

極紫外直入射用広帯域多層膜 と Schwarzschild光学系の開発

江島丈雄
東北大学 多元物質科学研究所

共同研究者
近藤祐治、高塚洋文、須藤健太、
石野雅彦、相川直志、豊田光紀、
山本正樹、渡邊 誠

02/03/06

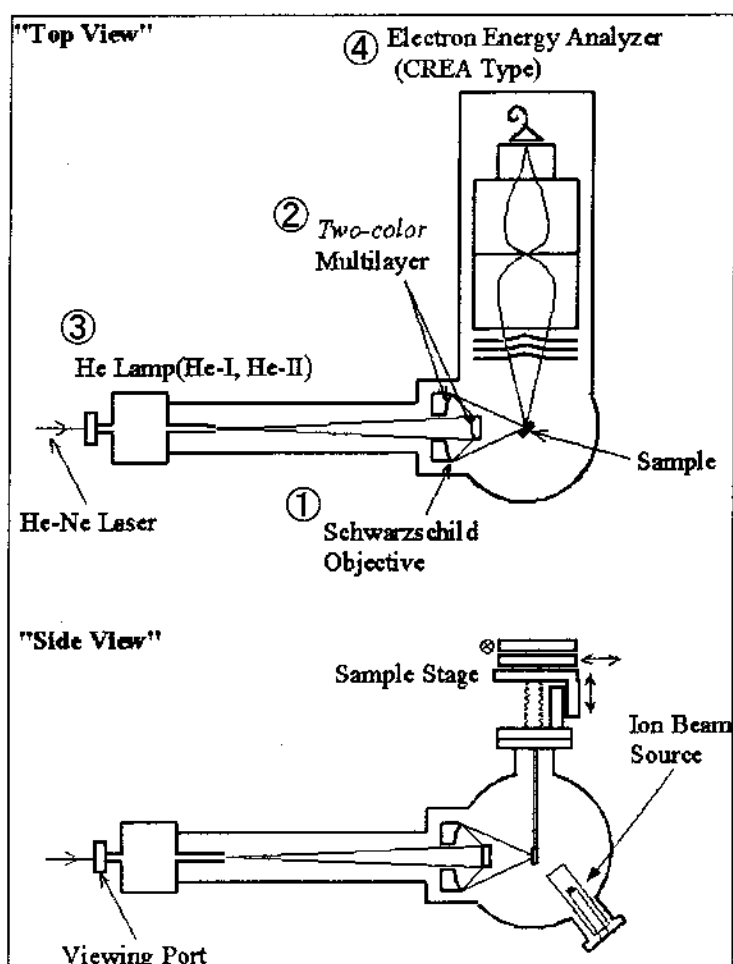
UVSORワークショップ ビームライン高度化

1

顕微光電子分光装置の構成

構成

- ① Schwarzschild 光学系
縮小率 1/68
- ② SiC(89Å)-Mg(102Å)/SiC(60Å)
多層膜
He-I, He-II共鳴線を同時に反射
- ③ He 放電管
差圧排気系装備
- ④ 光電子分光器
CREA type



顕微光電子分光装置の概念図

Schwarzschild 光学系の開発手順

- 1 倍率M及び物点から焦点までの距離 Z_0+Z_i の決定。
この2つが決まると同心球型のSchwarzschild光学系の3次の球面収差を打ち消す条件から、曲率半径比 R_1/R_2 が求まる。
- 2 経験的に $NA=0.2\sim 0.25$ の範囲が結像性能がよい。
- 3 1、2からミラーの設計パラメータが求まる。
- 4 球面作製。
- 5 曲率測定後、曲率に合わせてミラーの再設計。
この際、非同心的Schwarzschild光学系に設計変更。
- 6 組み立て。

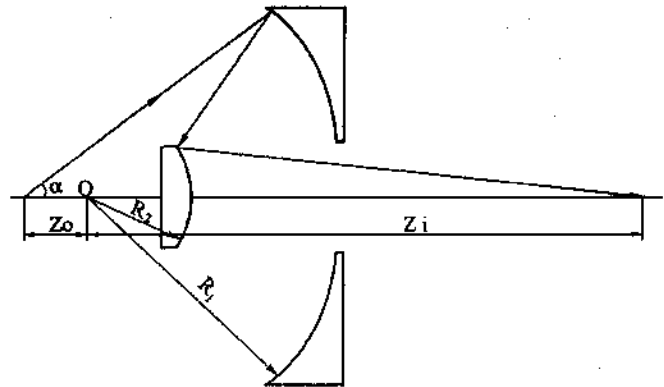


Fig. 1 The SO.

02/03/06

UVSORワークショップ ビームライン高度化

3

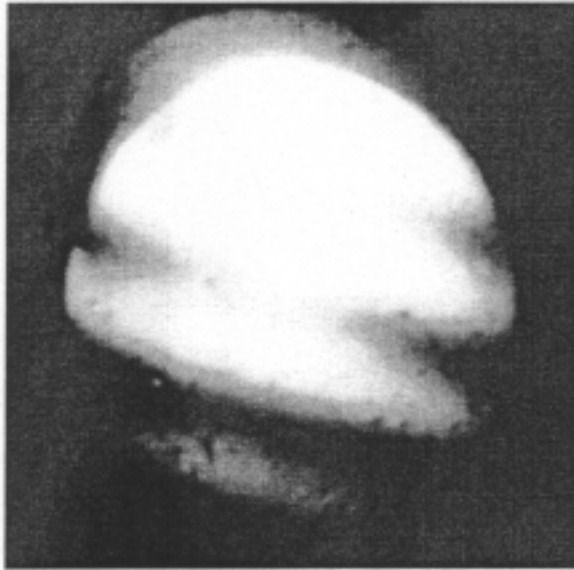
Schwarzschild 光学系の性能を決める要因

- 1 球面の形状精度。 → $\lambda/8\sim \lambda/10$ 。 λ は使用波長が望ましいが、現在He-Ne波長(632.8nm)。
- 2 表面の粗さ。 → Debye-Waller 係数から考えると、使用波長の2~3%程度の粗さ。真空紫外域の光ならほぼ満足する。
- 3 組立精度。 → 面間距離は多少粗くてもいいが、offsetは欲しい空間分解幅の10倍程度の値で合わせる必要あり。
- 4 反射膜。 → 欲しい波長域に合わせて設計する。単波長で良いなら20~200eVの間で反射可能。帯域を広げるのはテクニックが必要。

02/03/06

4

球面の形状精度



凸面鏡: $\lambda/8$



凹面鏡: $\lambda/10$

→ このときの形状誤差が集光性能に与える影響をレイトレーサで評価すると、17nm→92nm

5

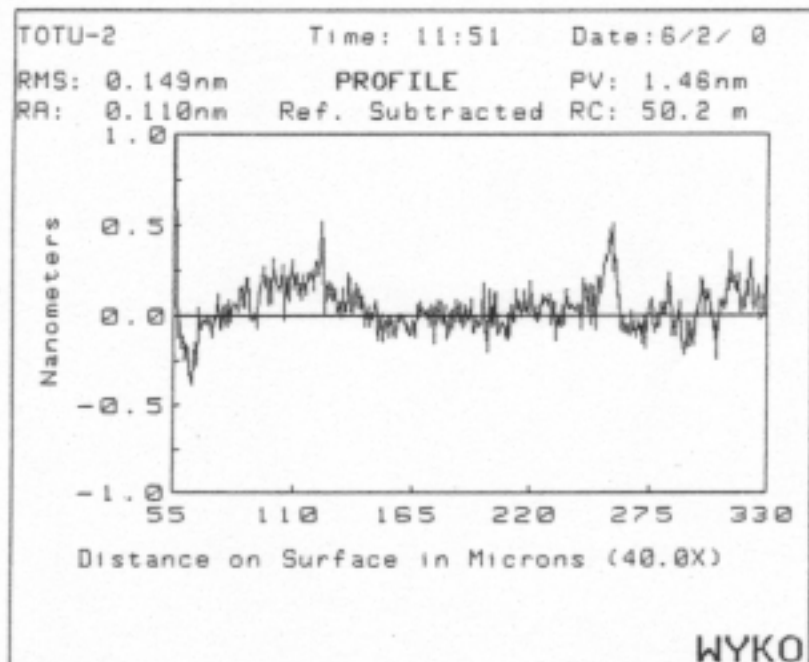
表面粗さ

石英基板を研磨。

RMS: 1.5Å程度

He-II(304Å)に対して十分に低い。

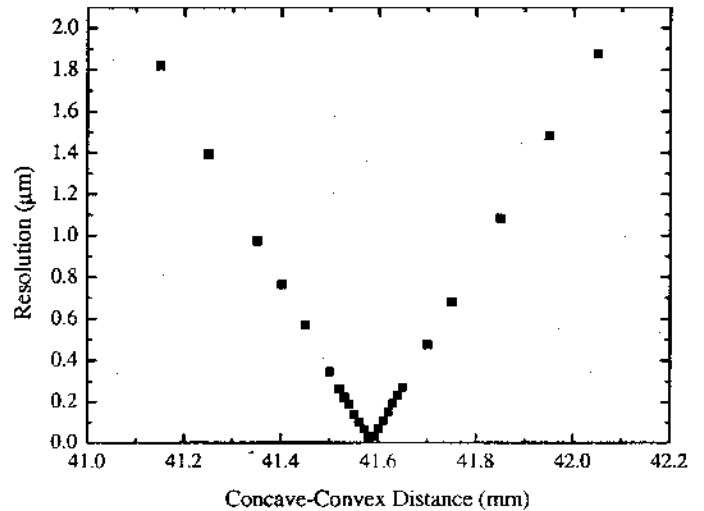
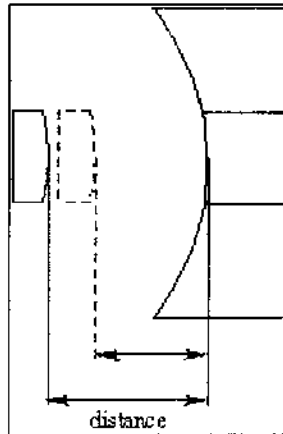
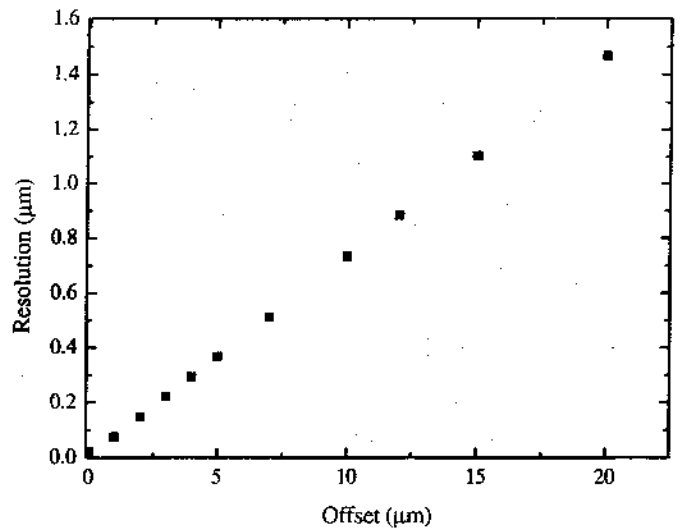
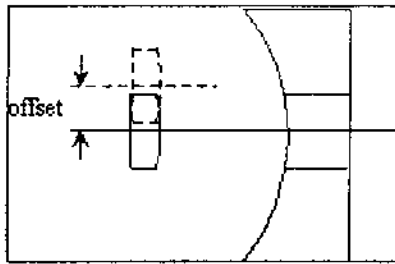
→ 0.5%程度。



→ 素材と研磨材を十分に吟味すれば、粗さはほとんど問題にならない。

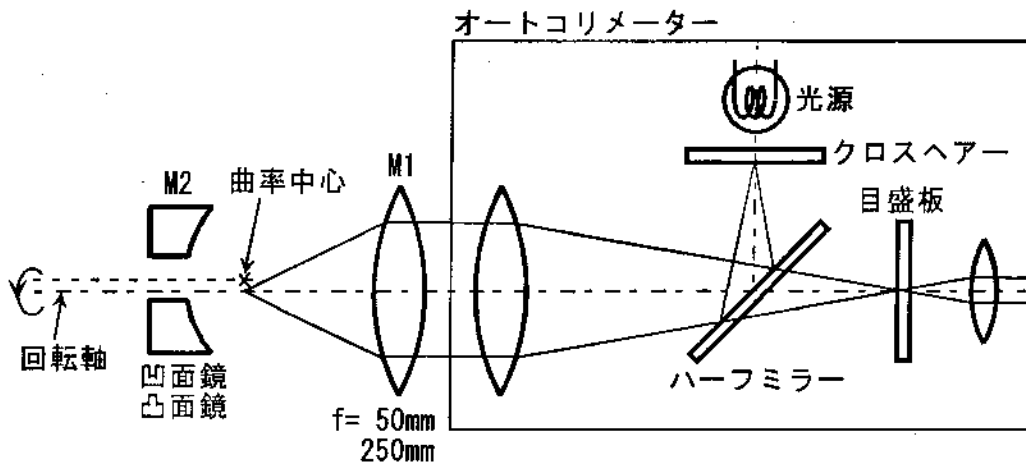
組立精度

→ レイトレースによる計算



02/03/06

• オートコリメータを用いてoffsetを調整。



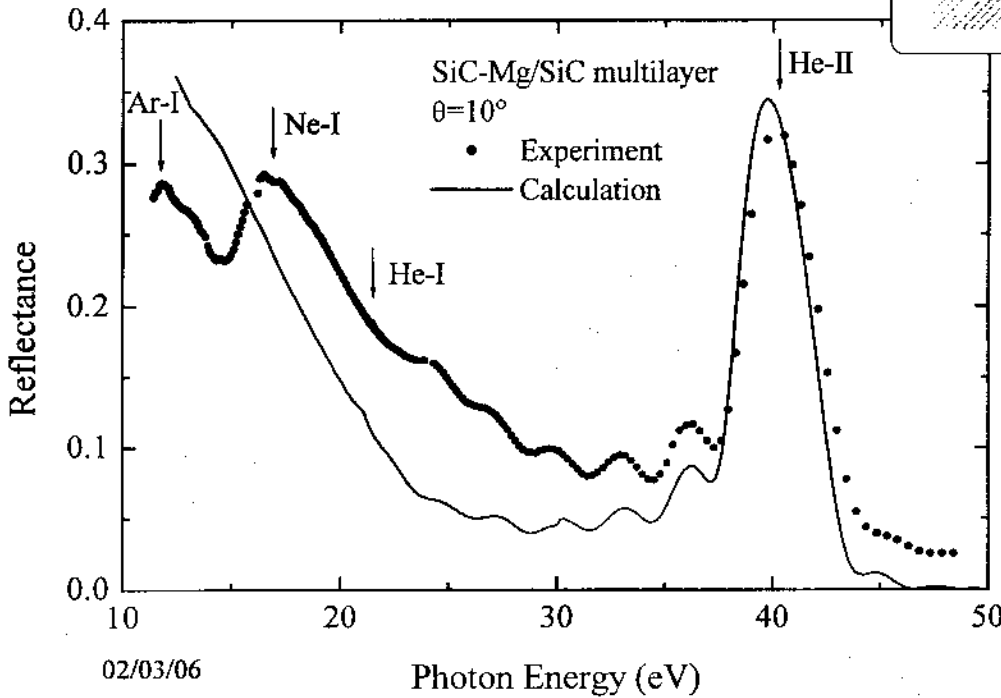
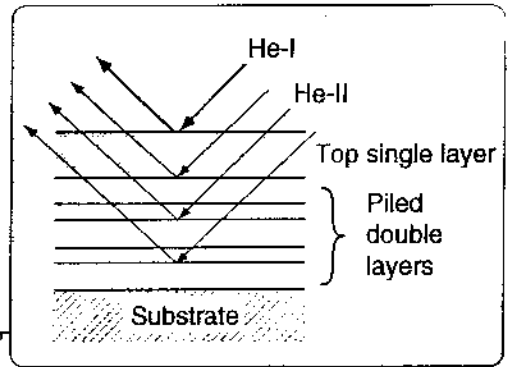
→ offset調整は5 μ mの精度。

• 面間距離はスペーサの製作精度で調整。

→ 10 μ mの精度

可視光による結像性能評価: ナイフエッジによる測定 = 約5 μ m

SiC (89Å)–Mg(102Å)/SiC(60Å)多層膜の 反射率の測定結果と計算結果の比較



→ 広帯域多層膜の
開発によって共鳴線
すべてを反射するこ
とが可能になった。

02/03/06

Photon Energy (eV)

9

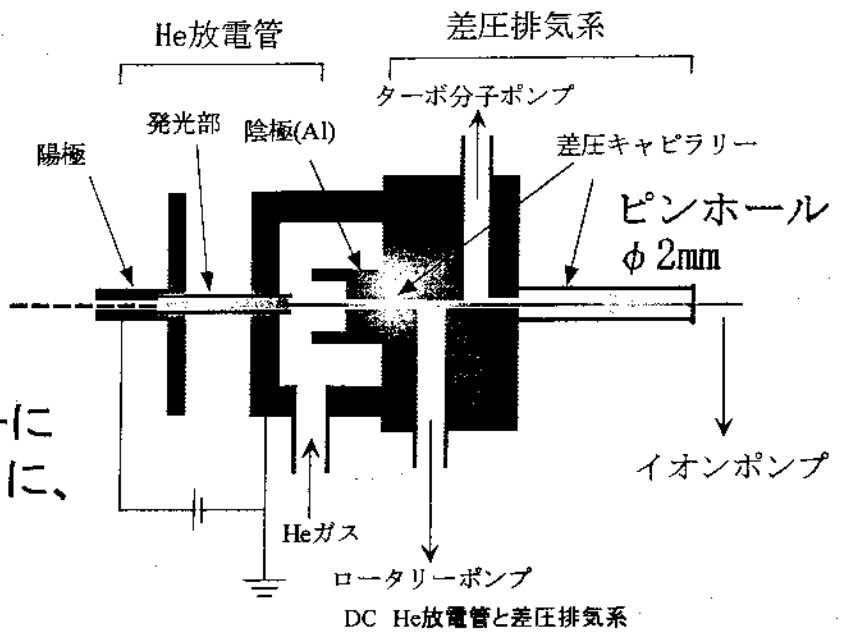
He放電管

光軸の調製を行うために、
陽極後部からHe-Ne
レーザー光が通るように、
放電管を作製。

基準となる光軸をレーザーに
よって決めた後、その軸上に、

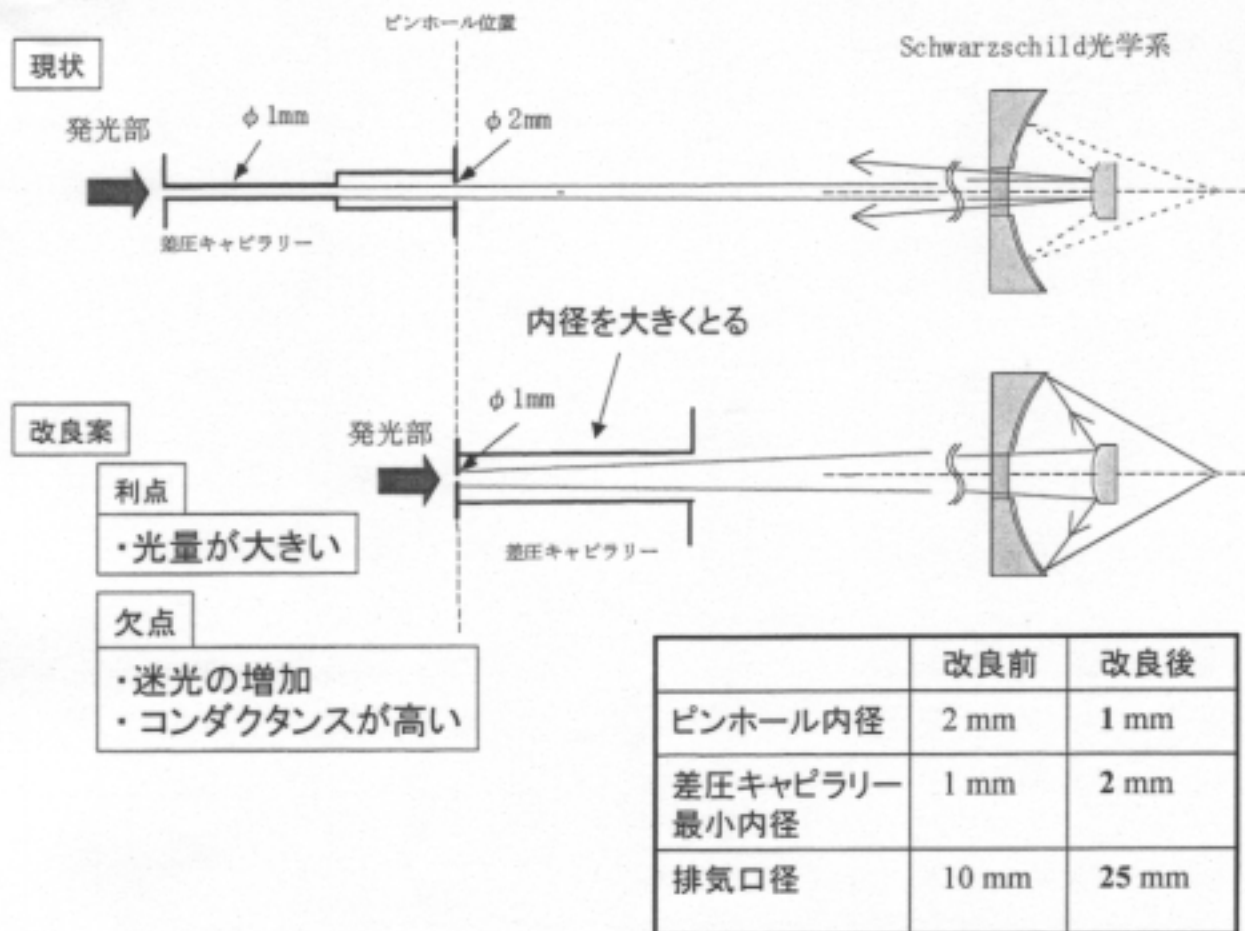
- 1 Schwarzschild 鏡
- 2 試料位置
- 3 光電子アナライザー
- 4 光源

の順で合わせた。



・He放電管
He-I, He-II共鳴線を発光。可視発光は
弱いため、これで光軸調整は行えない。

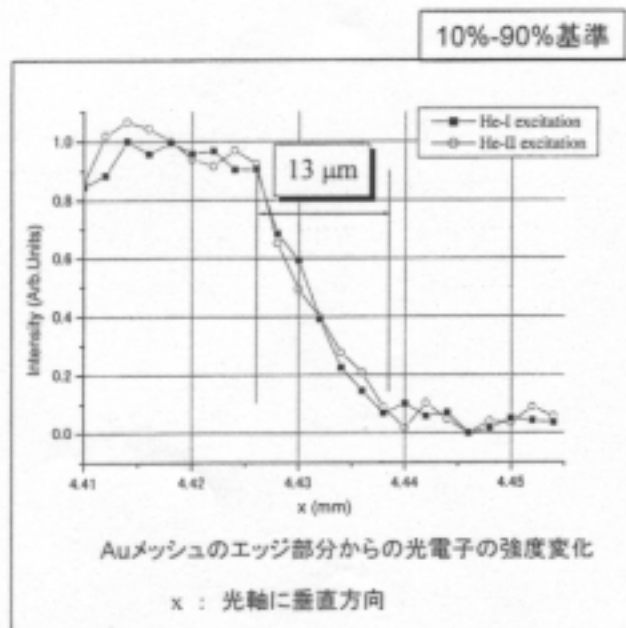
差圧排気系の設計



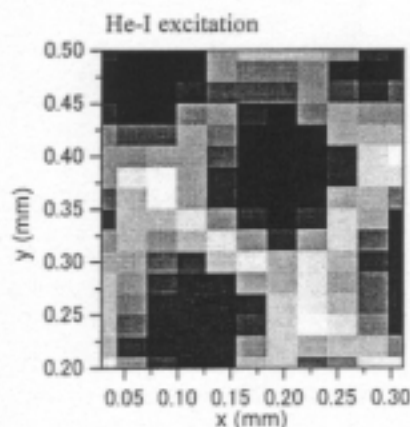
11

空間分解幅の評価

ナイフエッジ測定により空間分解幅測定



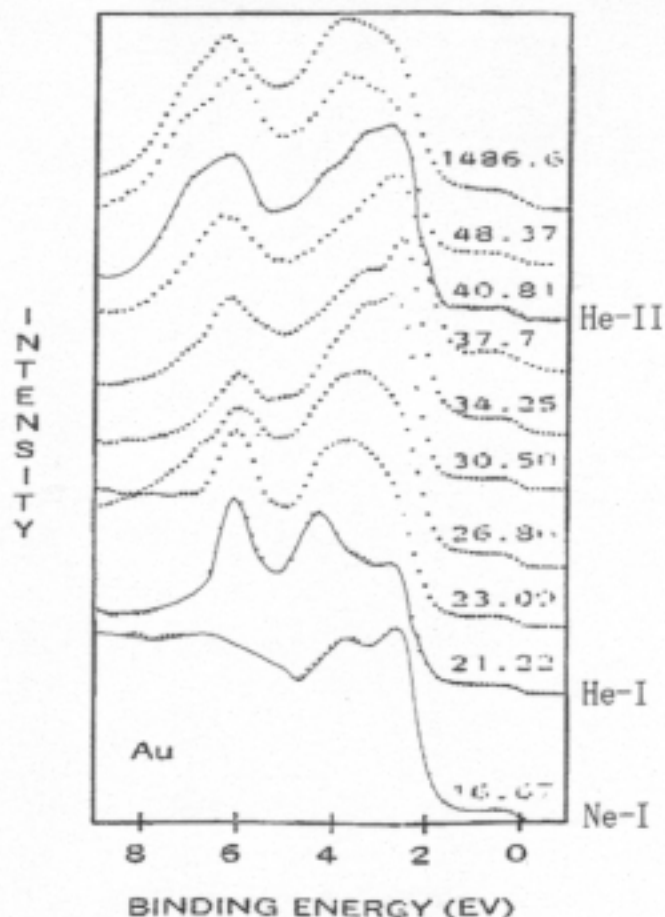
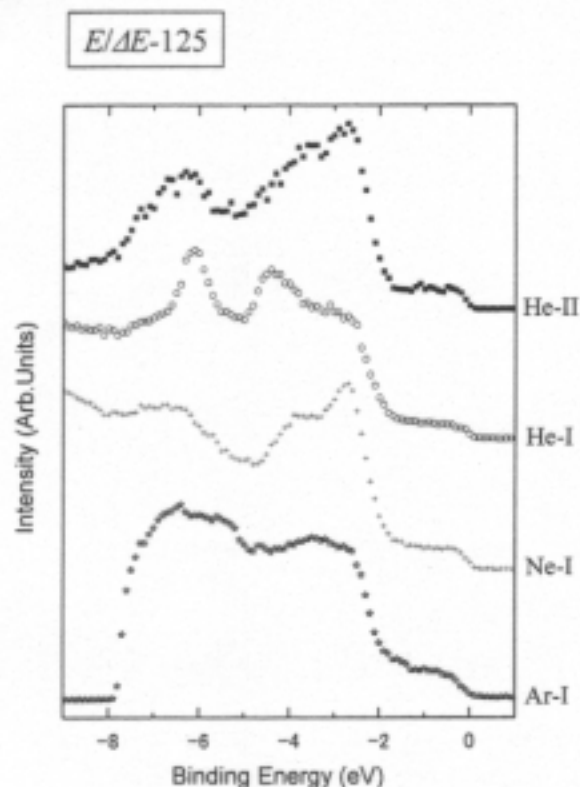
	改良前	改良後
空間分解幅	26 μm	13 μm
光電子強度 (He-I励起 Au5dのピーク)	30 cps	40 cps
測定チェン バー真空度	$\sim 10^{-6}$ Pa	$\sim 10^{-6}$ Pa



明るく且つ高空間分解幅化を実現

12

Auの測定



02/03/06

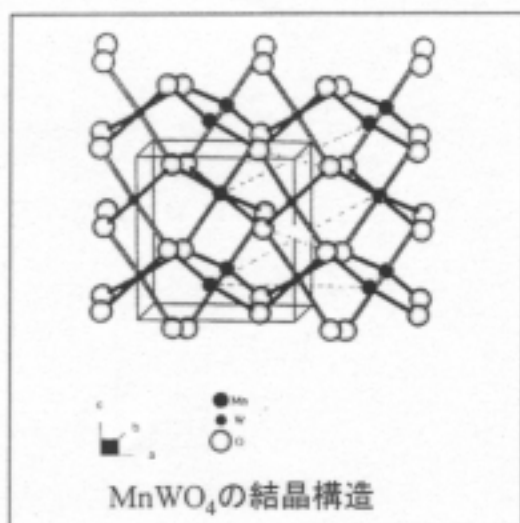
UVSORワークショップ ビームライン高度化

13

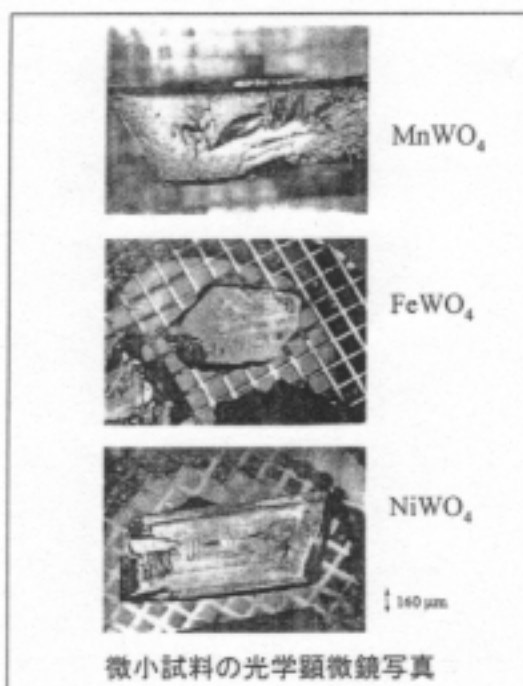
測定例

微小試料 MWO_4 (M = Mn, Fe, Ni)

(大阪工業技術研究所 松原氏により提供)



ウォルフラマイト構造
単斜晶系
空間群 P2/c



応用例

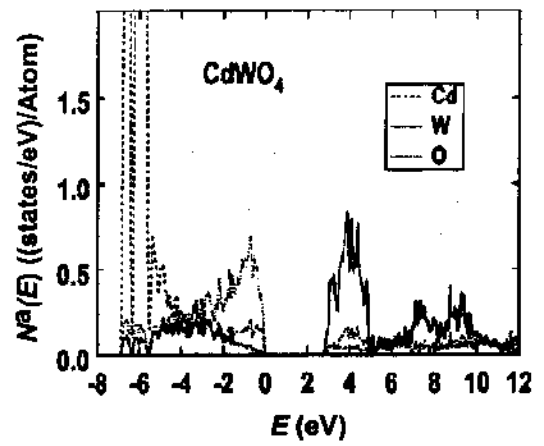
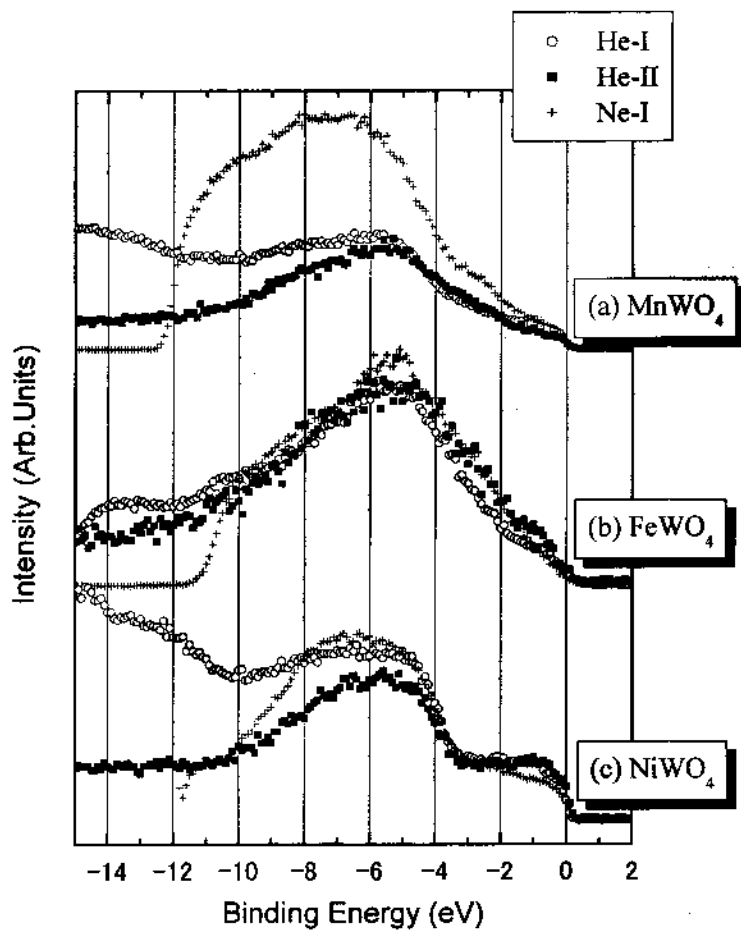
NiWO₄ → 触媒や湿度センサー
FeWO₄ → 光触媒

02/03/06

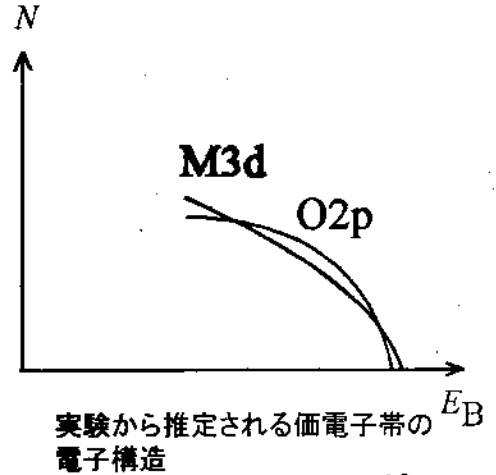
14

測定結果

He-I, He-II, Ne-Iによる励起
Au価電子帯スペクトルによって規格化。



CdWO_4 の部分状態密度の計算結果

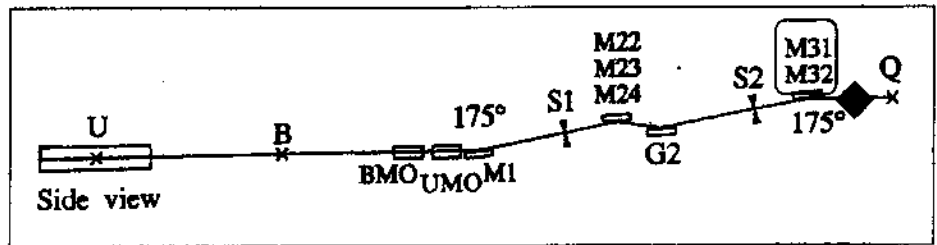


15

ここまでのまとめ

- 1 Schwarzschild 鏡を用いた Micro-UPS によって微小試料の UPS 測定が可能になった。
 - Schwarzschild 鏡の開発。
 - 稀ガス共鳴線をすべて反射する広帯域多層膜の開発
- 2 現状では、Opticsの性能を決めているのは球面の曲率半径の測定精度とoffsetの組立精度。
 - 可視光によるナイフエッジの結果 = $5 \mu\text{m}$
- 3 全体の性能を決めているのは、光源の強度。
 - ↔ 光源強度が弱いため、入射ピンホールの径を大きくせざるをえない。
 - He-IIによるナイフエッジの結果 = $13 \mu\text{m}$

BL5Aへの応用



・プラナーモードを
仮定
・ビームラインパラメ
ータは高橋(和)さん
による。

配置 M3-ピンホール間距離: 500mm
ピンホール-焦点間距離: 1000.8034mm

○後置鏡M3 + Schwarzschild鏡を設計

○後置鏡M3 (トロイダル鏡)

$R_V=36.4\text{mm}$, $R_H=15871.6\text{mm}$

Length \times Width = 280 \times 30mm

○Schwarzschild鏡(同心球型) $\times 100$ 倍

$R1=32.6538\text{mm}$, $R2=12.2497\text{mm}$

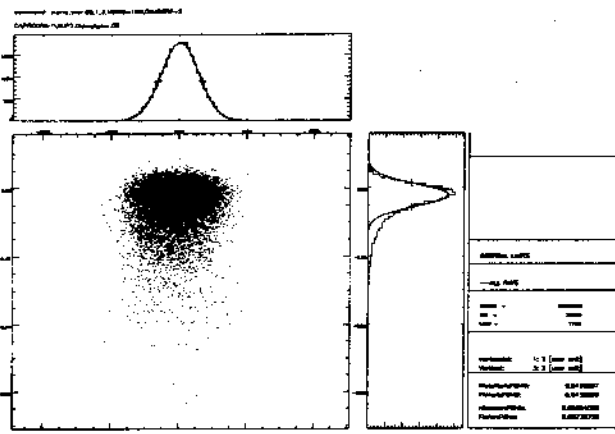
Work Distance = 9.9mm

02/03/06

UVSORワークショップ ビームライン高度化

17

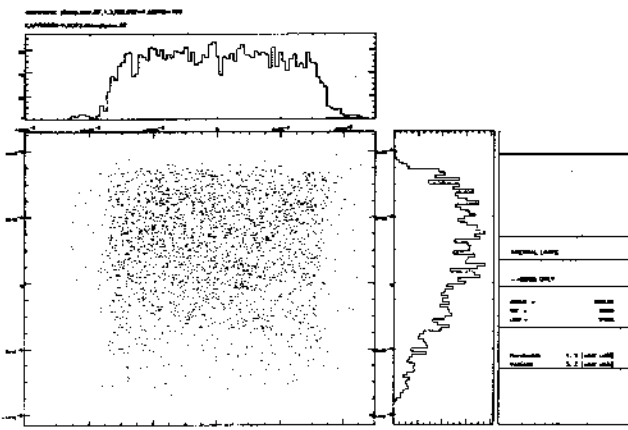
レイトレースの結果



←M3の焦点位置(ピンホール位置)での像。

FWHM = 0.13 \times 0.07mm

ピンホールとして、
0.07 \times 0.07mmの
正方形スリットを配置。
ピンホールにより光線の
72.9%がロストする。



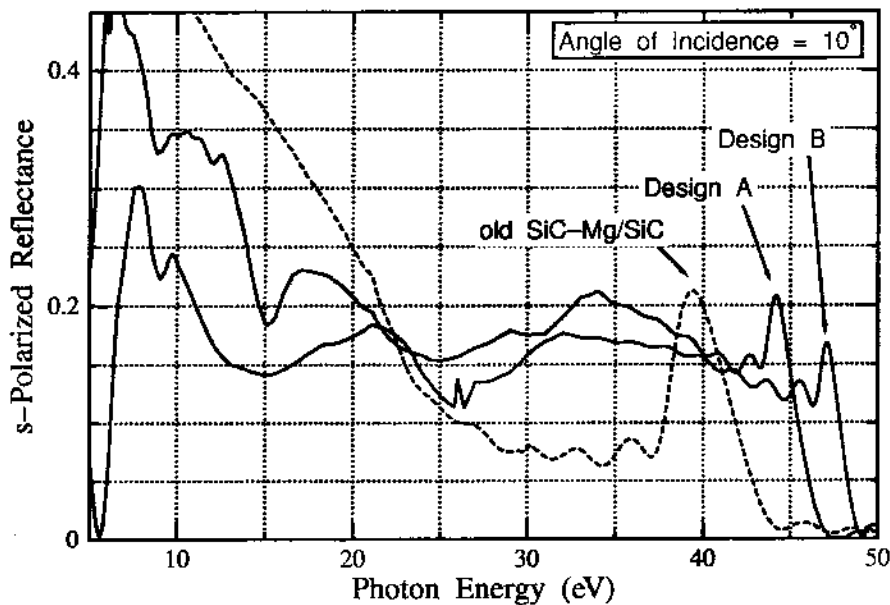
←焦点での像

ミラーの反射率を1としたときの
出射スリットS2からのスルーput
は約13.3%

18

多層膜設計

Undulator の一次に合わせて、反射領域がブロードになるように設計。→ 平均17%程度の反射率。



Design A = SiC 4.0nm/Au 5.5nm/Mg 13.0nm/Au 3.2nm/(Mg8.6nm/SiC 4.7nm)*20

Design B = SiC 6.0nm/Y₂O₃ 6.0nm/Mg 12.9nm/Y₂O₃ 3.3nm/(Mg 9.2nm/SiC 5.1nm)*20

全体のスループット

$$\rightarrow 0.133 \times 0.17 \times 0.17 = 0.00384 \text{ (0.38\%)} \quad (\text{S2スリットからの}\odot)$$

ブロードな反射率を狙わずに、単波長で良いなら40eVで0.4程度の反射率が得られるので、スループットとしては、

$$\rightarrow 0.133 \times 0.4 \times 0.4 = 0.0213 \text{ (2.1\%)}$$

程度にまで上がる。