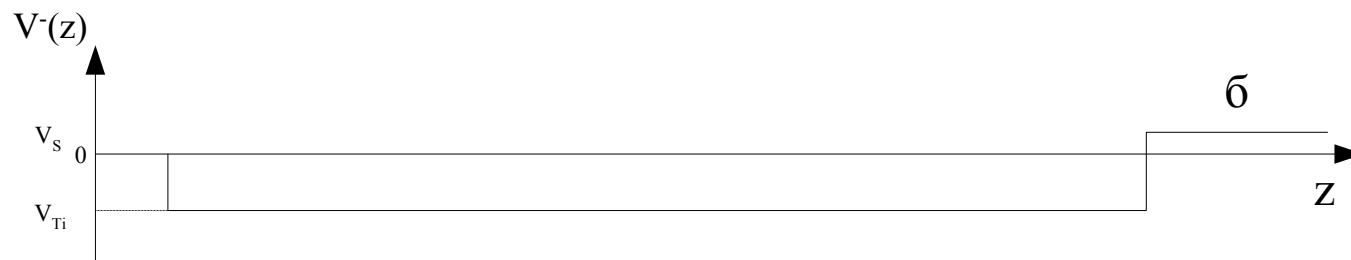
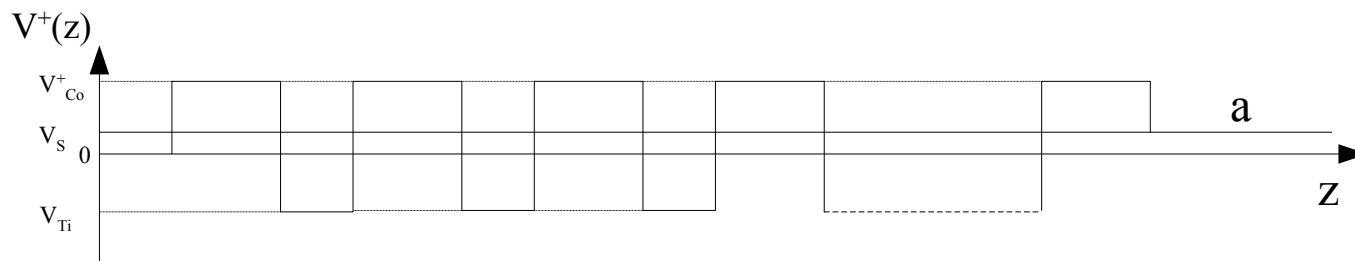
$TiZrGd 3000 \text{ Å}$

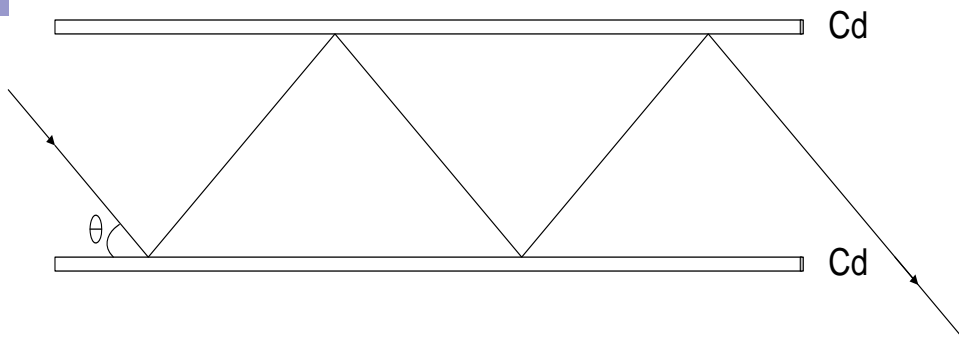
# Идеальный монохроматор-поляризатор Co/Ti на стекле.



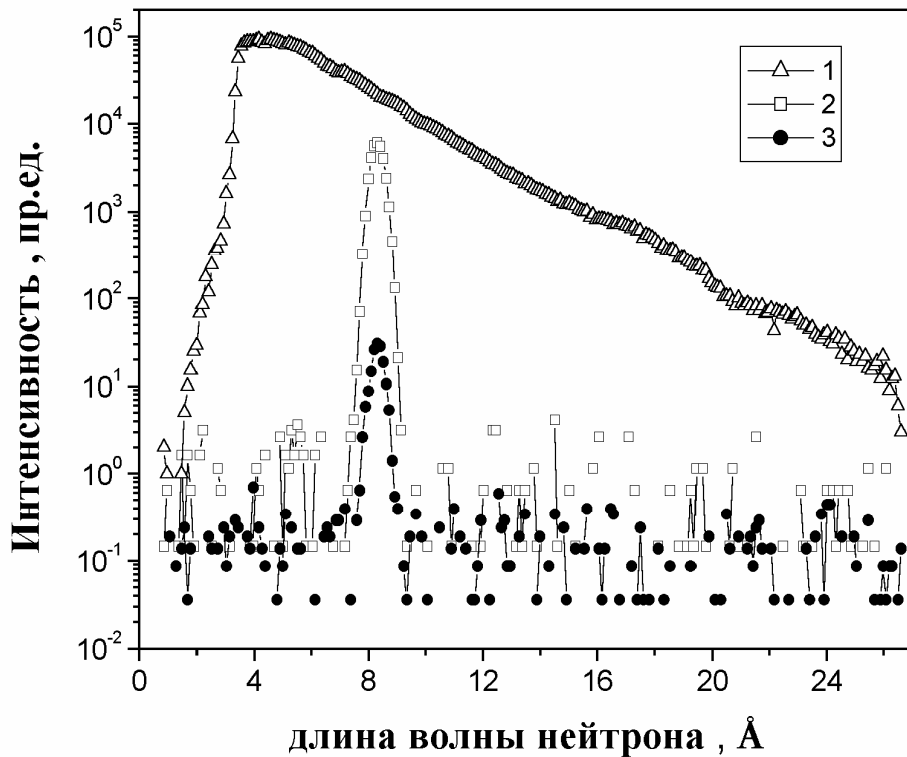


## Монохроматор-поляризатор Co/Ti на стекле.





**Рис. 4.** Схема двойного монохроматора-поляризатора Co/Ti на стеклянных подложках и ход пучка при измерениях на рефлектометре EROS (LLB, France).

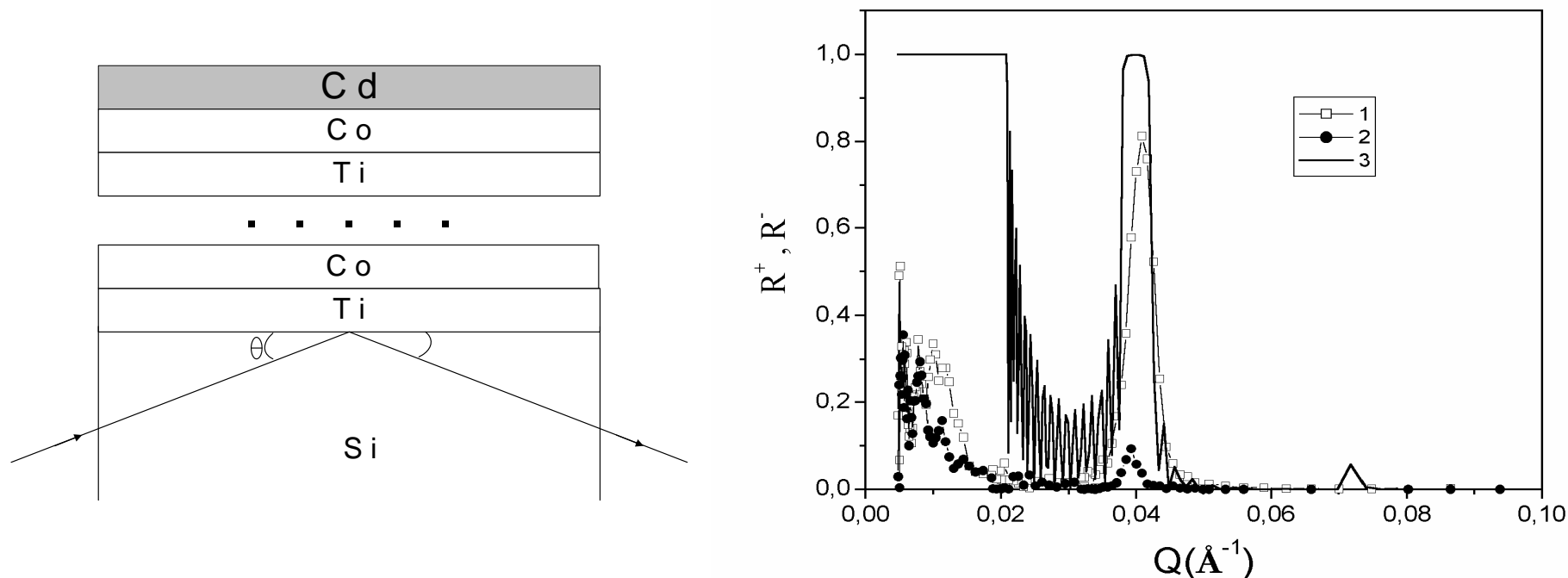


$$\lambda = 8.3 \text{ \AA} \quad \Delta\lambda / \lambda = 0.043$$

$$R^+ = 0.28 \quad I^+ = 2100 \text{ n / сек}$$

*флип* – отношение  $\geq 200$

## Монохроматор-поляризатор на кремнии.



**Рис. 2.** Схема многослойного монохроматора-поляризатора Co/Ti на кремниевой подложке и путь пучка.

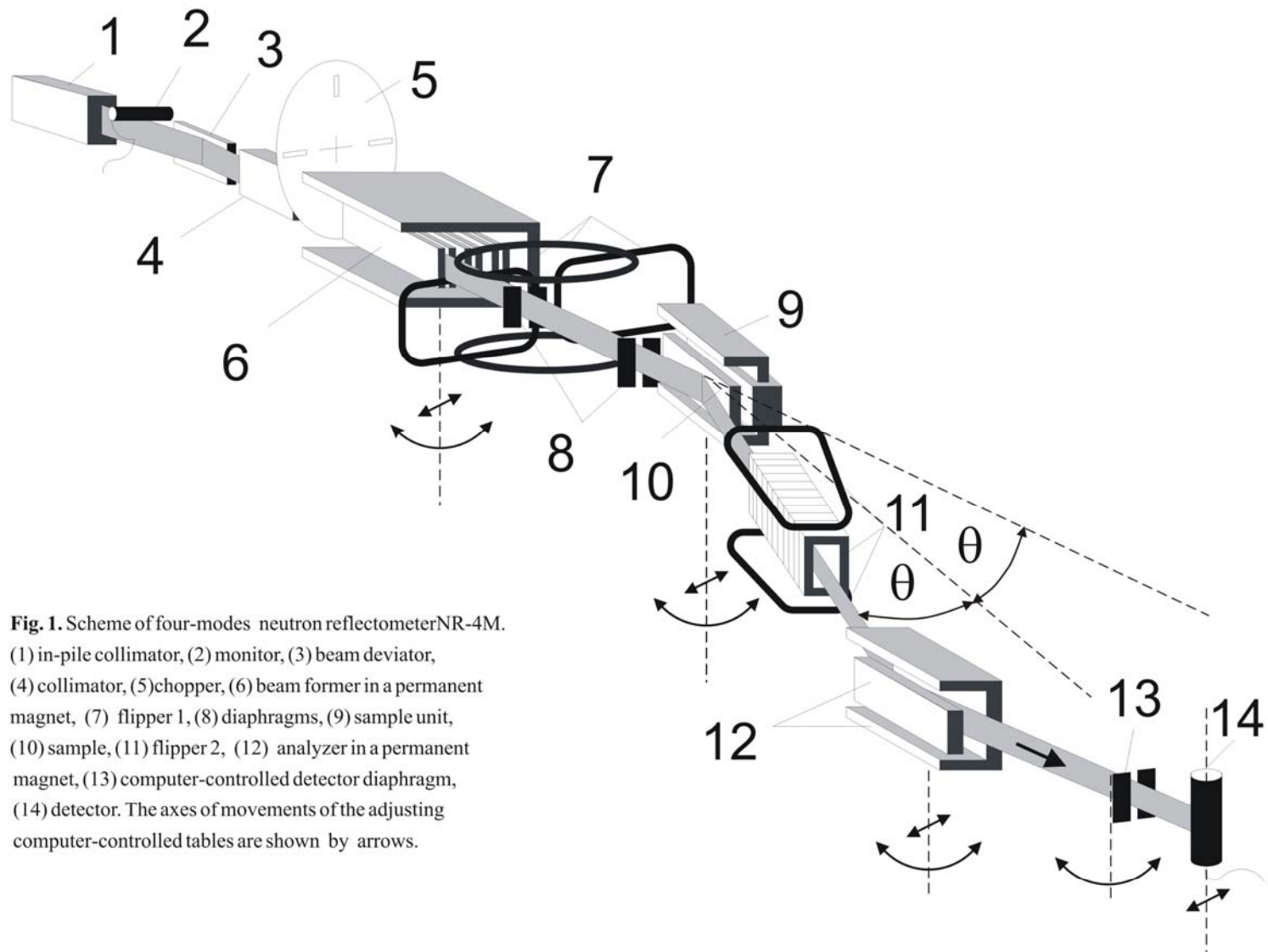
Средний потенциал структуры был равен потенциалу кремния, следовательно, для нейтрона, проходящего через кремний средний потенциал структуры равен нулю, т.е. область полного отражения должна отсутствовать.

$20Co (76 \text{\AA}) Ti (84 \text{\AA})$

$Cd (5 \text{ мкм})$

Реальная часть потенциала кадмия близка к потенциалу кремния, что позволяет избежать отражения на границе кремния и кадмия.

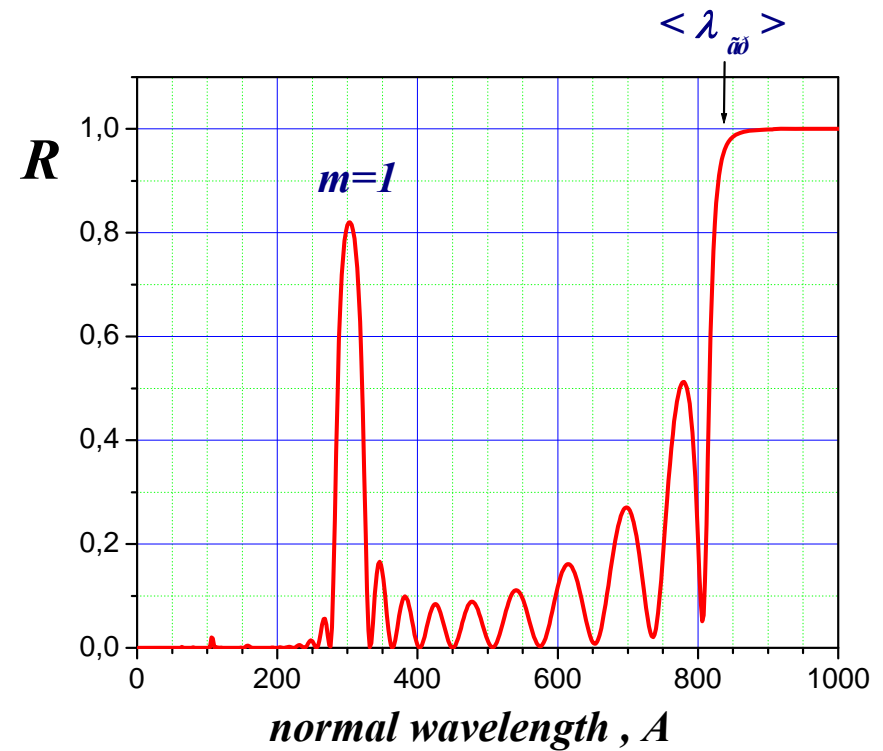
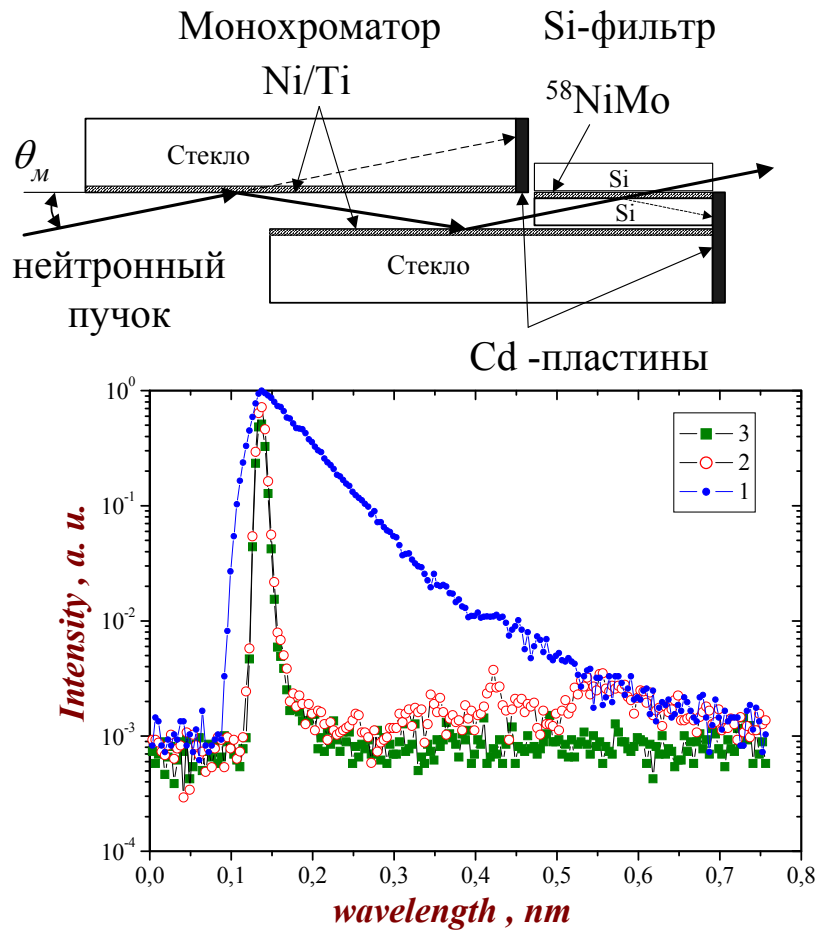
# Нейтронный рефлектометр НР-4М (ПИЯФ)



**Fig. 1.** Scheme of four-modes neutron reflectometer NR-4M.

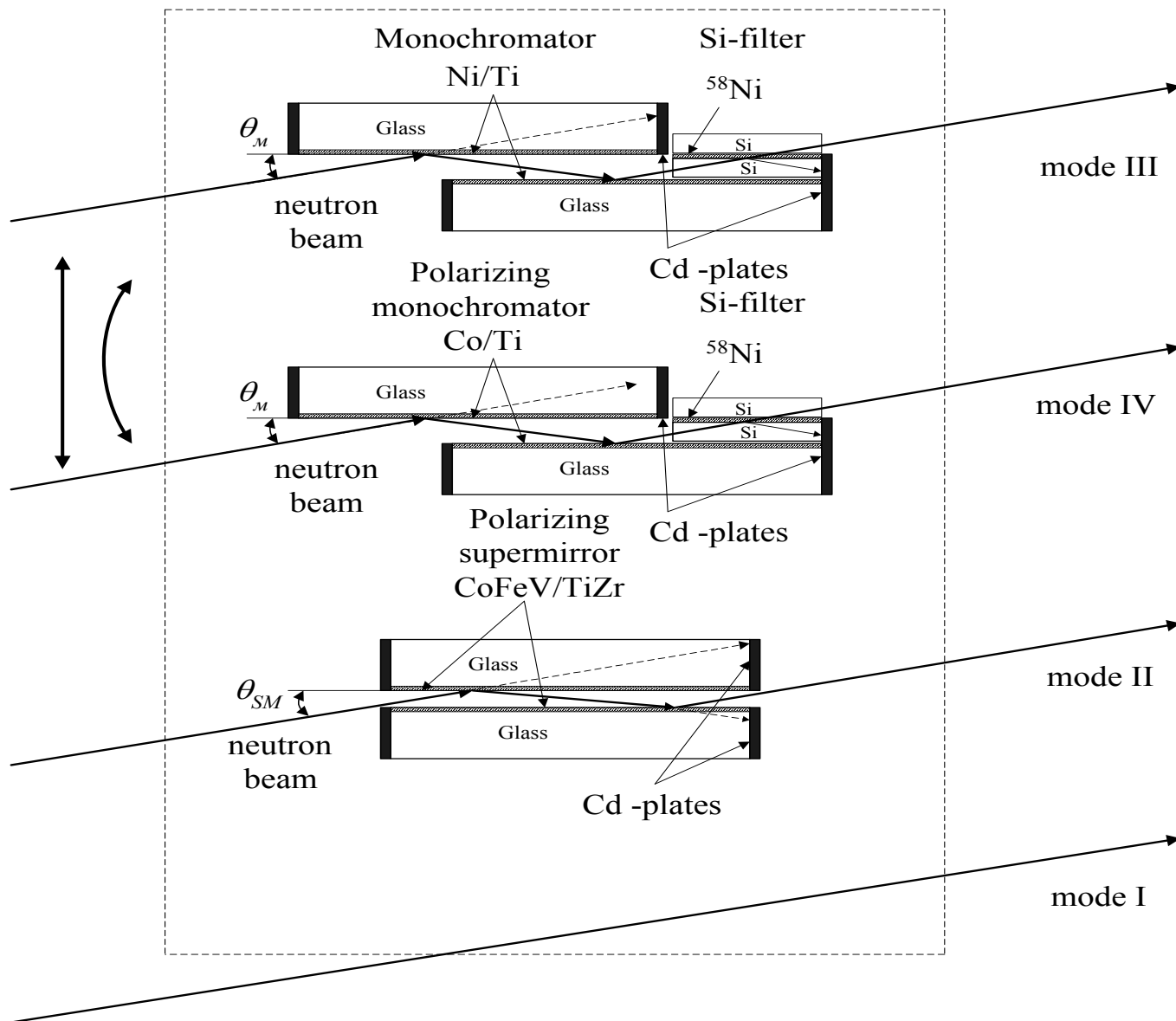
(1) in-pile collimator, (2) monitor, (3) beam deviator, (4) collimator, (5) chopper, (6) beam former in a permanent magnet, (7) flipper 1, (8) diaphragms, (9) sample unit, (10) sample, (11) flipper 2, (12) analyzer in a permanent magnet, (13) computer-controlled detector diaphragm, (14) detector. The axes of movements of the adjusting computer-controlled tables are shown by arrows.

# Двойные зеркальные монохроматоры рефлектометра НР-4М.

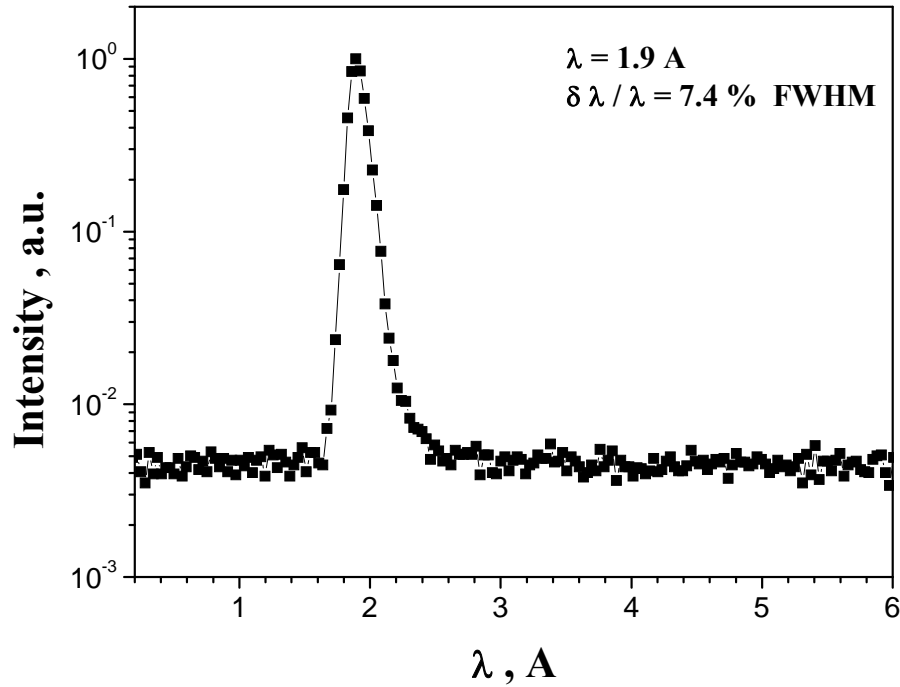


На одну из пластинок кремния (нижняя на рисунке) нанесен немагнитный  $^{58}\text{NiMo}$  слой, имеющий граничную длину волны  $\lambda_{\phi\perp} = 556 \text{ \AA}$ .

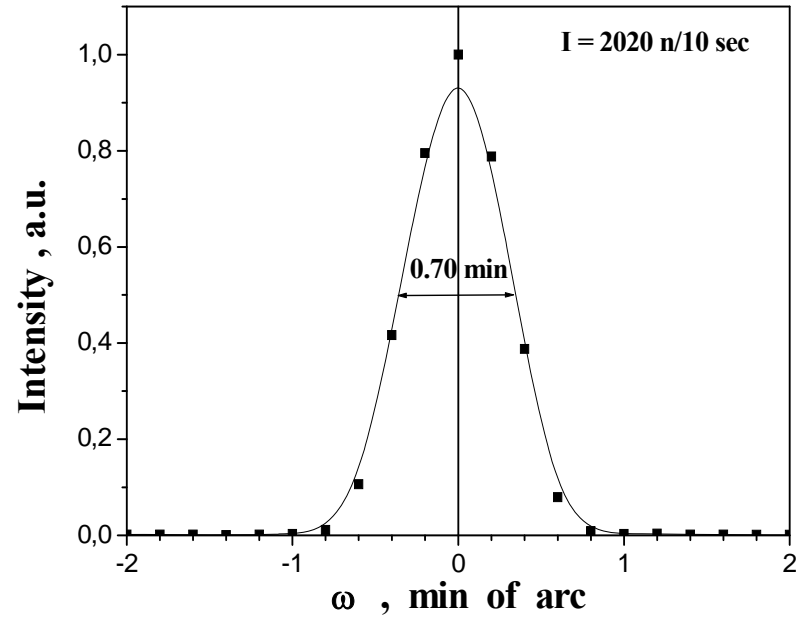
# Формирователь пучка рефлектометра НР-4М



## Монохроматический неполяризованный пучок HP-4M (мода III)

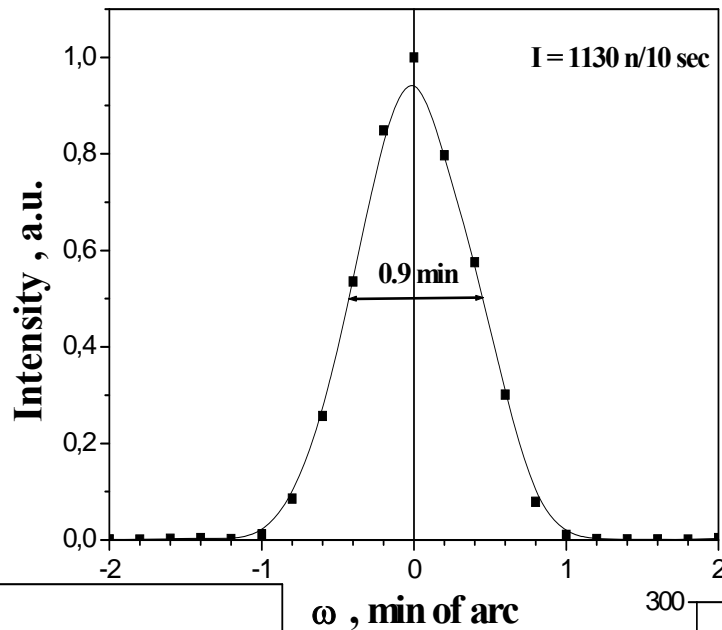


$20Ni(60\text{ \AA})Ti(118\text{ \AA})$



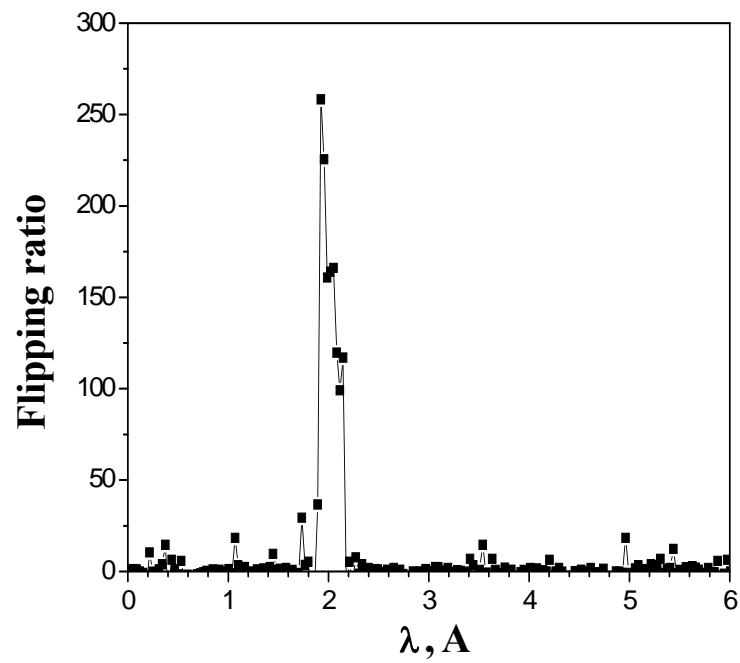
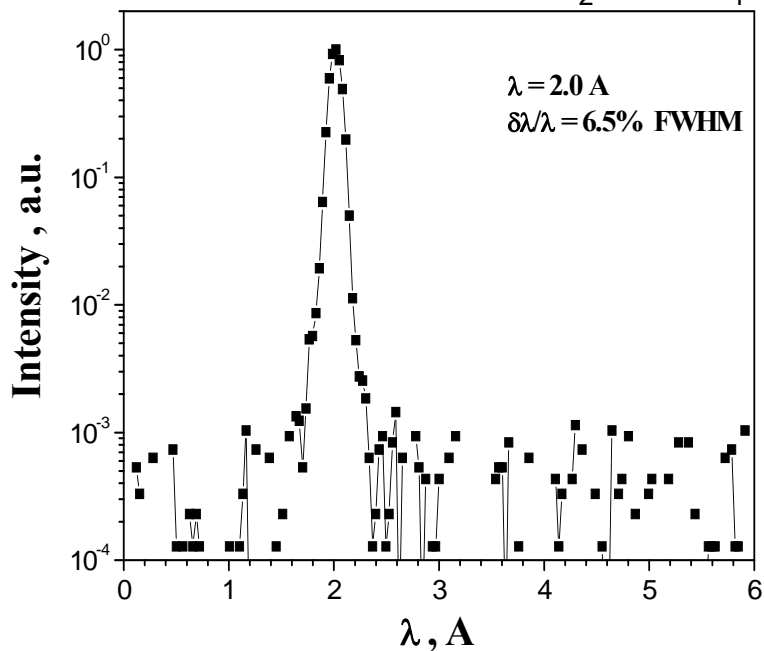
$TiZrGd 3000 \text{ \AA}$

# Монохроматический поляризованный пучок HP-4M (мода IV)

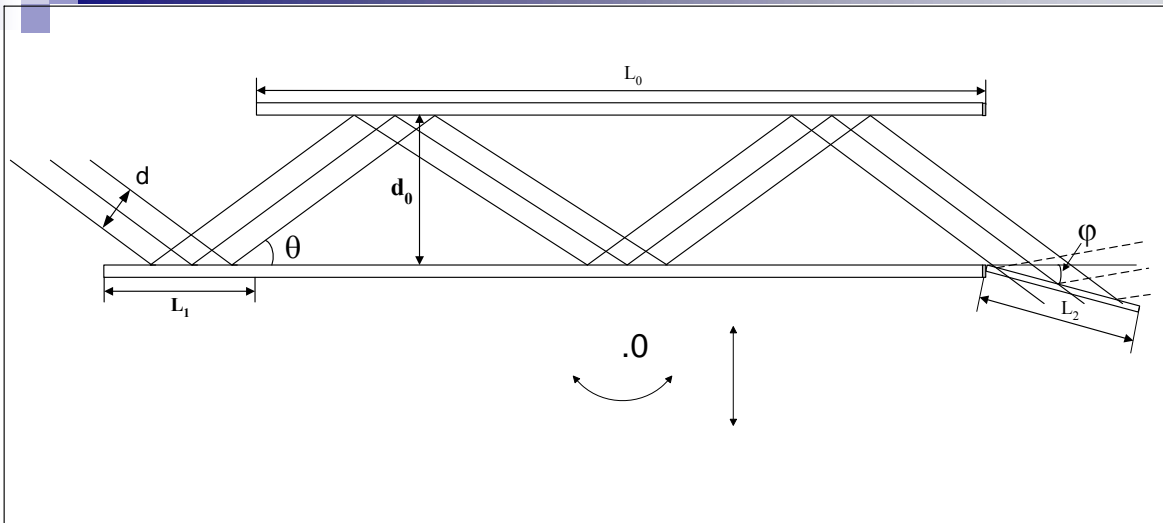


$20Co (70 \text{ \AA}) Ti (90 \text{ \AA})$

$TiZrGd 3000 \text{ \AA}$

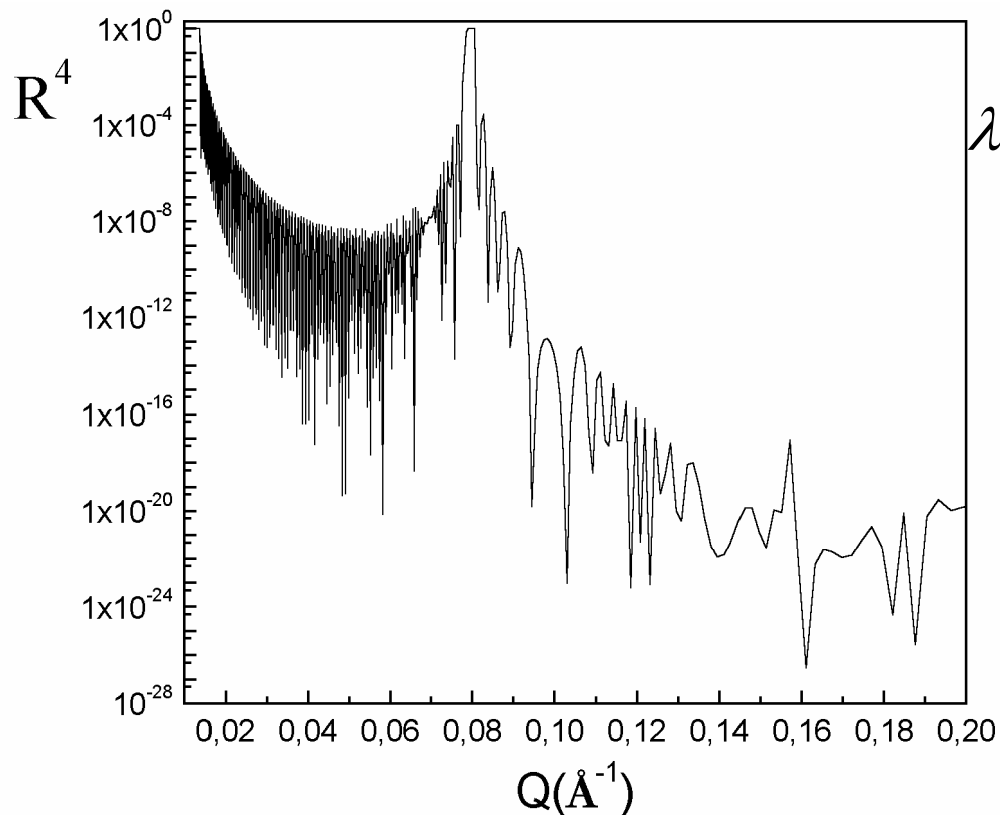






**Двойной монохроматор  
с 4-х кратным отражением**

*100 Ni(40 Å) / Ti(40 Å)*

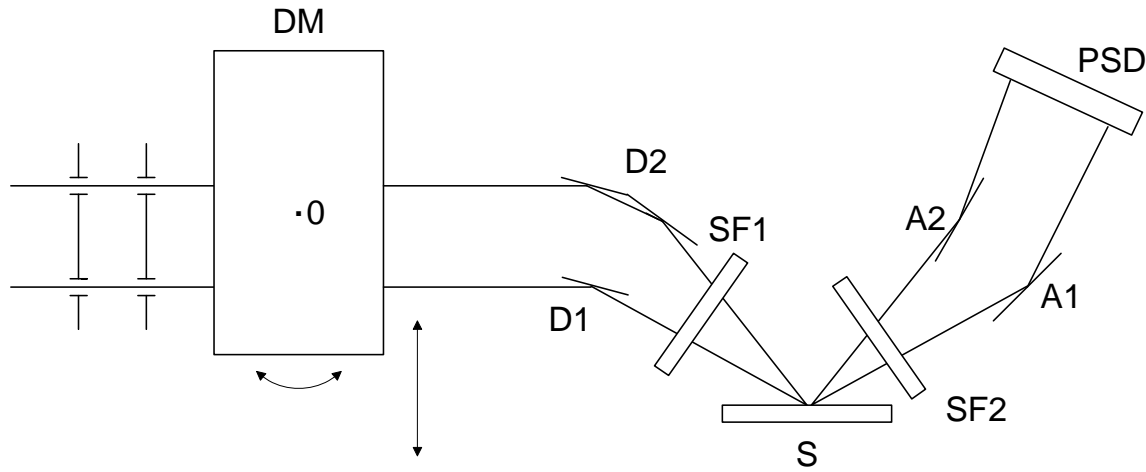
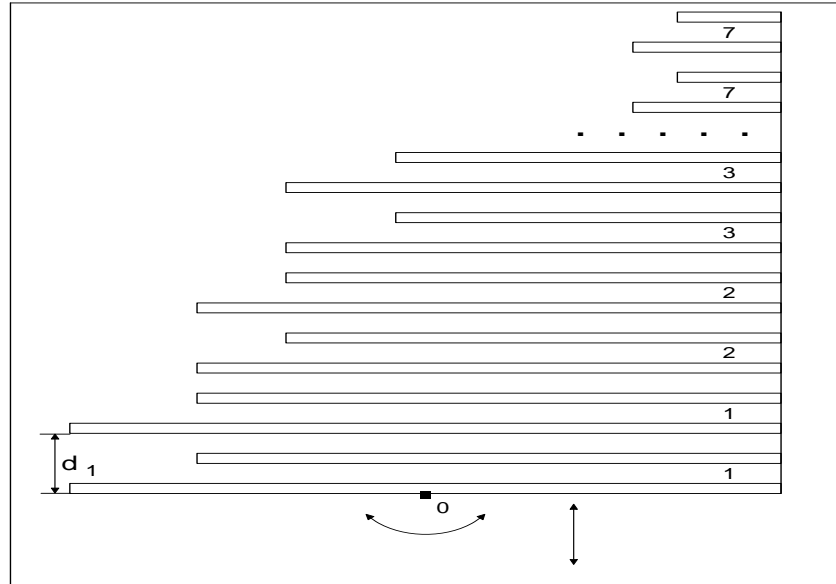
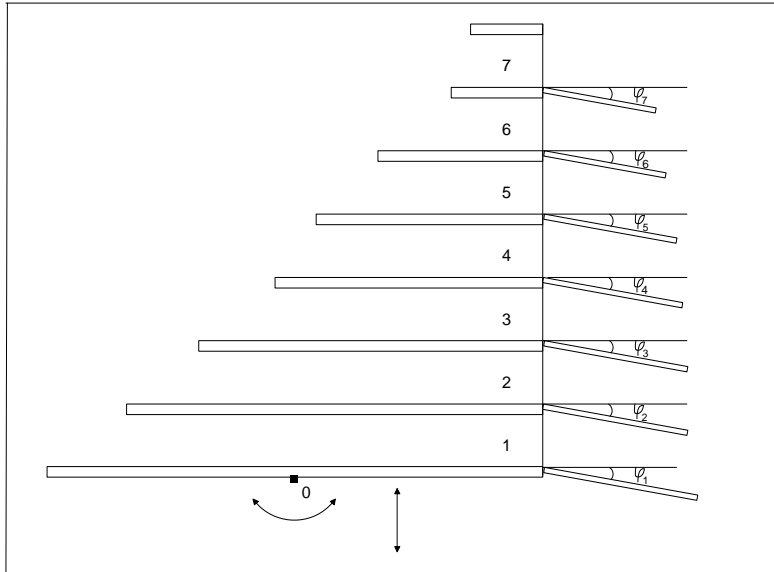


$$\lambda_{\min} = 2 \cdot D \cdot (3 \cdot d_0 + d) / (L_0 + L_1)$$

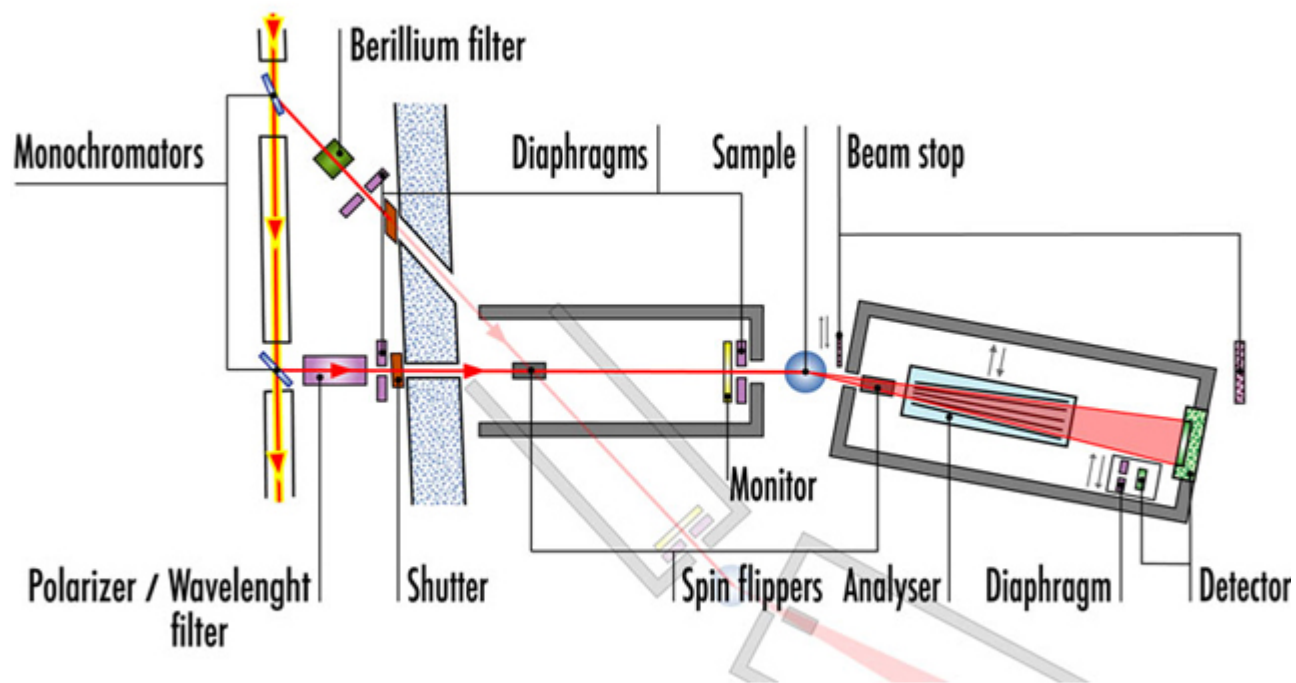
$$\lambda_{\max} = 2 \cdot D \cdot (5 \cdot d_0 - d) / L_0$$

$$\tau \equiv \lambda_{\max} / \lambda_{\min} =$$

$$= (5 - d / d_0) \cdot (1 + L_1 / L_0) / (3 + d / d_0)$$



# Нейтронный рефлектометр *SuperADAM* (ILL, Grenoble, France)



# Коллиматор-фильтр-поляризатор для *SuperADAM*

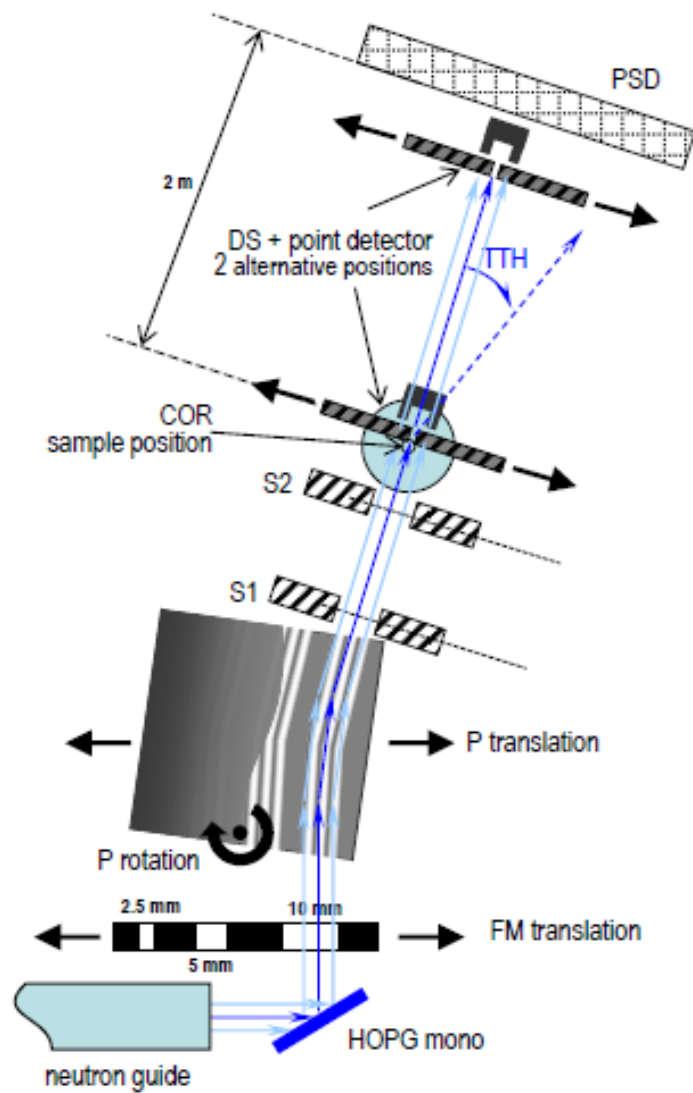
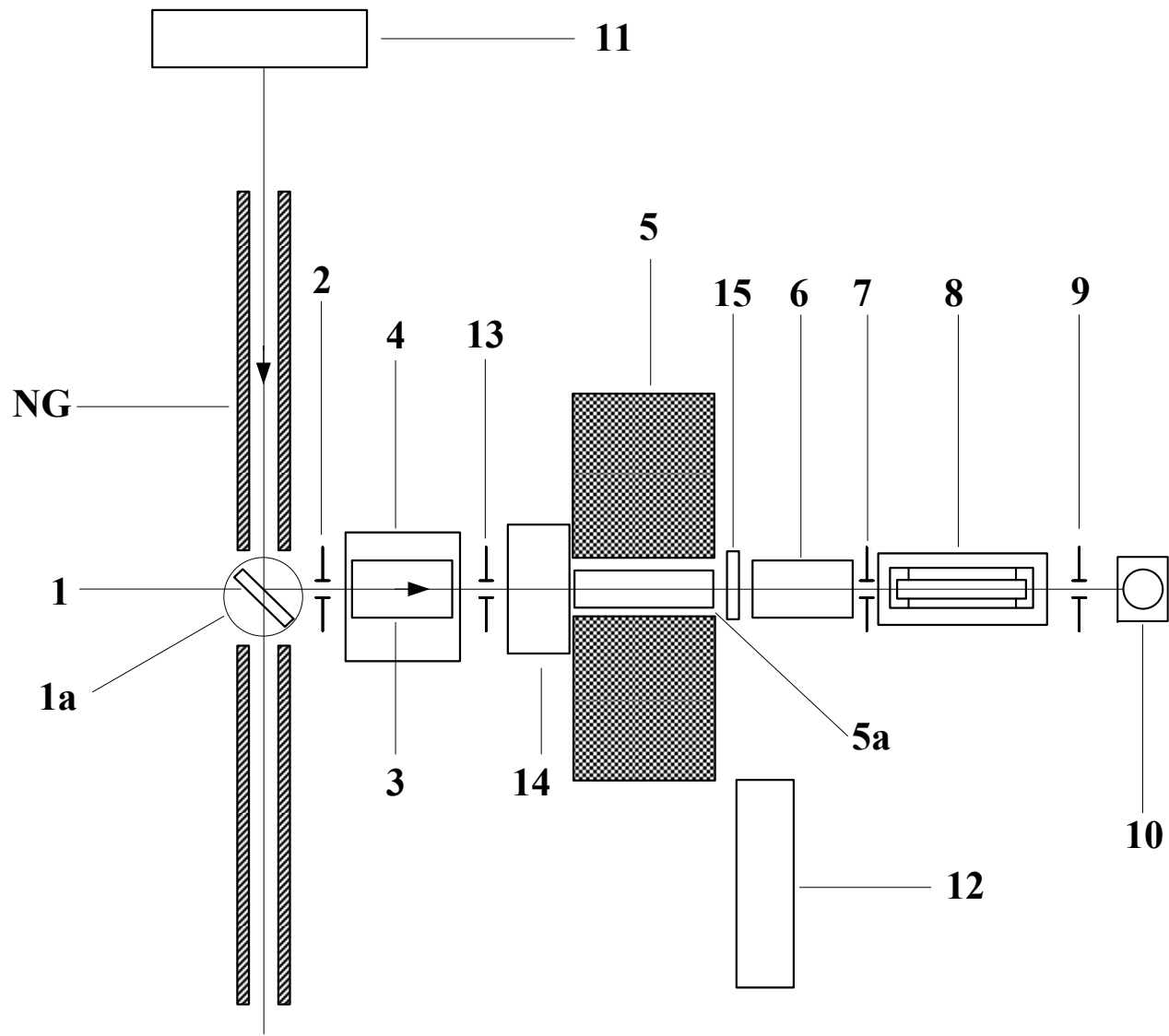


Схема измерений.

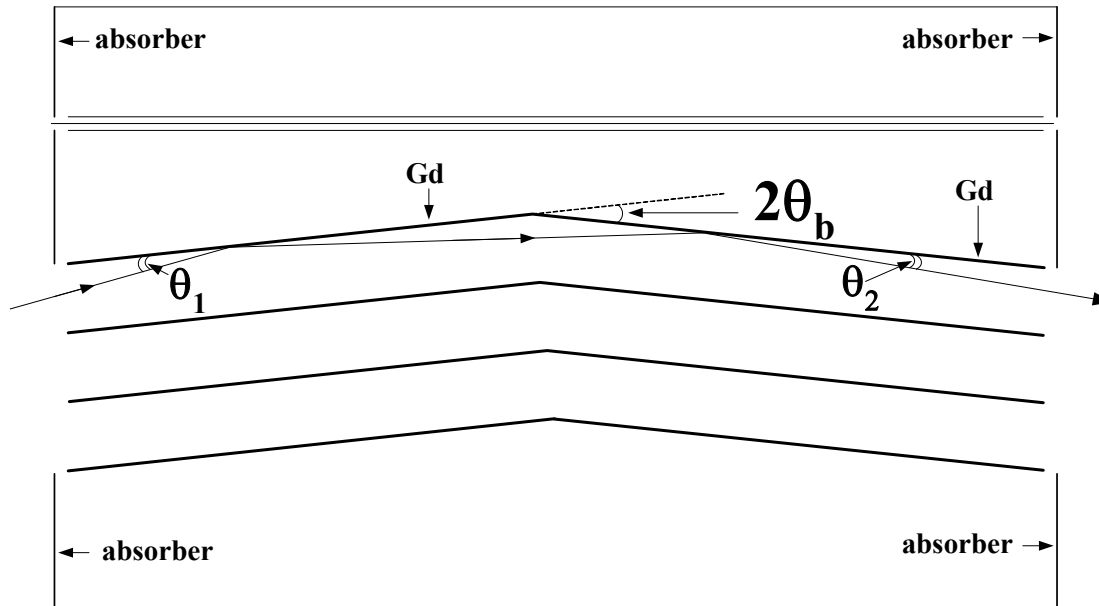
D16



CryoEDM

# Коллиматор-фильтр-поляризатор для *SuperADAM*

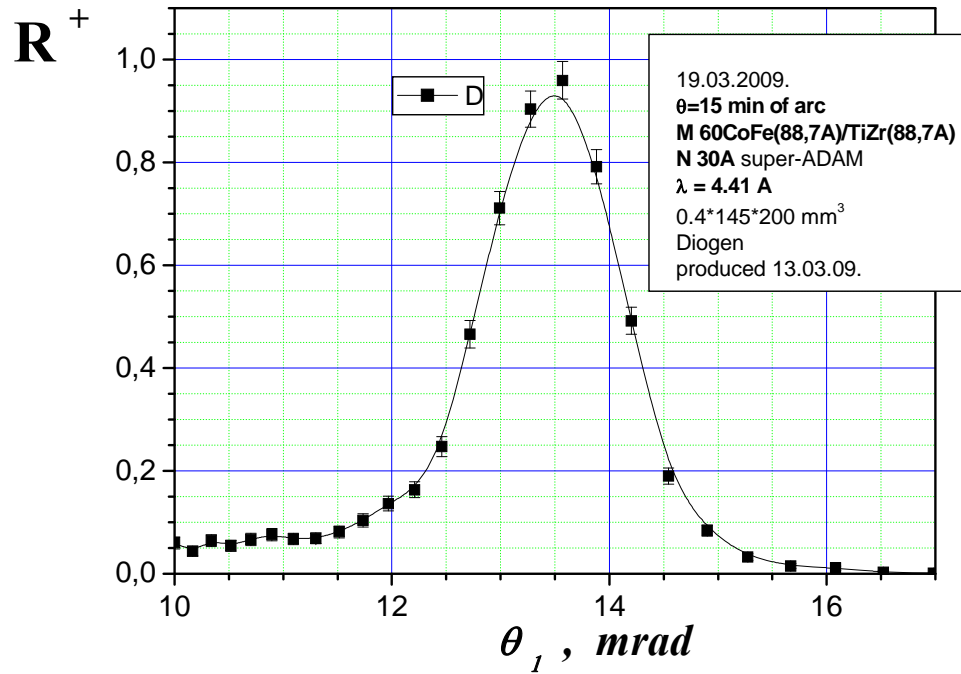
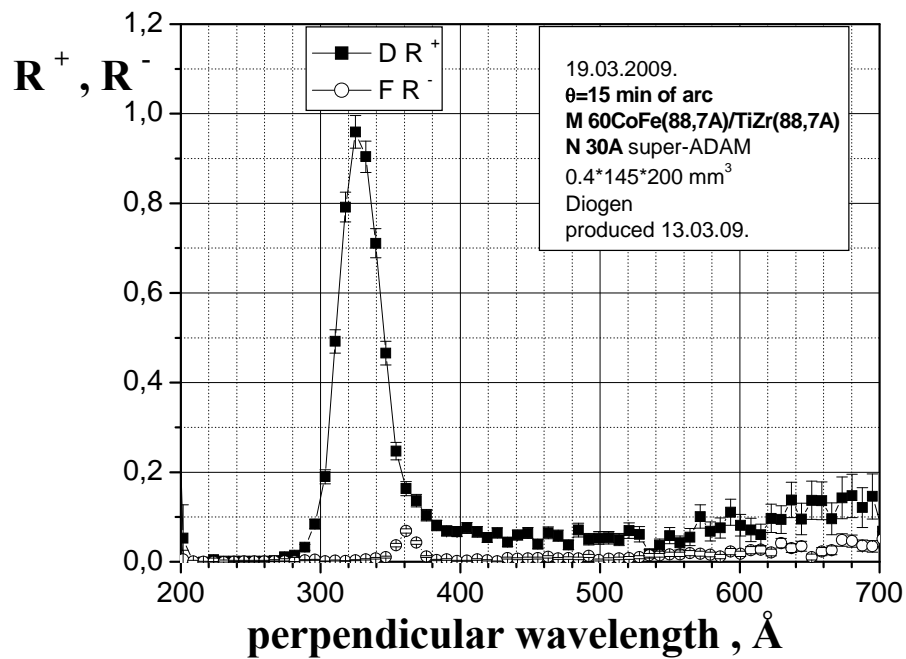
The scheme of one channel of one mode of  
Filter of super-ADAM



$$\theta_1 + \theta_2 = 2\theta_b$$

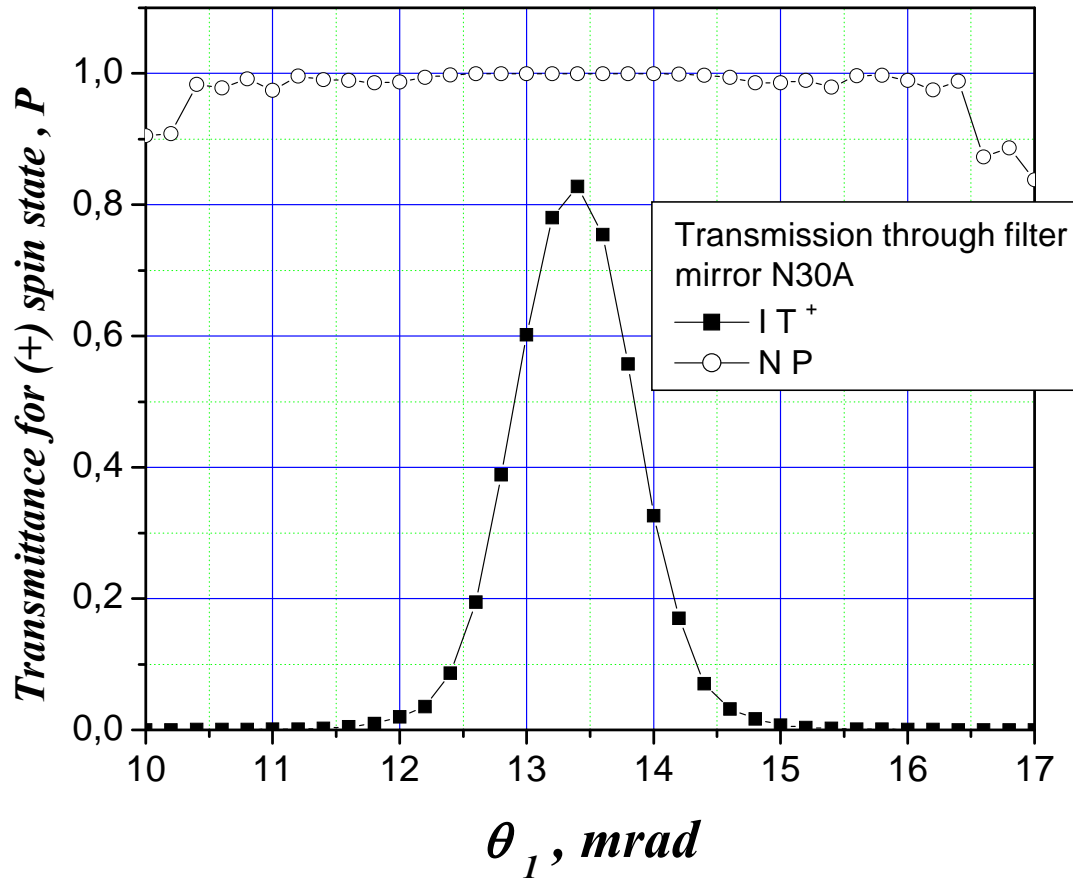
## Коллиматор-фильтр-поляризатор для SuperADAM

### Polarized Bragg mode of Filter.



## Коллиматор-фильтр-поляризатор для SuperADAM

### Polarized Bragg mode of Filter



Расходимость пучка на входе в коллиматор  $\sim 10$  мрад.