

UVSORにおける斜入射分光器

石黒 英治* , 渡辺 誠**

*大阪市立大学工学部

**分子科学研究所

Grazing Incidence Monochromators
at the UVSOR Facility

Eiji ISHIGURO

Department of Applied Physics,

Osaka City University

Makoto WATANABE

Institute for Molecular Science

Six grazing incidence monochromators are currently being installed on beam lines of UVSOR. They are a Rowland circle monochromator, a constant deviation monochromator with spherical gratings, two types of plane grating monochromators and a grasshopper monochromator. Except the last one, they were designed by the UVSOR facility. The present report describes the principle and characteristics of the UVSOR-designed monochromators.

1. はじめに

分子科学研究所のUVSORではX線領域の結晶分光器と赤外領域の干渉計を別にすれば、現在11台の回折格子分光器が各ビームラインに設置されている。この内5台は直入射型分光器と瀬谷波岡型分光器で、30nmより長波長域のいわゆる直入射領域での分光に使用されている。それ以外が斜入射領域の分光器である。

SOR用斜入射分光器は回折格子の種類によって、1)球面回折格子を用いるもの、2)平面回折格

子を用いるもの、3)非球面ホログラフィック回折格子や非等間隔刻線回折格子を用いるもの、に分けることができる。これらの特徴は一般的に言えば次のようである。球面回折格子分光器はローランド円の条件が満たされていればコマ収差が無くなるため最も高い分解能を与える。分光器自体としては反射面は回折格子のみであるが、入射光線方向を固定するための前置鏡システムを考えると複数の反射面が必要である。一方、平面回折格子分光器(PGM)は通常入口スリットがなく発光点

を入口スリットとみなすため分解能は光源サイズに依存する。従って、電子ビームのエミッタンスが小さい場合には比較的高い分解能で強い単色光が得られる。鏡の移動や交換によって入射角を変え高次光の低減に役立たせることが容易である。3)の型の分光器ではトロイダル回折格子分光器(TGM)^{1,2)}が広く使用されている。波長掃引は回折格子の回転のみで行う。機構がきわめて簡単である反面、高い分解能や高次光の除去は期待できない。非等間隔刻線によって集光作用を持たせた平面回折格子マウント³⁾もある。

UVSOR では1)の球面回折格子と2)の平面回折格子を用いた斜入射領域での新しいマウントの分光器を製作し、気体の光解離や光反応、固体の光電子などの分光研究に使用している。ここではこれら分光器の原理や得られたスペクトルなどについて報告する。

2. 2.2 m ローランド円型斜入射分光器⁴⁾

($2\text{ nm} < \lambda < 20\text{ nm}$)

2.1 原理

SOR用の極端な斜入射の分光器で球面回折格子を用いるものの多くはボダールマウント⁵⁾に基づいている。このマウントで出口スリットを固定して利用すると入口スリット及び回折格子が波長

と共に移動し分光器への入射光線の方向が変化するのでSORを分光器に導くためにいろいろな工夫がなされている。INS-SOR型ボダール⁶⁾では入口スリットの前に集光用の凹面鏡を用いてSORを分光器に導く。波長掃引に伴って鏡への入射角が変化するため一波長の近傍を除いて入口スリット上に結像しない。同様な集光鏡一面のマウントとしては前置鏡、入口スリット、回折格子の動きをコンピューター制御したBonnの変形ボダール⁷⁾がある。グラスホッパー分光器^{8, 9)}では入口スリットを平面鏡-ナイフエッジ(Codlingスリット)で置き換えることによって前置鏡へのSORの入射角を一定に保つことができ、全掃引範囲にわたって比較的よい結像が得られる。しかしながら、UVSORの場合のように光源と分光器の距離が短い場合には前置鏡の移動距離の割合が大きいため中心波長を離れるに従ってスリット上の像が悪くなる。そこで大きな強度を得るために波長にかかわらずシャープな結像が得られる入口スリットが固定した分光器を設計、製作した。

分光器とビームラインの光学系を第1図に示す。10 mrad (h) × 2 mrad (v) のSORを取り込むことができる。球面鏡M₀はSORを試料位置Qで水平方向に集光し、球面鏡M₁とM₂は入口スリットS₁上で垂直方向に集光する。このM₁とM₂は収

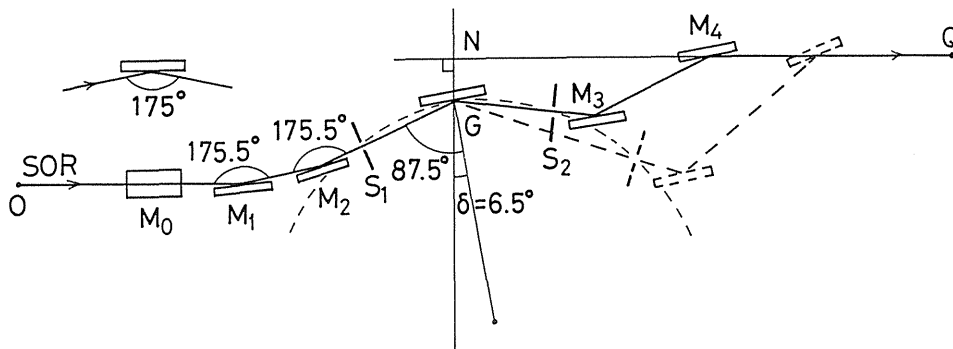


Fig.1 Optical design of the 2.2m Rowland circle grazing incidence monochromator. S₁, S₂: entrance and exit slits. G: grating. M₀, M₁, M₂: pre-mirrors. M₃, M₄: post-mirrors. O: source point. Q: sample position. OM₀ = 2167 mm, M₀M₁ = 5800 mm, M₁M₂ = 628 mm, M₂S₁ = 980 mm, S₂M₃ = 50 mm, M₃M₄ = 609.1 mm, GN = 61.2 mm and NQ = 2215 mm.

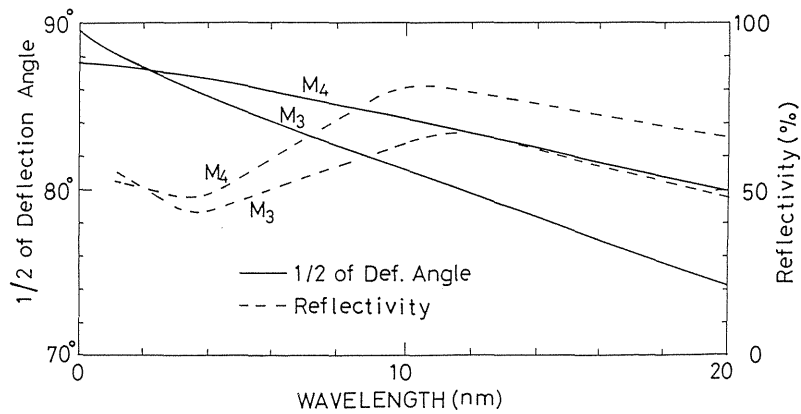


Fig.2 Dependence of incident angles and reflectivities of mirrors M_3 and M_4 on wavelength.

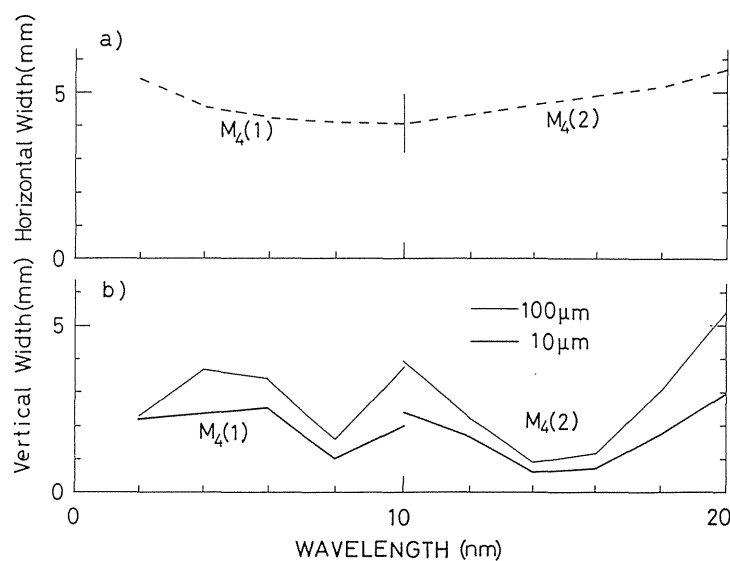


Fig.3 Calculated size of monochromatized beam at sample position in the case of 2400/mm grating. a) horizontal width. b) vertical width. Thick and thin solid lines represent the widths in the cases of $10\ \mu\text{m}$ - $10\ \mu\text{m}$ slits and $100\ \mu\text{m}$ slits, respectively. $M_4(1)$ and $M_4(2)$ are used in the 2-10 nm and 10-20 nm regions, respectively.

差補正の配置^{10, 11)}を成している。入口スリット S_1 及び球面回折格子 G は固定されており、波長掃引は出口スリット S_2 がローランド円上を移動することによって行われる。回折格子の曲率半径は 2217.6mm で、入射角 α は 87.5° である。出口スリットからの光は M_3 と M_4 の二つの球面鏡によって水平方向 NQ 上に取り出される。 M_3 は $G S_2$

の延長線上で $S_2 M_3 = 50\text{mm}$ に置かれ、 M_4 は $M_3 M_4 = 609.1\text{mm}$ を保ちながら出射光線の方向 NQ 上を移動する。波長掃引に伴い反射鏡 M_3 と M_4 への入射角 k_3 と k_4 は第2図に示すように変化する。図には入射角 k_3 、 k_4 における白金の反射率¹²⁻¹⁴⁾もプロットしてある。

試料位置 Q での像の大きさは波長掃引に伴って

変化するが、後置鏡 M_3 と M_4 の曲率半径を適当に選ばばある波長範囲にわたって比較的小きなスポットが得られる。しかしながら、全波長領域を一組の M_3 - M_4 でカバーするのは困難なので3つの M_4 が用意されている。 $M_4(1)$ は 2-10 nm, $M_4(2)$ は 10-20 nm の領域で使用され、また $M_4(0)$ は 0 次光を見る時のみ使用される。第 3 図に光線追跡法により計算された Q 点におけるスポットの大きさが示されている。これを見ると、10 μm のスリットを用いたときは垂直方向の像の全幅は 2 nm から 10 nm の領域では 1 mm から 2.5 mm に、また 10 nm から 20 nm の領域では 0.5 mm から 3 mm の間で変化することが分かる。水平方向の幅は全領域で 5 mm でほとんど変化しない。但し、光源の大きさは 0.4 mm (v) \times 0.6 mm (h), 発散角は 2 mrad (v) \times 10 mrad (h) と仮定された。

2.2 構造

分光器の側面図を第 4 図に示す。分光器の全光学系は一つの真空槽に納められる。三面の M_4 をのせたテーブルは直線ガイドレールの上を精密ボールねじによって駆動される。ボールねじの回転は磁気流体を用いた回転導入端子を経て外部に取り付けられたステッピングキーターにより与えられる。 S_2 と M_3 を乗せたテーブルは M_4 テーブルとの間の連結棒により押されローランド円のレール上を移動する。 M_4 の位置はロータリーエンコーダーでモニターされる。 M_4 の位置と波長の関係は

$$NM_4 = GM_3 \sin(\beta + \delta) + (M_3 M_4^2 - \{GN + GM_3 \cos(\beta + \delta)\}^2)^{1/2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $GM_3 = R \cos \beta + S_2 M_3$,

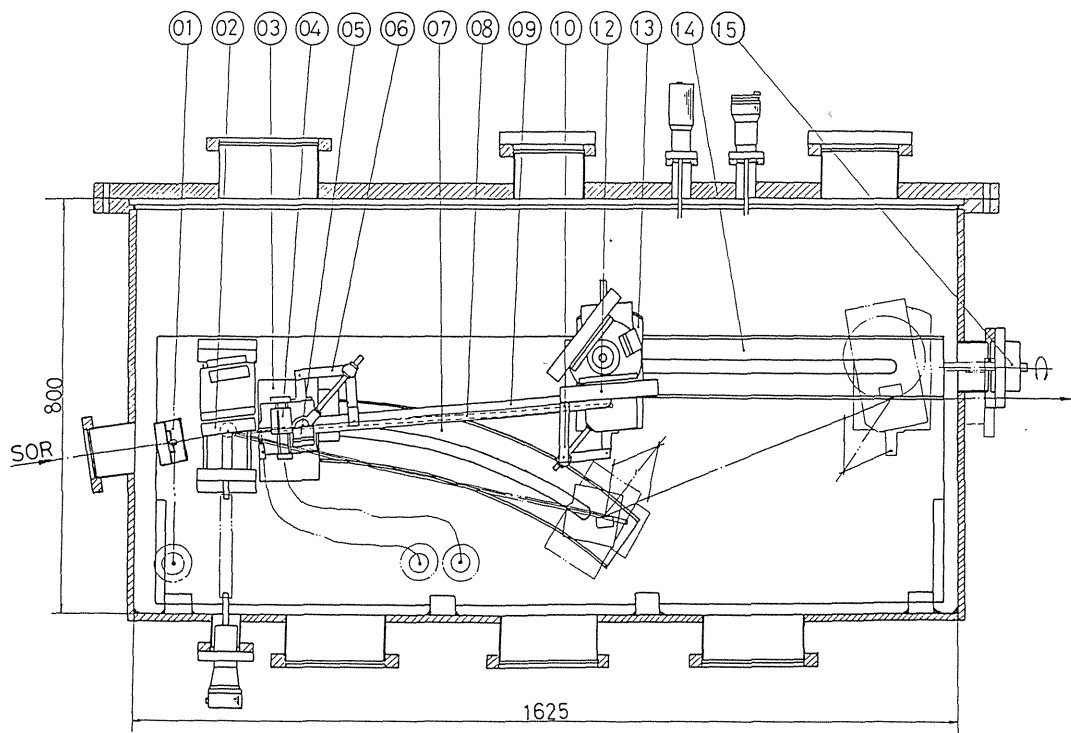


Fig.4 Side view of the 2.2 m Rowland-circle grazing incidence monochromator. 01 : entrance slit, 02 : grating, 03 : table of exit slit and M_3 mirror, 04 : exit slit, 05 : M_3 mirror, 06 and 10 : half angle mechanism, 07 : Rowland circle guide rail, 08 : bar facing exit slit perpendicular to the monochromatized light, 09 : bar connecting 03 and 13 tables, 12 : M_4 mirror, 13 : table of M_4 mirrors, 14 : linear guide rail and 15 : rotary motion feedthrough using magnetic fluid.

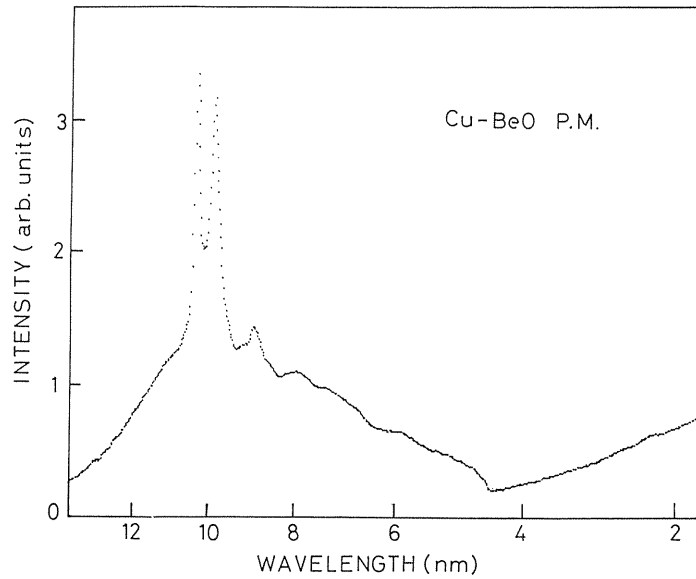


Fig.5 Output spectrum from the 2.2 m Rowland circle grazing incidence monochromator using a 2400/mm grating, taken by a nude type photomultiplier with a Cu-BeO cathode. $M_4(1)$ mirror was used.

$\beta = \sin^{-1}(\sin \alpha - \lambda/d)$ で、 δ は回折格子の法線と鉛直線のなす角である。 M_4 と M_3 の回転はパンタグラフ機構(半角機構)により与えられる。

回折格子は二面マウントすることができ、これらは真空を破らずに直線ガイドレール上を移動させて交換する事ができる。入口及び出口スリットは 0mm から 1mm まで連続的に変化でき、同様にこれらは真空を保ったまま調節できる。三面の M_4 鏡の交換は最初の設計までは真空を保ったまま回転導入端子からフレキシブルワイヤーで M_4 のターンテーブルを回転させる方法をとっていたが、位置の再現性などに問題があり現在のところ分光器を開けて交換している。

2.3 性能

第5図にホルマール¹⁵⁾(有機物)の薄い膜(推定 3000Å程度)を透過した光の強度分布を示す。2400本/mm, ブレズ角 2°のブレズドホログラフィック回折格子が使われた。これはガラス(BK-7)基盤に白金をコートしたオリジナルである。検出器は浜松ホトニクスのCu-BeO陰極をも

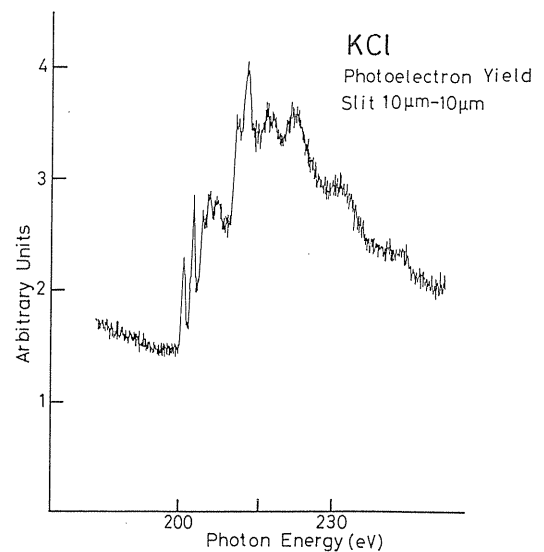


Fig.6 Photoelectron yield spectrum of KCl around Cl- L_{23} edge, obtained by the 2.2 m Rowland circle grazing incidence monochromator.

つ電子増倍管である。 M_4 には 2nm-10nm用の $M_4(1)$ が使用された。10nm近傍の強いピークはBeOからの光電子のバンドである。4.5nm付近に炭素のK-吸収端が見られる。それより短波長に行くにしたがって迷光が多くなる。現在使用で

きる波長領域は4nm付近より長波長域である。この短波長域の反射の悪さと迷光の多さは回折格子のブレイズ角の誤差や有機物が光分解してできた炭素による汚れなどによるのであろう。

電子増倍管の陰極に蒸着した KCl の Cl-L₂₃ 端近傍の光電子のスペクトルを第6図に示す。スリット幅は 10 μm である。最も鋭い第2ピークの半値幅は 0.22 eV である。これが分光器の分解能を表わしているとする分解能は約 1000 となる。分散から計算される分解能は 210eV の光エネルギーで 3000 で3倍ほど悪い。観測された幅はおそらく内殻励起子の寿命による自然幅によるものであろう。アルミフォイルの光電子収量から測定した出射光強度は、λ = 10nm で 50 μm のスリット幅（分解能 1000）の時、約 10¹⁰ p/s であった。一方、前置鏡、後置鏡の反射率をすべて 0.7 として、回折格子のそれを 0.05 と仮定すれば、リング電流 80mA、分解能 1000 の時光子数は 4 × 10¹⁰ p/s と見積られる。実測値はこれの 1/4 であるが、オーダーとしては一致している。

3. 155° 定偏角分光器¹⁶⁾(10nm < λ < 100nm)

3.1 原理

球面回折格子を用いた斜入射分光器で回折格子

への入射光線と回折光線のなす角が波長に関わらず一定であるマウントは最初 Codling¹⁷⁾ により考案された。このマウントでは入口及び出口スリットが固定位置にあり、回折格子がローランド円上を移動する。スリット部分は一体となった平面鏡—スリット (Codling スリット) で構成されており、回折格子を入射光線が常に照射するように、また出口スリットからの出射光の方向が変化しないように回折格子の移動と共に両スリット部は回転する。INS-SOR 型定偏角分光器¹⁸⁾ では入射方向と回折方向に沿って入口スリットと出口スリットが互いの距離を一定に保ちながら移動する。出口スリットが固定したマウントとして PF 型定偏角分光器¹⁹⁾ がある。回折格子の回転に伴う入口スリットの動きは適当な評価関数を最小にするよう決められており、その駆動はコンピューターで制御されている。UVSOR では定まった入射及び出射方向を持ち、且つ入口及び出口スリットも固定した新しい定偏角分光器を作った。これはアンジュレーター用ビームラインに設置されたが、アンジュレーター光のみならず通常の偏向電磁石からの放射光も利用する事ができる。UVSOR のアンジュレーターは電子エネルギーが 750MeV の時、15nm から 30nm の波長範囲で準単色光を放射で

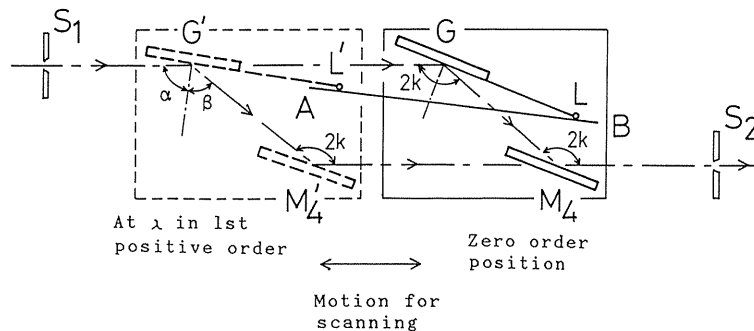


Fig.7 Optical design of the 155° constant deviation monochromator. An entrance slit S_1 and an exit slit S_2 are fixed. A spherical grating G moves along the incident beam, together with a plane mirror M_4 . The grating is rotated by an arm GL , the end L of which moves on a linear cam AB .

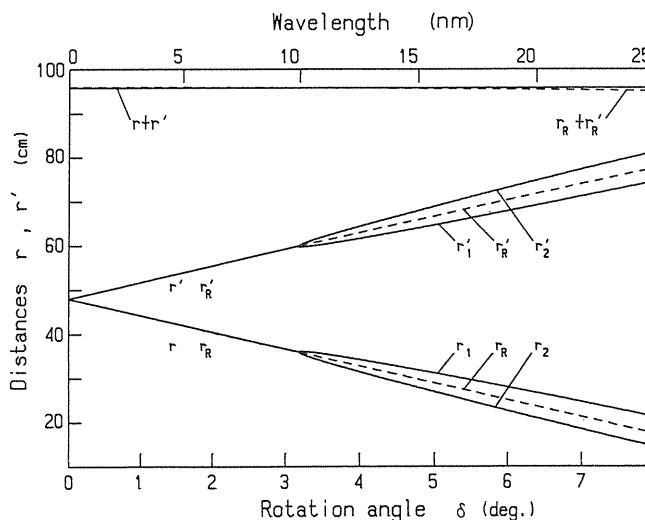


Fig.8 Relation between the rotation angle δ of the grating and the distance r from the entrance slit to the grating or the distance r' from the grating to the exit slit under a condition that the sum of r and r' is constant. Wavelengths shown were obtained for a 2400/mm grating. The Rowland circle condition is satisfied at 10 nm ($\delta_0 = 3.178$). For comparison, r and r' in the Rowland circle mount are indicated, marked by a subscript R.

きる²⁰⁾。三面の回折格子を持ち、2400本/mmで10nm–25nm、1200本/mmで25nm–50nm、600本/mmで50nm–100nmの波長範囲を掃引できる。

分光器の原理を第7図に示す。入口スリット S_1 及び出口スリット S_2 は固定されており、回折格子 G が平面鏡 M_4 と一緒に入射光線に沿って移動する。回折格子への入射光と回折光との間の角は一定の 155° で、波長掃引は回折格子の回転により行われる。 M_4 は回折格子からの回折光を入射光と平行に反射し、出口スリットにもたらし。このマウントでは S_1 から S_2 に至る光路は常に一定である。 S_1 と S_2 の位置はある任意の一波長でローランド円の条件を満たすように定められる。従って他の波長では厳密にはローランド円の条件を満たさない。全ての波長で球面回折格子の焦点の式は満足される必要があるから

$$\alpha + \beta = \alpha_0 + \beta_0 = 2k = \text{const} \quad (2)$$

$$r + r' = R (\cos \alpha_0 + \sin \beta_0) = \text{const} \quad (3)$$

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{R} = 0 \quad (4)$$

が成立する。ここで r は S_1G 、 r' は $GM_4 + M_4S_2$ 、 R は回折格子の曲率半径である。 α_0 と β_0 はローランド円条件が満たされる時の入射角と回折角である。

2400本/mmの回折格子を用いた時、 $\lambda = 10\text{nm}$ でローランド円の条件を満たすようにすると、 $2k = 155^\circ$ 、 $R = 2217.6\text{mm}$ であるから、 $\alpha_0 = 80.676^\circ$ 、 $\beta_0 = 74.324^\circ$ で、 $r + r' = 958.48\text{mm}$ となる。第8図に $2\delta = \alpha - \beta$ で定義される回折格子の回転角 δ あるいは2400本/mmの場合の波長 λ に対する r 及び r' の変化がプロットされている。ここで $\delta \leq \delta_0$ の範囲では実数解がないので(4)式の左辺が最小になるよう r, r' が選ばれた。また $\delta > \delta_0$ の範囲では r, r' の二組の解が存在し、 $\delta = \delta_0$ で $r_1 = r_2 = R \cos \alpha_0$ 、 $r'_1 = r'_2 = R \cos \beta_0$ となり、一致する。比較のため全波長領域でローランド円の条件を満たす場合の r_R, r'_R も示されている。この

図より本マウントの r, r' はローランド円マウントにおける r_R, r_R' とは大きく外れないことが分かる。なお、 $r_R + r_R'$ は λ が 0nm から 25nm に変わる間 959.95mm から 950.69mm 変化する。この分光器は正次数で使用するよう設計されている。

第7図に示すように、回折格子の回転は回折格子ホルダーの回転軸に取り付けられた腕 GL の端 L がカム AB 上をスライドすることによって与えられる。このカム AB の形状は(2)–(4)式を解くと求められ、一般には曲線となる。しかしこの曲線は直線によって良く近似される。このことは光線追跡法による出口スリット上の像の大きさの計算からも確かめることができ、掃引範囲の両端近傍を除いて両者の場合は良く一致する。従って製作の容易な直線のカムを用いた。

偏向電磁石から発散角 3mrad (v) の SOR が前置鏡により入口スリットで結ぶ垂直方向の角は 7.6mrad である。入口スリット上の一点から 7.6mrad (v) で発散する光線に対する出口スリッ

ト上の像幅 (v) は計算によるとローランド円マウントでは全波長領域にわたり $2\mu\text{m}$ を越えない。一方、直線カムをもつ現在のマウントでは最小幅は $\lambda = 11\text{nm}$ で $3\mu\text{m}$ 、最大幅は $\lambda = 25\text{nm}$ で $20.5\mu\text{m}$ で、これらは各々 $\Delta\lambda = 0.0006\text{nm}$ ($\Delta E = 6\text{mV}$)、 $\Delta\lambda = 0.004\text{nm}$ ($\Delta E = 8\text{mV}$) のバンド幅の増加になる。もしアンジュレーターが用いられたなら、その垂直方向の発散角は 1mrad 以下であるから、出口スリット上の像幅はずっと小さくなる。

3.2 構造

第9図に前置鏡と後置鏡の真空槽を含む分光器の上面図と側面図を示す。回折格子と平面鏡 M_4 のチェンバーは固定の入口及び出口スリットとベローズでつながれており、高精度の直線ガイドレール上を動く。三面の回折格子は真空を破らずに交換できる。

ビームライン BL3A における前置鏡と定偏角分

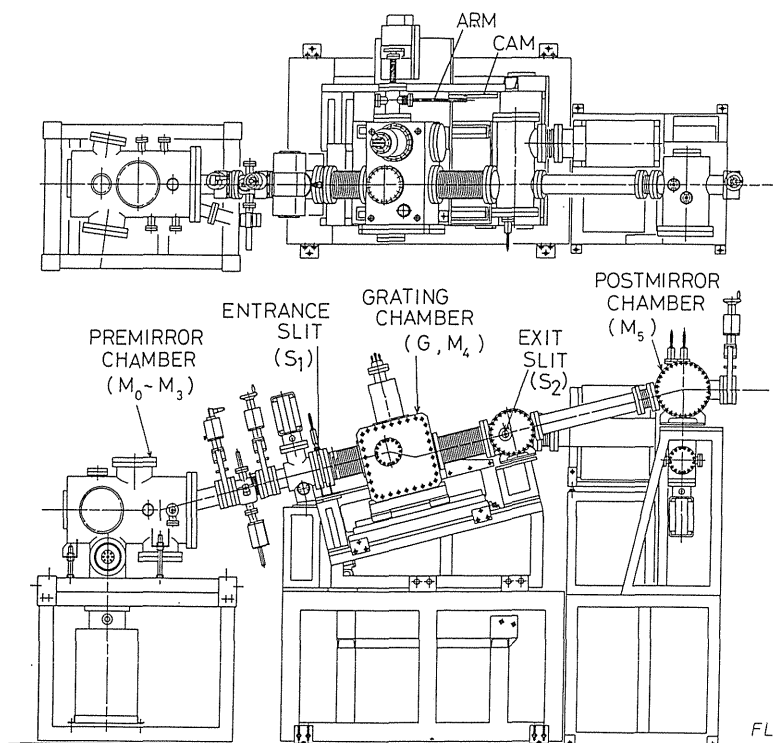


Fig.9 Schematic drawing of the 155° constant deviation monochromator including premirror and postmirror chambers.

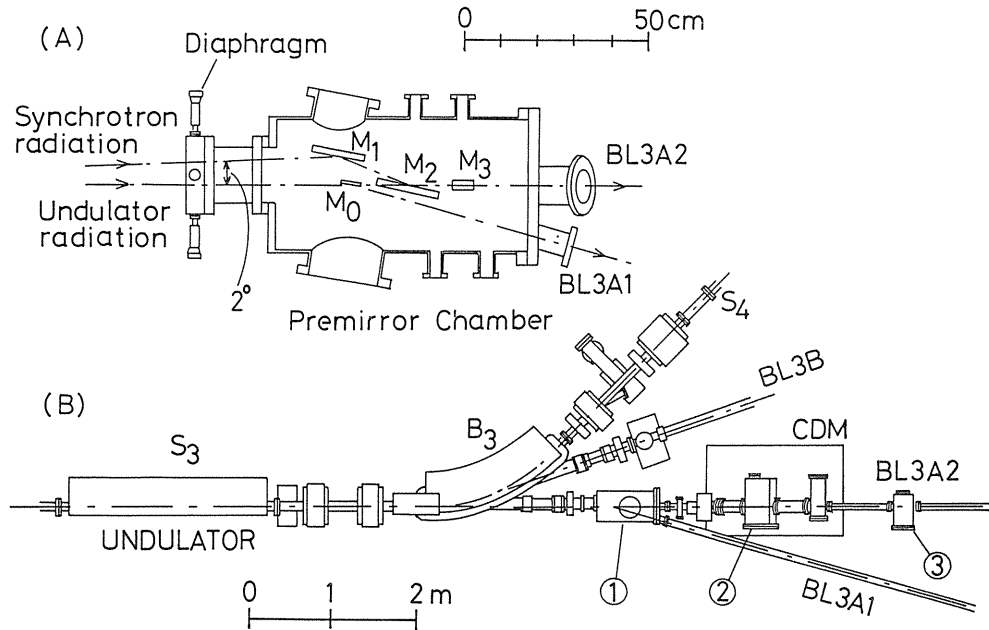


Fig.10 (A) Arrangement of mirrors in the premirror chamber and (B) lineup of the undulator beam line. S₃ is the long straight section into which the undulator is installed and B₃ is the bending section from which bending magnet radiation is obtained. 1: premirror chamber, 2: grating chamber, 2: postmirror chamber.

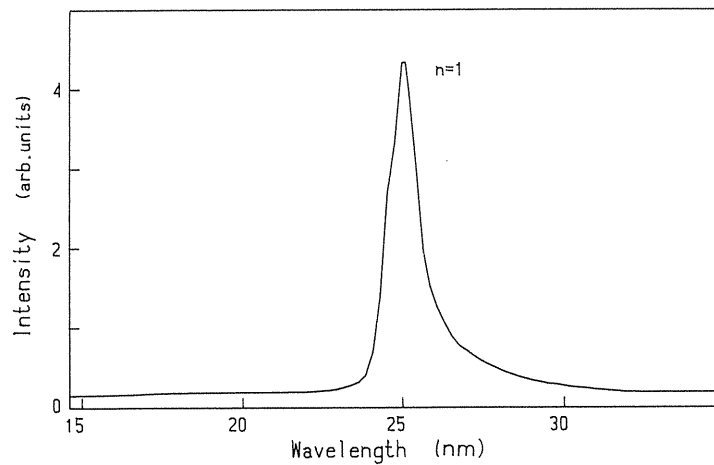


Fig.11 Intensity distribution of the first harmonic emitted from the undulator, obtained by using the 155° constant deviation monochromator. The slit widths are 100 μ m. The gap between magnets in the undulator is 33 mm ($K=1.28$) and the electron energy is 750 MeV. The higher harmonics were cutoff by an aluminum filter.

光器の配置を第10図に示す。ビームラインは BL3A1 と BL3A2 にわかれ、分光器は BL3A2 に設置されている。BL3A1 ビームラインは非分散のアンジュレーター光が必要な実験のためのポートで

トロイダル鏡 M₀ を挿入することにより取り出される。分光器に導くときは M₀ は光軸から外され、アンジュレーター光は球面鏡 M₀ により入口スリットに集光される。一方アンジュレーター光と 2°

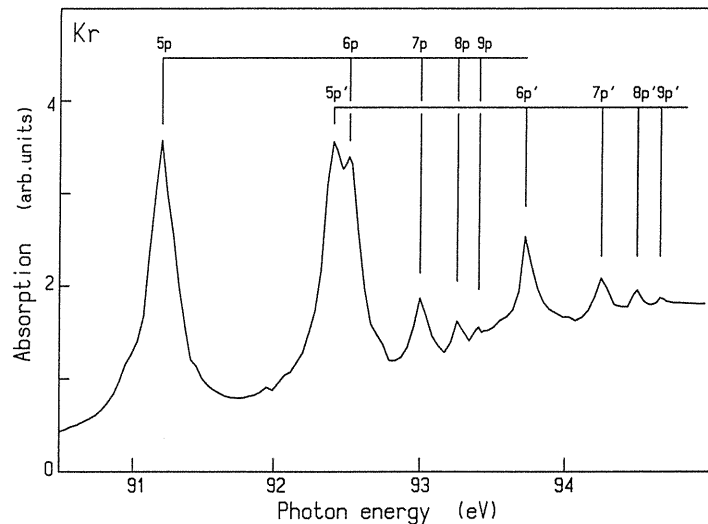


Fig.12 Absorption spectrum of Kr gas obtained by the 155° constant deviation monochromator equipped with a 2400/mm grating. The transitions shown are 3d-np ($n \geq 5$).

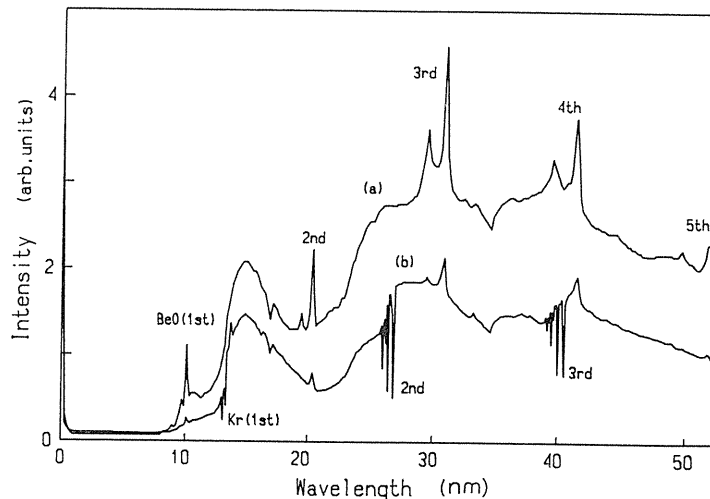


Fig.13 Transmission through the absorption cell obtained by the 155 constant deviation monochromator and an electron multiplier with a Cu-BeO photocathode: (a) without sample gas and (b) with Kr gas at the pressure of 1.179 torr. The region scanned with a 1200/mm grating was from 0 nm to 52 nm. Higher order structures of photoemission peaks of BeO around the photon energy of 100 eV can be seen up to the 5th order and those of absorption bands around the photon energy of 92 eV are seen up to the 3rd order.

の角度をなして入ってくる偏向電磁石からのSORは M_1 , M_2 , M_3 ,により入口スリットに導かれる。 M_2 と M_3 がSORを入口スリットへ垂直方向に集光する。 M_1 と M_3 と M_5 の組み合わせにより試料位置Qに光を水平方向に集める。

3.3 性能

第11図にアンジュレーター光の基本波の強度分布を示す。サルチル酸ソーダー付光電子像倍管を検出器としてもちい、また高調波を切るためアルミニウムの薄膜がフィルターとして用いられた。入口及び出口スリット $100 \mu\text{m}$ の時、ピークの $\lambda = 25 \text{ nm}$ での強度は $1 \times 10^{12} \text{ p/s}$ であった。試料位

置のスポットの大きさは光線追跡法から $0.5 \text{ mm (v)} \times 1 \text{ mm (h)}$ である。但し、発光位置で発散角は $1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$ 、大きさは $0.6 \text{ mm (v)} \times 2.0 \text{ mm (h)}$ で、アンジュレーターの長さは 2 m と仮定された。一方、偏向部からの SOR の場合は観測した零次光のスポットは $1.5 \text{ mm (v)} \times 2.0 \text{ mm (h)}$ である。計算では $1.3 \text{ mm (v)} \times 1.8 \text{ mm (h)}$ となり、観測結果と良く一致している。ここで発光点で発散角を $5 \text{ mrad (v)} \times 10 \text{ mrad (h)}$ 、光源の大きさを $0.4 \text{ mm (v)} \times 0.6 \text{ mm (h)}$ として計算した。

第12図に Kr の 3d 内殻励起の吸収スペクトルを示す。スリット幅は $10 \mu\text{m}$ で、回折格子には 2400 本/mm が使われた。8p と 8p' のバンドの FWHM は各々 90 meV と 70 meV で、9p と 9p' は 70 meV より更に狭い。これよりエネルギー幅は $E = 96 \text{ eV}$ で $\Delta E < 70 \text{ meV}$ で、従って分解能は 1400 より高い。

刻線が 1200 本/mm のホログラフィック回折格子をもちいて、 0 nm から 52 nm の全領域を掃引して得られた吸収セルの透過光の強度を第13図に示す。(a) は試料気体なしの場合で、(b) は Kr ガスの場合である。電子増倍管の陰極の BeO の 120 eV (10 nm) 付近の光電子のバンドや Kr の 96 eV (13.5 nm) 付近の吸収の高次の構造が見られる。出力スペクトルには高次光が有効に除去されていないことが分かる。高次光成分を抑えるためには

Al や Ti 等のフィルターを用いてやらねばならない。また、現在のマウントは正次数で使用するよう設計されており、長波長になる程入射角が大きくなって短波長の光の反射率が大きくなる。負次数で使用するとそれが逆になり高次光の抑制が期待できる。しかしながら同様に正次数で用いられている INS-SOR 型定偏角分光器¹⁸⁾では高次光の影響がそれ程大きくないので今回使用したホログラフィック回折格子それ自体のブレード角の誤差や溝の形状が多分に影響しているものと思われる。

4. 平面回折格子分光器 I²¹⁾ ($8 \text{ nm} < \lambda < 650 \text{ nm}$)

4.1 原理と構造

多くの平面回折格子分光器では SOR を平行とみなし、回折格子からの平行な単色光を集光用の凹面の後置鏡で出口スリットに集める。INS-SOR 型 PGM²²⁾ では回折格子の回転と共に後置鏡を射出方向に沿って移動して高次光が反射しないスペクトルの領域を選ぶ。同様なマウントは West ら²³⁾ や Howells ら²⁴⁾ の PGM がある。一方、Kunz らのマウント²⁵⁾ では後置鏡は固定して、平面の前置鏡を回折格子の回転に伴って入射光線方向に沿って移動、回転させ常にブレードの条件を満足させる。平面の前置鏡を移動させる代わりに多数の平面鏡を用意したのが“Flipper”分光器^{26,27)} である。そこでは回折格子とそれらの内の一つとの組み合わせにより入射角を決定し、波長掃引は回折格子

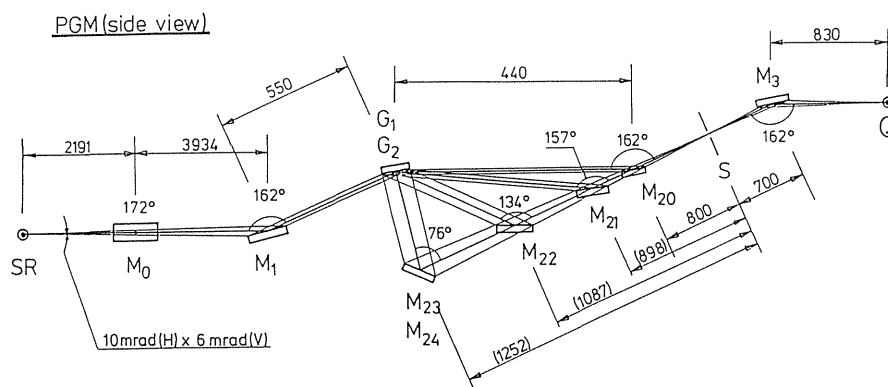


Fig.14 Optical design of the PGM I.

の回転のみ行うので機構は単純である。菅らの平面回折分光器²⁸⁾も同様な構造を持つ。

実際の光源距離は有限であるので回折格子への入射角の変化にともなって回折格子の結像位置も変化する。これは分光器の分解能を低下させる。Bessy の“SX 700”分光器^{29, 30)}では定まった結像位置の条件を満足するよう平面の前置鏡と回折格子に回転を与え、集光用後置鏡に楕円面をもちいて高分解能を得ている。平面の前置鏡の代わりにコリメーティング用凹面鏡を用いて平行ビームにする³¹⁾ことも有効である。UVSOR では光源と分光器の距離は 3.5m-6m と短く、また長波長領域まで利用するため受け入れる SOR の発散角も大きいので前置鏡より SOR を平行にした。

分光器の光学系を第14図に示す。10mrad (h) × 6mrad (v) で発散してくる SOR は球面鏡 M₀ により水平方向で、球面鏡 M₁ により垂直方向で平行にされる。回折格子は 1200本/mm と 450本/mm の2面が各々短波長用と長波長用に用意されている。集光鏡 M₂ は5面用意され、これらへの入射角とコーティングの材料を選ぶことにより高次光が重ならない波長領域を設定する。この分光

器は負次数で用いられる。各光学素子のパラメータは第1表に与えられている。M₂₃ と M₂₄ は同一のブランク上の左右半分ずつに Pt と Al/MgF₂ をコートして造られている。

M₂ と出口スリット S₂ との距離の選び方は（従って、M₂ の曲率半径は）分光器の分解能に影響する。出口スリット上の像の垂直方向の幅は、M₂ が円筒面であることによって生じる収差と光源の拡大（あるいは縮小）像を与える倍率の大きさにより決まる。M₂S₂ が小さいと収差による像のボケが倍率による像の大きさより顕著になり分解能は悪くなる。M₂S₂ が十分大きいと逆に像の大きさは主に倍率で決められる。この倍率による像の大きさは M₂S₂ に比例して大きくなるが、回折格子の線分散の大きさも同様に M₂S₂ に比例するため分解能としては M₂S₂ によらない。このようにして出口スリットの位置は光線追跡法による計算から収差による像の拡がりを実質上無視できる最小の距離を求めて定めてある。

分光器の側面図を第15図に示す。回折格子の回転は回折格子ホルダーからの腕木を直進運動で押しで行っている。2面の回折格子と5面の集光鏡は

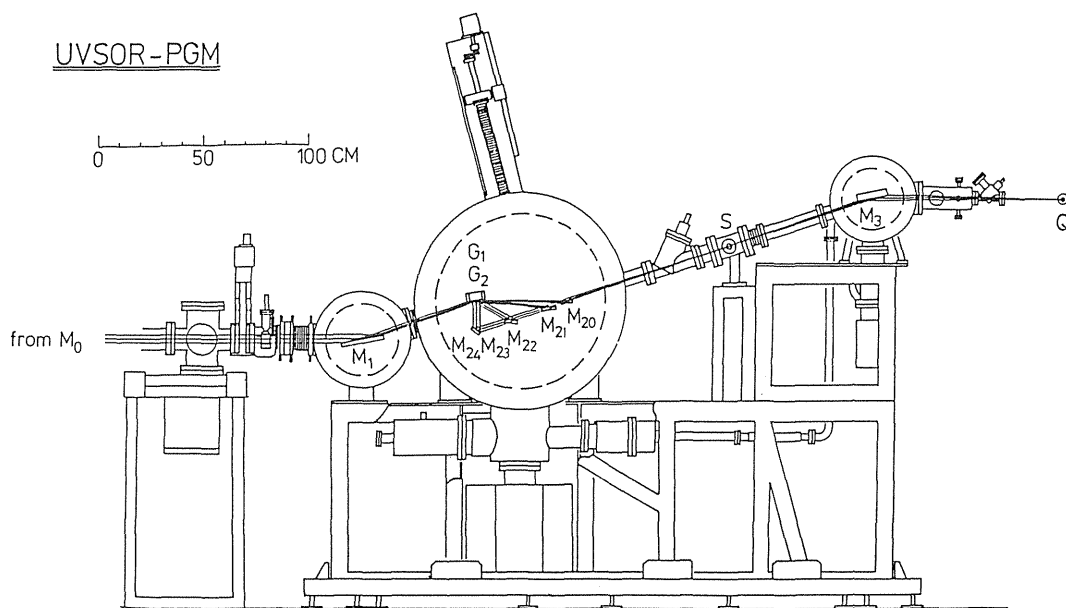


Fig.15 Schematic drawing of the PGM I.

Table.1 Designed parameters of optical components for the plane grating monochromator I

Component	R (h) (mm)	R (v) (mm)	Coating	Incident angle(deg.)	Grating : λ blaze (nm)	Wavelength region (nm)
M ₀	63381	63381	Pt	86		
M ₁	78443	78443	Pt	81		
M ₂₀	∞	10228	Pt	81	G ₁ : 15.9	8-15
M ₂₁	∞	9010	Pt	78.5	G ₁ : 20.3	15-30
M ₂₂	∞	5565	Ni	67	G ₁ : 39.8	30-60
M ₂₃	∞	3179	Pt	38	G ₁ : 80.2	60-120
M ₂₄	∞	3179	Al/MgF ₂	38	G ₂ : 177.2	100-650
M ₃	259.7	4885	Pt	81		
G ₁	∞	∞	Pt	1200/mm θ blaze = 3.5°		8-120
G ₂	∞	∞	Al/MgF ₂	450/mm θ blaze = 2.9°		100-650

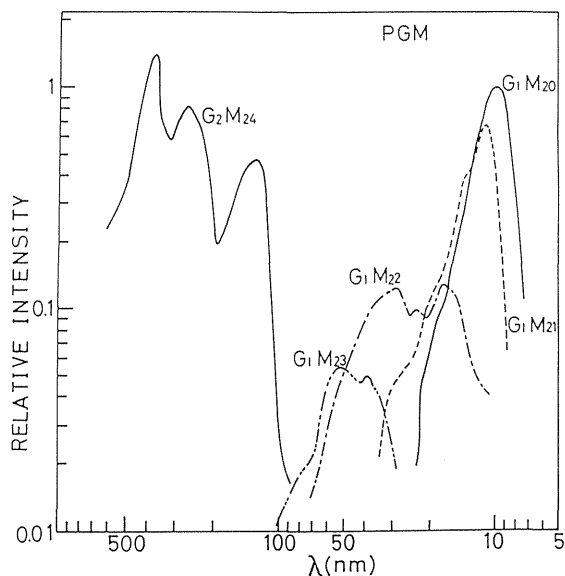


Fig.16 Spectral distribution of the output from the PGM I.

真空を保ったまま直線ガイドレールを用いて交換できる。出口スリットからの光線はトロイダル鏡 M₃により 0.83m 後の試料位置に垂直、水平方向共に集められる。

4.2 性能

スリット幅 500 μ m で、サルチル酸ソーダを窓

にコートした光電子増倍管を用いて測定した相対的な強度分布を図16図に示す。回折格子と集光鏡の組み合わせにおいて必ずしも設計どりのスペクトル分布を示さず、特に G₁-M₂₃の組み合わせの強度が低く、90nm 近傍が極端に弱くなっている。アルミフォイルの光電子収量から絶対強度を測定した結果、スリット幅 500 μ m で電流 27 mA の時、縦軸の相対強度 1 は 2×10^{11} p/s であることが分った。He, Ne, O₂などの気体の吸収スペクトルや KCl などのイオン結晶の光電子スペクトルから分解能を評価した。波長領域が 230 nm から 13.5 nm の間ではバンド幅 ΔE は 0.015 eV から 0.3 eV まで変化する。これは光線追跡法によって求めた結果と良く一致している。また試料位置 Q での零次光のスポットの大きさは 1mm \times 1mm より小さかった。

5. 平面回折格子分光器 II ^{32, 33)}

(1.8 nm < λ < 238 nm)

5.1 原理と構造

これは名古屋大学プラズマ研究所の核融合プラズマ計測センターがプラズマ放射計測器の校正を

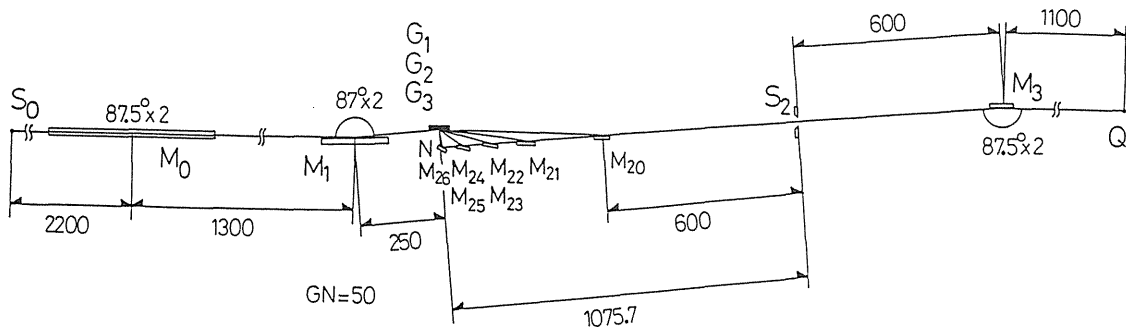


Fig.17 Optical design of the PGM II.

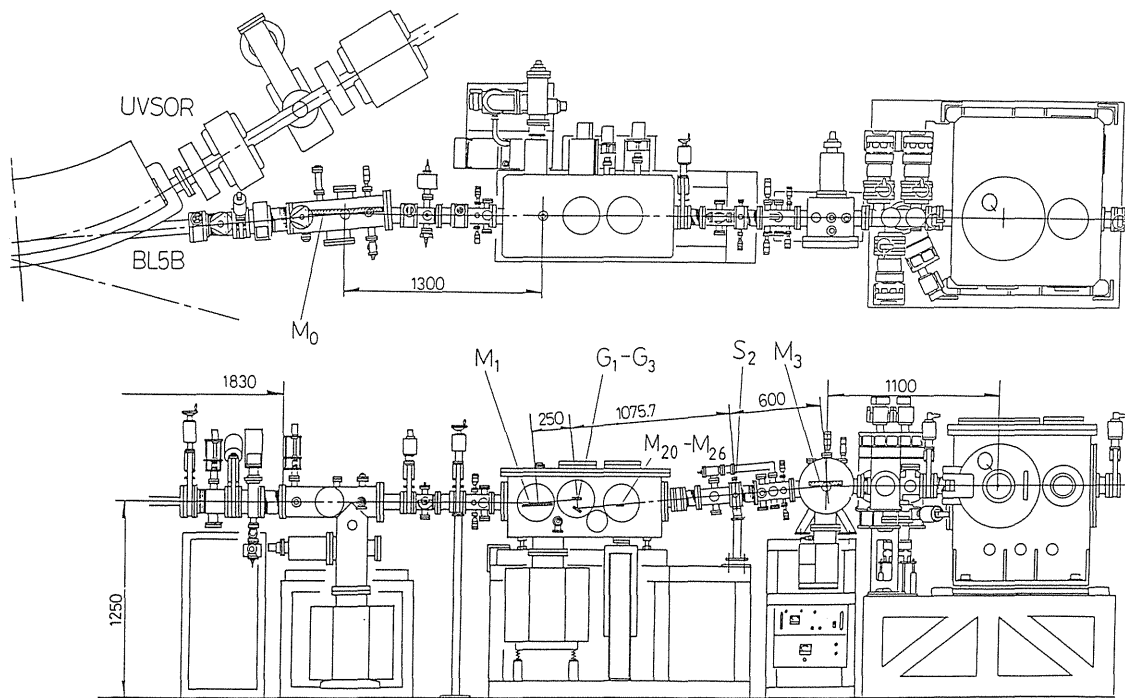


Fig.18 Schematic drawing of the PGM II and calibration chamber.

目的として UVSOR に設置した分光器である。原理、構造は上述の平面回折格子分光器 I と基本的には同様であるが、波長を軟 X 線領域まで拡張するため、さらに斜入射の設計になっている。第17図に光学系を示す。10mrad(h) × 3mrad (v) の SOR が取り込まれ、前置鏡 M₀ と M₁ でそれぞれ水平、垂直方向に平行にされる。回折格子は 1800 本/mm (G₁)、1200 本/mm (G₂) と 800 本/mm (G₃) の 3 面の内の 1 面が、また集光鏡は 7 面のうちの 1 面が必要な波長領域に合わせて選択される。各光学素子のパラメーターを第 2 表に示す。またビームラインの上面図、側面図を第18図に示す。

平面回折格子分光器 I と比べて本体は随分コンパクトになっている。

5.2 性能

第19図にアルミフォイルをフォトカソードとした検出器で測定された分光器のスペクトル分布を示す。スリット幅は 30 μm でいろいろな回折格子-集光鏡の組み合わせで得られた。回折格子 G₁ (1800 本/mm, ラメラ) は迷光の成分が多く、また分解能も悪かったので、当初の設計の G₁-M₂₀ と G₁-M₂₁ という組み合わせの G₁ の代わりに G₂ (1200 本/mm) が使用された。稀ガスを用い

Table.2 Designed parameters of optical components for the plane grating monochromator II

Component	R(h) (mm)	R(v) (mm)	Coating	Incident angle (deg)	Grating: λ blaze (nm)	Wavelength region (nm)
M ₀	50436	50436	Pt	87.5		
M ₁	134072	134072	Pt	87		
M ₂₀	22929	22929	Pt	87	G ₁ :	1.8-3.5
M ₂₁	17079	17079	Pt	84.5	G ₁ :	3-6
M ₂₂	∞	12953	Pt	82	G ₂ : 8.6	6-12
M ₂₃	∞	12953	Si	82	G ₂ : 18.0	10-12
M ₂₄	∞	6680	Pt	72.5	G ₃ : 25.8	15-30
M ₂₅	∞	6680	Si	72.5	G ₃ : 53.9	27-54
M ₂₆	∞	3352	Ni	50.5	G ₃ : 112.1	50-110
M ₃	47	17801	Pt	87.5		
G ₁	∞	∞	Pt	1800/mm laminar		1.8-6
G ₂	∞	∞	Pt	1200/mm $\theta_{\text{blaze}} = 2.0^\circ$		6-20
G ₃	∞	∞	Pt	800/mm $\theta_{\text{blaze}} = 4.0^\circ$		15-110

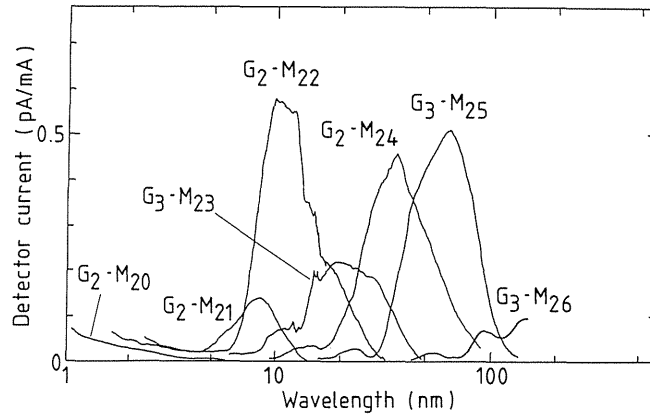


Fig.19 Spectral distribution of the output from the PGM II measured by Al photodiode.

たダブルイオンチェンバーのイオン電流の大きさから出射光の強度が求められ、その結果スリット幅 $30 \mu\text{m}$ 、電流 100mA の時、 $\lambda = 50 \text{nm}$ で $2 \times 10^{10} \text{ p/s}$ であった。

光線追跡法から計算された分解能の波長依存性が第20図に示されている。分解能は全領域にわたって、 500 ± 200 である。第21図の (a) には NaCl

の Cl-L₂₃ 端付近の光電子スペクトルが、また (b) には Ar の自動電離の構造が示されている。バンドの FWHM から NaCl では分解能は 200, Ar では 800 が得られる。Ar は計算結果と一致しているが NaCl の観測された分解能は小さい。これは励起状態の寿命によるバンド幅の広がりによると思われる。分解能はスリット幅が $100 \mu\text{m}$ より狭

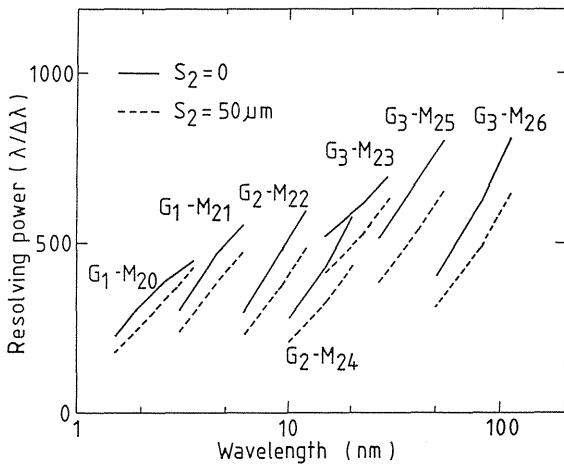


Fig.20 The resolution of the PGM II for various combinations of grating and mirror calculated by ray tracing analysis. The solid and broken curves correspond to the case for slit width of 0 and 40 μm, respectively.

い場合には、スリット幅によらず一定である。

後置鏡 M₃ の 1.1 m 後ろにある試料位置 Q でのスポットの大きさは 2 (h) mm × 0.5 (v) mm であった。これは計算値の 1.3 (h) mm × 0.7 (v) mm と良く一致している。スポットの位置は回折格子や鏡を交換しても 0.2 mm 以上は変化しなかった。

6. おわりに

ローランド円型斜入射分光器では入口スリットが固定しているため、収差補正配置の前置鏡が使用でき、強い出射光強度を得ることができた。最終的な分解能のチェックは行われていないが、注意深い調整を行えば分散から計算される分解能は得られるものと思われる。問題は試料位置でのスポットの大きさが波長と共に変化することと、スポットの位置が後置鏡の M₃ や M₄ の駆動機構の機械的精度に大きく依存することである。前者は強度を犠牲にすれば絞りを試料の前に置くことにより解決できるが、後者は専ら移動や回転の機械的精度を上げるしかない。現在は 4 nm から 10 nm まで掃引する間に、スポット位置は 3 mm 移動する。これを改善するための努力が現在なされている。

定偏角分光器は入射光線および出射光線の方向はもとより、入口および出口スリットも固定されているため前置鏡や後置鏡システムの設計は容易であり、且つ分解能も低くない。但し、現在のところスペクトルには高次光成分が多い。これは既に述べたように回折格子のブレイズ角の誤差や溝形状が影響しているものと思われる。異なる種類の回折格子によるスペクトルの測定は今後の課題である。

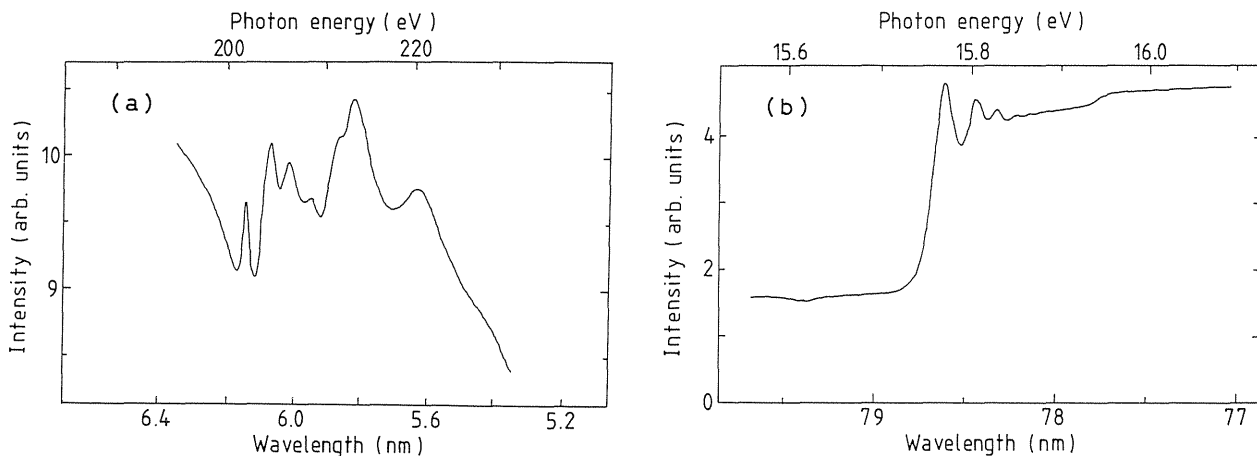


Fig.21 Expanded spectra near the absorption edge of the elements of detectors. (a) was measured by electron multiplier with NaCl photocathode, and show the exciton spectra near L₂₃ edge of Cl. (b) is an absorption spectrum near Ar M₂₃ edge measured by the ionization chamber.

平面回折格子分光器は大きな発散角の SOR を受け入れ、明るく、中程度の分解能を持ち、出射光のスポットも小さい使いやすい分光器である。しかし回折格子と鏡の組み合わせにおいて設計どりのスペクトル分布がかならずしも得られておらず、鏡への入射角やコーティングの材料の検討が必要である。

スペクトルの強度や高次光、散乱光の割合は回折格子の質に大きく依存する。特にローランド円型斜入射分光器と平面回折格子分光器Ⅱの軟X線領域の改善のためには回折格子の選択が本質的であると思われる。

UVSOR の斜入射分光器は以上述べた分光器(平面回折格子分光器Ⅰが2台と他は1台ずつ)の他に2.2m グラスホッパー分光器(1.5nm-60nm)が現在稼働している。

最後に、この報告に平面回折格子分光器Ⅰを記載するにあたり資料を提供していただいた広島大理 関一彦、福井大工 中川英之の各氏とワーキンググループの方々に、また平面回折格子分光器Ⅱに関しては名大プラ研の藤田順治先生、森田繁、桜井誠の各氏とワーキンググループの方々に感謝いたします。これら分光器の機械部及び回路部に関する設計、製作や組立、調整などは分子研の酒井楠男、松戸修、山崎潤一郎、中村永研、鈴井光一、福井一俊の各氏と多数の方々によるものであることを付記して感謝の意を表します。

文献

- 1) C. Depautex, P. Thiry, R. Pinchaux, Y. Petroff, D. Lepere, G. Passereau and J. Flamand, Nucl. Instrum. and Meth., **152** 101 (1978).
- 2) W. Gudat, E. Kisker, G. M. Rothberg and C. Depautex, Nucl. Instrum. and Meth., **195** 233 (1982).
- 3) T. Harada, T. Kita, M. Itou and H. Taira, Nucl. Instrum. and Meth., **A246** 272 (1986).
- 4) M. Watanabe, K. Sakai, E. Nakamura, J. Yamazaki, O. Matsudo, K. Fukui, E. Ishiguro and S. Mitani, Rev. Sci. Instrum. (To be published)
- 5) M. Salle and B. Vodar, Compt. Rend., **230** 380 (1950).
- 6) H. Sugawara and T. Sasaki, SOR 測定系レポート (in Japanese) 47 (1975).
- 7) G. Puester and K. Timm, Nucl. Instrum. and Meth., **152** 95 (1978).
- 8) F. C. Brown, R. Z. Bachrach and N. Lien, Nucl. Instrum. and Meth., **152** 73 (1978).
- 9) F. C. Brown, J. P. Stott and S. L. Hulbert, Nucl. Instrum. and Meth., **A246** 278 (1986).
- 10) T. Namioka, H. Noda, K. Goto, and T. Katayama Nucl. Instrum. and Meth., **208** 215 (1983).
- 11) H. Maezawa, S. Nakai, S. Mitani, H. Noda, T. Namioka, and T. Sasaki, Nucl. Instrum. and Meth., **A246** 310 (1986).
- 12) W. Gudat and C. Kunz, in Synchrotron Radiation Techniques and Applications, edited by C. Kunz (Springer-Verlag, Berlin, 1979) p.74.
- 13) H. Sugawara, S. Sato, T. Miyahara, A. Kakizaki, Y. Morioka, Y. Iguchi, I. Nakamura, M. Ando, T. Ohta and S. Aoki, Nucl. Instrum. and Meth. **228** 549 (1985).
- 14) T. Koide, T. Shidara, M. Yanagihara and S. Sato, Appl. Opt. (to be published)
- 15) R. J. Grader, R. W. Hill, C. W. McGoff, D. S. Salmi and J. P. Stoering, Rev. Sci. Instrum. **42** 465 (1971).
- 16) E. Ishiguro, M. Suzui, J. Yamazaki, E. Nakamura, K. Sakai, O. Matsudo, N. Mizutani, K. Fukui and M. Watanabe, Rev. Sci. Instrum. (To be published)
- 17) K. Codling and P. Mitchell, J. Phys. E: Sci. Instrum., **3** 685 (1970).
- 18) H. Sugawara and T. Sagawa, Extended

- Abstracts of 4th Int. Conf. Vacuum Ultra violet Radiation Phys., Hamburg, 62 (1974).
- 19) T. Miyahara, S. Suzuki, T. Hanyu, H. Kato, K. Naito, H. Fukutani, I. Nagakura, H. Sugawara, S. Nakai, T. Ishii, H. Noda, T. Namioka and T. Sasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24** 293 (1985).
 - 20) H. Yonehara, T. Kasuga, O. Matsudo, T. Kinoshita, M. Hasumoto, J. Yamazaki, T. Kato and T. Yamakawa, *IEEE Transaction on Nucl. Sci.*, NS-32 3412 (1985).
 - 21) K. Seki, H. Nakagawa, K. Fukui, E. Ishiguro, R. Kato, T. Mori, K. Sakai and M. Watanabe, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **A246** 264 (1986).
 - 22) K. P. Miyake, R. Kato and H. Yamashita, *Sci. Light*, **18** 39 (1969).
 - 23) J. B. West, K. Codling and G. V. Marr, *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, **7** 137 (1974).
 - 24) M. R. Howells, D. Norman, G. P. Williams and J. B. West, *J. Phy. E : Sci. Instrum.*, **11** 199 (1978).
 - 25) H. Dietrich and C. Kunz, *Rev. Sci. Instrum.*, **43** 434 (1972).
 - 26) W. Eberhardt, G. Kalkoffen and C. Kunz, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **152** 81 (1978).
 - 27) J. Barth, F. Gerken, C. Kunz and J. Schmidt-May, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **208** 307 (1983).
 - 28) S. Suga, M. Taniguchi, S. Shin, H. Sakamoto, M. Yamamoto, M. Seki, Y. Murata and H. Daimon, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **222** 80 (1984).
 - 29) F. Riemer and R. Torge, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **208** 313 (1983).
 - 30) H. Petersen, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **A246** 260 (1986).
 - 31) M. R. Howells, *Nucl. Instrum. and Meth.* **177** 127 (1980).
 - 32) S. Morita, J. Fujita, K. Fukui, K. Sakai, M. Watanabe, E. Ishiguro and K. Yamashita, *Fusion Research*, **58** 485 (1987) (in Japanese)
 - 33) M. Sakurai, S. Morita, J. Fujita, H. Yonezu, K. Fukui, K. Sakai, E. Nakamura, M. Watanabe, E. Ishiguro and K. Yamashita, *Rev. Sci. Instrum.* (To be published)