

ひたち海浜公園

NTT-ATにおけるX線集光素子開発

NTTアドバンステクノロジー株式会社
竹中久貴

放射光セミナー@PF 2007/5/25

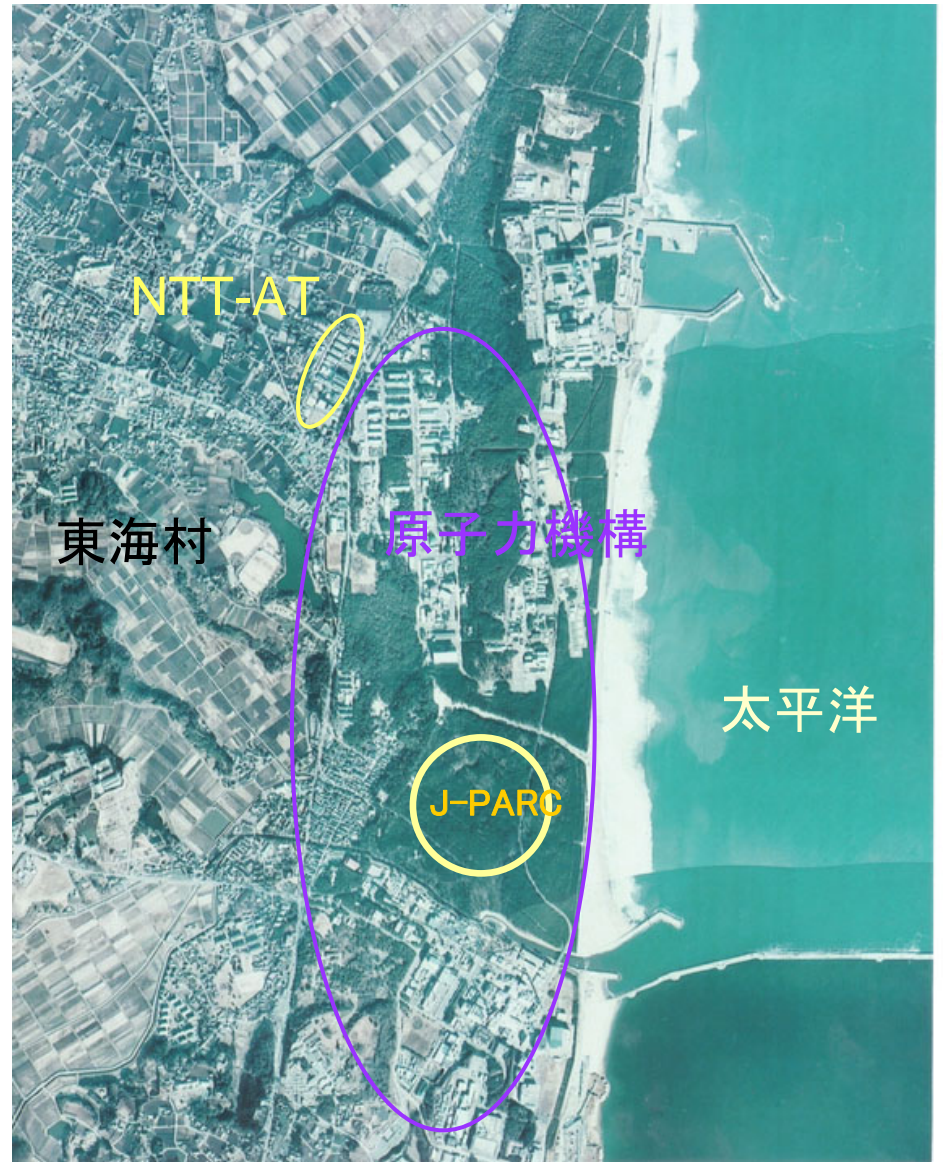
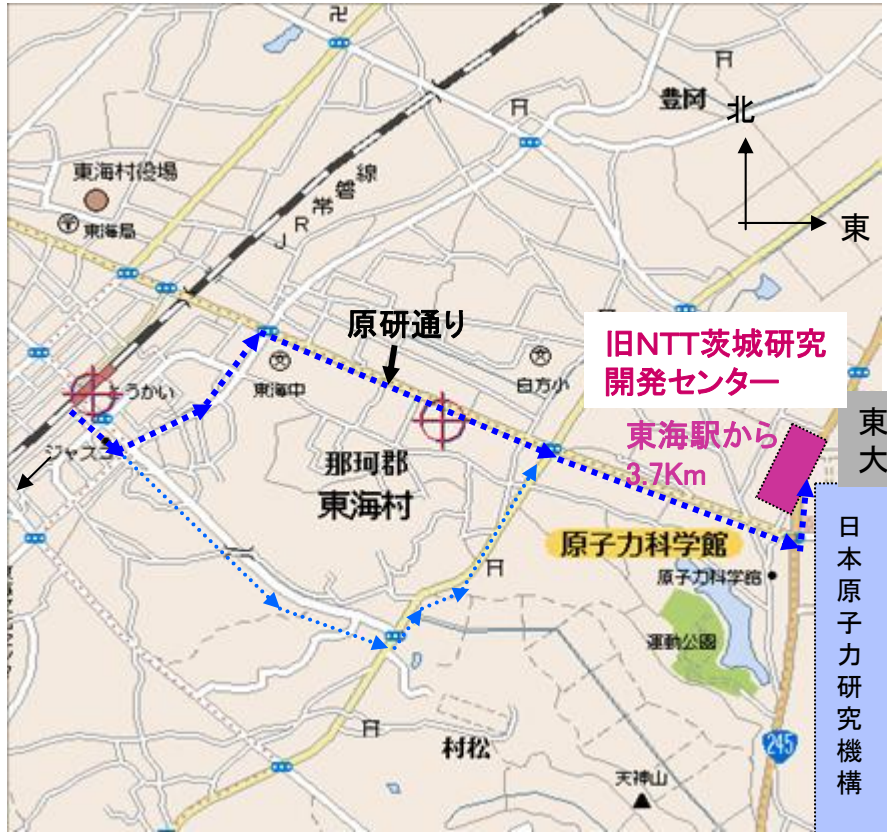
NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

NTT-ATのロケーション



私たちの事業ユニットの仕事

事業概要:

1. X線素子の製造・販売

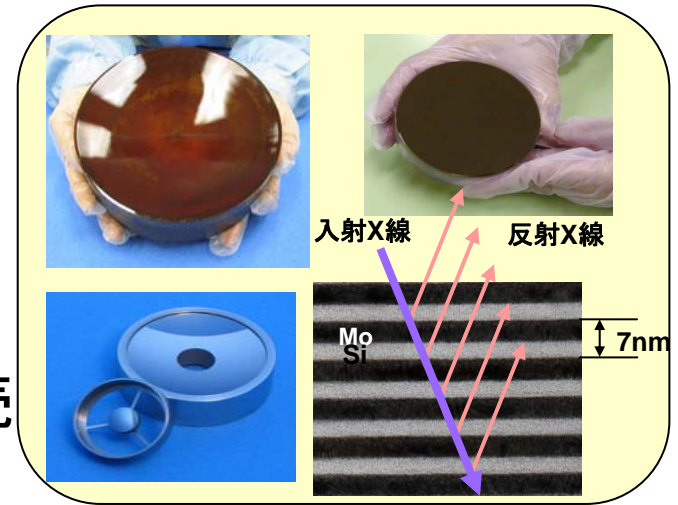
X線反射ミラー, X線集光素子など

2. X線マイクロビーム利用装置の製造・販売

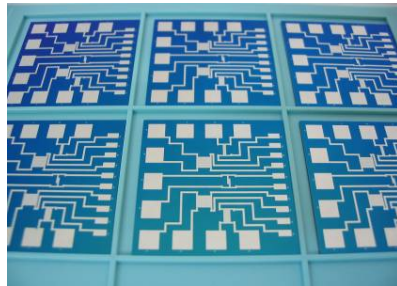
X線顕微鏡, 微小部分分析用光電子分光装置,
細胞へのX線マイクロビーム照射装置など

3. 薄膜・薄膜加工事業

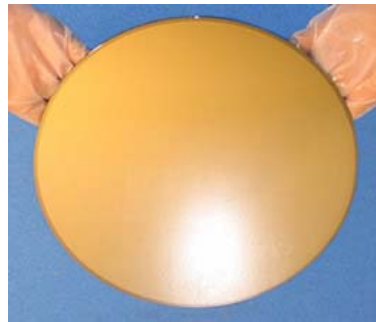
様々な基板への薄膜形成や電極加工など



X線反射ミラー



Pt/Ti櫛歯電極形成



金属積層膜 (12インチ径)

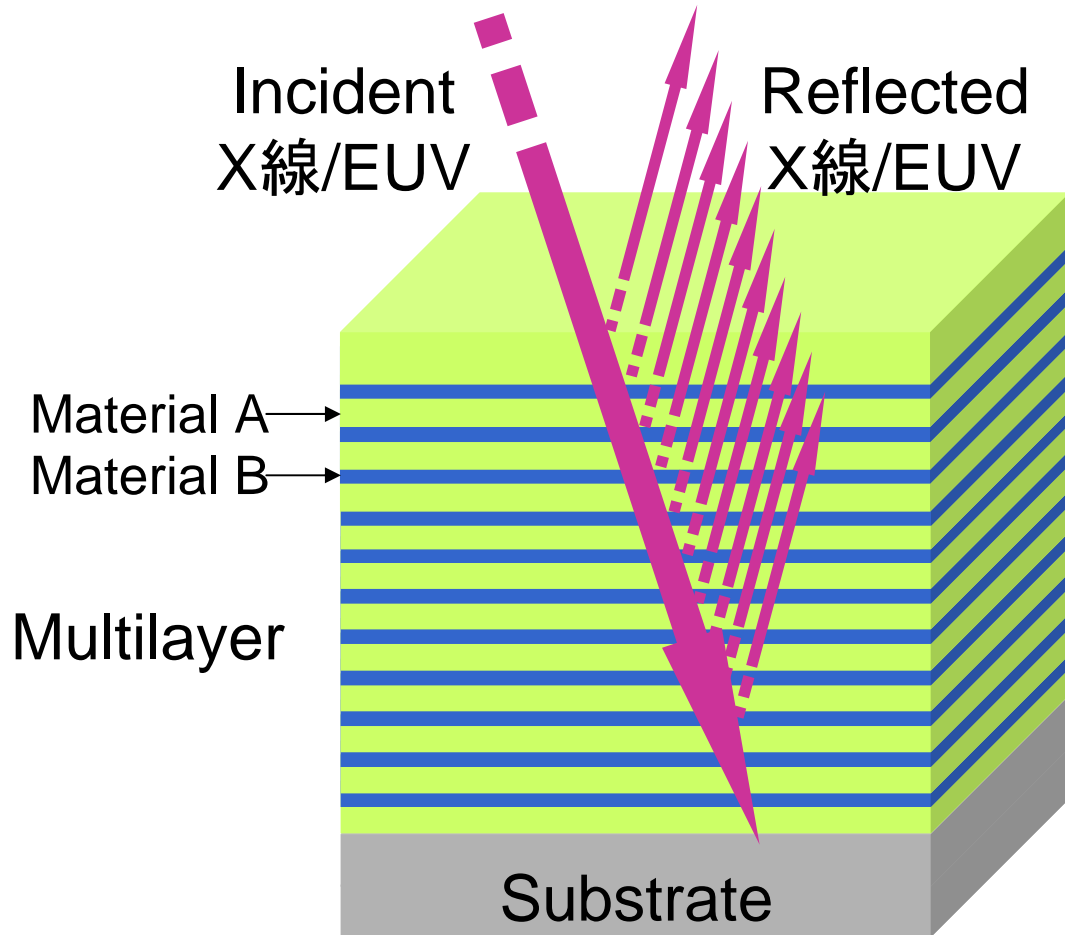


AIST富江様開発
微小部極表面分析装置(EUPS) 4

NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

多層膜X線ミラー



X線/EUVの
反射, 分光, 集光
が可能

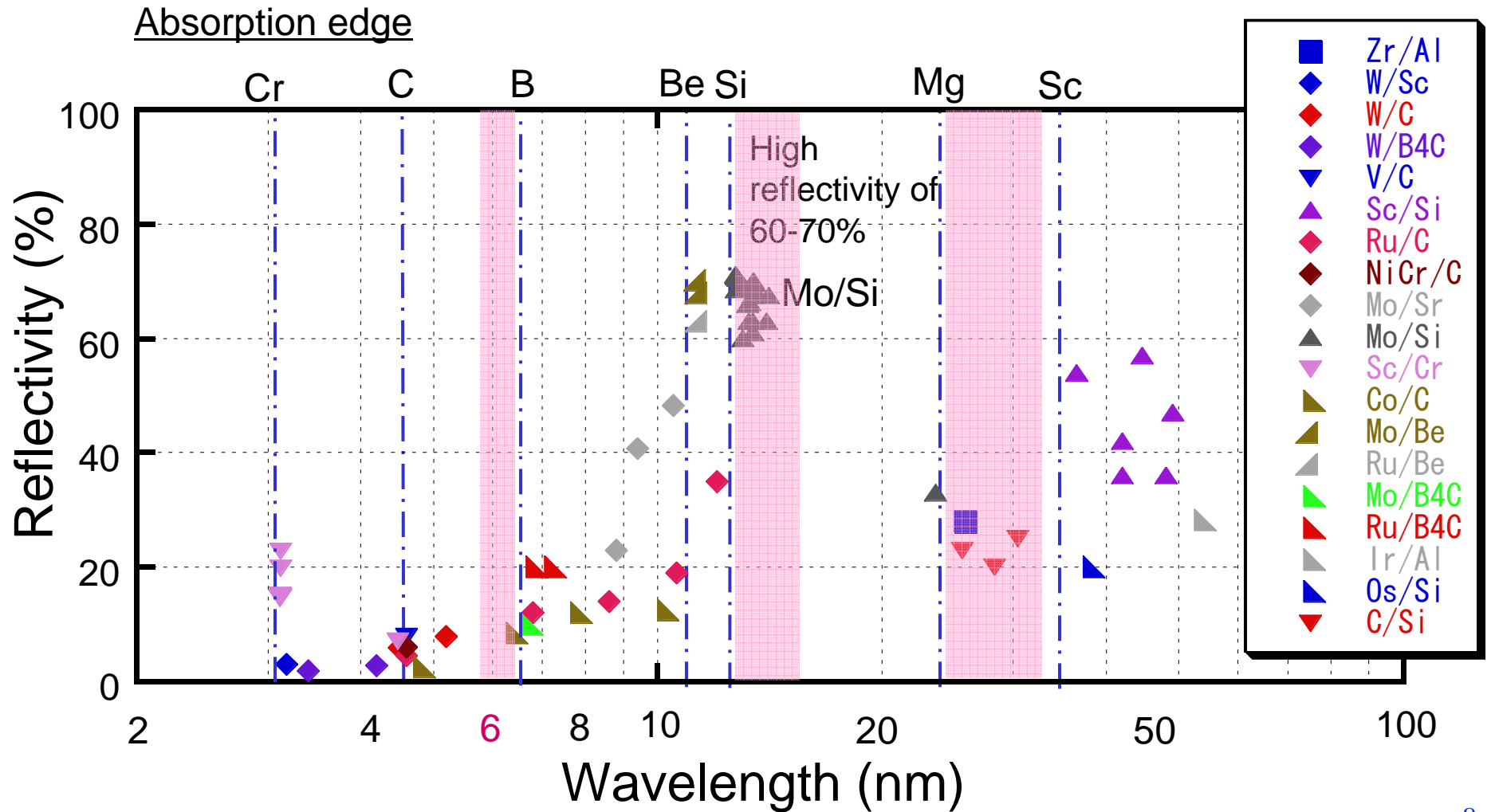


材料分析, 結像,
微細加工などに適用
(例: 光電子分光, 天体
望遠鏡, EUVリソグラ
フィ)

私たちの多層膜ミラーとPF

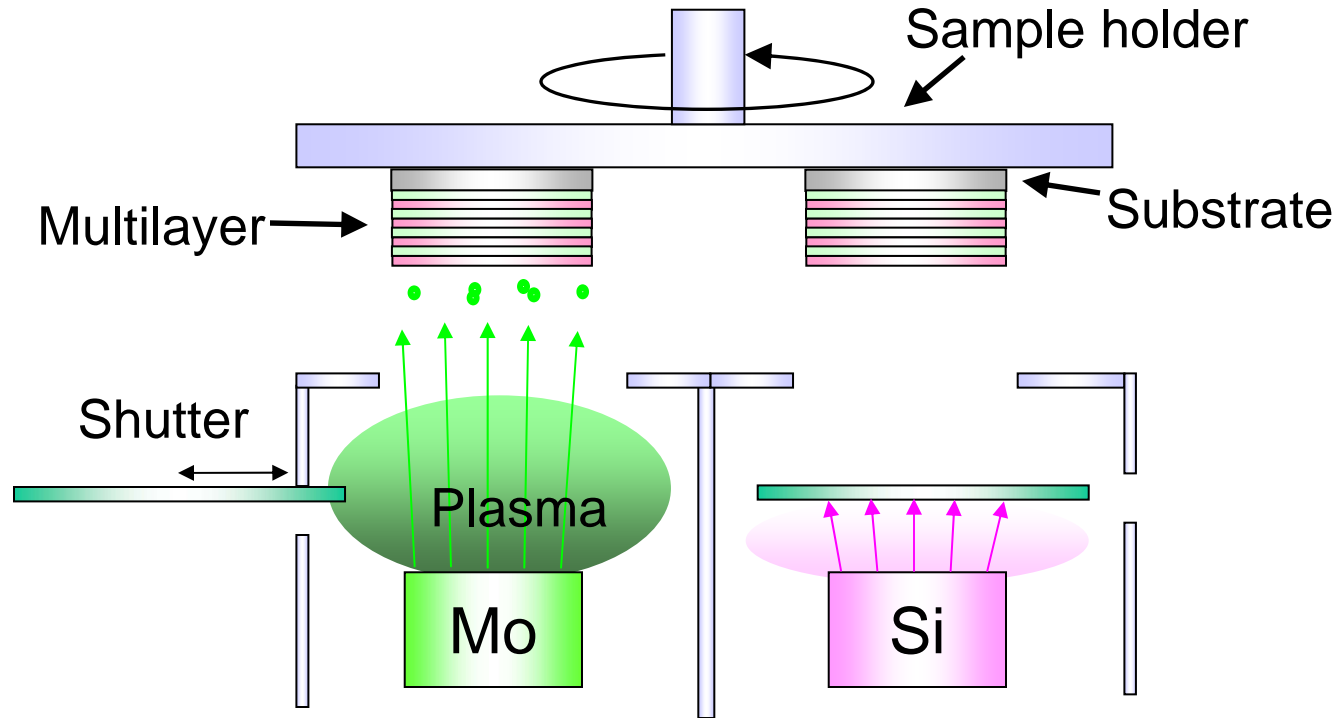
- ✦ きっかけは 高良先生のおすすめ
- ✦ 放射光による最初の評価は 石川先生
- ✦ 多層膜集光素子の集光実験は 河田先生と
- ✦ PF-BL1Aに多層膜を用いた2結晶分光器設置
(1985～1986)
- ✦ X線縮小リソグラフィ(現在のEUVリソグラフィ)開発
をPF-BL1Bで(1985～現兵庫県立大木下先生らと)

多層膜ミラーの反射率

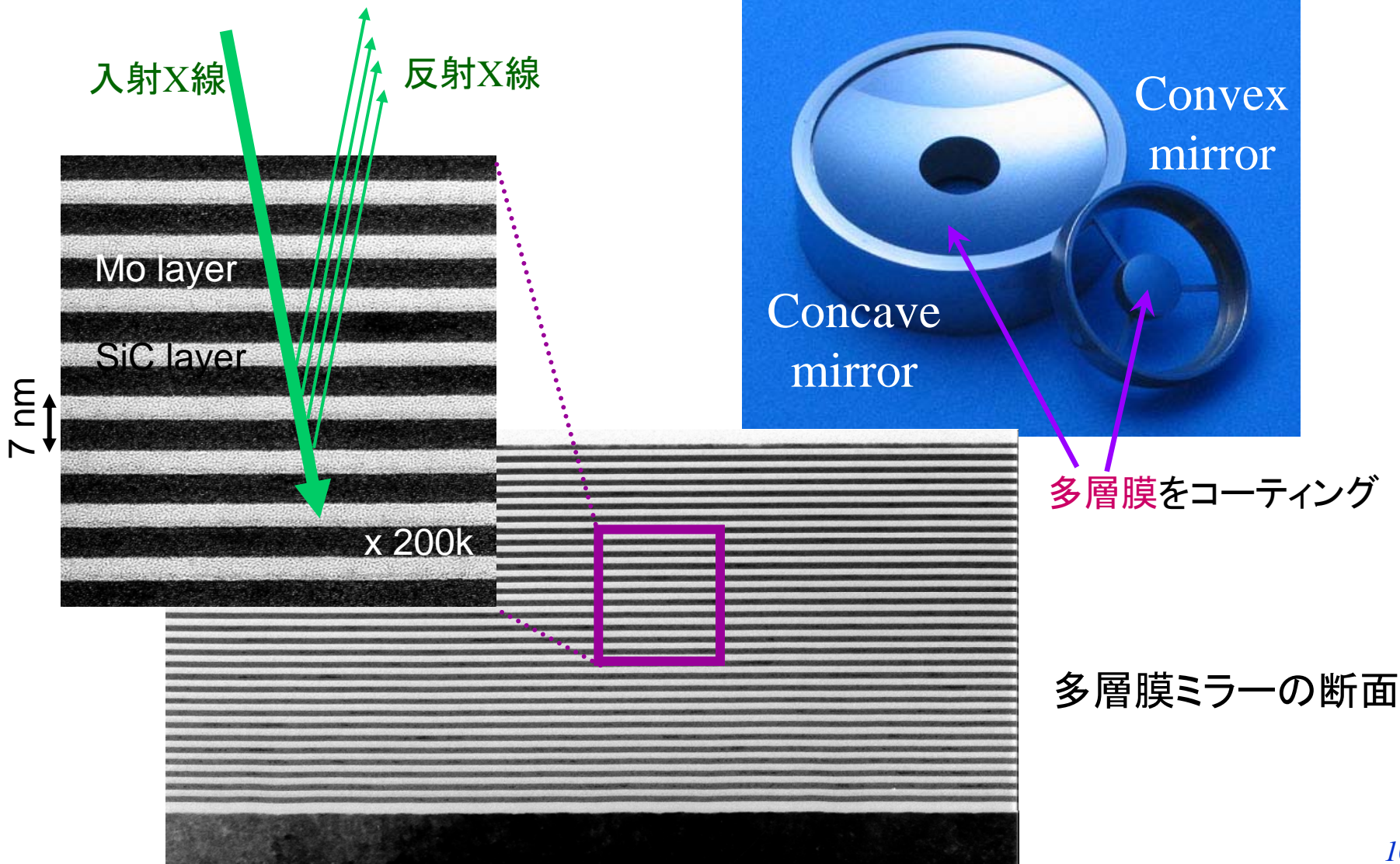


多層膜ミラーの作製法

- 作製はスパッタ法



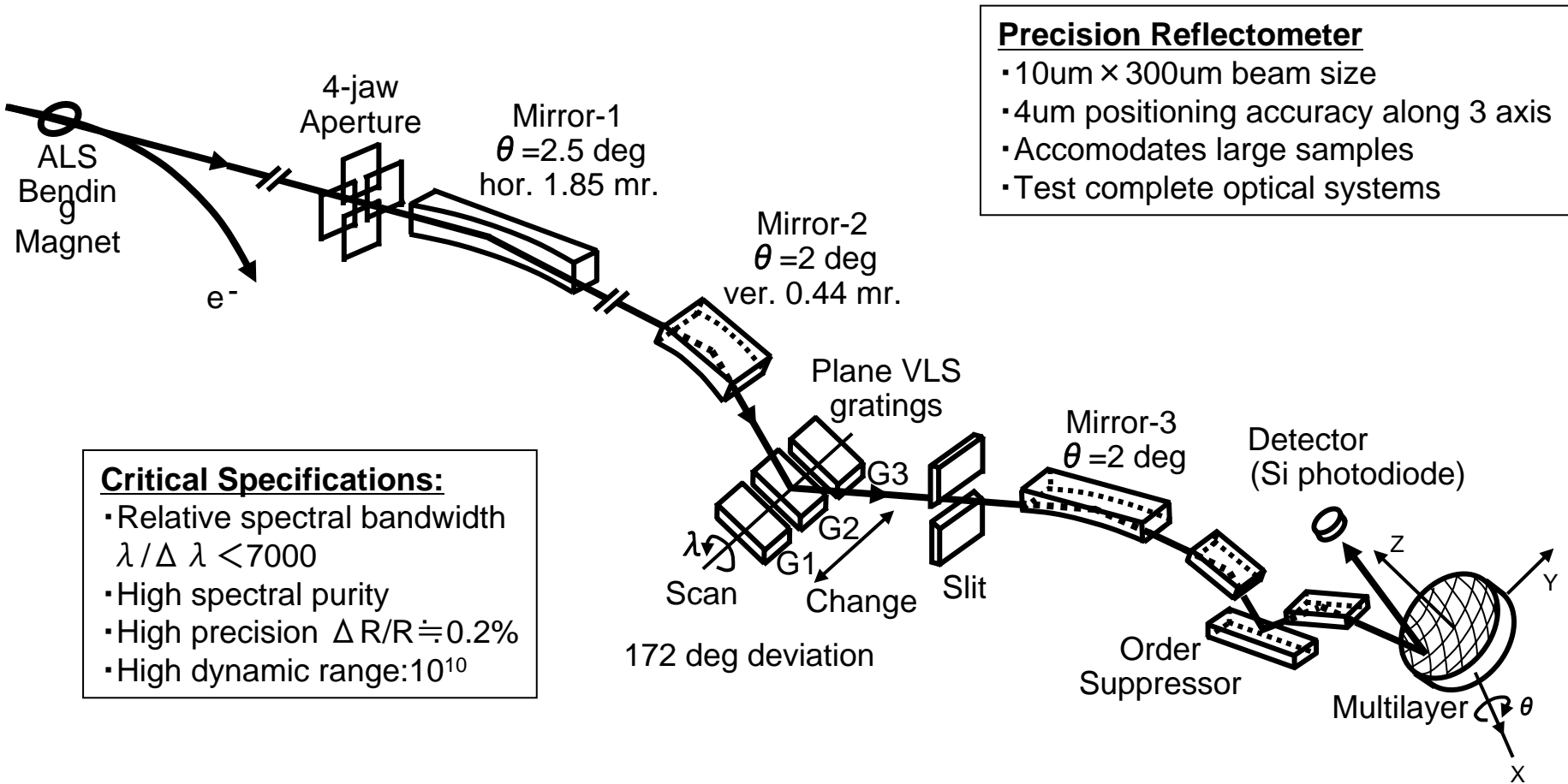
多層膜X線ミラー(構造と外観)例



多層膜作製装置例と多層膜ミラー一例



多層膜反射率測定装置例

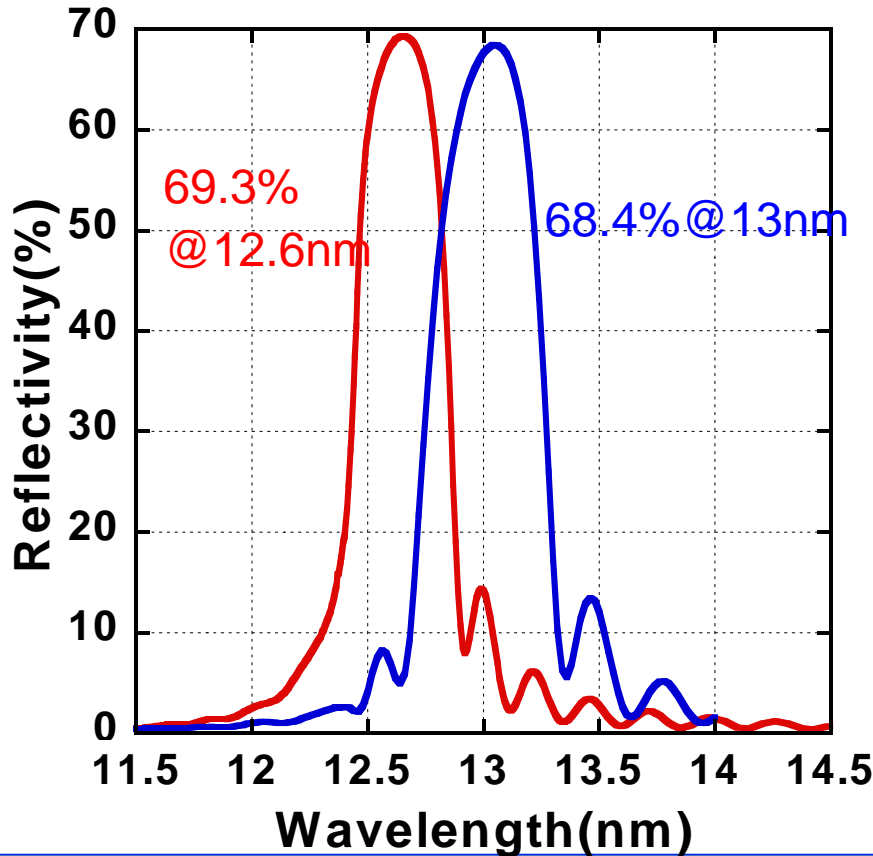


Schematic layout of ALS beamline 6.3.2. courtesy of <http://www.cxro.lbl.gov/ALS6.3.2/>.

波長13nm用多層膜ミラーの反射特性

Mo/Si 多層膜ミラー@波長13nm, 直入射

@ grazing incident angle of 88°



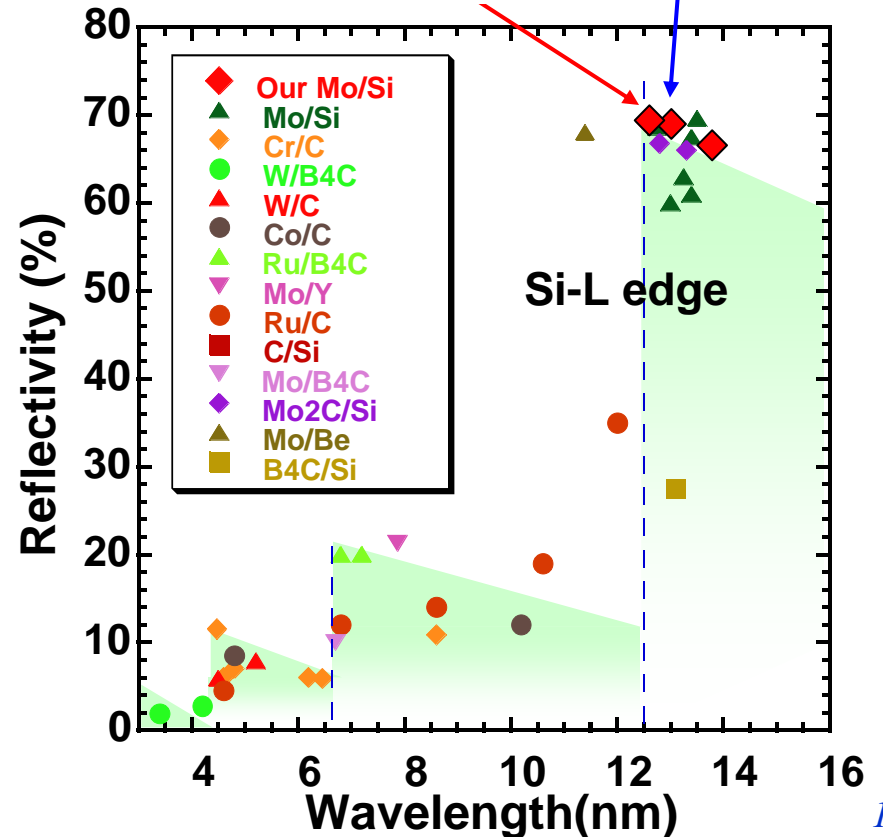
➤ 報告例との比較

R:69.3%

(λ :12.6nm, θ :88deg)

R:68.4%

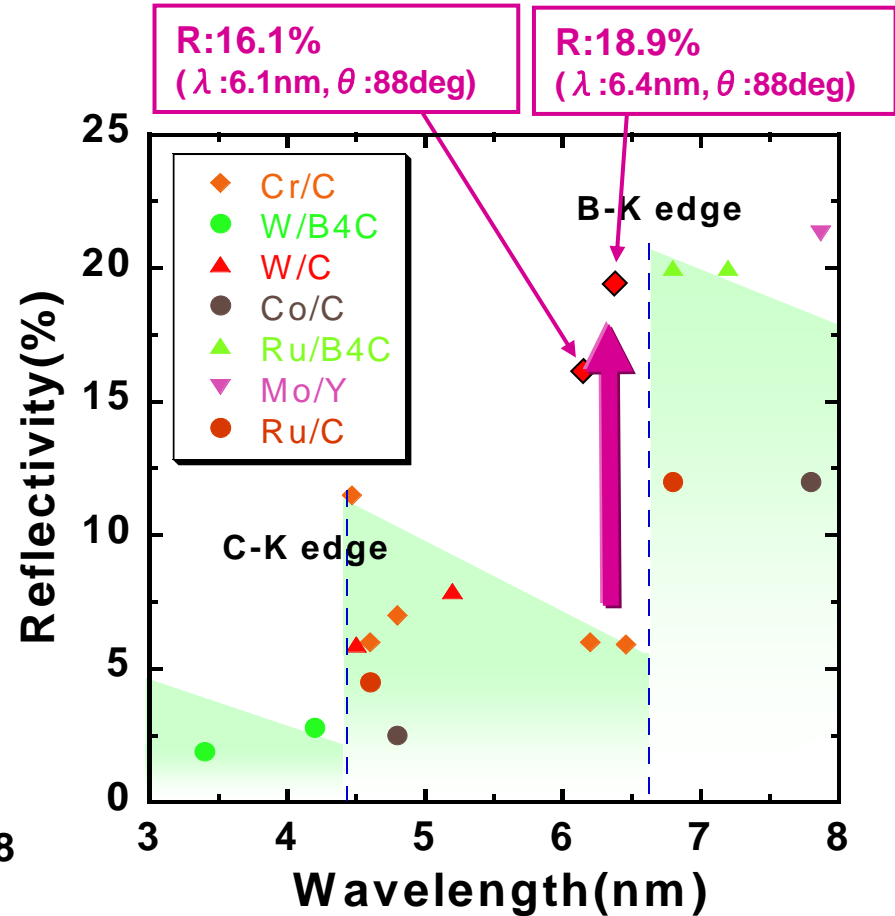
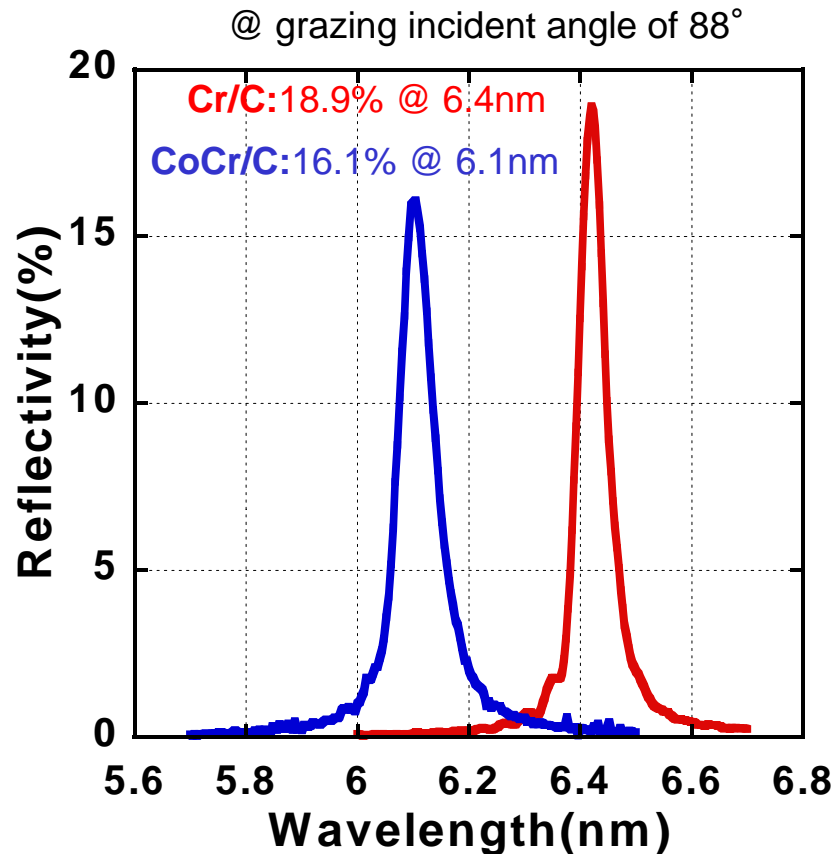
(λ :13.0nm, θ :88deg)



波長6nm用多層膜の反射特性

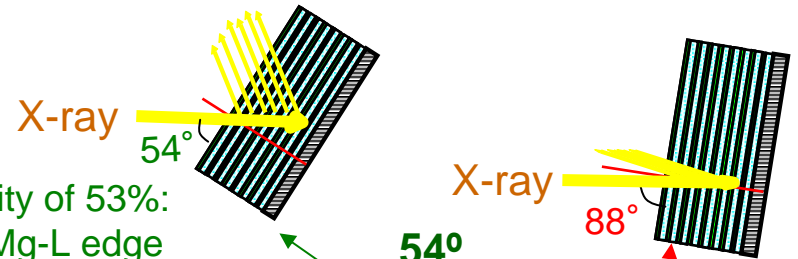
➤ Our results

➤ The database of reported multilayer reflectivity

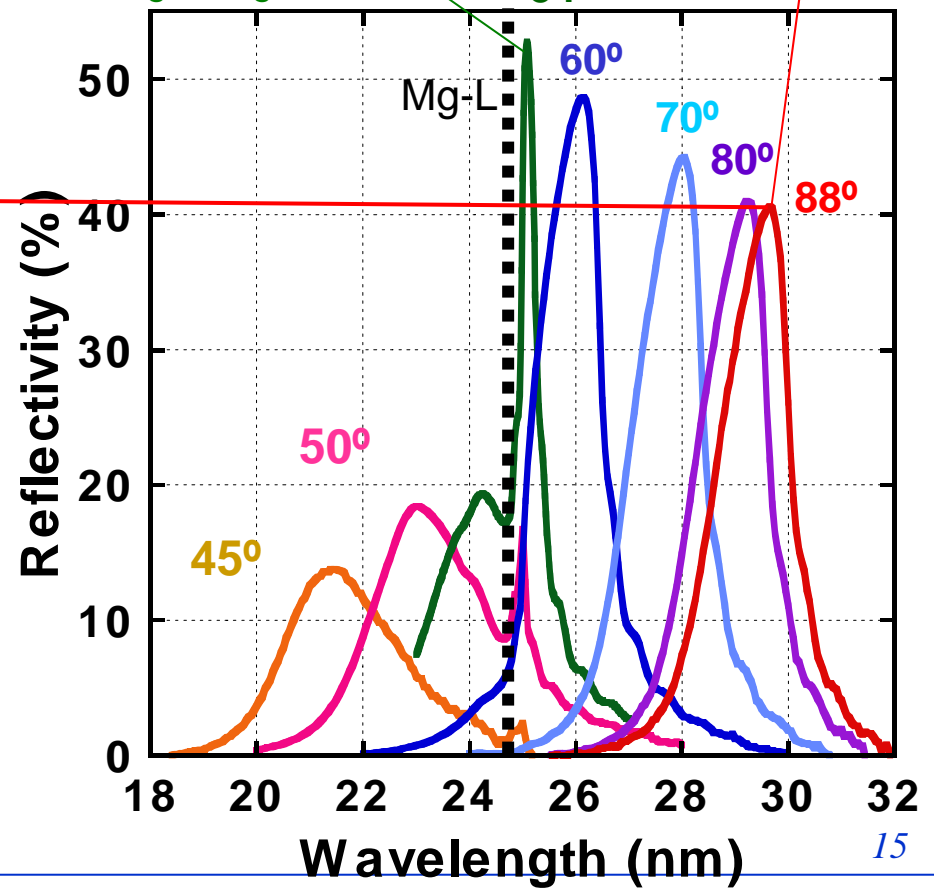
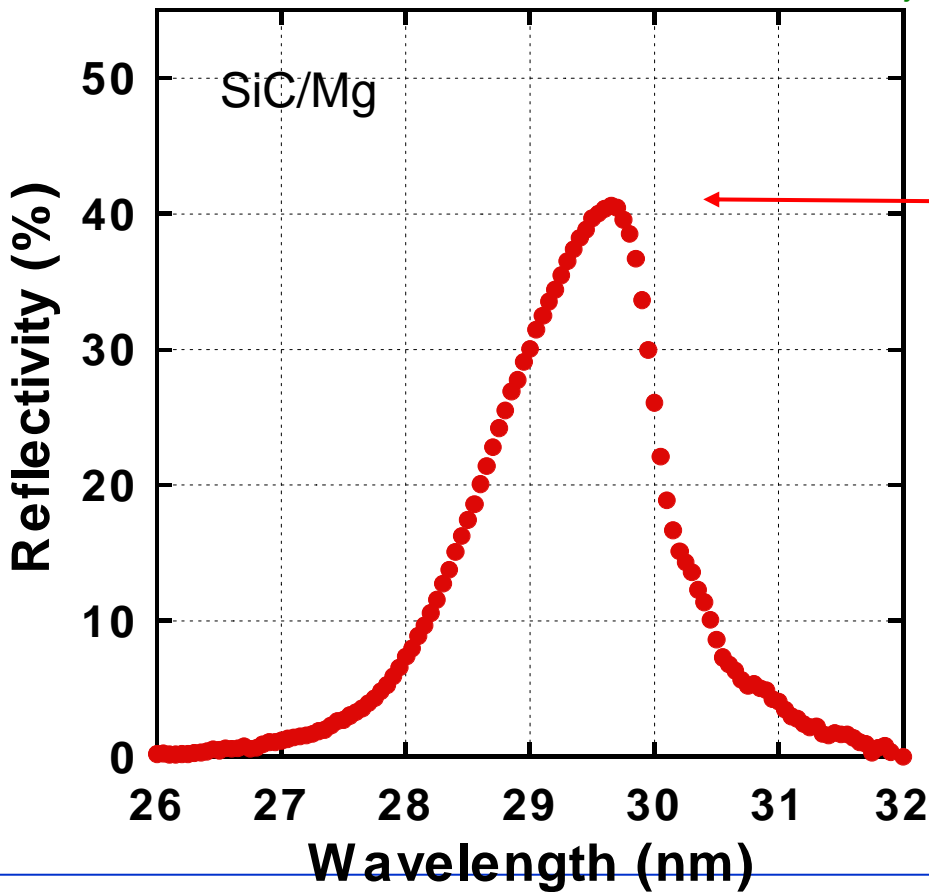


波長30nm用多層膜の反射特性

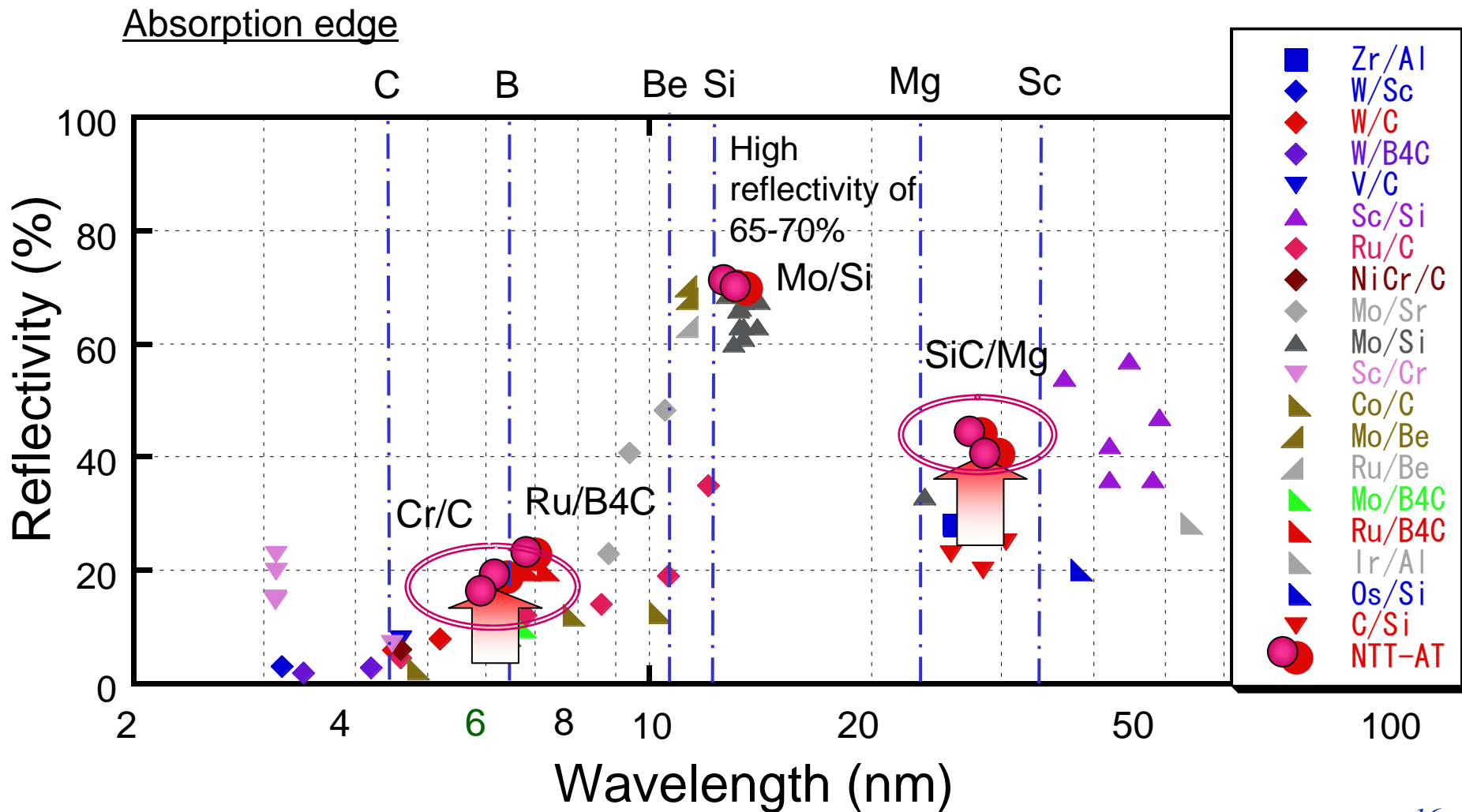
Reflectivity : 40.5% ($\lambda = 29.7$ nm,
Incident angle of 88°)



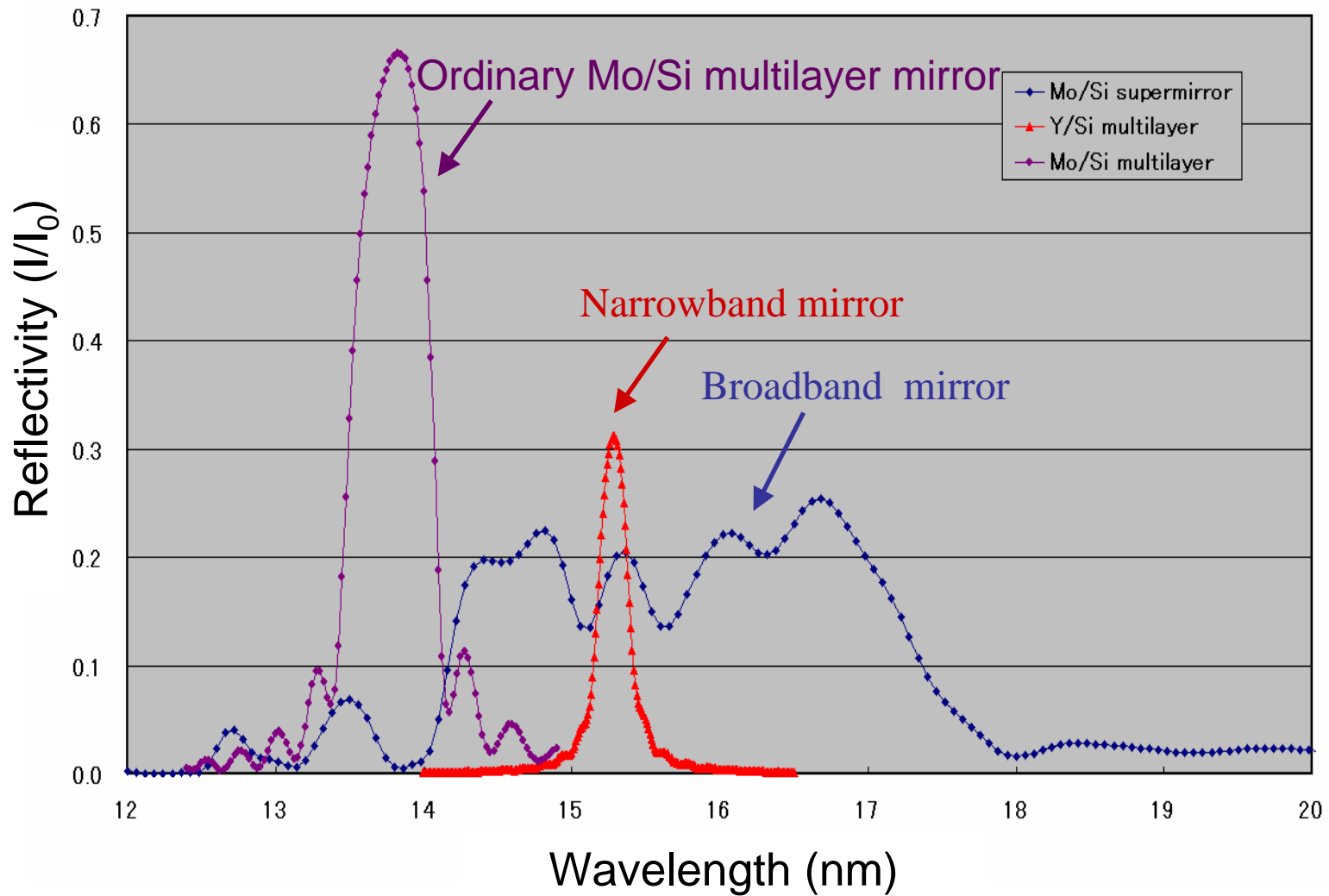
Highest reflectivity of 53%:
just over Mg-L edge



従来の反射率との比較

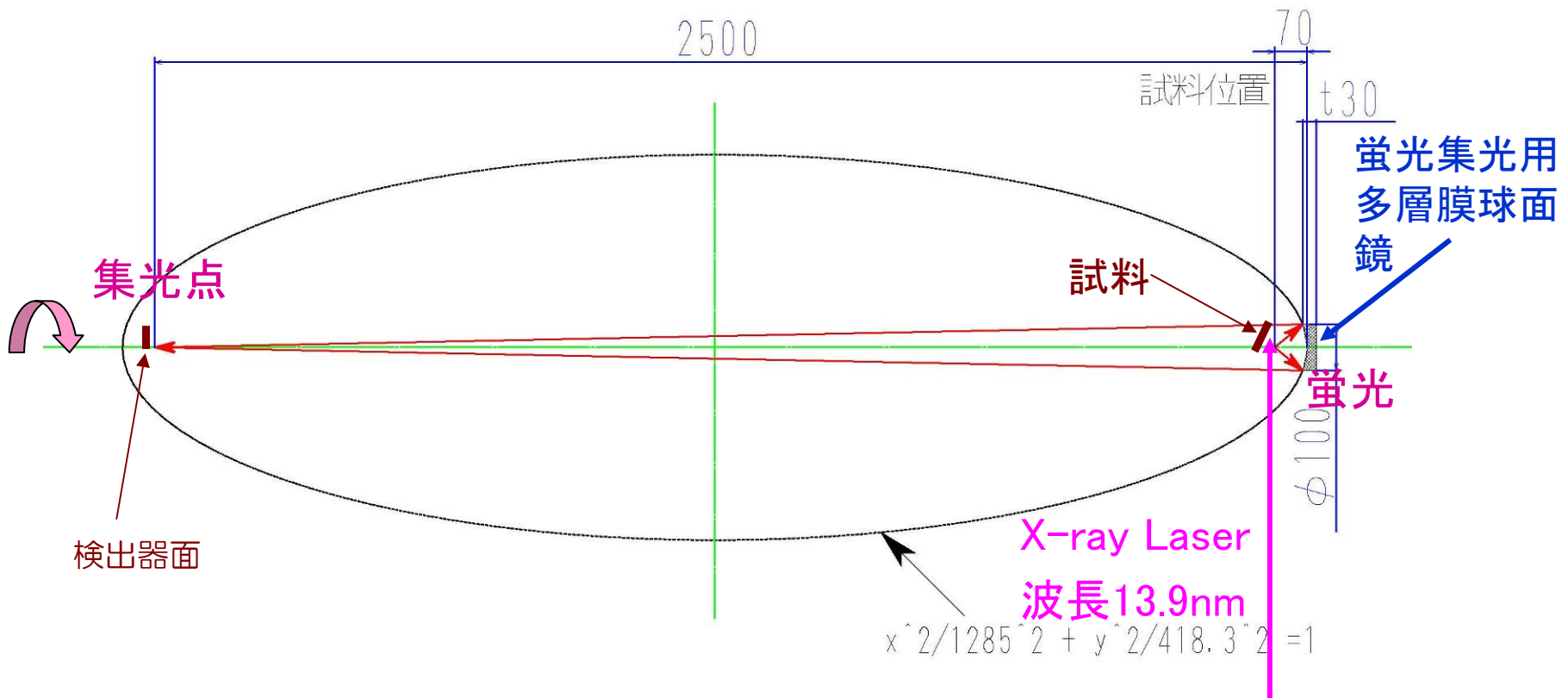


ブロードバンドミラー, ナローバンドミラー



蛍光軟X線集光実験配置概略図

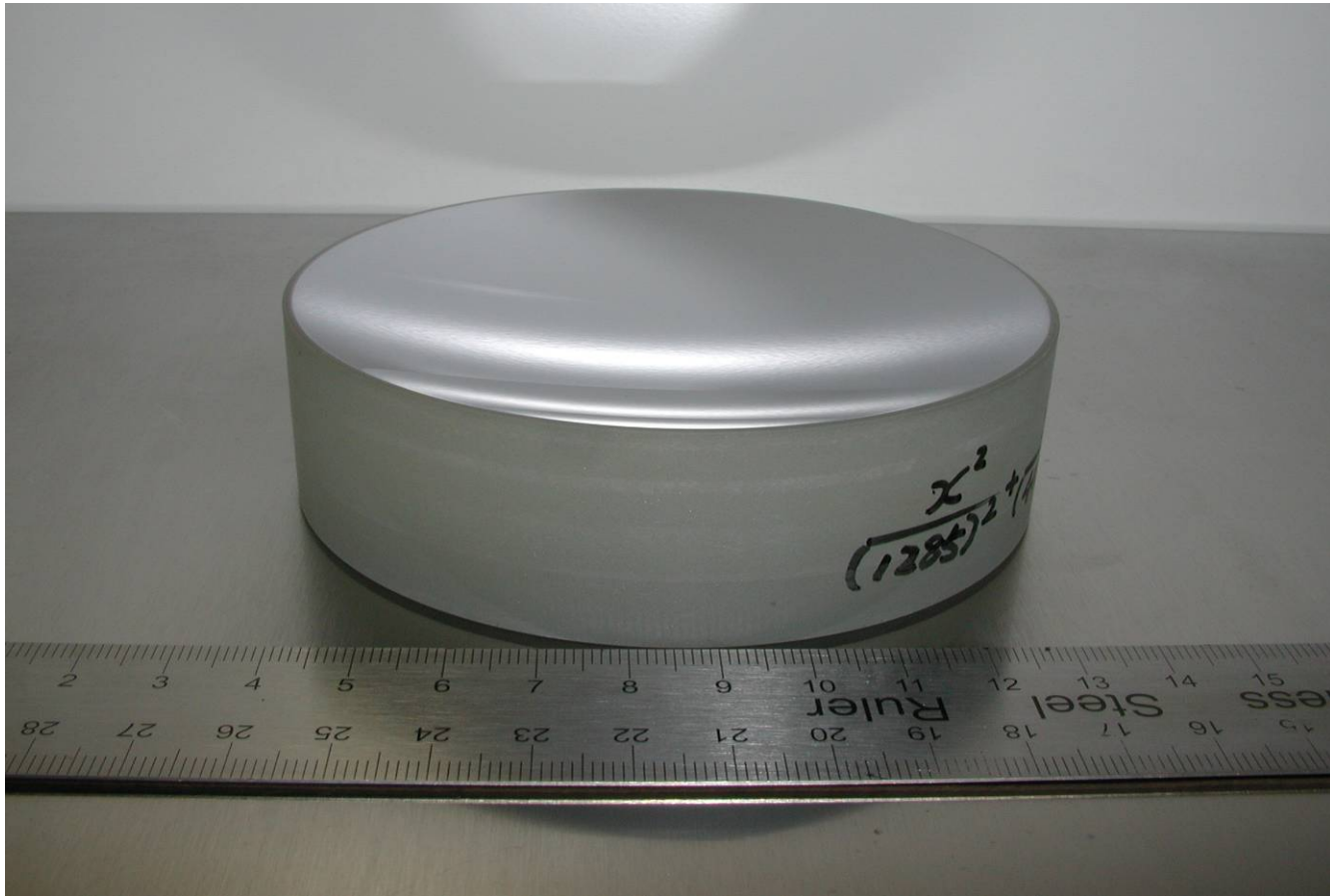
X線レーザーを試料に照射し、試料からの蛍光X線
(波長16.5nmおよび波長15.5nm)を同時に観測する。



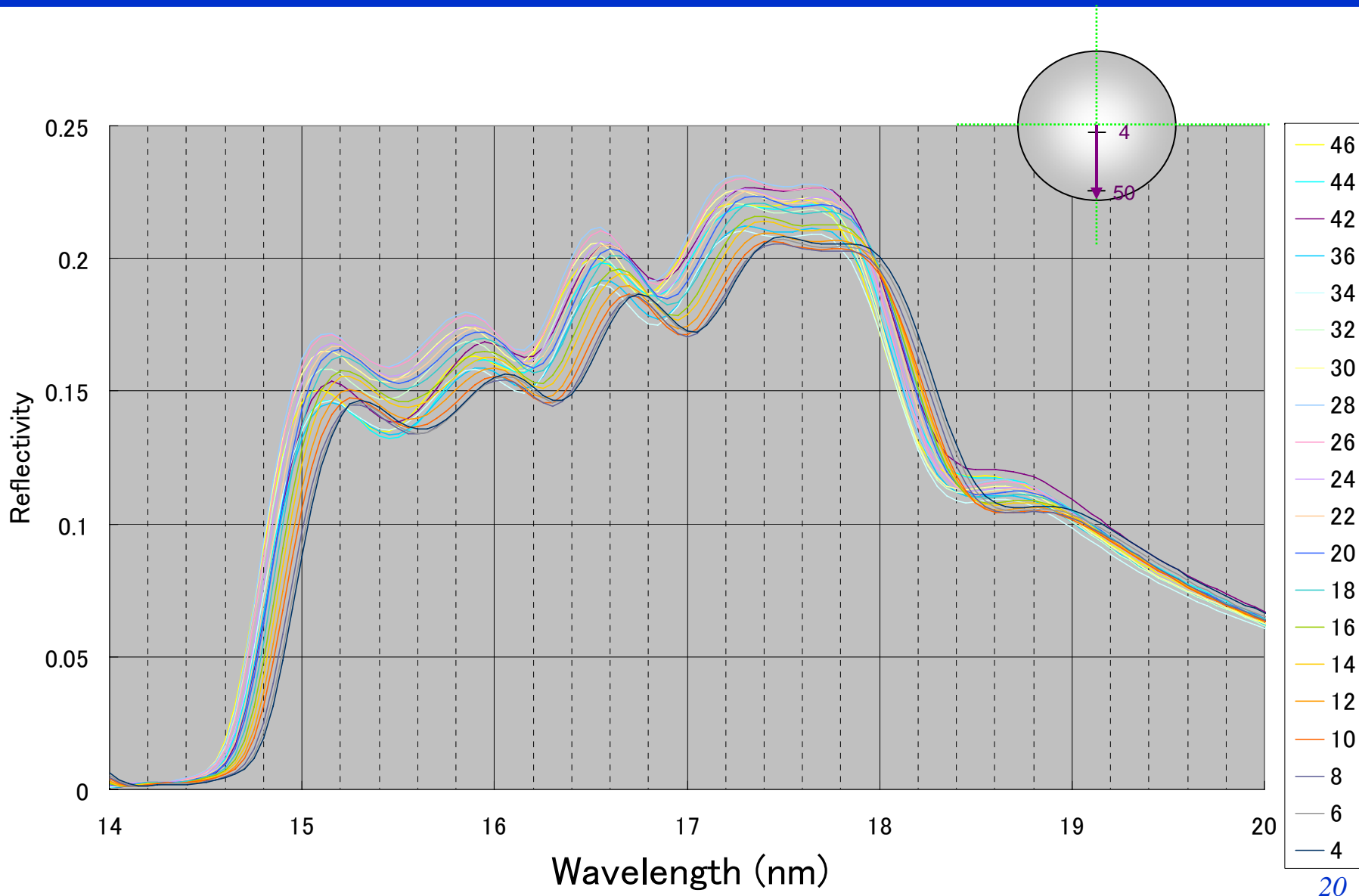
回転楕円面反射鏡

“broadband多層膜を作製する条件” + “graded多層膜を作製する条件”

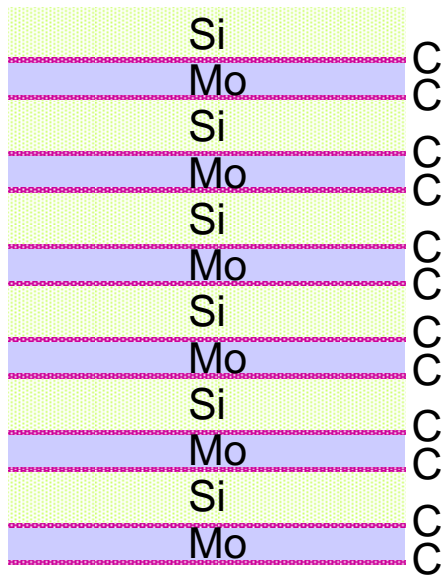
→ Zerodur を研磨した基板上に形成



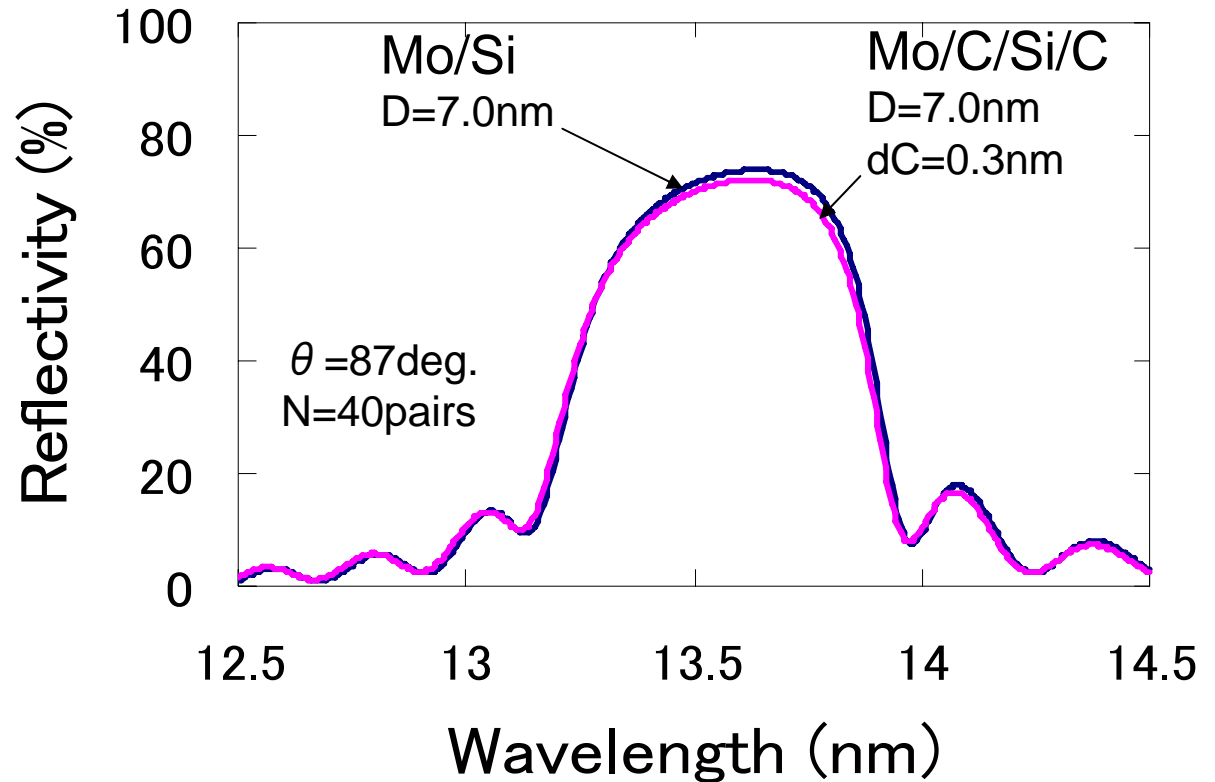
楕円面 broadband ミラーの反射率測定例



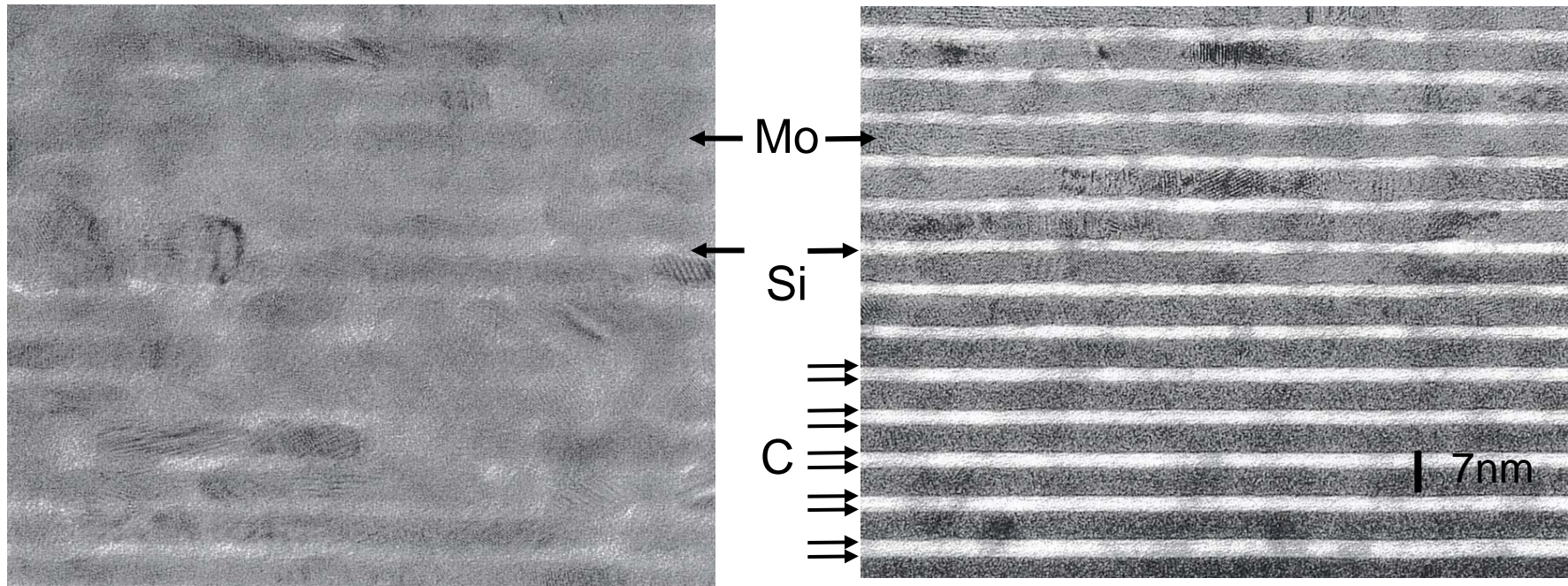
Mo/Si とMo/C/Si/C多層膜の反射率と構造



Multilayer structure



Mo/Si とMo/C/Si/C多層膜の耐熱性



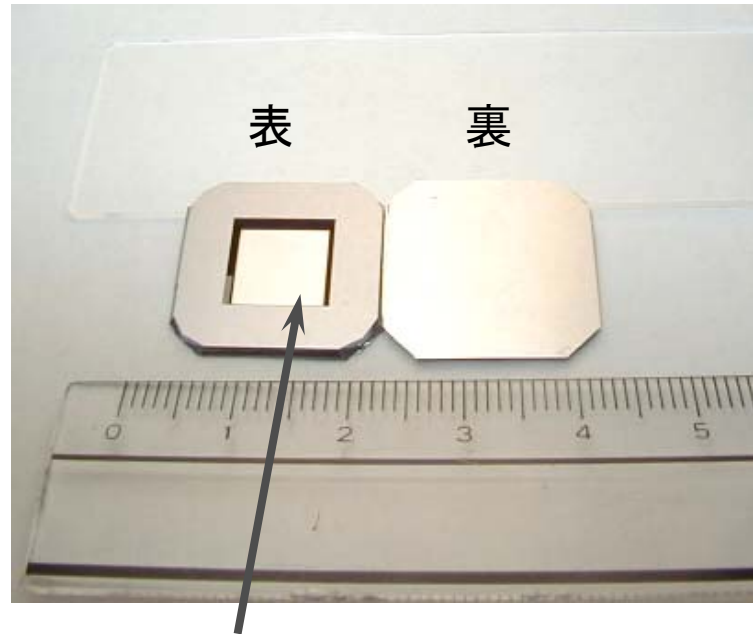
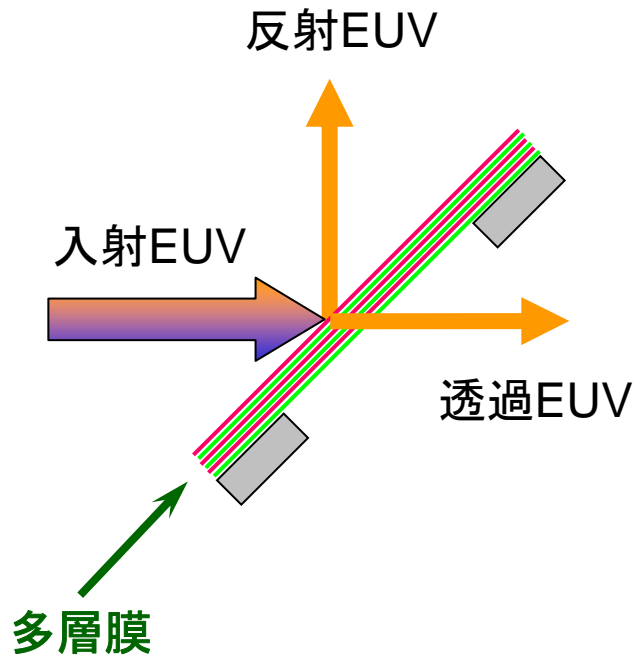
Mo/Si multilayer

Mo/C/Si/C multilayer

Cross-section TEM images for 700°C heated Mo/Si and Mo/C/Si/C multilayers

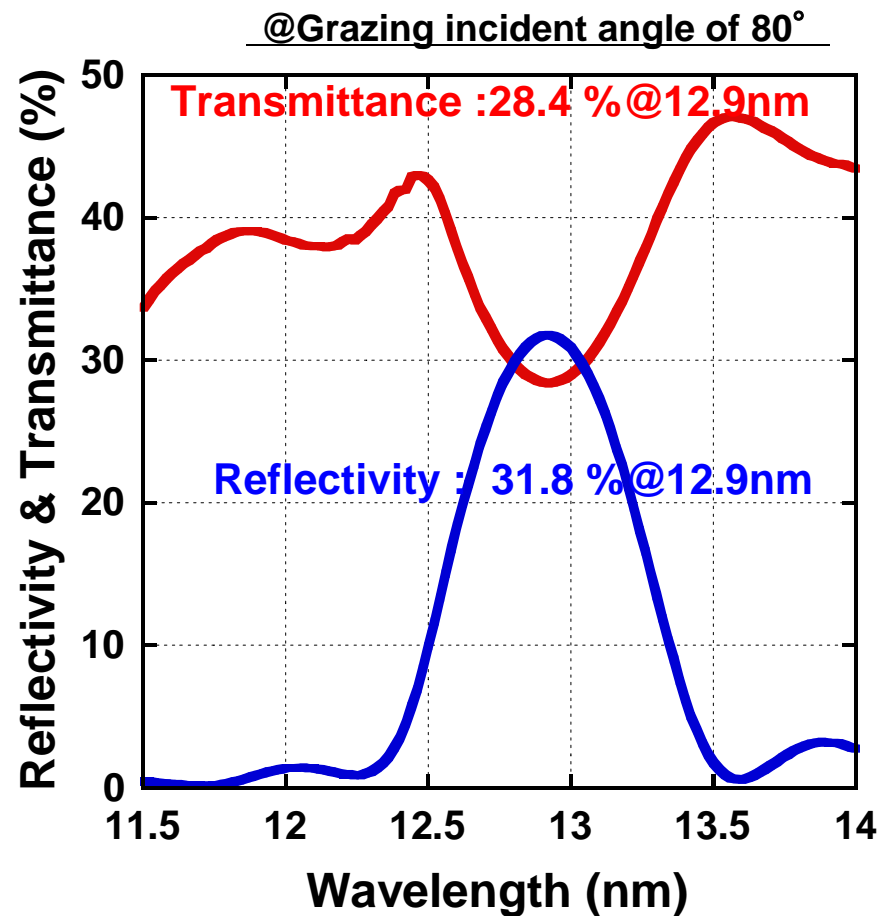
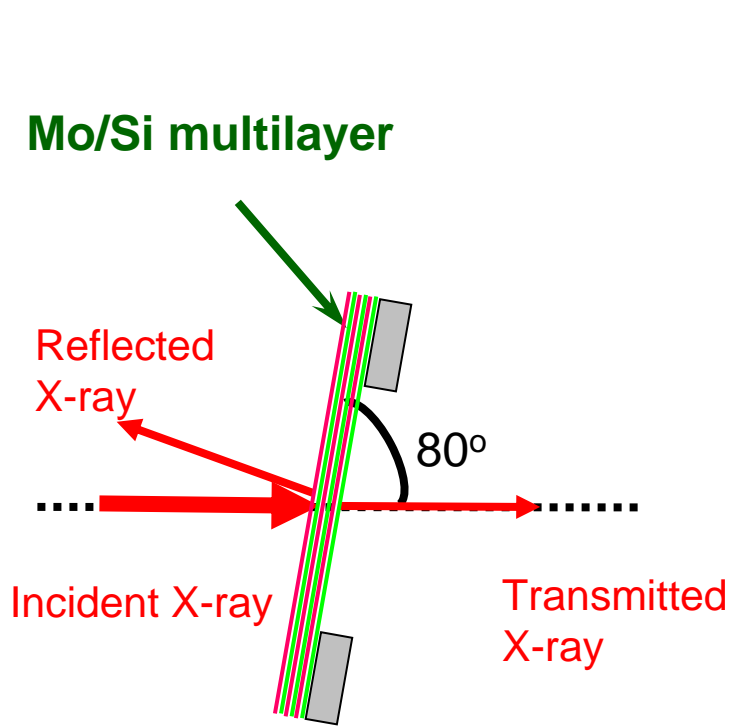
透過型EUVビームスプリッター

EUV光利用干渉光学系作製に有用



free-standing multilayer
window size : 10 mm X 10 mmなど
平坦, 平滑

波長13nm用直入射型ビームスプリッタの反射透過特性



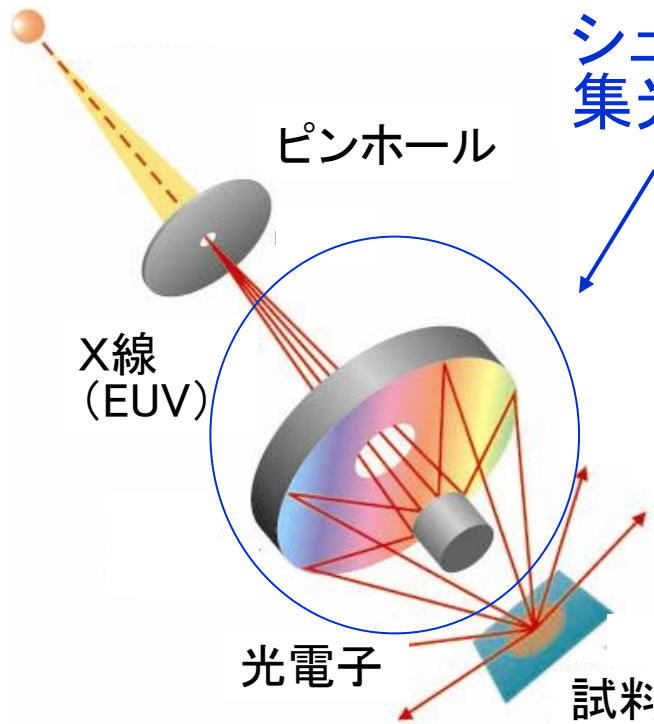
H. Takenaka, S. Ichimaru, T. Haga, T. Ohchi, H. Ito, Y. Muramatsu, E. M. Gullikson, R. C. C. Perera, J. Phys. IV France 104(2003) 255

NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

集光光学系(シュバルツシルト)

X線源



シュバルツシルト
集光光学系

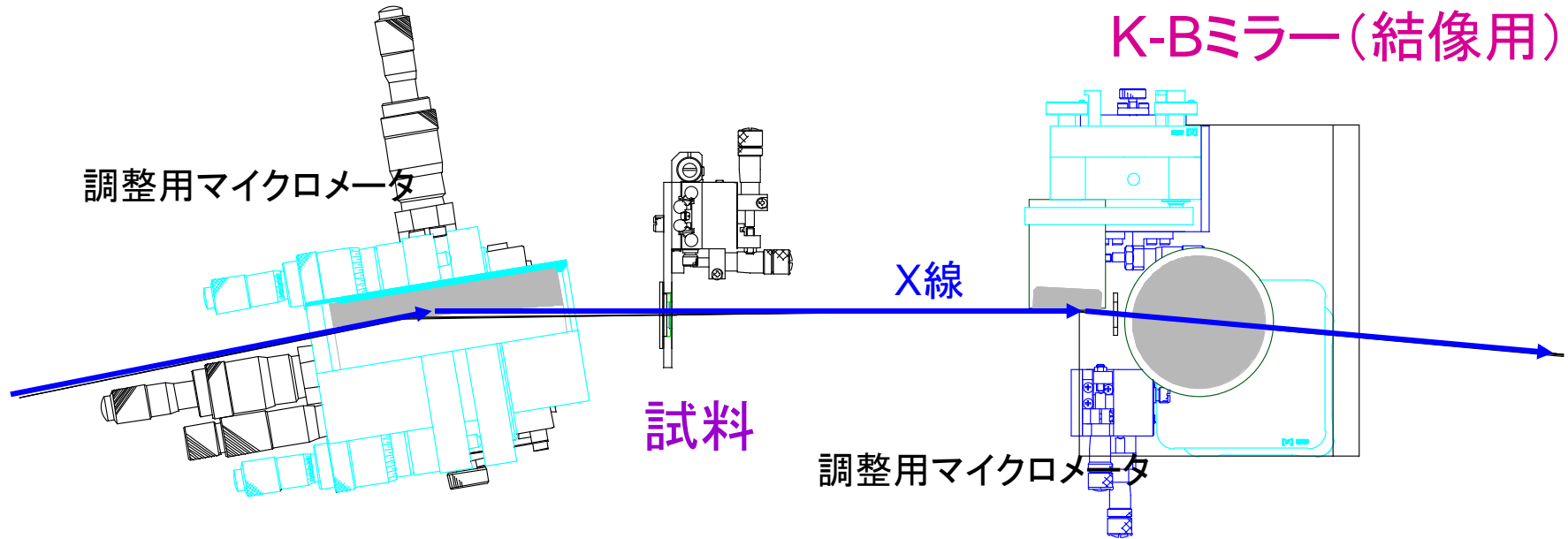


シュバルツシルト: 広がってくるビームの集光に有効

NTT-ATにおけるX線集光素子開発

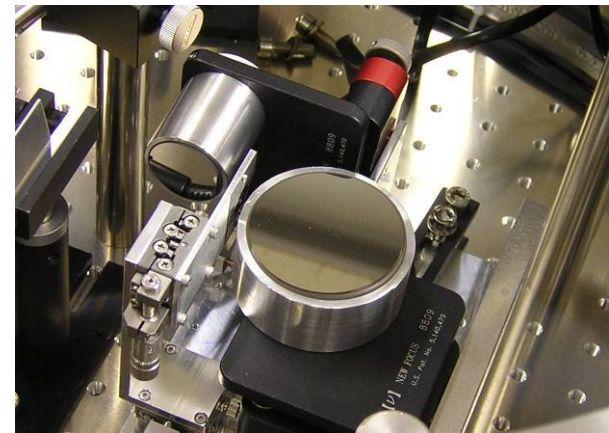
1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

集光光学系例(回転楕円面ミラー & K-Bミラー)



回転楕円面ミラー
(照明用)

NTT 中野秀俊氏のご好意

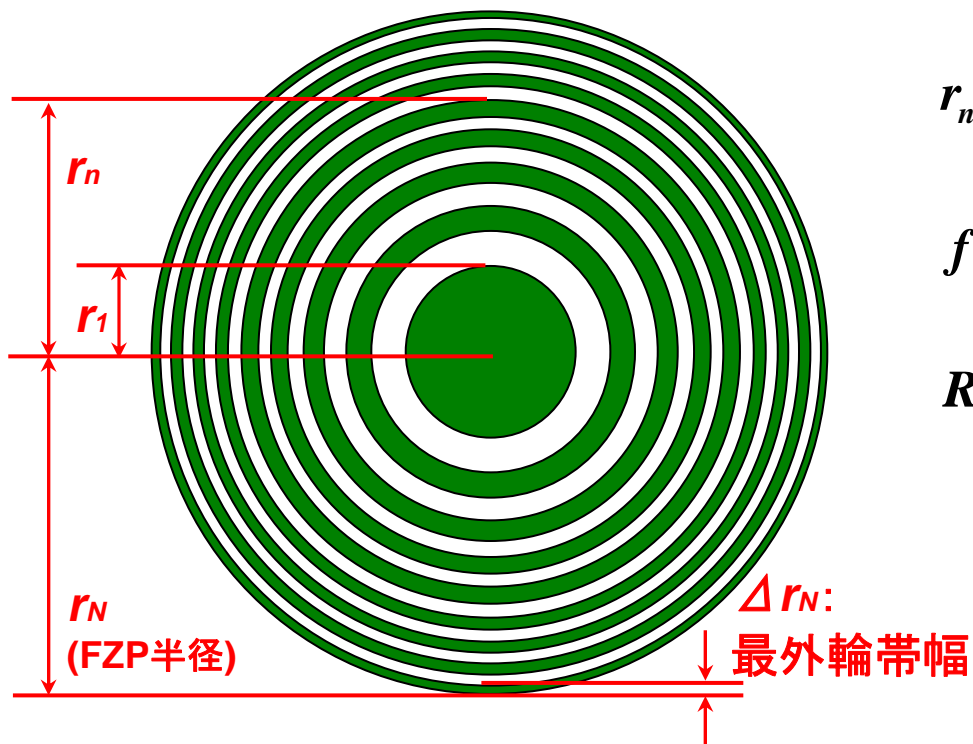


K-B mirror

NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

Fresnel Zone Plate (FZP)



$$r_n = \sqrt{n\lambda f + \frac{n^2 \lambda^2}{4}}$$

$$f = \frac{4N(\Delta r_N)^2}{\lambda}$$

$$\text{Rayleigh criterion} = \frac{0.61\lambda}{NA} = \underline{\underline{1.22\Delta r_N}}$$

(回折限界)

最外輪帯幅と
同程度の大きさ

n : ゾーン数

N : 全ゾーン数

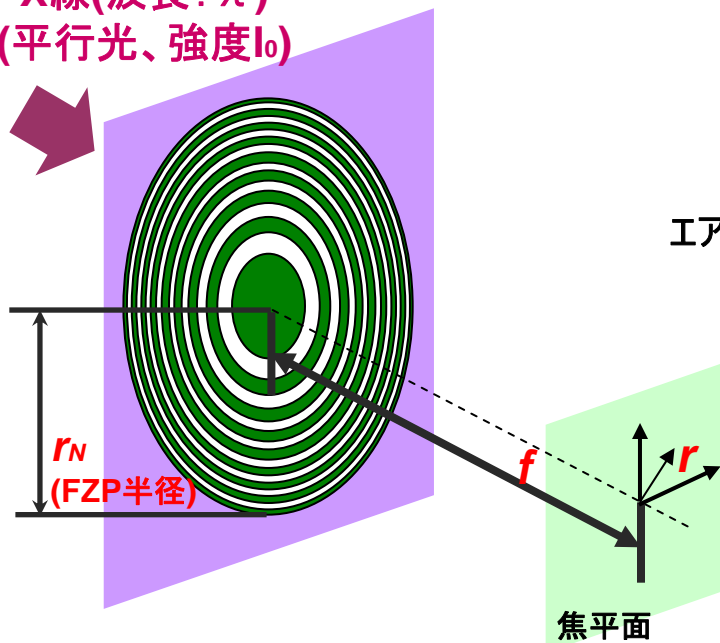
λ : 波長

f : 焦点距離

NA : 開口数(Numerical Aperture)

FZPの回折パターン(1次光)

X線(波長: λ)
(平行光、強度 I_0)

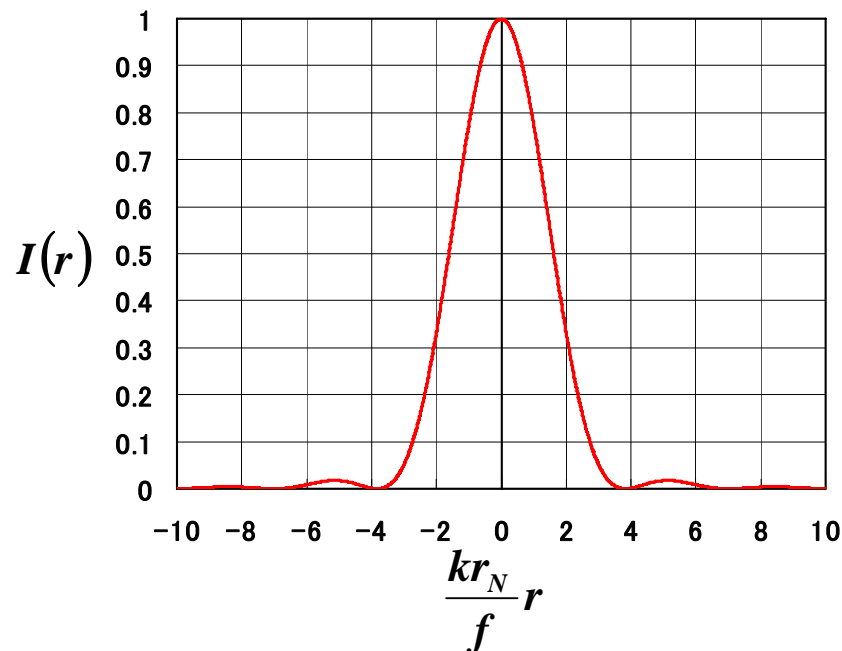


焦平面上でのFZPの回折パターン(1次光)

$$I(r) \propto \left| \frac{2J_1\left(\frac{kr_N}{f}r\right)}{\frac{kr_N}{f}r} \right|^2$$

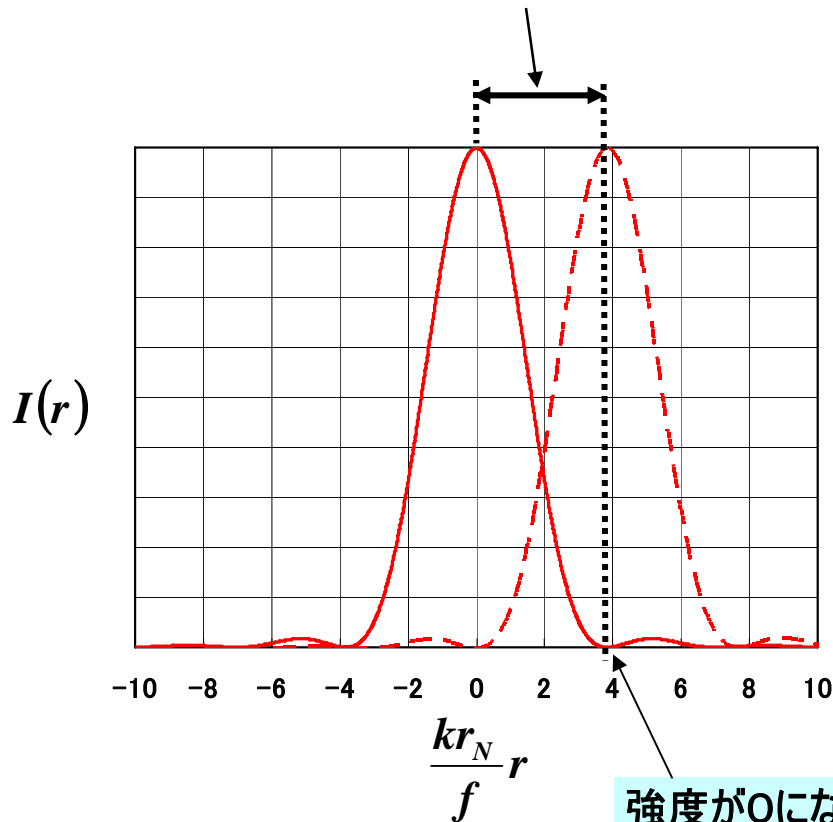
$J_1(x)$: 第1種ベッセル関数
 k : 波数($=2\pi/\lambda$)
 r_N : FZP半径
 f : 焦点距離

回折パターンの計算結果



FZPの空間分解能

レーリ- (Rayleigh) の解像限界
= 空間分解能と定義する



強度が0になる位置

$$\frac{kr_N r}{f} = 3.832$$

$$\frac{kr_N r}{f} = 3.832$$

展開

$$r = 3.832 \cdot \frac{f}{kr_N}$$

$$= \frac{3.832}{2\pi} \cdot \frac{\lambda f}{r_N}$$

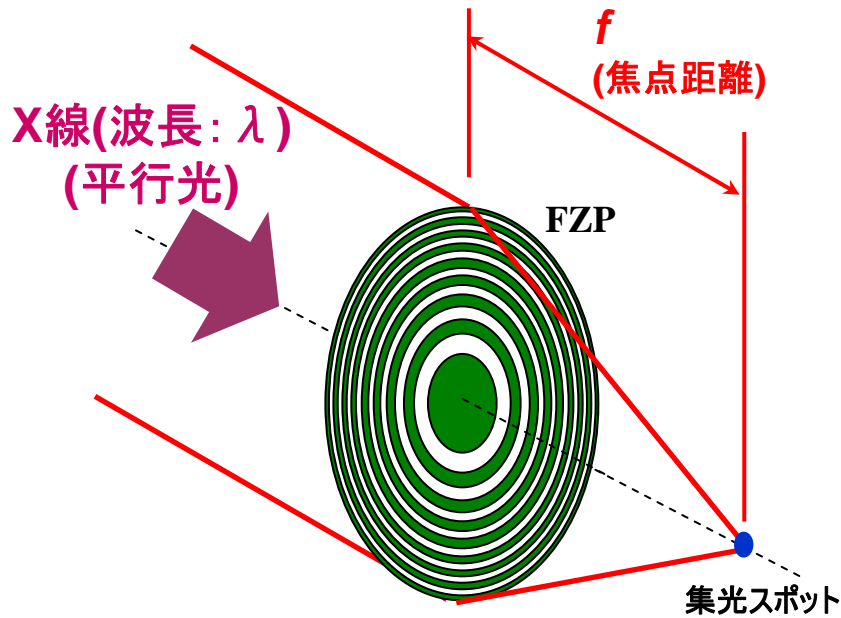
$$= 0.610 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

$$= 1.22 \Delta r_N \left(\because NA \approx \frac{\lambda}{2\Delta r_N} \right)$$

FZPの空間分解能は、最外輪帯幅 (Δr_N) とほぼ同じ値になる

FZP集光特性

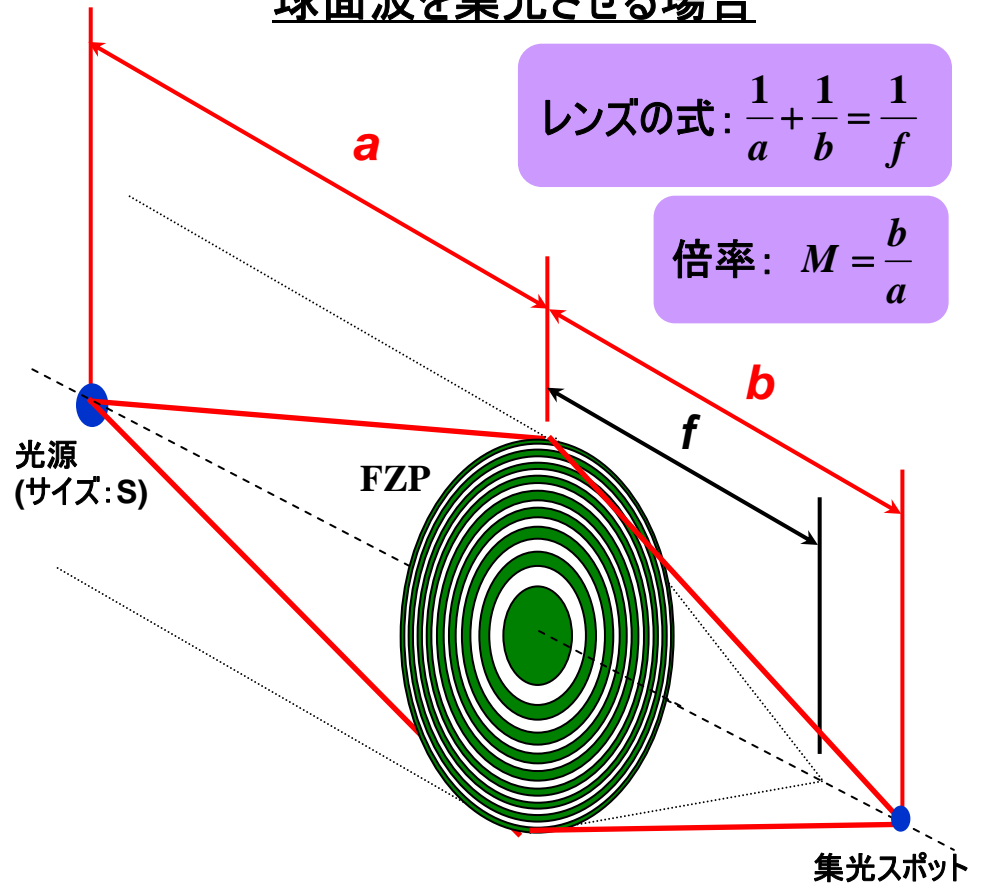
平行光を集光させる場合



スポット径(理想値) = $\sim \Delta r_N$ (最外輪帯幅)

→ 入射ビームの平行度、パターン形状精度により径が大きくなる

球面波を集光させる場合



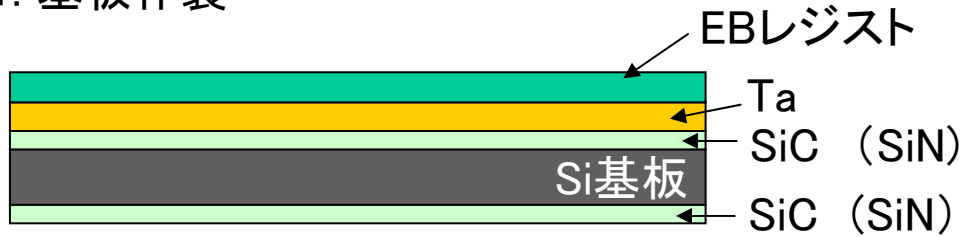
スポット径(理想値) = $\sim \left\{ (\Delta r_N)^2 + (s \cdot M)^2 \right\}^{1/2}$

(回折限界と幾何学的縮小サイズのコンポリューション)

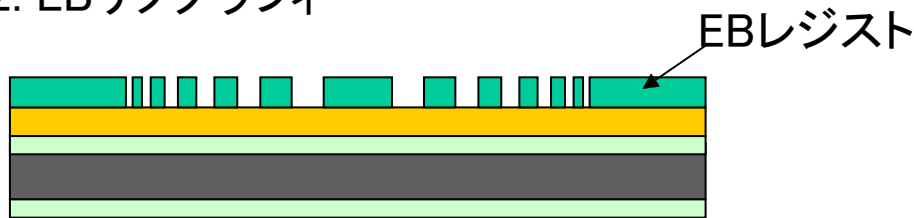
→ パターン形状精度により径が大きくなる

ゾーンプレートの作り方

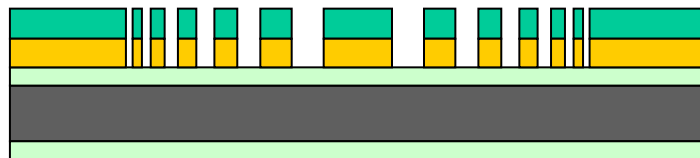
1. 基板作製



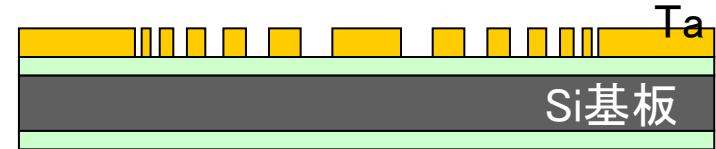
2. EBリソグラフィ



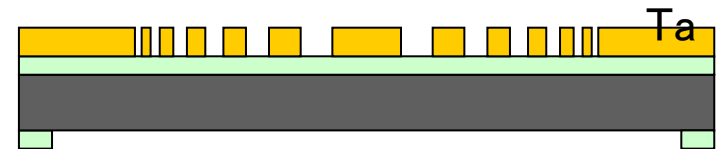
3. Taエッチング



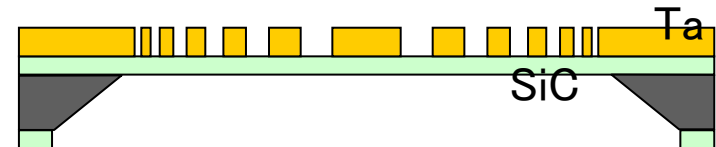
4. レジスト除去



5. 裏SiC(SiN)窓加工



6. Siエッチング

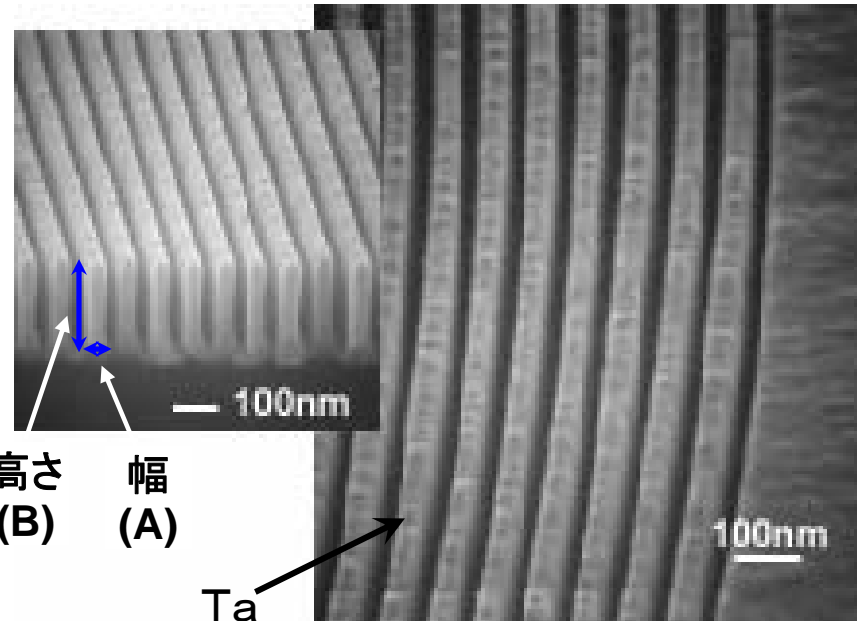
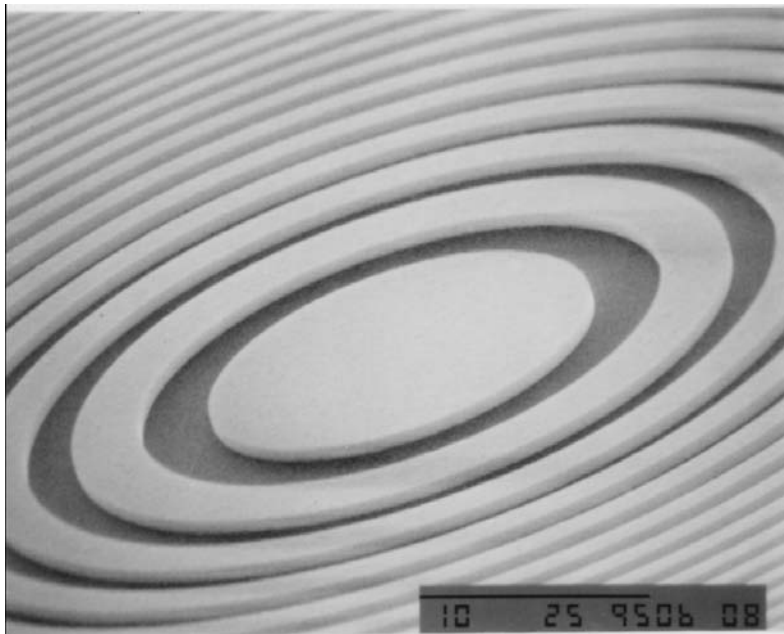


NTT-AT製Fresnel Zone Plate

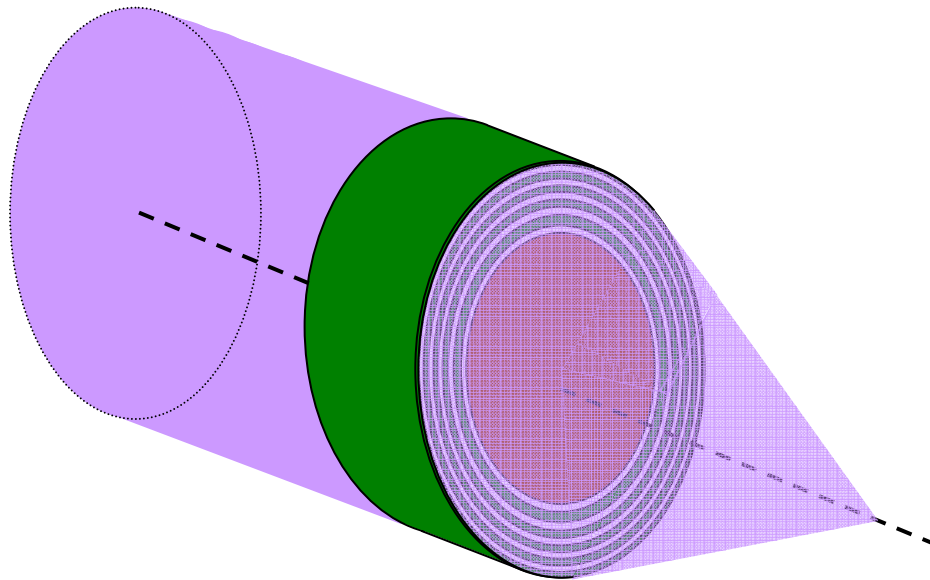
特徴:

- メンブレン材料(SiN、SiC)上にTaを吸収体材料としてゾーンを形成
- 35nm程度のパターンを製作可能
- キノホルム型(回折効率向上のため)の製造も可能
- アスペクト比(B/A):最大8程度まで製作可能

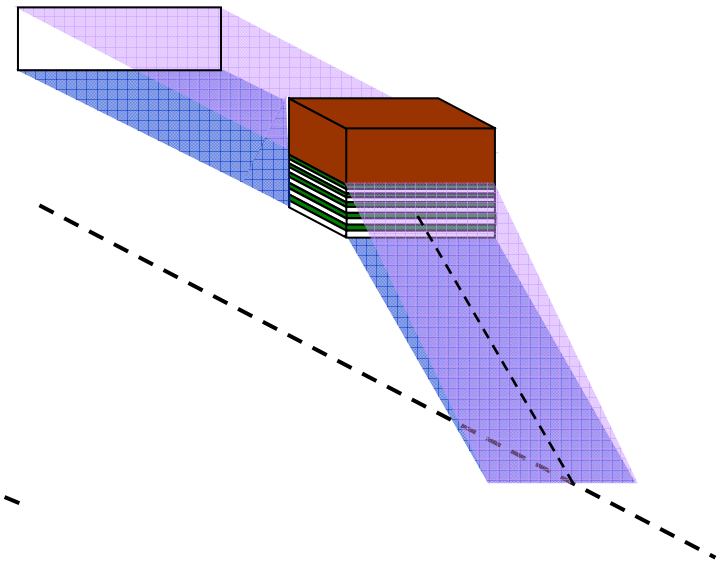
最小最外周ゾーン幅	35nm
最大直径	5mm
メンブレン材料	SiN、SiC
メンブレン厚さ	0.2~2 μ m
吸収体材料	Ta
吸収体厚さ	0.1~2 μ m
Si基板外形	10mm角
Si基板厚さ	1mm



金太郎飴FZPと1次元FZP



Sputtered-sliced FZP



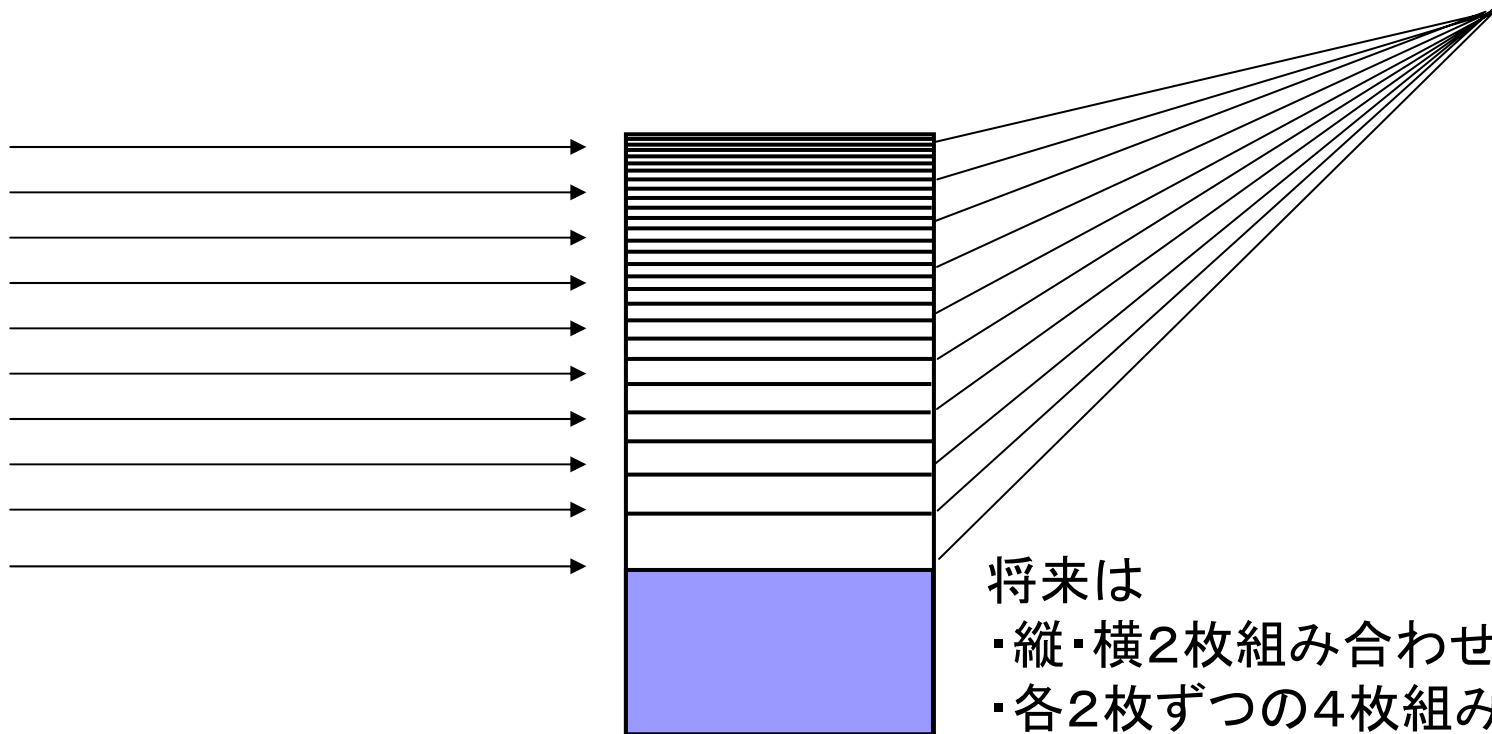
Multilayer FZP

1次元積層型FZP

多層膜では超薄層の厚み制御が可能



最外殻線幅を小さくできる

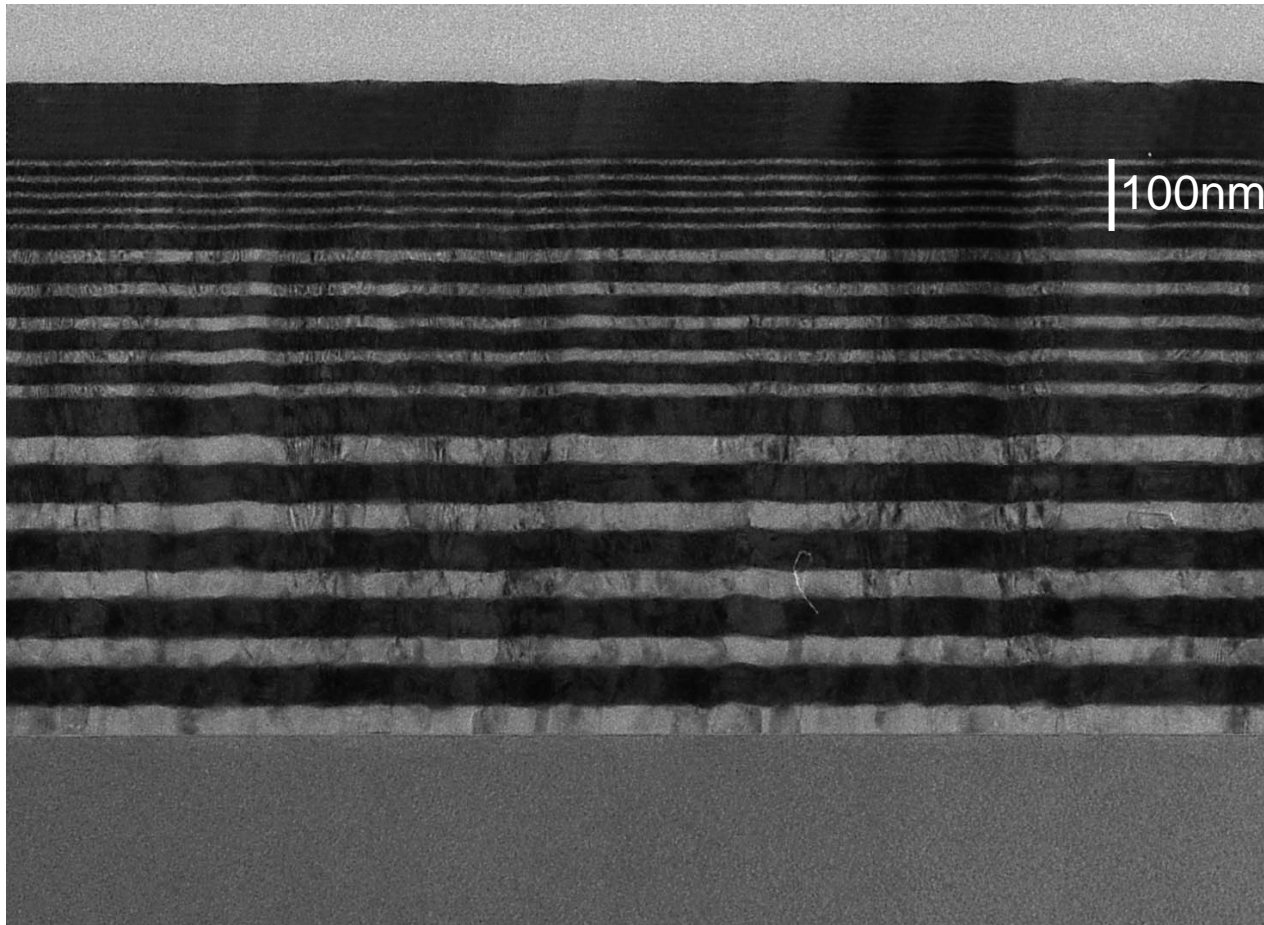


将来は

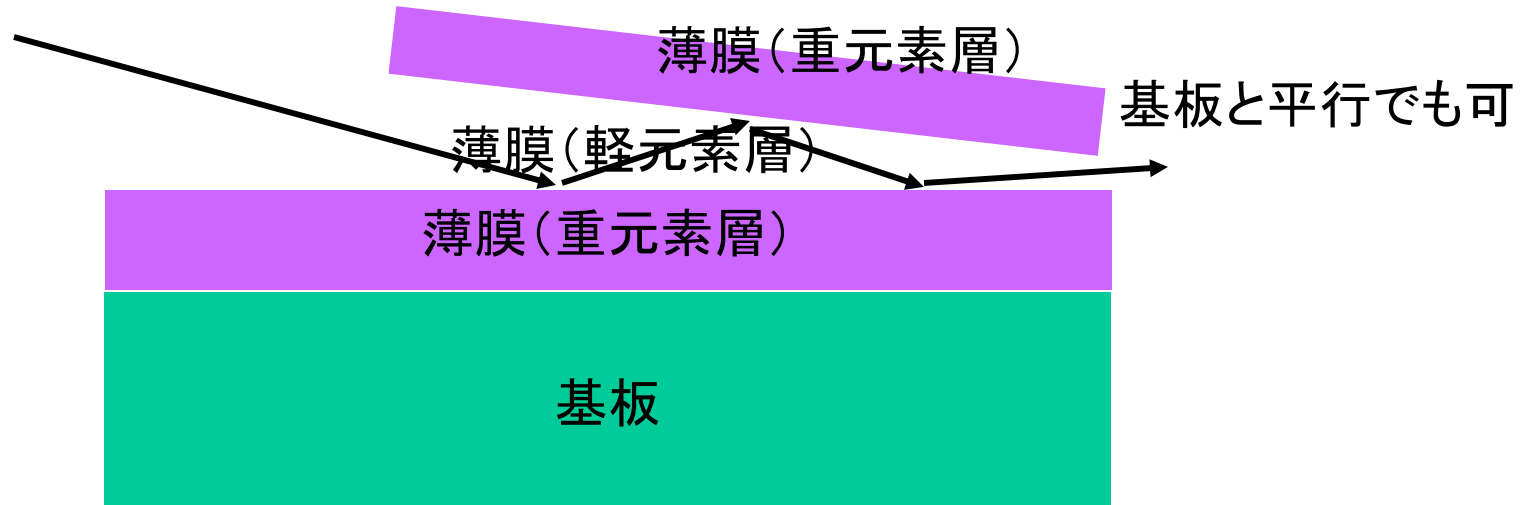
- ・縦・横2枚組み合わせ
- ・各2枚ずつの4枚組み合わせも

1次元FZP用テスト成膜

層厚制御の検討



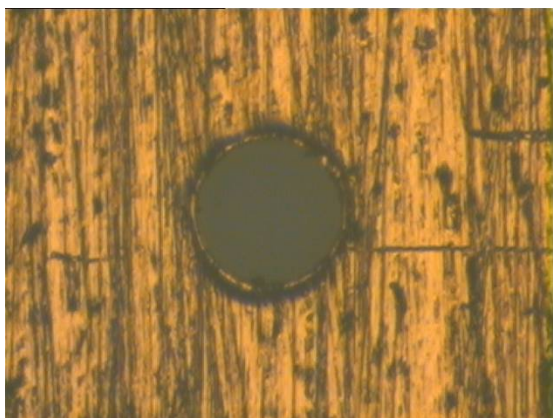
微細ビーム化案



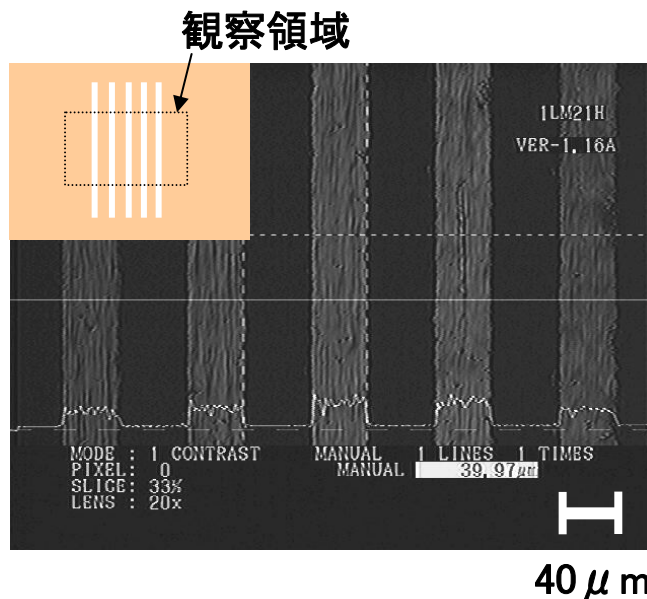
NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

その他の素子

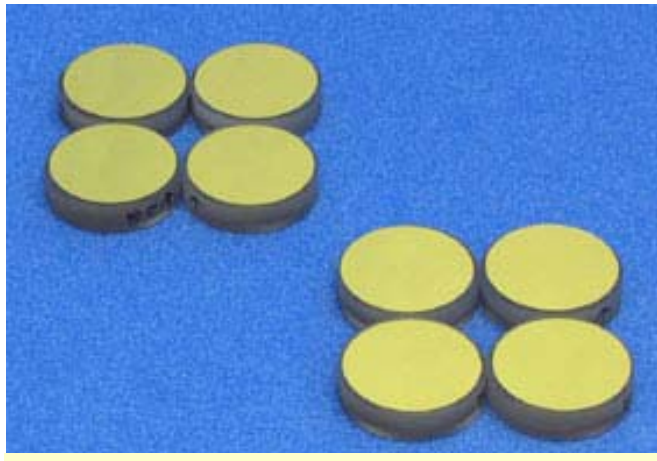


ピンホール(Ta)
100 μm 径, 500 μm 厚

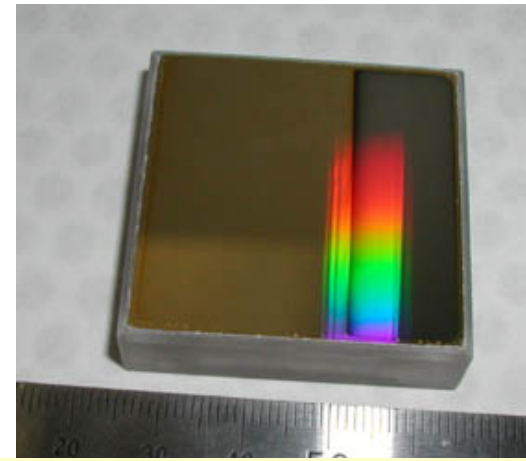


高エネルギーX線用分解能評価素子
Ta: 厚み30 μm
30 μm ピッチ(溝幅: 15 μm)
~100 μm ピッチ(溝幅: 50 μm)

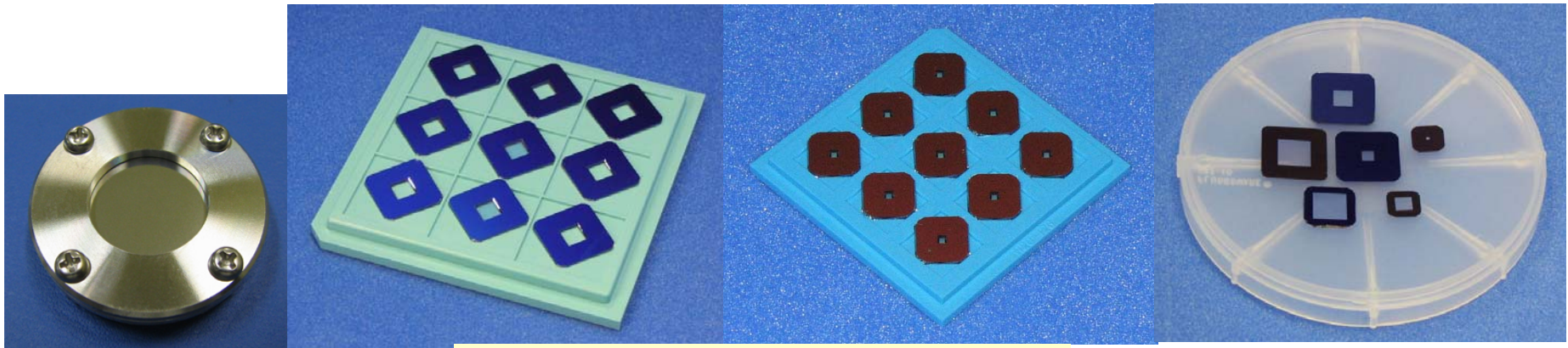
X線光学部品(回折格子 & フィルタ)



Auミラー

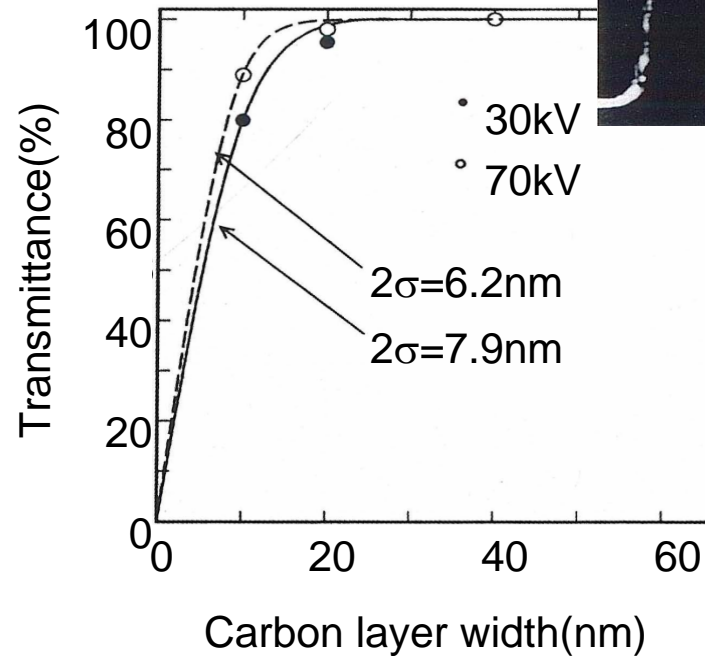
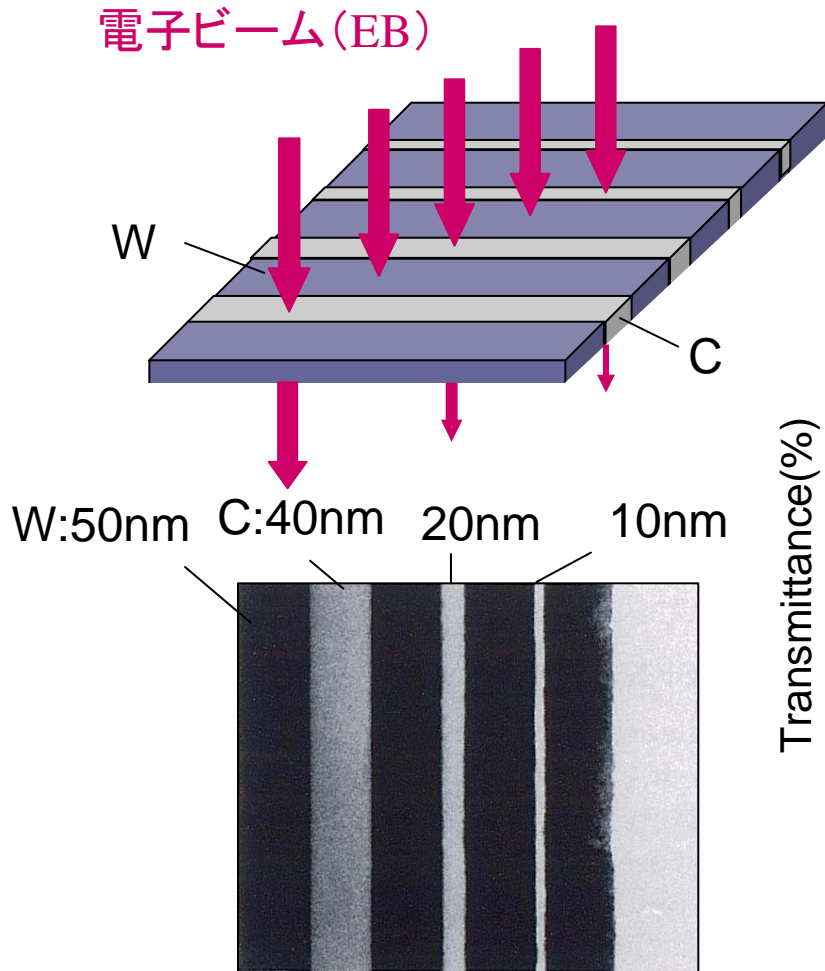


放射光用多層膜回折格子



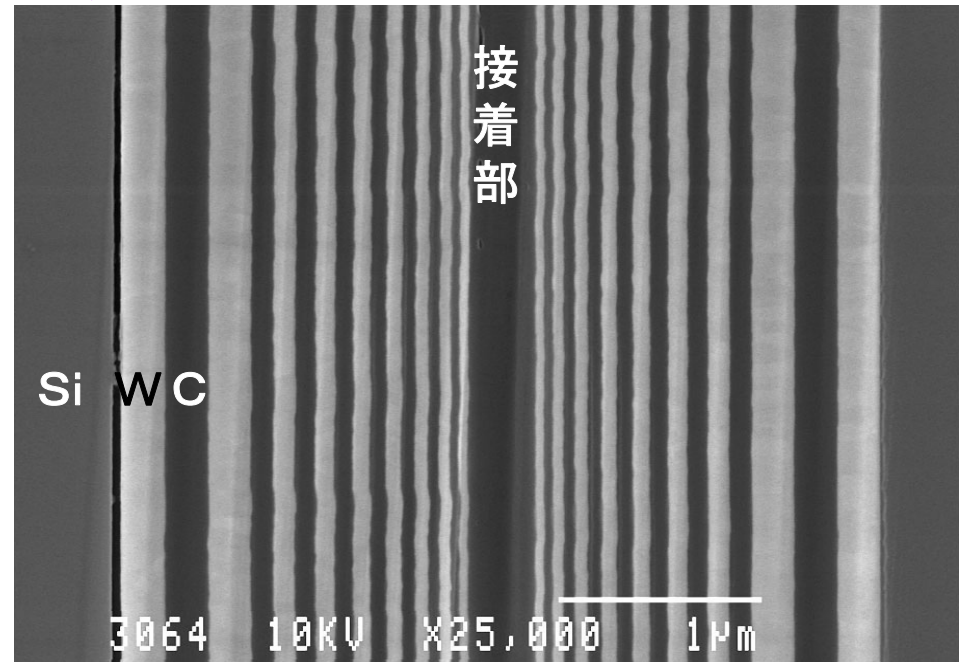
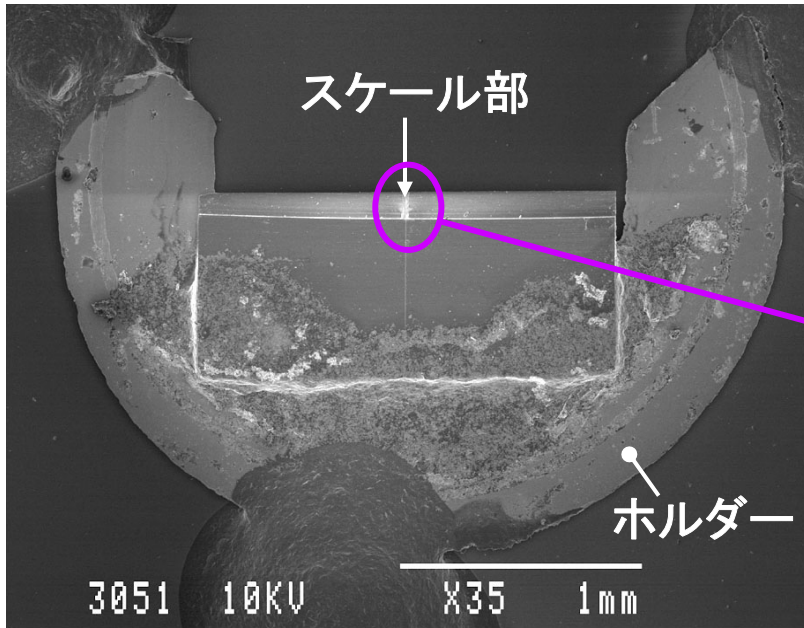
X線フィルタ

微細ビーム幅計測用スケール



K. Kurihara, K. Iwadate, H. Namatsu, M. Nagase, H. Takenaka and K. Murase,
Jpn. J. Appl. Phys., 34 (1995) 6940 43

ビーム径測定用スケール



NTT-ATにおけるX線集光素子開発

1. 私たちの場所, 仕事
2. 多層膜X線ミラー
3. X線集光素子
 - シュバルツシルト
 - KBミラー
 - FZP
4. その他のX線光学素子
5. 素子の応用

EUVリソグラフィ

Schematic layout of EUV Exposure System courtesy of EUVA

	2007	2010	2013	2016
DRAM 1/2 PITCH	65 nm	45 nm	32 nm	22 nm
193 nm 液浸	←→			
EUV リソグラフィ		←→		

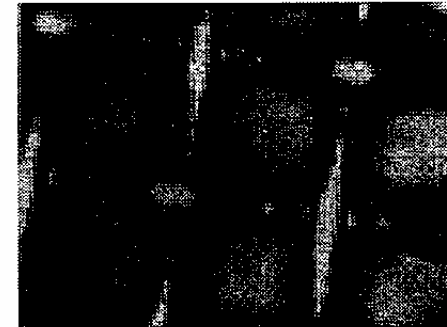
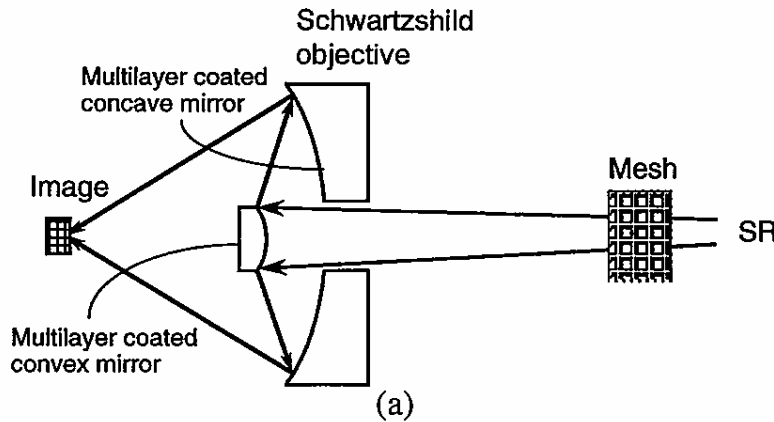
EUV露光装置構成 EUV Exposure System



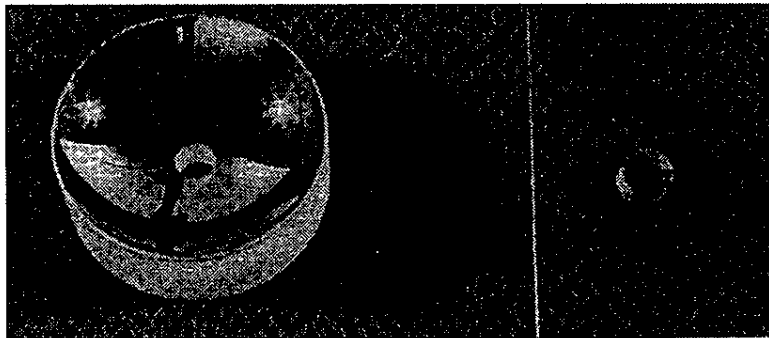
By ITRS: International Technology Roadmap of Semiconductor

History of NTT'S EUV Lithography

Prototype of EUVL@NTT (1985-1986)

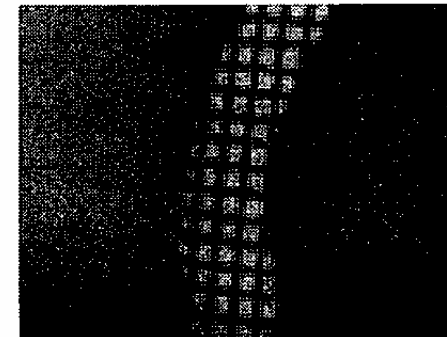


250μm
Mesh mask



40mm dia.
concave mirror

10mm dia.
convex mirror



Reduced pattern
magnification: 1/6.5

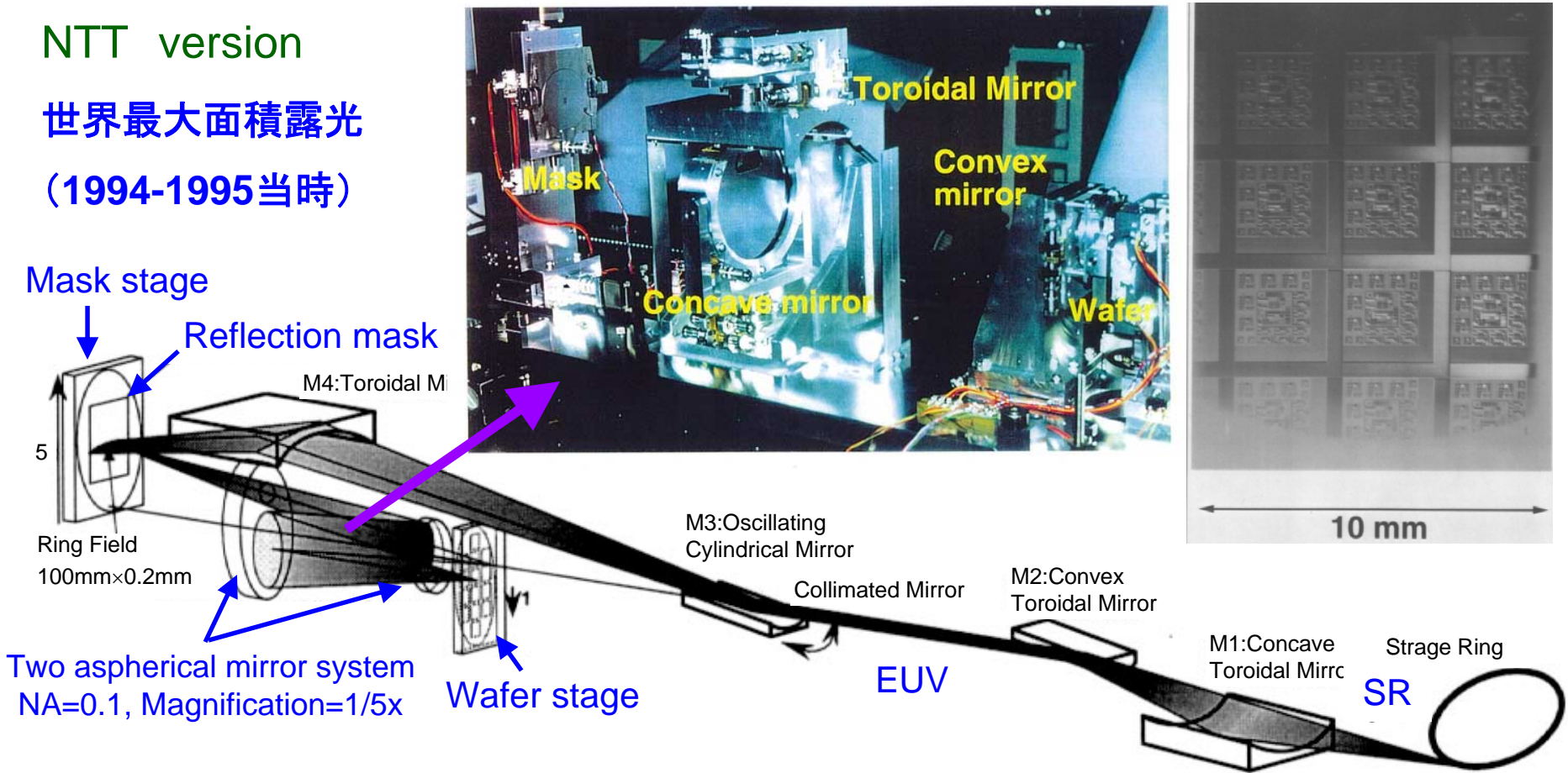
(c)

By Hiroo Kinoshita

EUV lithography 大面積露光

NTT version

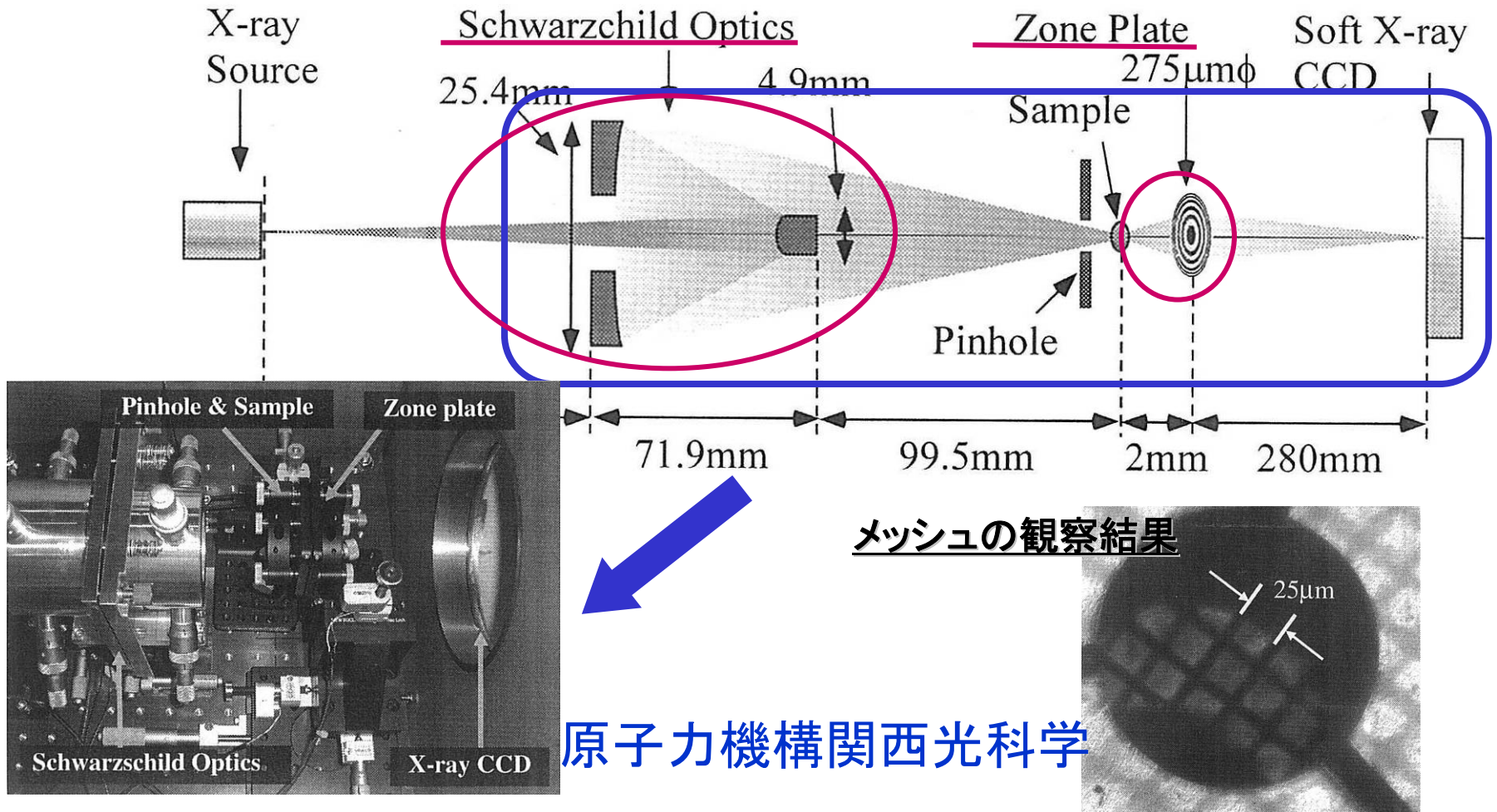
世界最大面積露光
(1994-1995当時)



H. Haga, M. C. K. Tinone, H. Takenaka and H. Kinoshita, *Microelectronic Engineering* 30, p.179, 1996

H. Takenaka, T. Haga, M. C. K. Tinone and H. Kinoshita, *Abstracts of Photon Technology Workshop*, 1-9, 1996

FZPとシュバルツシルトを組み合わせたX線顕微鏡



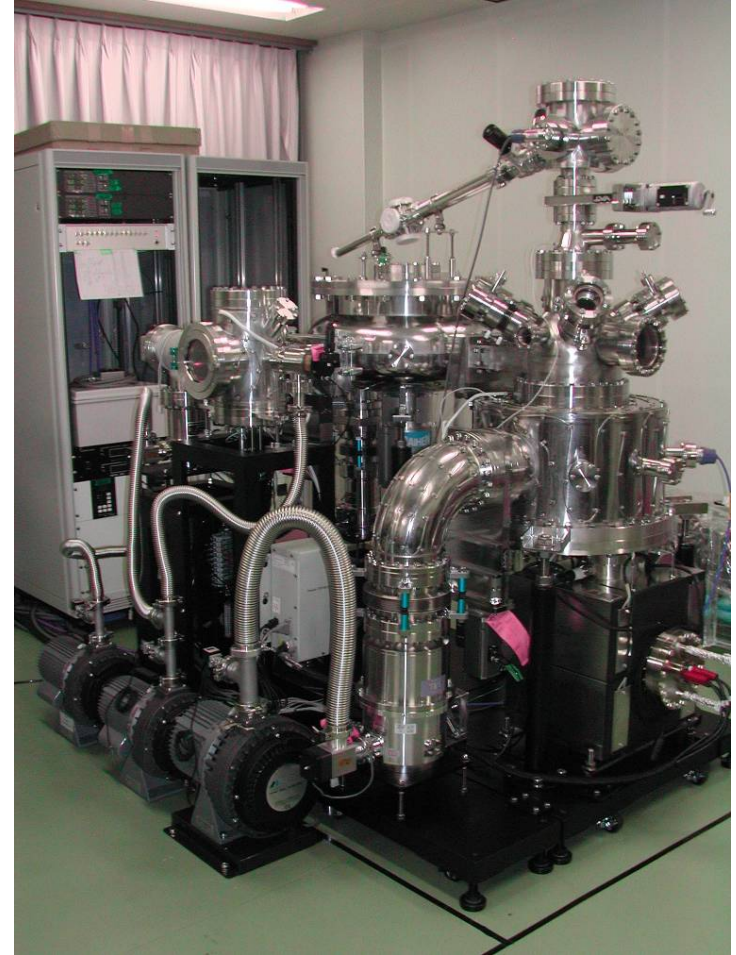
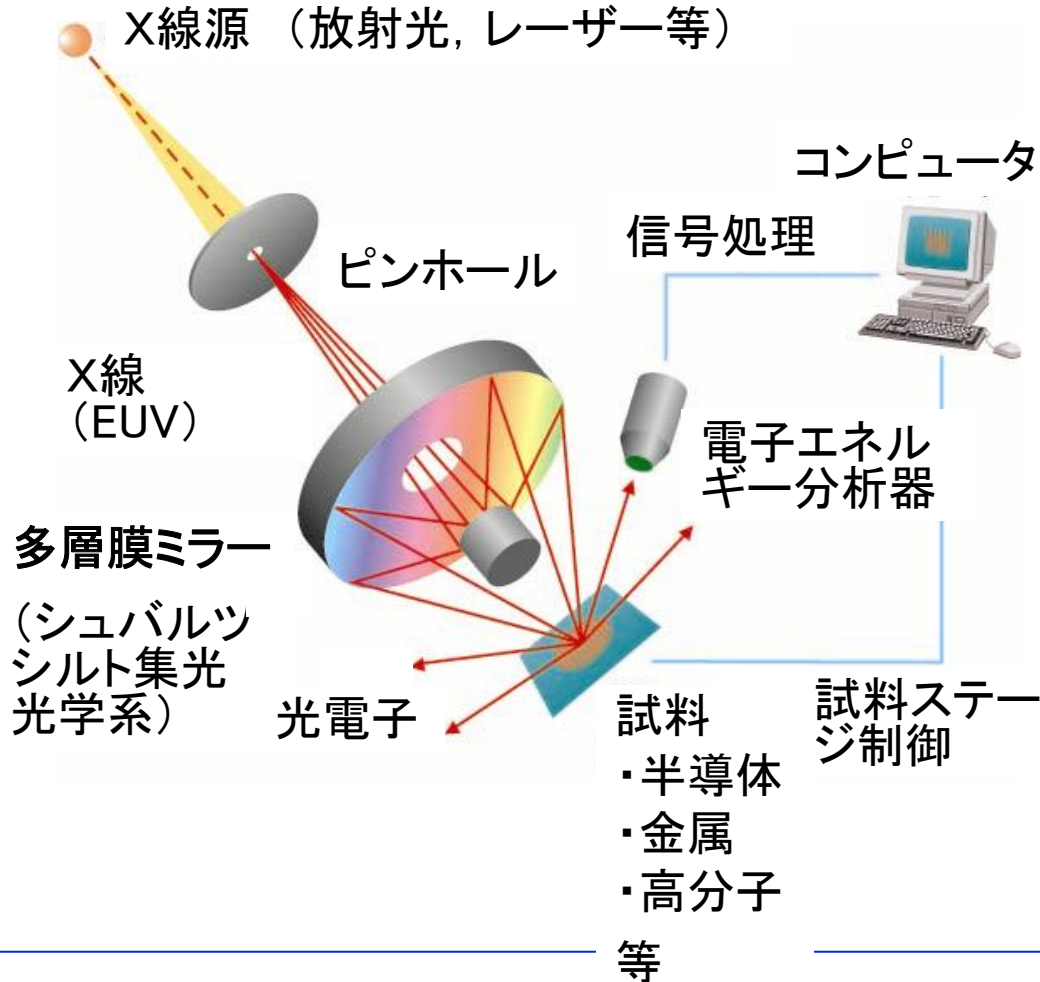
M.Kishimoto, M. Tanaka, R.Tai, K. Sukegawa, M. Kado, N. Hasegawa, H. Tang, T. Kawachi, P. Lu, K. Nagashima, H. Daido, Y. Kato, K. Nagai and H. Takenaka, J. Phys. IV France, 104(2003) p.141

49

顕微光電子分光装置

シュバルツシルト光学系の応用例

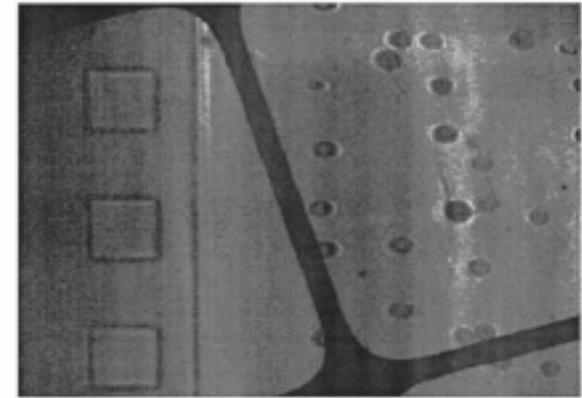
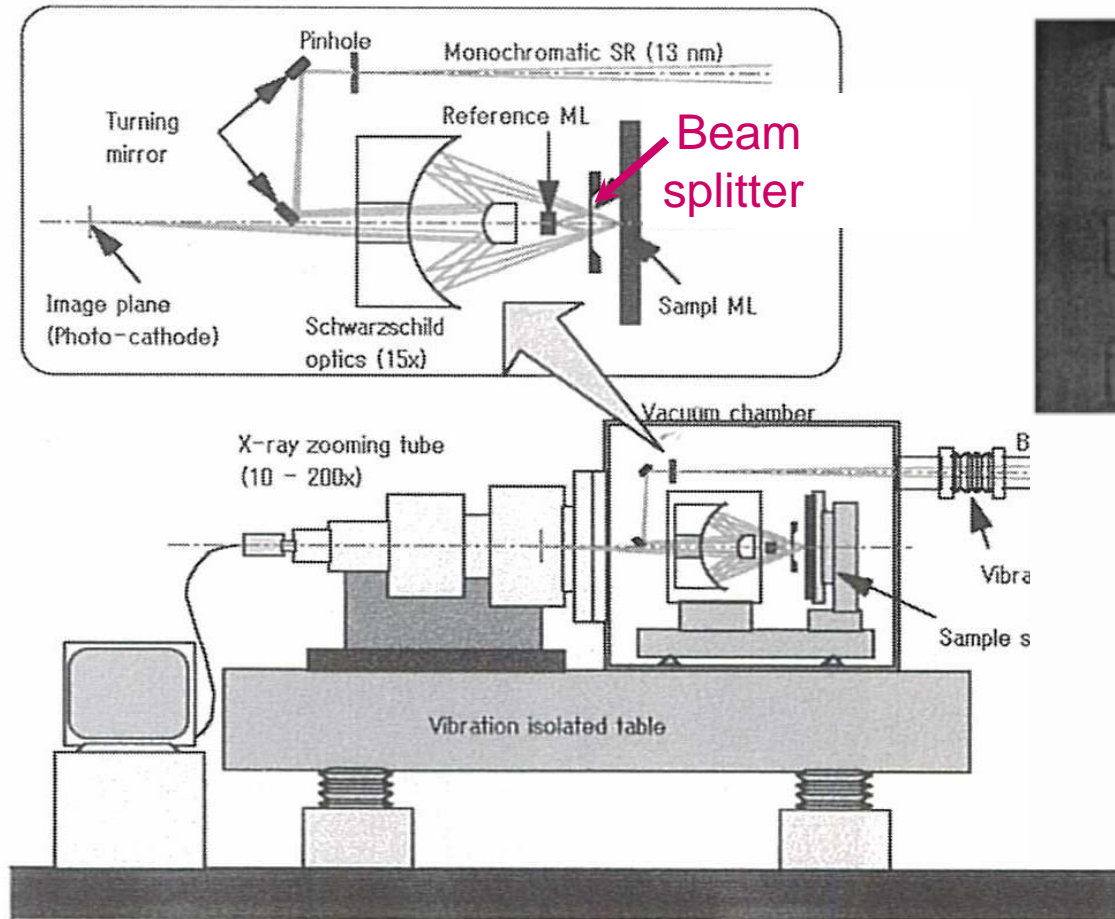
材料の表面分析



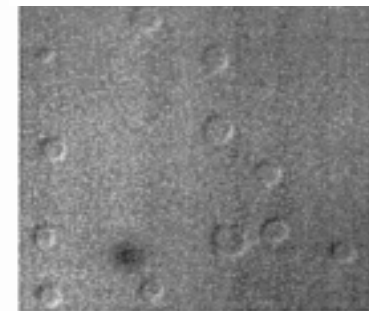
産総研 富江氏開発 50

EUVビームスプリッターの応用

ミロー型干渉計を用いたX線顕微鏡 → マスクの欠陥検査



EUV ミロー干渉顕微鏡
微像

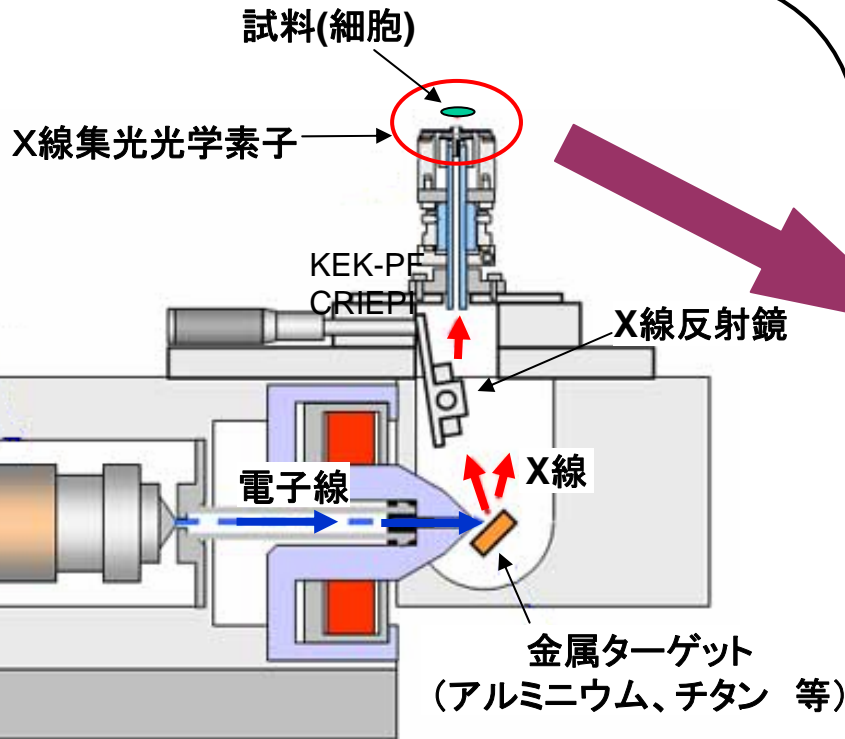


光学顕微鏡像

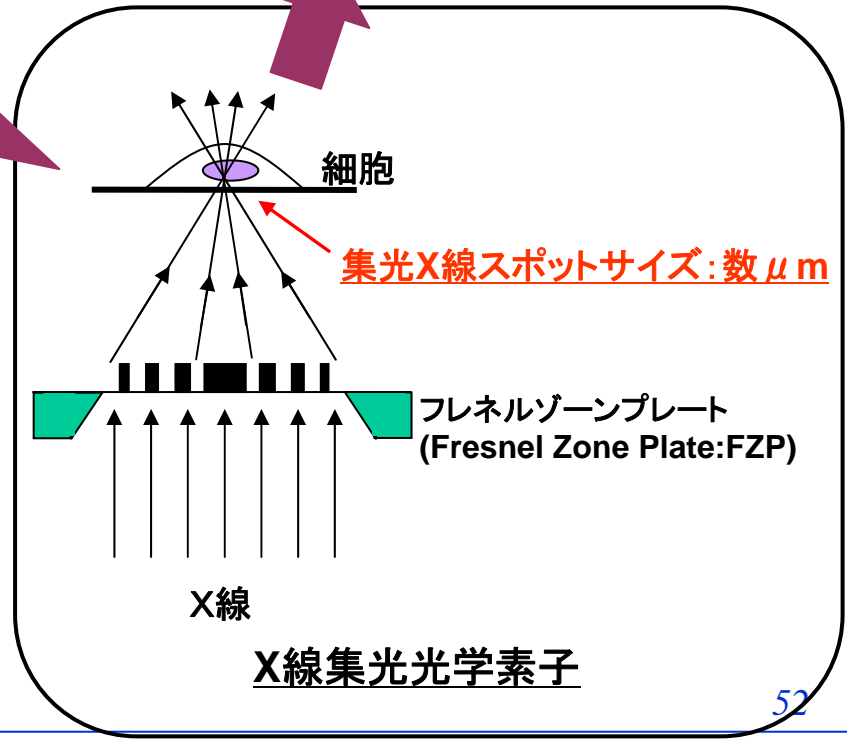
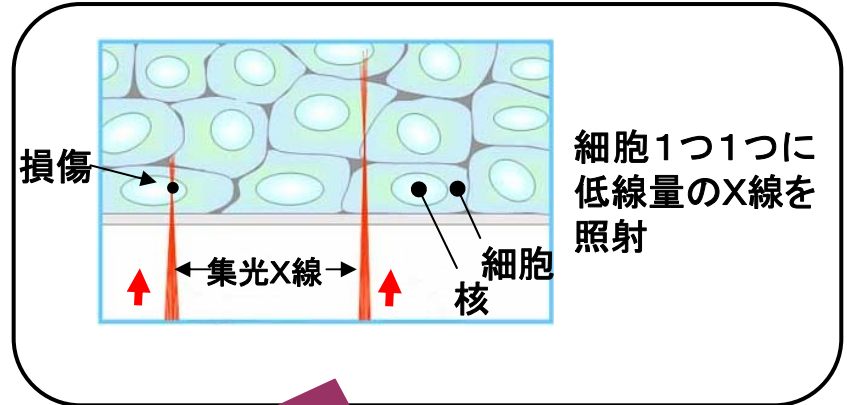
T.Haga, H. Takenaka and M. Fukuda, J.Vac. Sci. Technol. B 18(6), p.2916, 2000

低線量X線マイクロビーム細胞照射装置

With CRIEPI, KEK-PF



X線集光光学システム概略図
Gray Cancer Institute



おわりに

- ✚ NTT-AT社で開発している多層膜X線ミラー，X線集光素子等についてご紹介させていただきました。
- ✚ 微細X線を更に集光するには積層型のFZPが適しているのでは。
- ✚ 今後の素子開発，装置開発で皆様のご指導がいただければとてもありがたい。

遊びにきてください



偕楽園