

Рентгеновская оптика. Рентгеновская микроскопия в ультрамягкой области

А. В. Виноградов, *ФИАН, Москва*

1

Современная рентгеновская оптика это:

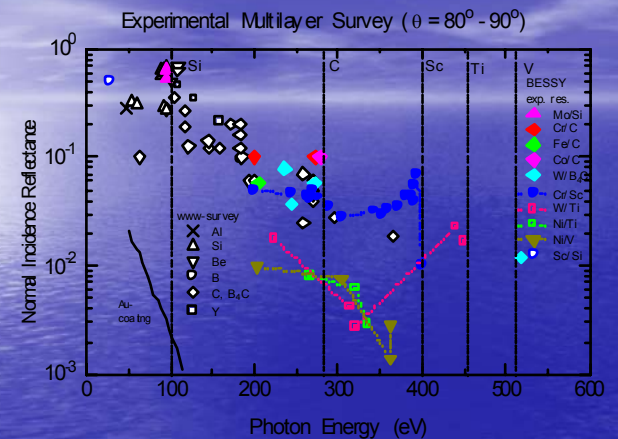
- Кристаллы-монокроматоры
- Зеркала скользящего падения, основанные на ПВО, с критическим углом $\theta_c \approx \sqrt{\delta}$, диапазон 0,1-300 А применяются в управлении синхротронным излучением.
- Многослойные рентгеновские зеркала:
 - коэффициент отражения до 70 %, период 15-250 А, диапазон 0,3 – 600 А (30 кэВ – 30 эВ).
- Дифракционные решётки
- Френелевские зонные пластинки

2

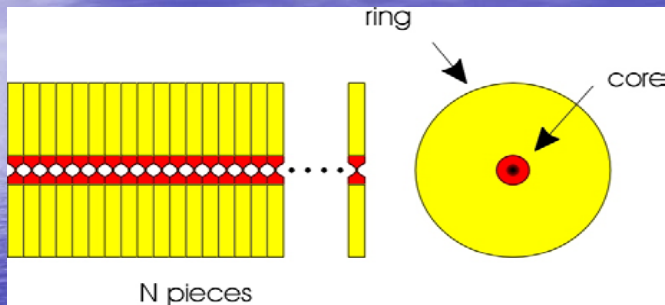
Современная рентгеновская оптика

- Преломляющие многокомпонентные линзы
диапазон короче 5 А, число линз – до 100
- Капилляры и жгуты капилляров
диаметр – до 200А

3



4



5

Свойства материалов в мягкой рентгеновской области спектра ($0,2 < \lambda < 50 \text{ nm}$)

Диэлектрическая проницаемость веществ близка к 1, а френелевские коэффициенты отражения близки к нулю

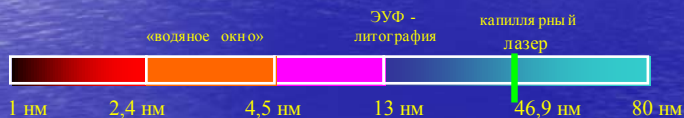
$$\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma, \quad \delta, \gamma \propto 10^{-2} - 10^{-6}, \quad R_f = |\varepsilon - 1|^2 / 16$$

Сильное поглощение, которым нельзя пренебречь (длины пробега 0,01-100 мкм)

6

Мягкое рентгеновское излучение

- Спектральный диапазон $1 \text{ nm} < \lambda < 80 \text{ nm}$ ($16 \text{ эВ} < E < 1,2 \text{ кэВ}$)
- Сильное поглощение в твердых материалах и газах
- Энергия фотонов близка к энергии внутренних оболочек атомов



7

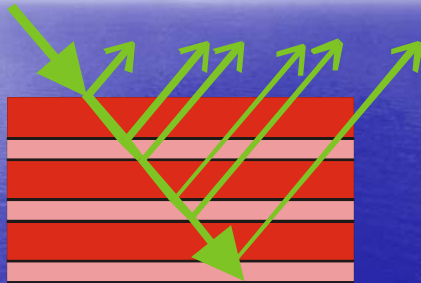
Показатель преломления

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

λ	никель			кремний		
	δ	γ	$R, \%$	δ	γ	$R, \%$
4,5 нм	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$6,84 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
13,5 нм	$5,15 \cdot 10^{-2}$	$7,25 \cdot 10^{-2}$	0,21	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$

8

Многослойные зеркала



Число пар слоев - до 1000, период - до 1,6 нм

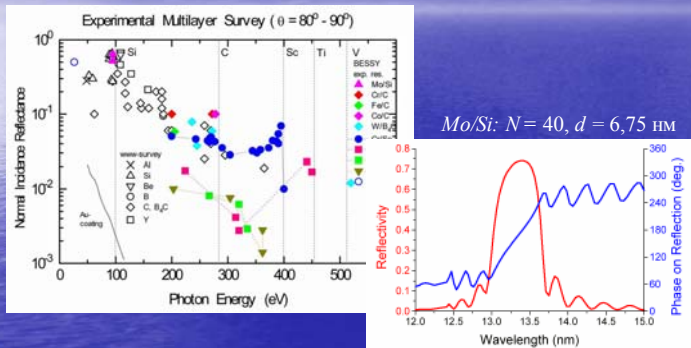
Многослойные зеркала

$$R^{s,p}(\varphi, \lambda) = \left| \frac{(f+i)\sigma}{y} \left(\eta - i - i \sqrt{\frac{\sigma^2 (f+i)^2}{y^2} - (\eta - i)^2} \right) \right|^{-2}$$

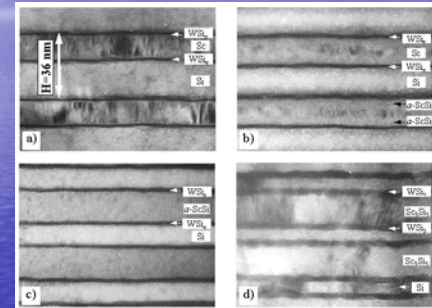
$$f = \frac{\text{Re}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\text{Im}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad y = \frac{\pi}{\sin \pi\beta} \left(\beta + \frac{\text{Im}\varepsilon_2}{\text{Im}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \right) \quad \eta = \frac{\left(\frac{\lambda}{2l}\right)^2 - \cos^2 \varphi + \text{Re}(1 - \mu)}{\text{Im}\mu}$$

ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости материалов;
 λ - длина волны; l – период структуры; φ - угол падения; $\beta = l/\lambda$;
 $\mu = \beta\varepsilon_1 + (1-\beta)\varepsilon_2$; $\sigma = 1$ для s - или $\cos 2\varphi$ для p - поляризации

Многослойные зеркала

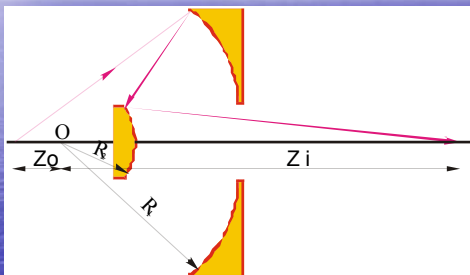


Эволюция Sc/Si покрытия при отжиге



а) сразу после напыления; б) и в) – при отжиге 3,5 ч и 10 ч при $T = 300^\circ \text{C}$; д) при температуре отжига $T = 600^\circ \text{C}$

Объектив Шварцшильда



$$Z_o = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2 + \sqrt{R_1 R_2}}$$

$$M_{z_i} = \frac{R_1 - R_2 + \sqrt{R_1 R_2}}{R_1 - R_2 - \sqrt{R_1 R_2}}$$

13

Геометрические aberrации объектива Шварцшильда

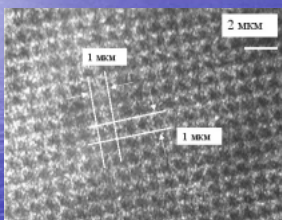
- Отсутствие сферических aberrаций 3-его порядка
- Отсутствие комы 3-его порядка
- Поле зрения 100 – 200 мкм (при разрешении < 0,1 мкм), определяется кривизной поля
- Разрешение на оси – до 0,02 мкм, определяется aberrациями 5-го порядка

для ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЫ $N_A = 0,2$

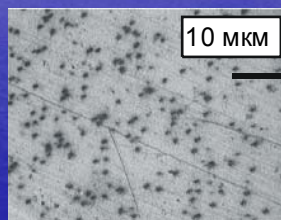
14

Рентгеновские изображения, полученные на длине волны 20 нм

Трековые мембраны 10^8 пор/см²



регулярная

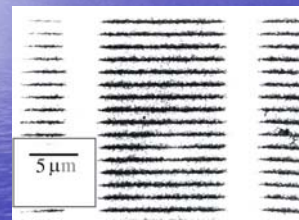


нерегулярная

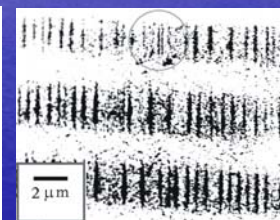
15

Рентгеновские изображения, полученные на длине волны 20 нм

Пропускающие дифракционные решетки



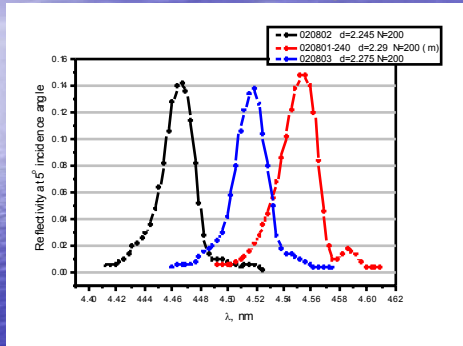
700 штрихов/мм



5000 штрихов/мм

16

Многослойные зеркала для длины волны 4,5 нм

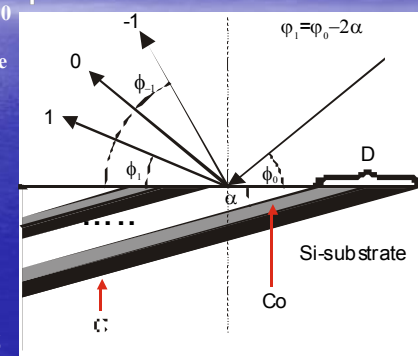


Покрyтие: Co/C
 $N = 200$
 $d = 2,24 - 2,75$ нм
 $R = 15\%$

Измерения BESSY-II (ФРГ)

- Срезанная многослойная решетка представляет собой срезанную под определенным углом многослойную структуру
- Является компактным оптическим прибором работающим в диапазоне 4,4-30 нм
- Такие решетки сочетают в себе высокую дисперсию и дифракционную эффективность при числе периодов до 4000. Их свойства аналогичны свойствам асимметричных кристаллов.
- Если имеется градиент периода вдоль поверхности срезанная решетка будет фокусировать излучение
- Она обладает свойством блеска при выполнении условия Брэгга, где d – период покрытия

Срезанные многослойные решетки



Soft X-ray microscopy near carbon K-edge ("carbon window" microscopy)

I.A.Artyukov, A.V.Vinogradov, R.M.Feschenko, S.A.Romanova
Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

E.A.Bugaev, V.V.Kondratenko, Yu.P.Pershin
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine

Yu.S.Kasyanov

Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

S.V.Saveliev

Institute of Human Morphology, Moscow, Russia

Outline

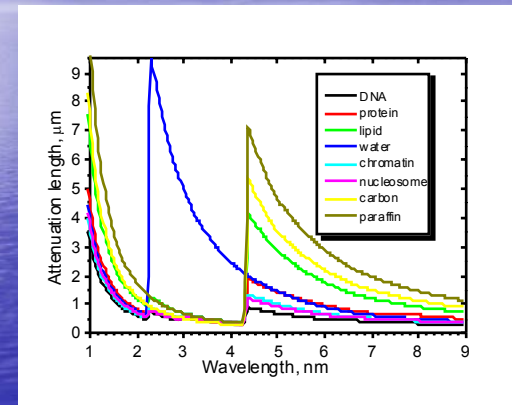
- «Carbon window» for soft X-ray microscopy
- Co/C (Co₂C/C) multilayer mirrors for $\lambda = 4.5$ nm
- C/Sc/polymer/Sc/C filters
- Soft X-ray imaging experiments in the "carbon window"

«Water window» or «carbon window» ?

- «Water window»: $22.8 \text{ \AA} < \lambda < 43.6 \text{ \AA}$
 - **High contrast** between carbon-containing materials and water
 - **Water** is transparent \Rightarrow «in vivo» biological objects ?
- «Carbon window»: $43.7 \text{ \AA} < \lambda < 60 \text{ \AA}$
 - **Medium contrast** between different organic materials, with overall transmission being satisfactory
 - **Paraffin and formaldehyde** are transparent \Rightarrow well-developed standard technique of sample preparation

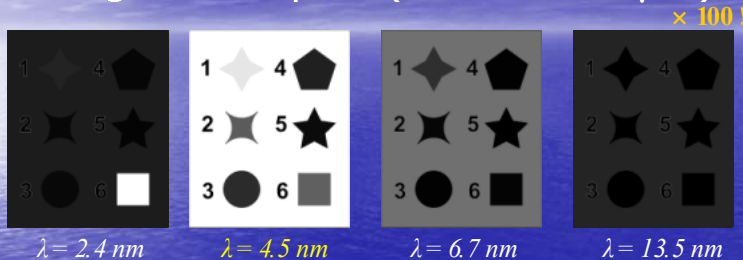
21

1/e attenuation length at the soft X-rays



22

Simulation of contrast pattern for biological samples (thickness $3 \mu\text{m}$)



1- lipids; 2 – protein; 3 – chromatin; 4 – nucleosome; 5 – DNA; 6 – water. Background is paraffin.

23

“Carbon window” pros:

- The biological objects are fixed with the well-developed technique, which have been used in the visible light/electron microscopy for many years. Does not need cryogenic stations.
- Decreased exposure dose due to better transmission of organic materials. Water is still not opaque.
- Differential contrast of various organic materials
- Ability to study “thick” ($> 10 \mu\text{m}$) samples of carbon-containing materials with sub-micron resolution. 3D imaging.

24

Co/C mirror's parameters obtained from XRD

#	Number of bi-layers	Period d , nm	d_{Co2C}	d_C	σ (RMS), nm
1	80	2.321	1.185	1.136	0.38
2	100	2.276	1.190	1.086	0.38
3	150	2.284	1.165	1.119	0.39
4	200	2.253	1.138	1.115	0.39

B.L. Henke et al. "X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\text{-}30000\text{ eV}$, $Z=1\text{-}92$ ", *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, V. 54 (2), p.181-342 (1993).

25

Measured reflectivity of Co/C mirrors at the wavelength $\lambda \approx 4.5\text{ nm}$

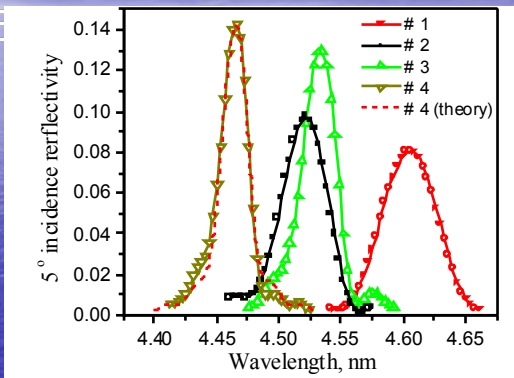
#	Bi-layers	$\Delta\lambda/\lambda$, %	λ_{peak} , nm	R , %
1	80	1.1	4.61	8.1
2	100	0.95	4.52	9.7
3	150	0.66	4.53	13.0
4	200	0.57	4.47	14.3

Near normal-incidence measurements at BESSY II (Germany) (incidence angle $\alpha = 5^\circ$)

26

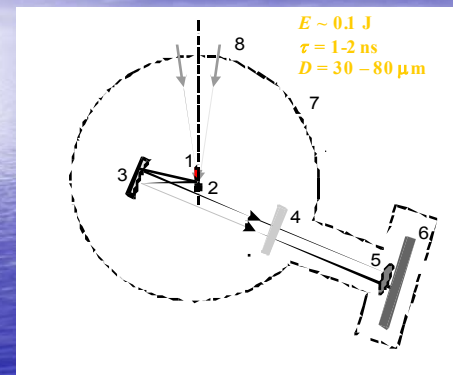
Measured reflectivity of Co/C mirrors at the wavelength $\lambda \approx 4.5\text{ nm}$

(BE



27

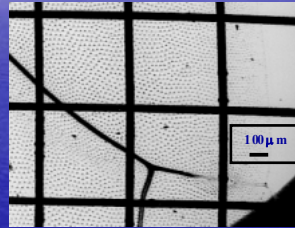
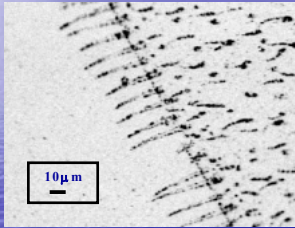
Soft X-ray imaging at $\lambda = 4.5\text{ nm}$



- 1 – laser-produced plasma
- 2 – rhenium target
- 3 – Co/C multilayer mirror
- 4 – a set of Sc/C filters
- 5 – sample
- 6 – X-ray film UF-4
- 7 – vacuum chamber ($P \sim 10^{-2}$ Torr)
- 8 – 2nd harmonics of Nd-laser ($\lambda = 0.53\ \mu\text{m}$)

28

Examples of soft X-ray images at the wavelength $\lambda = 4.5$ nm

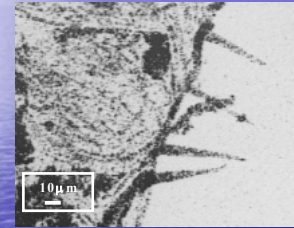


Fly (*Sarcophaga carnaria* L.)

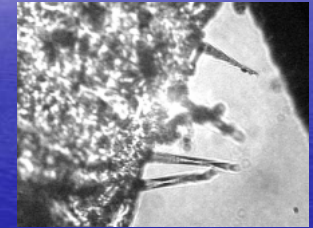
No special treatment!

29

Soft X-ray images (compared with light microscopy)



$\lambda = 4.5$ nm



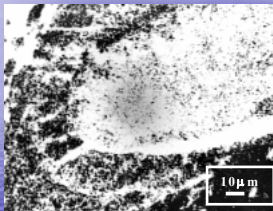
visible light

Grasshopper (*Tettigonia viridissima*)

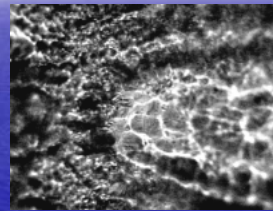
No special treatment!

30

Soft X-ray images of gystological slice prepared in paraform (thickness 10 μm)



$\lambda = 4.5$ nm



visible light

Human embryo

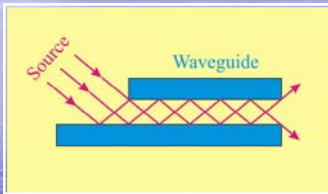
31

Conclusions

- ✓ Soft X-ray microscopy in "carbon window" enables to produce contrast images of "thick" biological samples (up to 20 μm) with recognition of the materials
- ✓ Co/C multilayer mirrors with the reflectivity $R > 14\%$ and thin film X-ray filters with the transmission $T > 50\%$ have been successfully developed and tested
- ✓ State-of-art X-ray optics can be used for construction of multi-mirror high resolution soft X-ray microscope implemented with a table-top X-ray source

32

Computer code



Solution of parabolic wave equation

$$2ik \frac{\partial U}{\partial z} + \Delta_{\perp} U + k^2 \alpha(x, y, z) U = 0$$

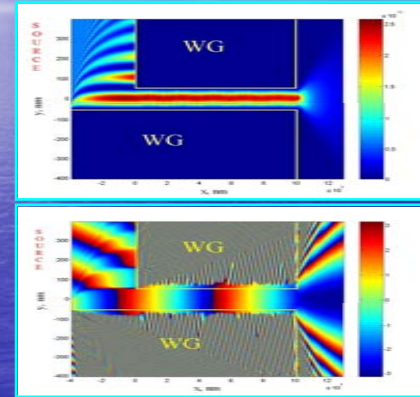
$$\epsilon = 1 + \alpha(x, y, z), \quad |\alpha| \ll 1$$

Method
Finite-difference scheme

Simulation
Waveguide with front coupling in monomodal regime

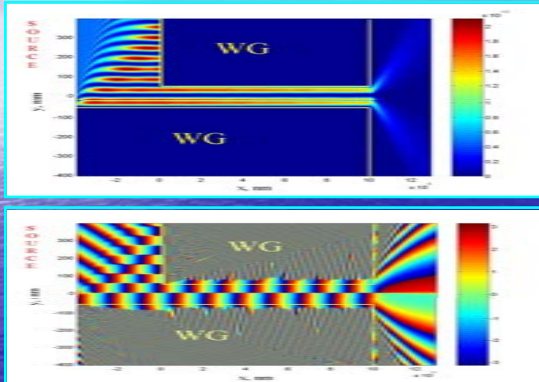
I. Bukreeva, S. Lagomarsino
IFN CNR Rome Italy
A.V. Popov, A.V. Vinogradov,
Yu.V. Kopylov, A.N.K. urahin
X-ray Optics Group, Moscow Russia

WG monomodal regime 1st mode (coherent source)



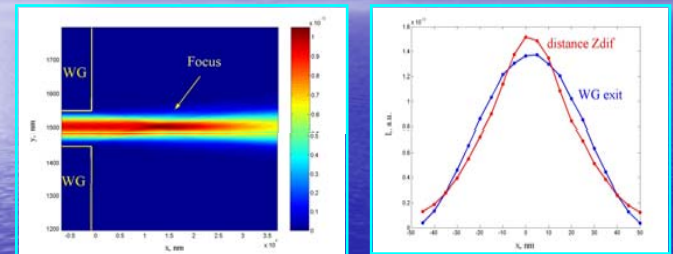
Pt
 $\lambda = 0.154$ nm
 $d = 100$ nm

WG monomodal regime 2nd mode (coherent source)



Pt
 $\lambda = 0.154$ nm
 $d = 100$ nm

WG monomodal regime Edge of WG (1st mode)

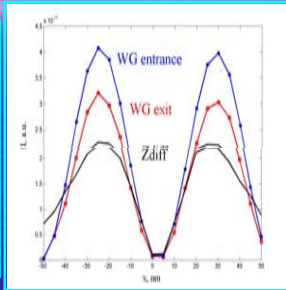
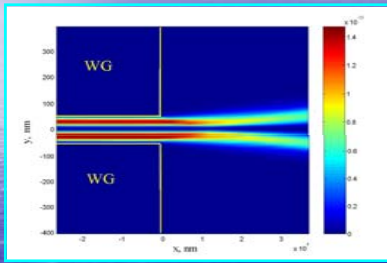


$$Z_{\text{diff}} = \frac{r^2}{\lambda}, \quad r = \frac{d}{2}$$

$d = 100$ nm $Z_{\text{diff}} = 1.6 \cdot 10^4$ nm
 $d = 240$ nm $Z_{\text{diff}} = 10^5$ nm
 $\lambda = 0.154$ nm

WG monomodal regime

Edge of WG (2nd mode)



Pt $\lambda = 0.154$ nm $d = 100$ nm