

第3章 実験装置の構成

本研究では光電子分光用の装置として実験室規模で微小領域の観察が行えるような装置を目指していることは第1章で述べたとおりである。そのために本研究ではレーザープラズマX線源とウォルターミラーを用いることで目的の装置を構築した。本章では、その実験装置全体及び各素子について説明する。

3-1 装置全体の概略

装置の概略図を図3-1に示す。装置はX線源、分光器、集光素子、試料室、エネルギー分析器の五つの部分に大きく分けられる。チャンバー内はターボポンプを用いて真空に引いており、分光器のトロイダルミラーのチャンバーに $6.0 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ の、回折格子のチャンバーには $2.5 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ 、試料室には $3.0 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ のターボポンプを用いた。実験時の真空度は、

トロイダルミラーのチャンバー	:	約 $4 \times 10^{-6} \text{ Torr}$
回折格子のチャンバー	:	約 $4 \times 10^{-7} \text{ Torr}$
試料室	:	約 $2 \times 10^{-7} \text{ Torr}$

で行った。なお、図3-1において実際の試料とエネルギー分析器の配置は紙面に対して垂直な方向に立った状態になっている。

以下で各部分について説明する。

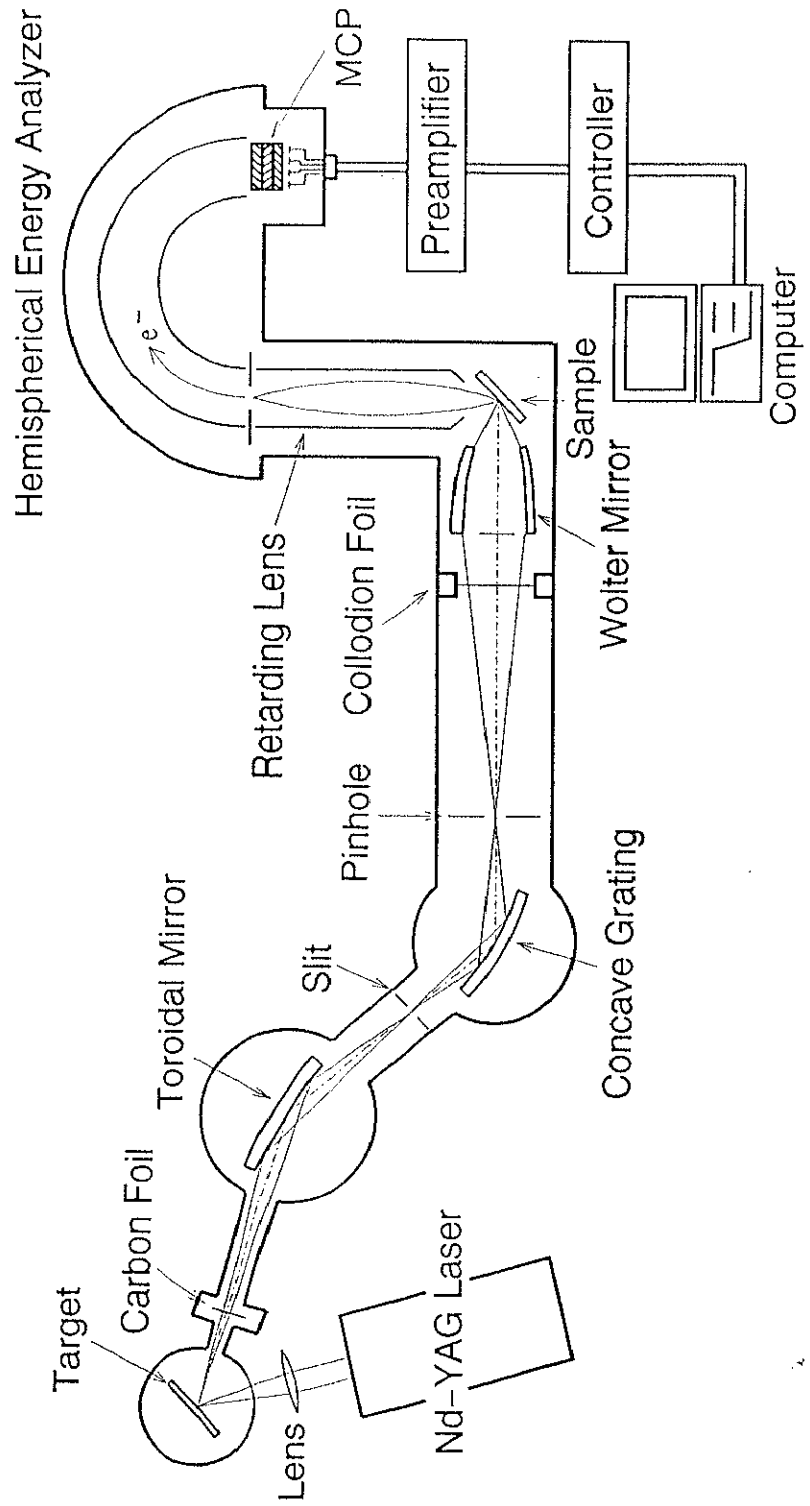


図 3 - 1 実験装置の概略図

3-2 レーザープラズマX線源

レーザープラズマX線源は、レーザー、レンズ、ターゲット、ターゲット駆動用パルスモーターからなる。用いたレーザーはNd-YAGレーザー(Quantel International)で、その仕様は以下の様になっている。

表3-1 Nd-YAGレーザーの仕様

Energy Power	1.2 [J]
Wavelength	1064 [nm]
Pulse Width	8 [ns]
Repetition Rate	10 [Hz]
Beam Divergence	0.45 [mrad]

レーザーは焦点距離150mmの平凸レンズでターゲット上に集光され、プラズマを発生させる。レーザーの通るレンズとターゲットチャンバーの窓は、レーザーの反射を抑えるため反射防止膜をコートしている素子を用いた。本実験におけるターゲット上のエネルギー密度は、

$$\frac{1.2 \text{ [J]}}{8 \text{ [ns]} \times \pi(50 \text{ [\mu m]})^2} \approx 2 \times 10^{12} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

であった。ターゲットには厚さ4mm、大きさ70mm角の純粋なアルミニウムの板を用いた。レーザーはターゲット面の法線に対して -30° 方向から入射して、X線は法線に対して 30° 方向から取り出した。

このX線源では、レーザーを照射するとターゲットに直径約 $200 \mu\text{m}$ のクレーターができる。このためレーザーを1発照射するたびにパルスモーターを用いてターゲットを動かし、常にターゲット面が新しくなるようにした。従っ

て、ターゲットに照射することのできるパルス数は制限され、ターゲット1枚当たり約6万発のレーザーを照射することができる。また、2-2節でも述べたが、このX線源ではターゲットから構成物質であるアルミニウムの粒子が放出される。そのためターゲットとミラーとの間の光路上でターゲットから約700mm離れたところに、フィルターを挿入してミラーへのアルミニウム粒子の付着を防いだ。この実験で用いたフィルターはカーボン薄膜で、厚さは0.5 μ m、透過率は使用波長(5.24nm:後述)に対して約70%である(図3-2)。

発生したX線の安定度を調べるために、検出器にアバランシェフォトダイオード(以下APD)を用いてその出力のばらつきを測定した。APDは、図3-3に示すようにフィルターを挿入する位置に置き、回路を通してオシロスコープで波形を見た。使用したAPDは浜松ホトニクス製(型番:S5343)で、窓材を外し可視光カットのために厚さ1.2 μ mのカーボン薄膜を張り、さらにその上にX線強度調節のため1.5 μ mマイラー膜を張ってX線を検出した。2枚の薄膜を合わせた透過率を図3-4に示す。主にカーボンのK吸収端付近のX線を検出していることになる。

まずX線のパルス幅を見てみると、図3-5に示すように半値幅で約7.4nsあった。この値はNd-YAGレーザーのパルス幅にほぼ等しい。次にこの波形のピークの出力を20発測定し、その平均値と標準偏差を調べた。以下の表はターゲットを一枚打つ間の平均値と標準偏差の変化を示したものである。

表3-2 ターゲット1枚におけるX線出力の変化

ターゲットの位置	最初(0)	1/100	1/5	最後(1)
平均値 [V]	5.51	5.49	4.58	4.45
標準偏差 [V]	0.50	0.12	0.13	0.12

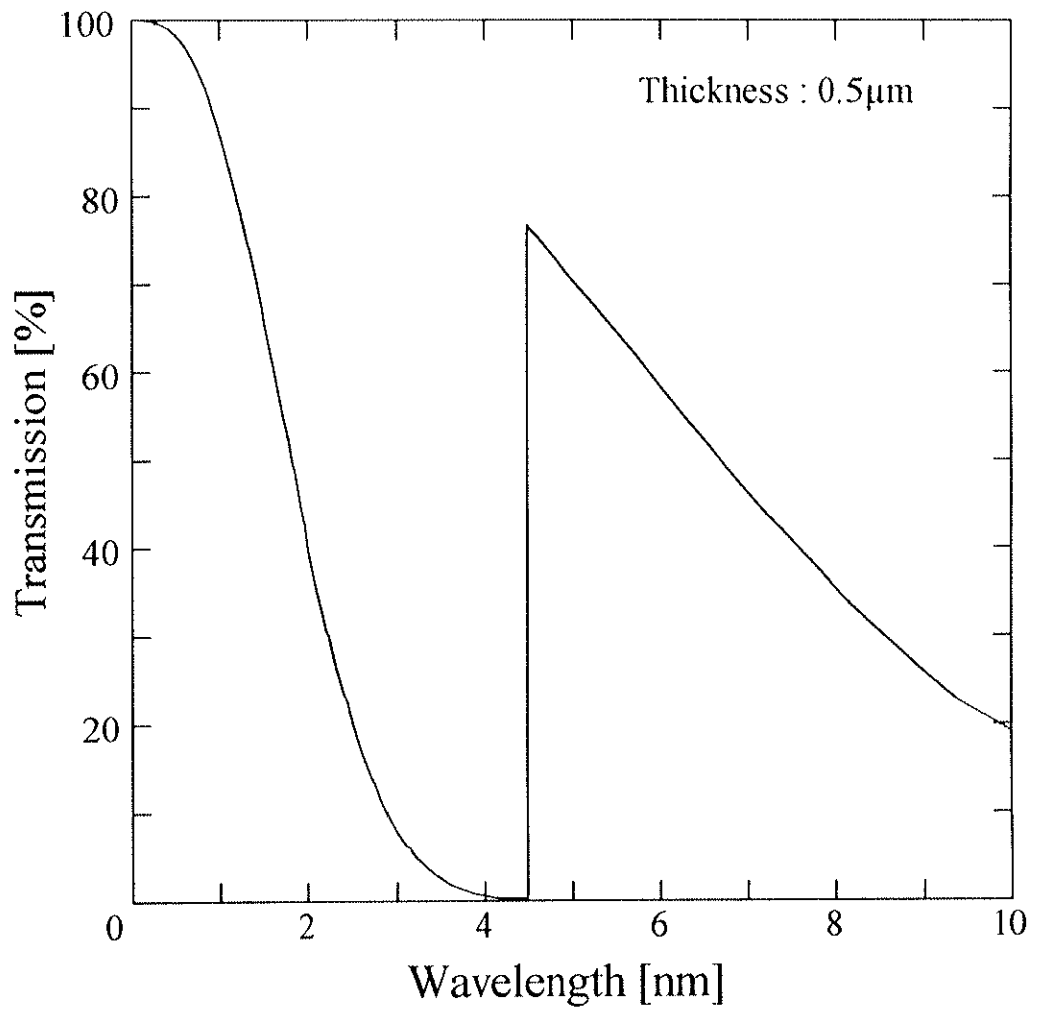


図3-2 カーボンフィルターの透過率

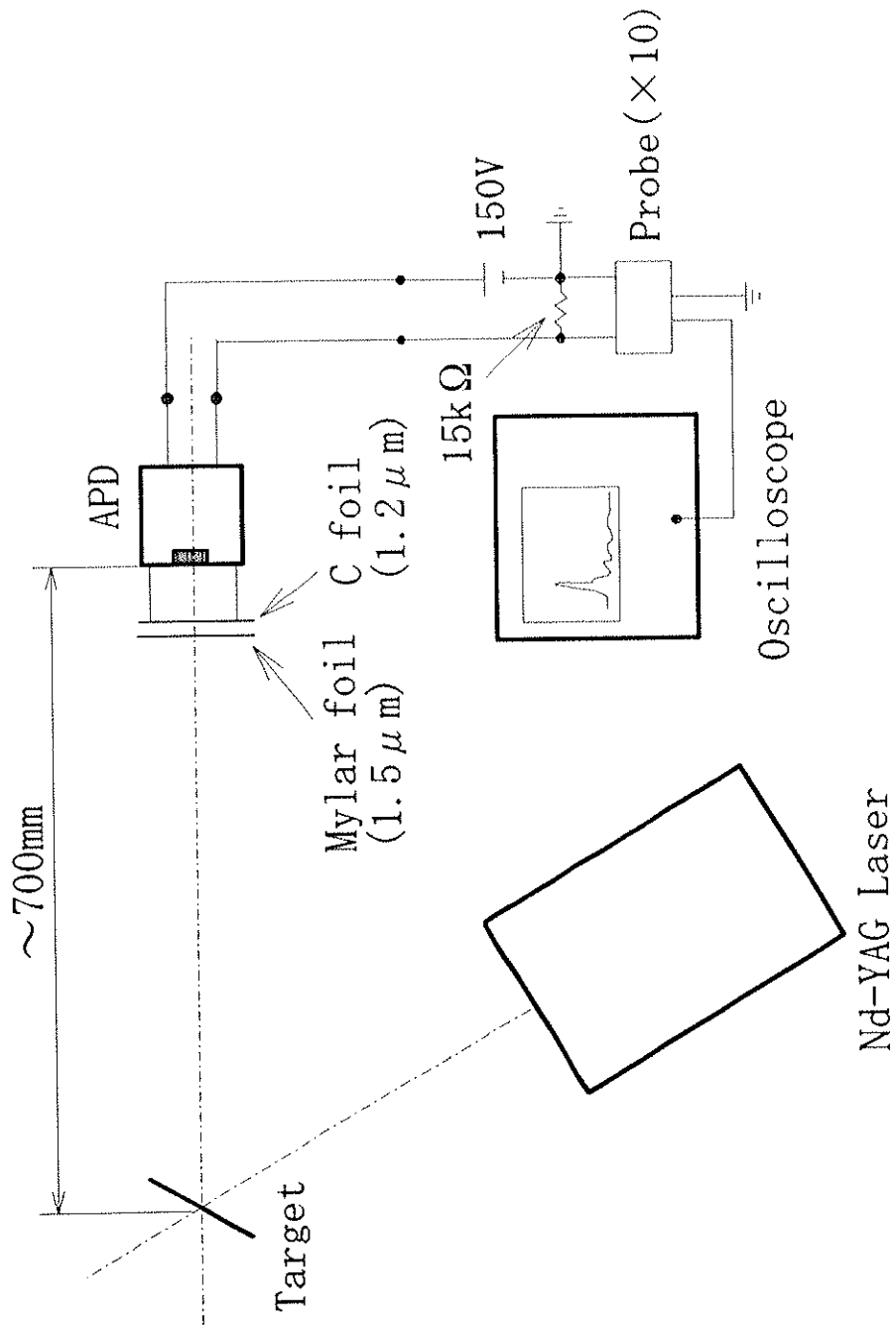


図 3 - 3 X線波形検出系の配置図

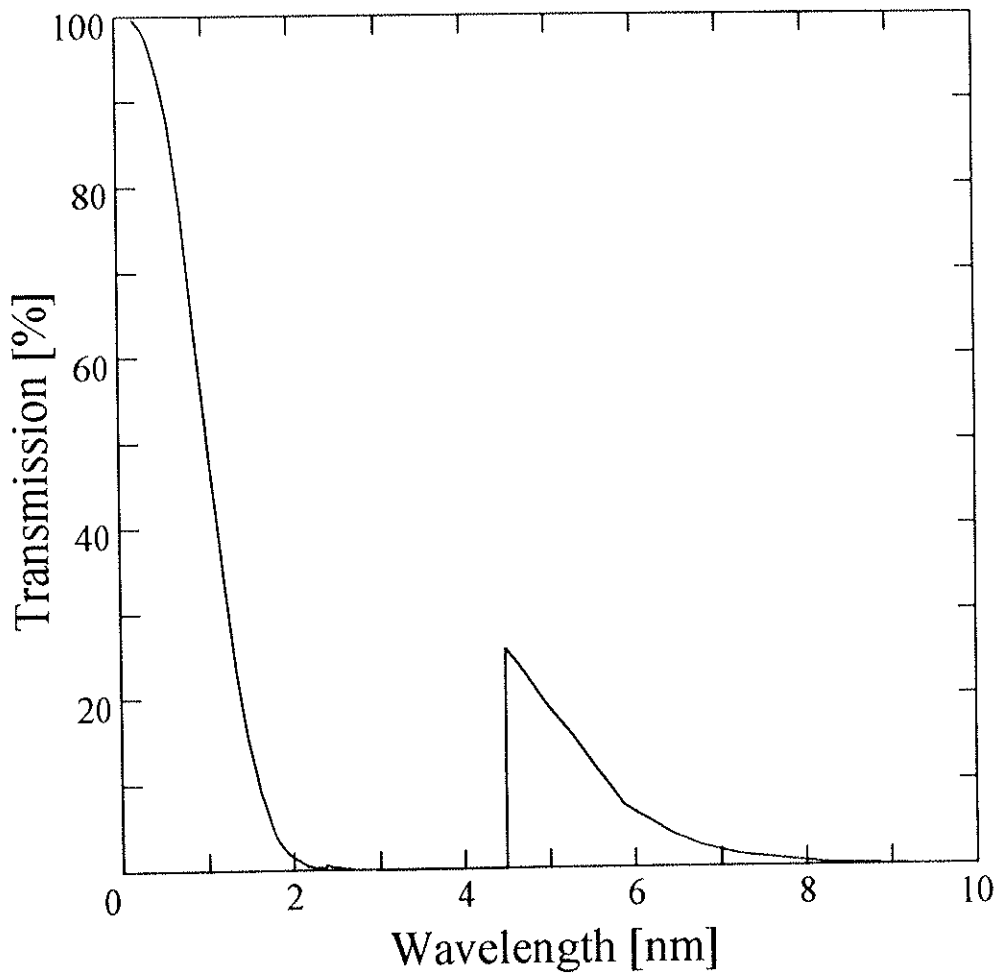


図 3 - 4 APDの前に張ったフィルターの透過率
 マイラー膜：1.5 μm
 カーボン膜：1.2 μm

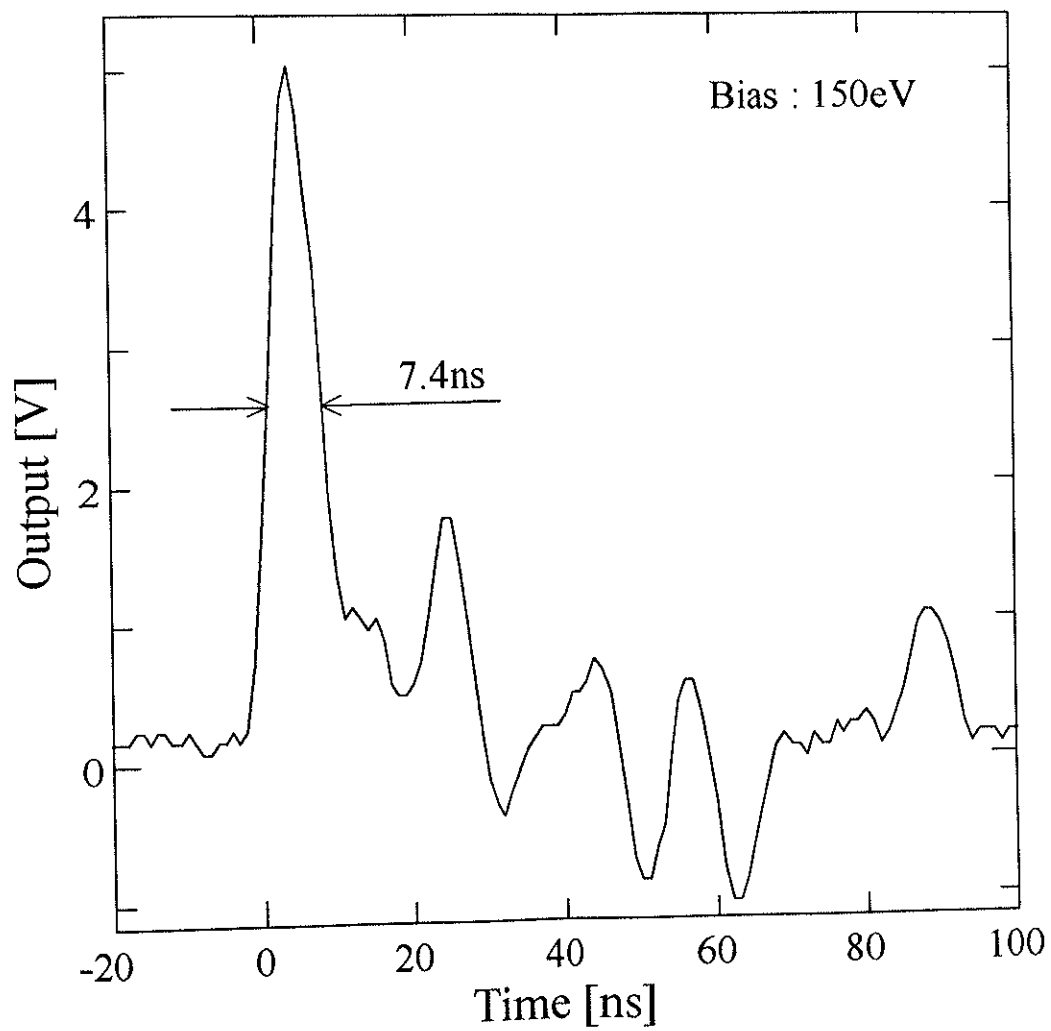


図3-5 アバランシェフォトダイオードで
検出したX線の波形

表3-2において「最初」の語句はまだレーザーを照射していないターゲットに初めてレーザーを照射したときを意味し、「最後」の語句は約6万発照射したターゲットにレーザーを照射する時を、 $1/100$ 、 $1/5$ と分数で表しているところはおよそ6万×(分数)発照射したターゲットにレーザーを照射した時を意味している。これを見るとターゲットの打ちはじめでは出力にばらつきがあるが、すぐに安定すること、また出力ははじめは少し高くなっていることが分かる。次にターゲットを交換するごとに測定した「最初」と「最後」の状態に注目した時の結果を表3-3と図3-6に示す。抜けている部分はデータをとってない所である。これを見ると、「最初」の状態の方が「最後」の状態の時より平均値が高くばらつきが大きく、ばらつきはそれぞれ出力の約 $\pm 3.8\%$ 、 $\pm 2.5\%$ 平均に当たる。APDのゲインの安定度が $\pm 2.5\%$ [3-1]であることから、実験中はほぼ安定している。

発生したX線のスペクトルについては次節(3-3)で述べる。

ターゲットの番号	最初		最後	
	平均 [V]	標準偏差 [V]	平均 [V]	標準偏差 [V]
1	4.83	0.33	4.74	0.18
2	5.97	0.17	5.03	0.13
3	5.51	0.50	4.45	0.12
4	5.44	0.15	4.12	0.12
5	5.45	0.23	4.46	0.10
6	5.75	0.26	4.47	0.19
7	6.20	0.18	4.24	0.07
8	6.00	0.25	—	—
9	7.40	0.34	4.18	0.08
10	6.44	0.24	4.70	0.14
11	8.47	0.34	4.58	0.10
12	7.03	0.33	4.62	0.10
13	6.69	0.24	4.69	0.13
14	6.75	0.38	—	—
15	5.45	0.18	4.58	0.09
16	5.58	0.10	4.37	0.09
17	—	—	—	—
18	—	—	—	—
19	5.35	0.09	5.19	0.09
20	5.83	0.13	4.33	0.13
21	5.34	0.20	—	—
22	6.14	0.17	3.95	0.10
23	5.54	0.20	4.33	0.09
24	5.40	0.12	—	—

表 3 - 3 ターゲットを交換するごとに測定した X線出力の変化

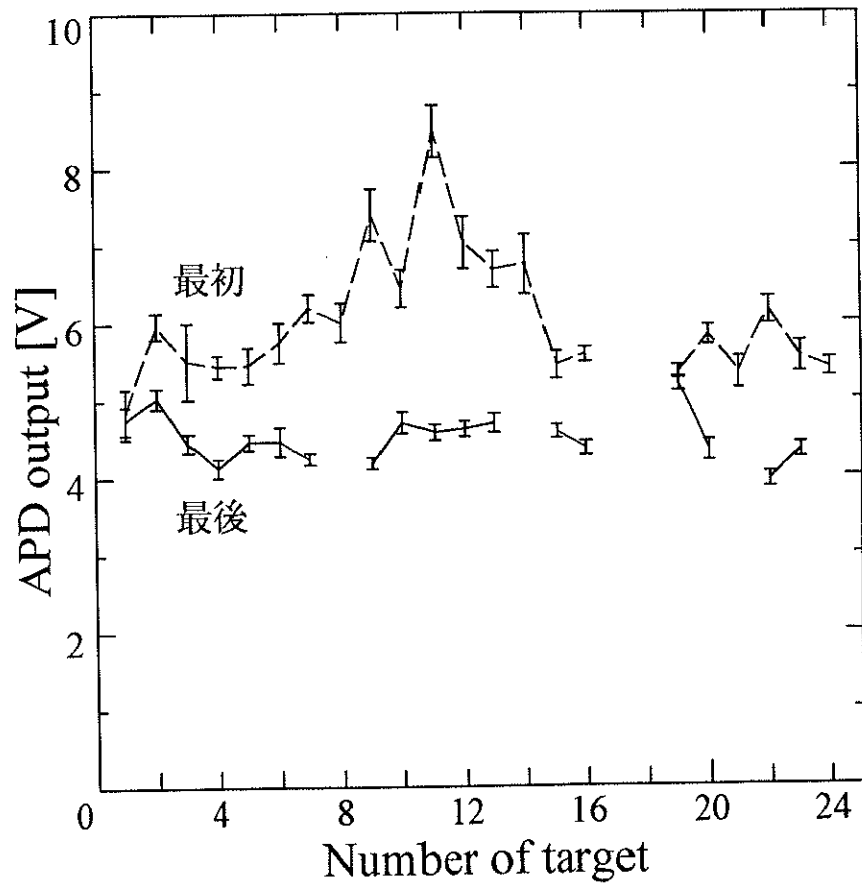


図 3 - 6 ターゲットを交換するごとに測定した X線出力の変化

3-3 分光器

レーザープラズマX線源では、様々な波長のX線が発生する。光電子分光法において光電子の運動エネルギーを分析し元素を識別するためには、照射するX線を単色化することが重要である。本研究では図3-7に示すトロイダルミラーと凹面回折格子からなる光学系を組んでX線の単色化を行った。

ここで用いた凹面回折格子は、従来の等間隔凹面回折格子と違い溝が不等間隔に付いたものである。図3-8に示すように、従来の凹面回折格子は分光した各波長の光がローランド円上に1次元に集束するのに対し、不等間隔凹面回折格子は特定の波長領域において集光面が平面になるように規則的に不等間隔の溝を付けたものである。これにより、得られるスペクトルを平面状のフィルムやCCD等の検出器で一度に撮影することができる。中心から位置 w での溝間隔 σ は以下の式によって成り立つ[3-2]。

$$\sigma = \sigma_0 / \left(1 + \frac{2b_2}{R} w + \frac{3b_3}{R^2} w^2 + \frac{4b_4}{R^3} w^3 \right) \quad (3-1)$$

ここで、 σ_0 は中心部分の単位長さ当たりの溝数、 R は凹面鏡の曲率半径、 b_2 、 b_3 、 b_4 はルーリングパラメーター (Ruling Parameter) と呼ばれる溝を引く時に設定されるパラメーターで、この凹面回折格子の場合、

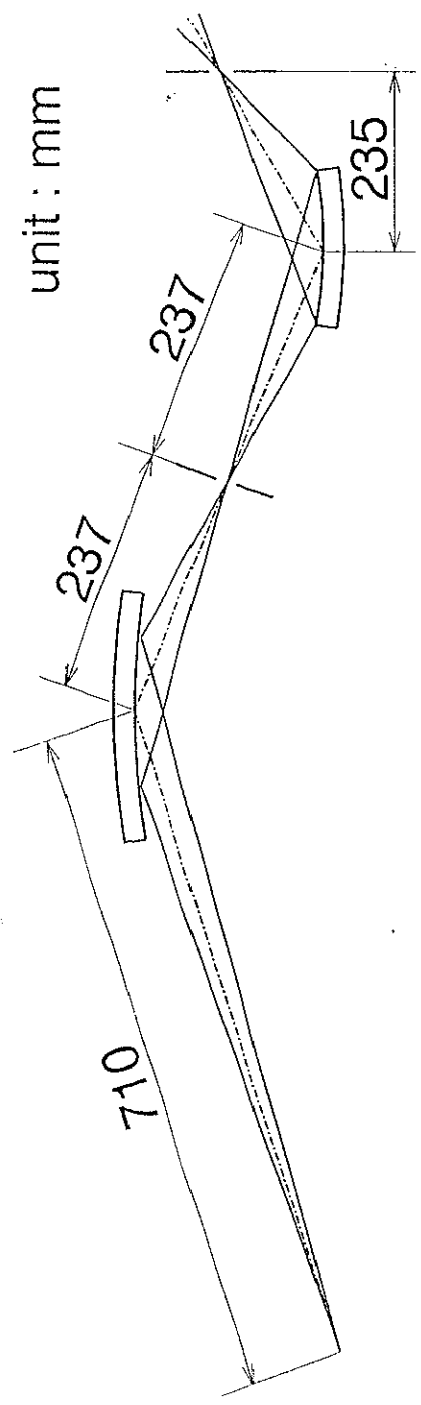
$$b_2 = -20$$

$$b_3 = 455.8$$

$$b_4 = -1.184 \times 10^4$$

である[3-2]。また、その他のパラメーターを表3-4に示す。これらよりこの回折格子の溝は、 $0.69 \mu\text{m}$ から $0.99 \mu\text{m}$ の間の間隔で刻まれている。この凹面回折格子を用いる理由は、平面上に集光しているX線の波長を選択するのに一次元方向のみに絞りを動かすだけで良いからである。波長 λ と集光面

Meridional Plane



Sagittal Plane

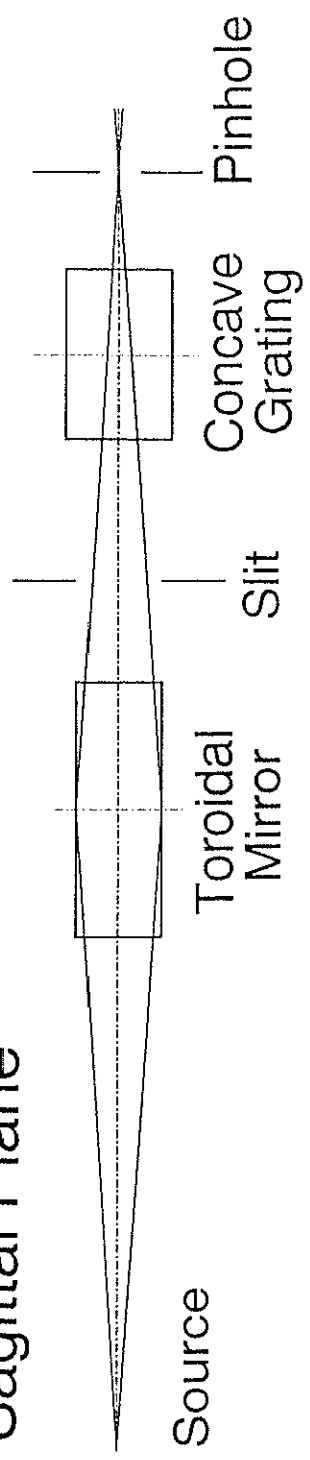
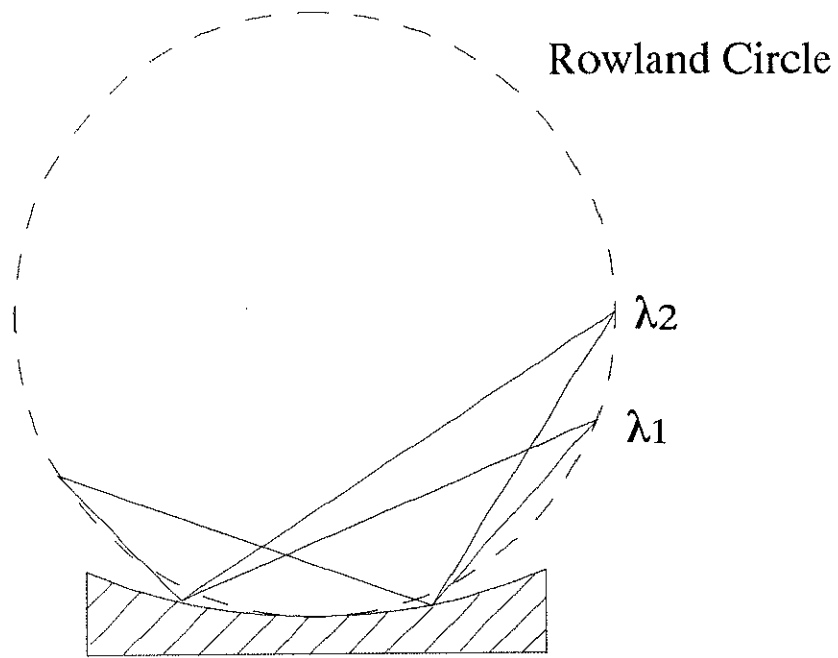
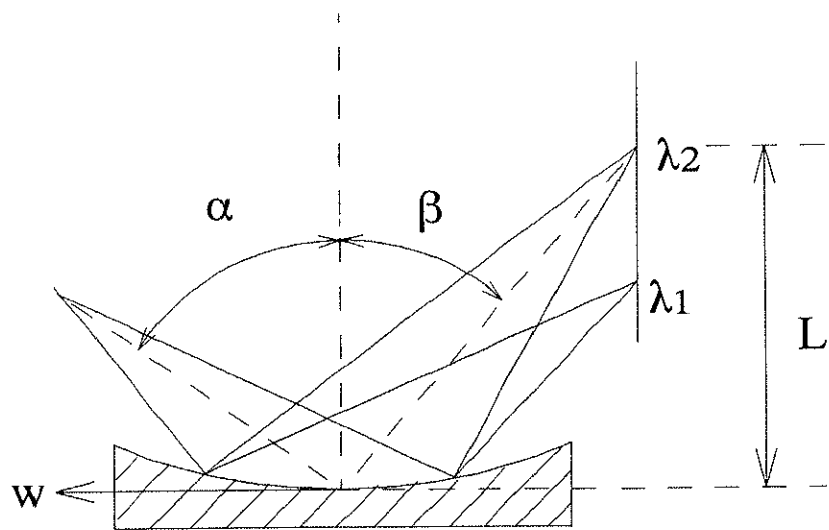


図 3 - 7 分光器の概略図



Conventional Concave Grating



Varied Spacing Concave Grating

図 3 - 8 等間隔凹面回折格子と不等間隔凹面回折格子の違い

	Toroidal mirror	Concave grating
Radius of curvature	6792 mm (meridional) 37.20 mm (sagittal)	5649mm
Grazing angle	3°	3°
Size	100 x 20 mm ²	50 x 30 mm ²
Effective area	96 x 16 mm ²	46 x 26 mm ²
Materials	Fused quartz	Pyrex glass
Coated materials	Cr : 10 - 20 nm Pt : 100 nm	Au
Nominal groove number		1200 grooves/mm (varied space)
Blaze angle		3.2°

表3-4 トロイダルミラーと凹面回折格子のパラメーター

上の位置との関係は、凹面鏡中心部分の接線と集光点との距離をL、回折角を β ($\beta < 0$) とすると

$$L = -235 \times \cot \beta \quad (3-2)$$

となる。ただし回折角 β は、

$$m\lambda = \sigma_0(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (3-3)$$

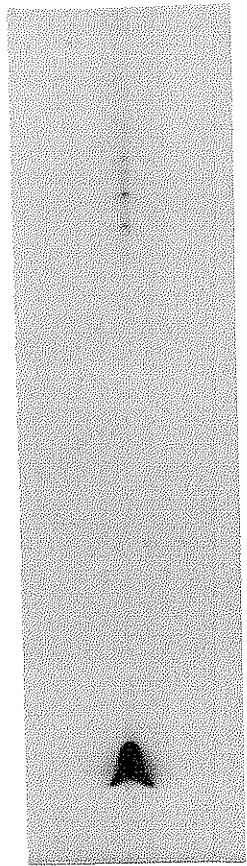
という関係になり、ここで m は回折の次数、 α は入射角 (87°) である (図3-8)。

凹面鏡は一次元方向の収束しかよい集光が得られない。光量を多く得るためには二次元に収束させた方がよい。このために、凹面回折格子の上流側にトロイダルミラーを置き、トロイダルミラーの曲率半径を

- ① サジタル面における倍率を1対1にする
- ② トロイダルミラーとスリットの間の距離を凹面回折格子とスリットの距離と等しくする
- ③ 5. 2 nmのX線で最適になるようにする

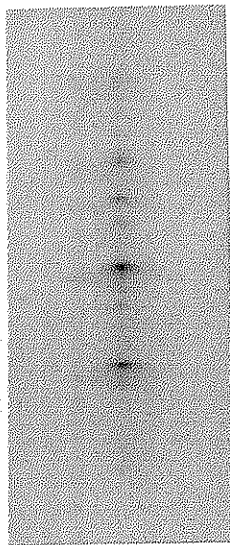
という条件に合うように設計することにより、二次元的な集光を得た。用いたトロイダルミラーのパラメーターを表3-4に示す。

この分光器を用いてアルミニウムターゲットから発生したX線のスペクトルを撮った。分光器の集光面上にミニコピーフィルム (富士フィルム製) を置き、トロイダルミラーと凹面回折格子の間のスリットの幅を2 mmにして1発のパルスX線で撮った。その結果を図3-9に示す。(a), (b), (c)はそれぞれスペクトル全体、0次光、1次光の写真である。また、(c)の横方向のプロファイルを図3-10に示す。各ラインスペクトルはアルミニウムのイ



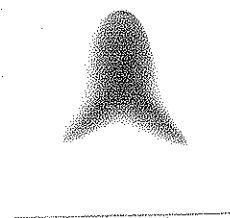
(a) 全体の写真

5mm



(c) 1次光の写真

1mm



(b) 0次光の写真

1mm

図3-9 アルミニウムからのX線スペクトル

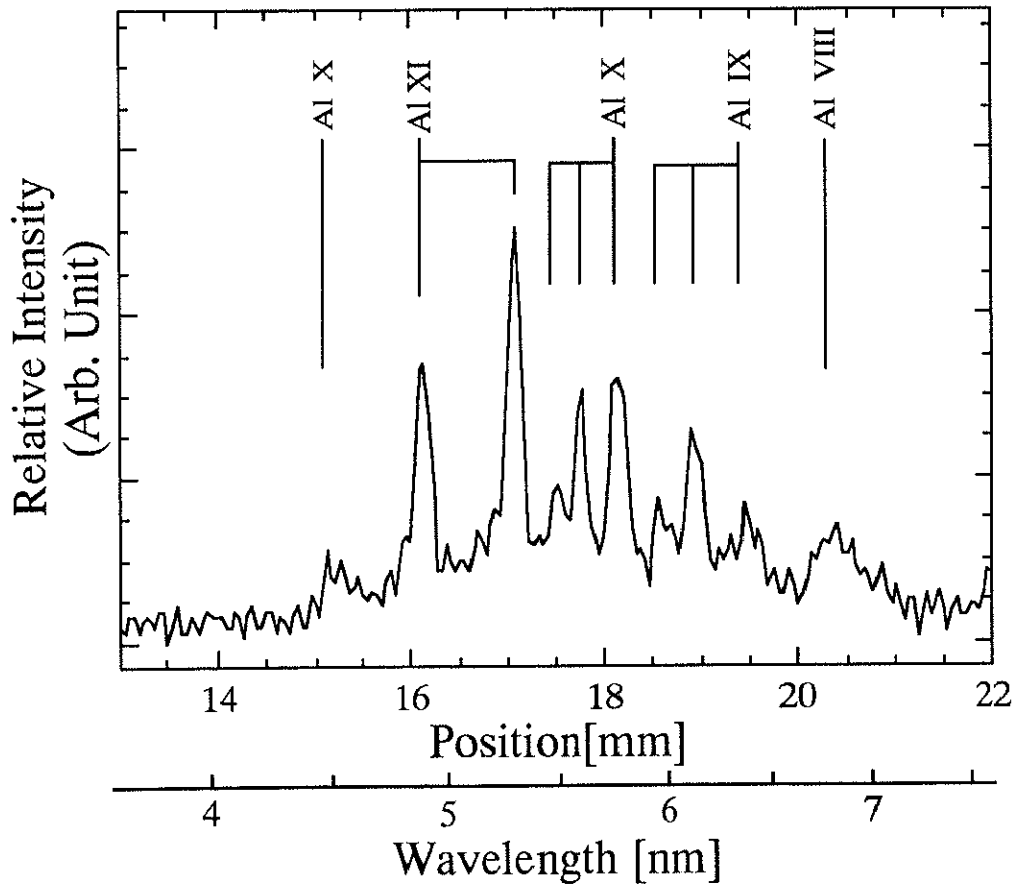


図 3-10 X線スペクトル1次光のプロファイル

オン価数が+7 (VIII) から+10 (XI) までのイオンから発生したX線に対応する[3-3]。本研究ではこれらのスペクトルの内、強度の強い5.2 nm付近のピークの軟X線を用いることにした。このラインには細かく見ると5.23 nm (237.1 eV; Al XI) と5.24 nm (236.4 eV; Al XI) の二つの強度の高いライン ($1s^2 2p \leftarrow 1s^2 3d$) と中心部分の強度が一桁以上弱い5.20 (238.6 eV; Al X) のライン ($2s^2 \leftarrow 2s 3p$) からなり[3-3]、集光面上での5.20 nmと5.23 nmの波長間、5.23 nmと5.24 nmの波長間の間隔は式(3-2)、(3-3)より74 μm 、34 μm である。

この波長の集光面上での光量をフィルムの黒化度から見積もった。図3-11 [3-4]に示したミニコピーフィルムのCK α 線を用いた時の感度曲線を参考にして求めた結果、辺の長さが約250 $\mu\text{m} \times 1\text{mm}$ の菱形の領域に1パルス当たり約 10^7 個のX線が来ており、その中にある約50 $\mu\text{m} \times 90\ \mu\text{m}$ のX線の集まっている楕円の領域には、全体の約40%に当たる 4×10^6 個のX線が来ていると見積もられた。

このX線を選択するために、集光面上にピンホールを置いて用いた。

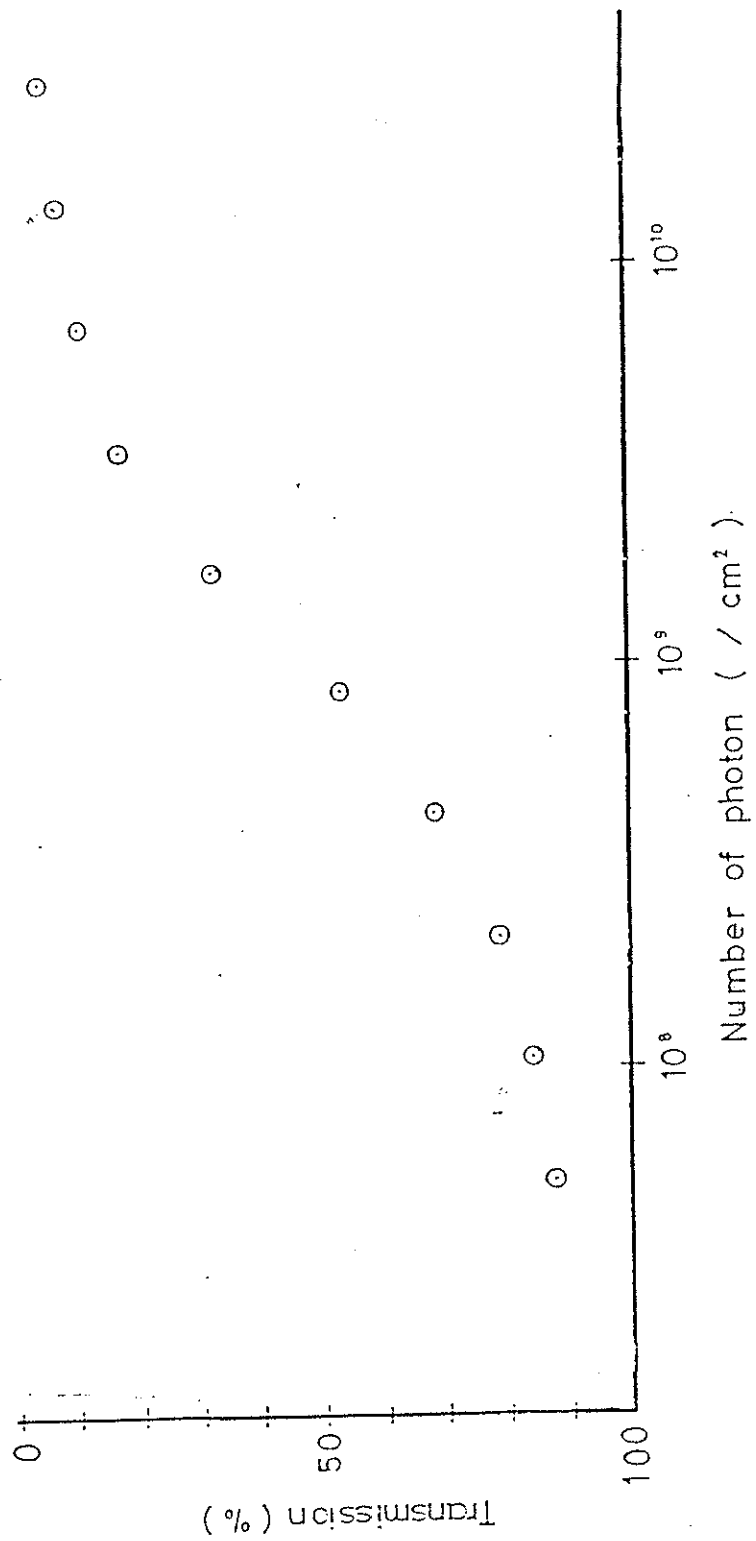


図 3-11 ミニコピーフィルムのCK α 線に対する感度曲線 [3-4]

3-4 ウォルターミラー

試料面上に微小スポットを作り微小領域の測定を行うために、X線を集光させる光学素子を用いた。X線領域では、物質の屈折率が1よりわずかに小さいためレンズの様な屈折を利用して光を集める素子を用いることが出来ない。そこでX線領域では、回折や反射を使った素子を用いている。

本研究では、この中で全反射を利用したウォルターミラーを用いる。ウォルターミラーは、1951年にウォルター (V.H. Wolter) によって提案された光学素子[3-5,6]で、結像条件を満たしコマ収差を極力抑えるために2つの二次曲面体を組み合わせてできた結像素子である。回転楕円面の焦点Aに分光器のピンホールを、回転双曲面の焦点Bに試料を置き二つの面で反射させることにより、ピンホールの縮小された像が試料面上に投影される。よってスポットの大きさは、ピンホールの大きさによって決まってくる。今回用いたミラーは回転楕円面と回転双曲面を組み合わせたもので、そのパラメータを図3-12に示す。このミラーの縮小率は $1/32$ で、平均斜入射角は 40 mrad 、ミラーの材質はパイレックスガラス、ミラー反射面の平均自乗粗さは 0.7 nm である[3-7]。またこのミラーの反射率は 5.24 nm の軟X線の時、1回反射で約 77% (計算値：図3-13) となり、2回反射させるので約 60% になる。

次にこのミラーの理論的な性能を調べるために、点光源を結像した時の像面におけるスポットのプロファイルを計算した。点光源を点Aに置いた時、点Aから光軸に対して垂直な方向に $25\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ ずらした時の 5.24 nm の軟X線におけるスポットの結果をそれぞれ図3-14 (a)、(b)、(c)に示す。これらのピークの半値幅を見るとそれぞれ 10.6 nm 、 10.7 nm 、 11.4 nm とほとんど変化が見られない。このことから、 $\phi 200\text{ }\mu\text{m}$ のピンホールを用いてもスポットの大きさが幾何光学的な縮小率から計算した大きさより極端に大きくなり、ほぼ期待する大きさのスポットが得られることがわかった。

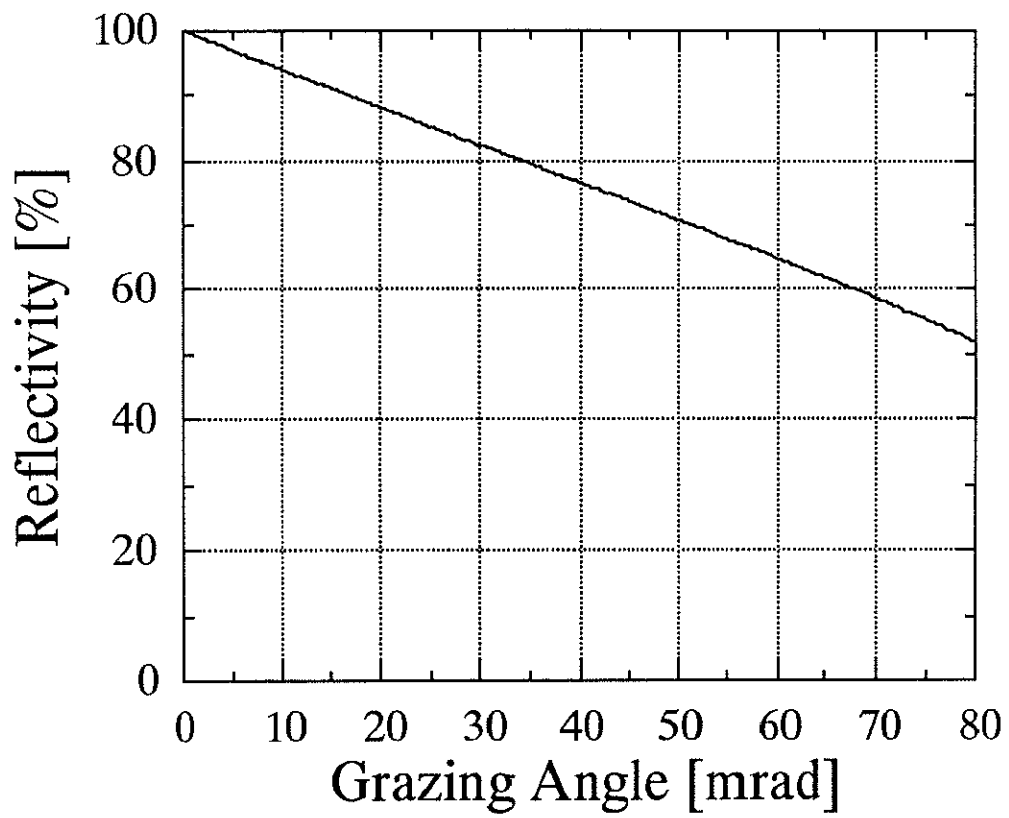


図 3 - 1 3 ウォルターミラーの反射率

波長 : 5. 2 4 n m

材質 : パイレックスガラス

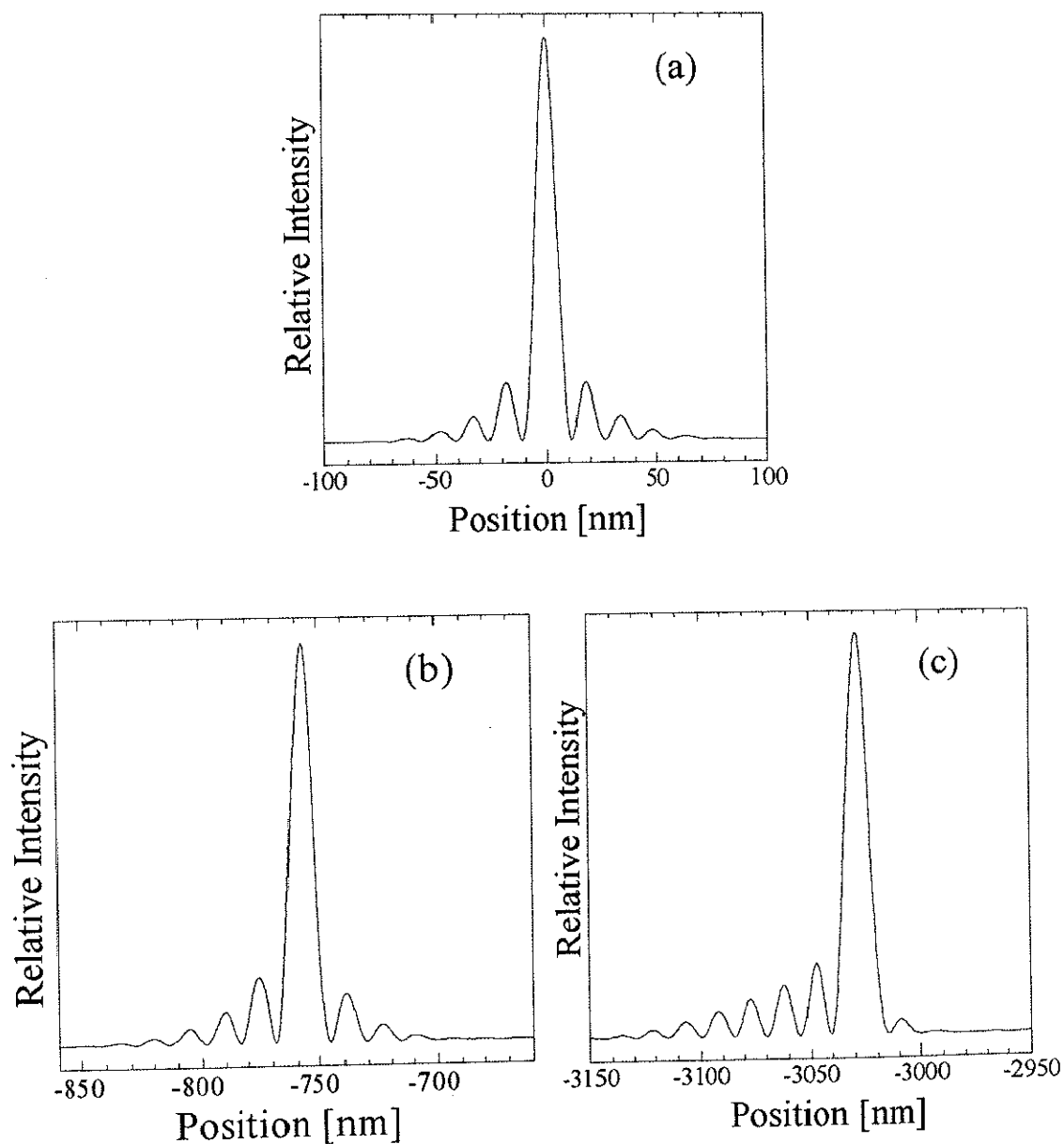


図 3 - 1 4 点光源を用いたときのスポットの計算結果
 波長：5. 2 4 n m
 (a) 焦点上
 (b) 焦点から 2 5 μ m ずれた時
 (c) 焦点から 1 0 0 μ m ずれた時

3-5 試料チャンバー

試料はウォルターミラーの光軸に対して45度傾いたステージ上に置き、X線スポットを動かさずに試料を走査することによって試料面上の様子を観察した。ステージは試料面に平行な二次元方向に精度0.1 μm 、稼動範囲8 mmのステッピングモーター（Klinger Scientific Co. 製）で動かすことができる。また、ミラーの光軸方向にもステッピングモーターと歯車を組み合わせて、0.1 μm 以下の精度で動かすことができ、最も小さくなるスポットで実験を行った。

試料チャンバー内の真空は観察時に高真空で常に一定にしておく必要がある。しかしながら、X線源からの飛粒により真空が一桁近く悪くなる。それを防ぐためにピンホールとミラーの間の光路上にコロジオンの薄膜を入れて試料チャンバー内の真空を保持した。このコロジオン膜は0.1 μm オーダーの厚さの薄膜で、コロジオンの固まりを溶液で溶かし水面に垂らして作製し、それを支持するフレームですくいあげ、装置にセットした。

3-6 エネルギー分析器

エネルギー分析器はXPSで最も重要な部分である。本研究で用いたエネルギー分析装置は、(株)リガクで市販されているシステムの一部を用いたもので、電子レンズ・エネルギー分析器・検出器・アンプ・カウンター・電圧制御装置・コンピューターからなる。試料から発生した光電子は電子レンズで減速・集光され、同心半球型エネルギー分析器で特定のエネルギーを検出する。

特定のエネルギーの光電子を選別するには、電場や磁場中に電子を通せばよい。定まった場の中に定まったエネルギーをもって入った電子の描く軌道は一つに定まるので、その場の入口と出口にスリットを置けば、二つのスリットを通ることのできるエネルギーをもった電子のみを検出することができるため、電子のエネルギーを選ぶことができる。

本装置で用いた分析器は同心半球型エネルギー分析器で、半径の異なる2つの半球を中心が一致するように組み合わせたものである(図3-15)[3-8]。内球電極と外球電極の半径をそれぞれ R_1 、 R_2 、両極に加える電圧を V_D とすると、中心軌道(半径 R_0 の円軌道)を通る電子の運動エネルギー E_0 は、

$$E_0 = \frac{eV_D}{\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_2}} \quad (3-4)$$

となる。この式から電圧 V_D を決めると中心軌道を通る電子の運動エネルギーが決まることがわかる。

次に、分析器の分解能について述べる。電子がエネルギー $E_0 + \Delta E$ で α 、 β のひろがり(図3-15)をもって入射スリット上の位置 x_1 から入射し、出射スリット上の位置 x_2 から出たとする。この時 x_2 は次のような関係式が成り立つ。

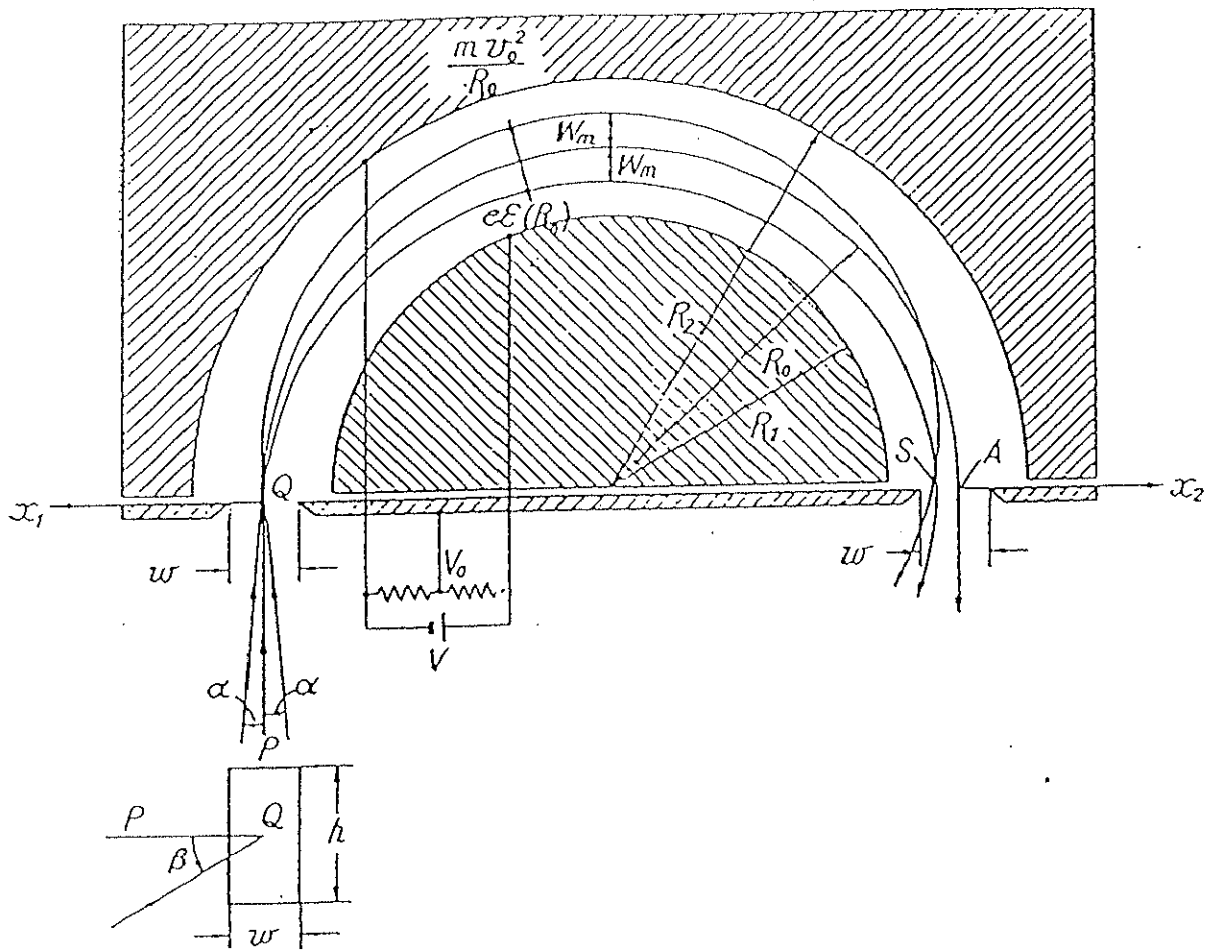


図 3 - 1 5 同心半球型エネルギー分析器の断面図 [3-8]

$$\frac{x_2}{R_0} = -\frac{x_1}{R_0} + 2\frac{\Delta E}{E_0} - 2\alpha^2 \quad (3-5)$$

ここで α は、図3-15の紙面上でPQ方向と入射方向とのなす角である。今、入射スリットの幅を ω_1 、出射スリットの幅を ω_2 、 $\alpha \ll 1$ とするとエネルギー分解能は、

$$\frac{\Delta E}{E_0} \approx \frac{\omega_1 + \omega_2}{2R_0} \quad (3-6)$$

となる。これは、分解幅 ΔE が中心軌道 R_0 を通るエネルギー E_0 （これをパスエネルギーと呼ぶ）と装置の幾何学的なパラメータ ω_1 、 ω_2 、 R_0 によって決まることを示している。また、右辺は定数になることから E_0 が大きくなると ΔE も大きくなり分解幅が大きくなることがわかる。

この装置では、電子の運動エネルギーによらず分解幅を常に一定にして測定するために、入射スリットと試料との間に阻止電位をかけ分析器に入る電子の運動エネルギーをパスエネルギー E_0 まで落とす方法を用いている。例えば、運動エネルギー E_1 の光電子を阻止電位でパスエネルギー E_0 まで下げて分析器に入れ検出したとする。ここで運動エネルギー E_2 の光電子を上と同じエネルギー分解能で検出する場合、阻止電位で E_2 の運動エネルギーを E_0 まで下げて分析器に入れると良い。このように、検出する光電子の運動エネルギーは違って、阻止電位でパスエネルギーの値まで運動エネルギーを落とすことによって、エネルギー分解幅を一定にすることができる。この役割をする部分が電子レンズである（図3-16）[3-9]。また電子レンズは電子の速度を下げると同時に、電子を集める働きもする。

選別された光電子は、MCP（Micro Channel Plate）で検出・増幅され、電流に変換される。この測定装置ではアノードが20個あるマルチアノード型のMCPを用いており、パスエネルギーによって決まる20個の隣り合ったあ

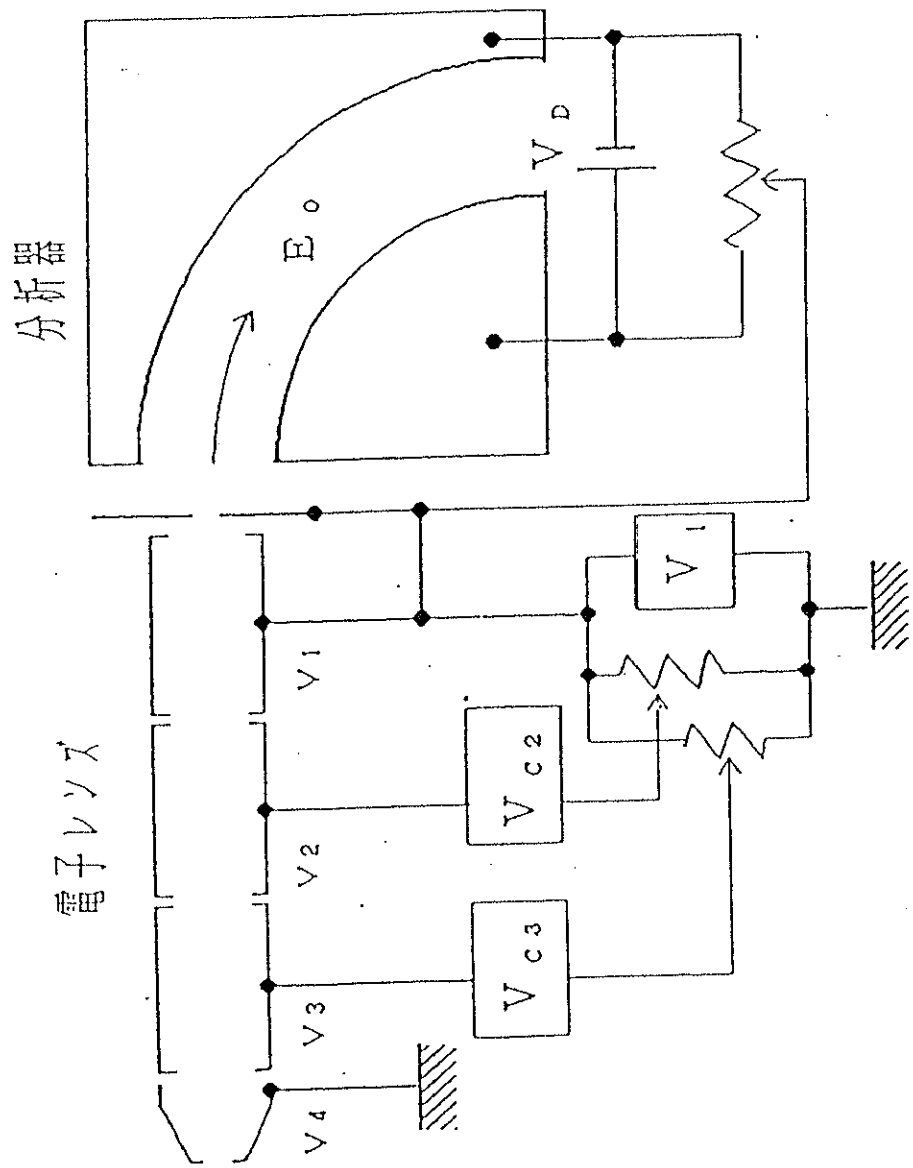


図3-16 電子レンズ [3-9]

るエネルギー領域内の電子を同時に検出することができる。

検出された信号は、プリアンプで電圧に変換し増幅され、計数器でカウント数に変換される。電子レンズの電圧や分析器の電極の電圧、ため込み時間は全てコントローラーで制御され、コントローラーへの命令はG P - I Bインターフェースを通してコンピュータ（P C - 9 8 0 1）で行う。

本研究では2種類の測定モードを用いている。一つは阻止電位を走査して広いエネルギー領域のスペクトルを得るエネルギー走査モードで、もう一つは阻止電位を固定しあるエネルギーのみを測定するエネルギー固定モードである。

エネルギー走査モードは、X P Sの測定では欠かすことのできない測定モードであり、この検出器のM C Pがマルチアノード型であるためデータの取込が工夫されている。まず運動エネルギー E_1 の電子を検出することを考える。運動エネルギー E_1 の電子は、電子レンズでパスエネルギー E_0 までエネルギーを落とされて分析器に入り、電極の中心を通り外球側から11番目[3-9]のアノードで検出される。この時他のアノードでも同時に違うエネルギーを持った電子が検出される。そのエネルギーは、式(3-6)で $\omega_1=0$ 、 ω_2 にアノードの間隔を代入した時の値を ΔE_A 、 ω_2 にアノードの幅を代入した時の値を ΔE_B とした時、外球側から n 番目のアノードには

$$E_1 + (11 - n) \Delta E_A$$

の運動エネルギーを持った電子を中心に $\pm \Delta E_B / 2$ のエネルギー幅内の電子が検出される。続いてパスエネルギーはそのまま阻止電位を ΔE_A だけ高くすると、運動エネルギー E_k の電子は12番目のアノードで検出され、他の電子も一つずれたアノード位置で検出される。このように阻止電位を ΔE_A ずつ走査しながら測定すると運動エネルギー E_1 の電子は20個全てのアノードで検出されることになる。図3-17を見ながら更に詳しく述べると、はじめ運動エネルギー E_1 の電子は阻止電位 V_1 の時1番目のアノードで検出されていた。その後阻止電位を V_2 、 V_3 ($\Delta E_A = V_n - V_{n-1}$) と走査すると、運動エネ

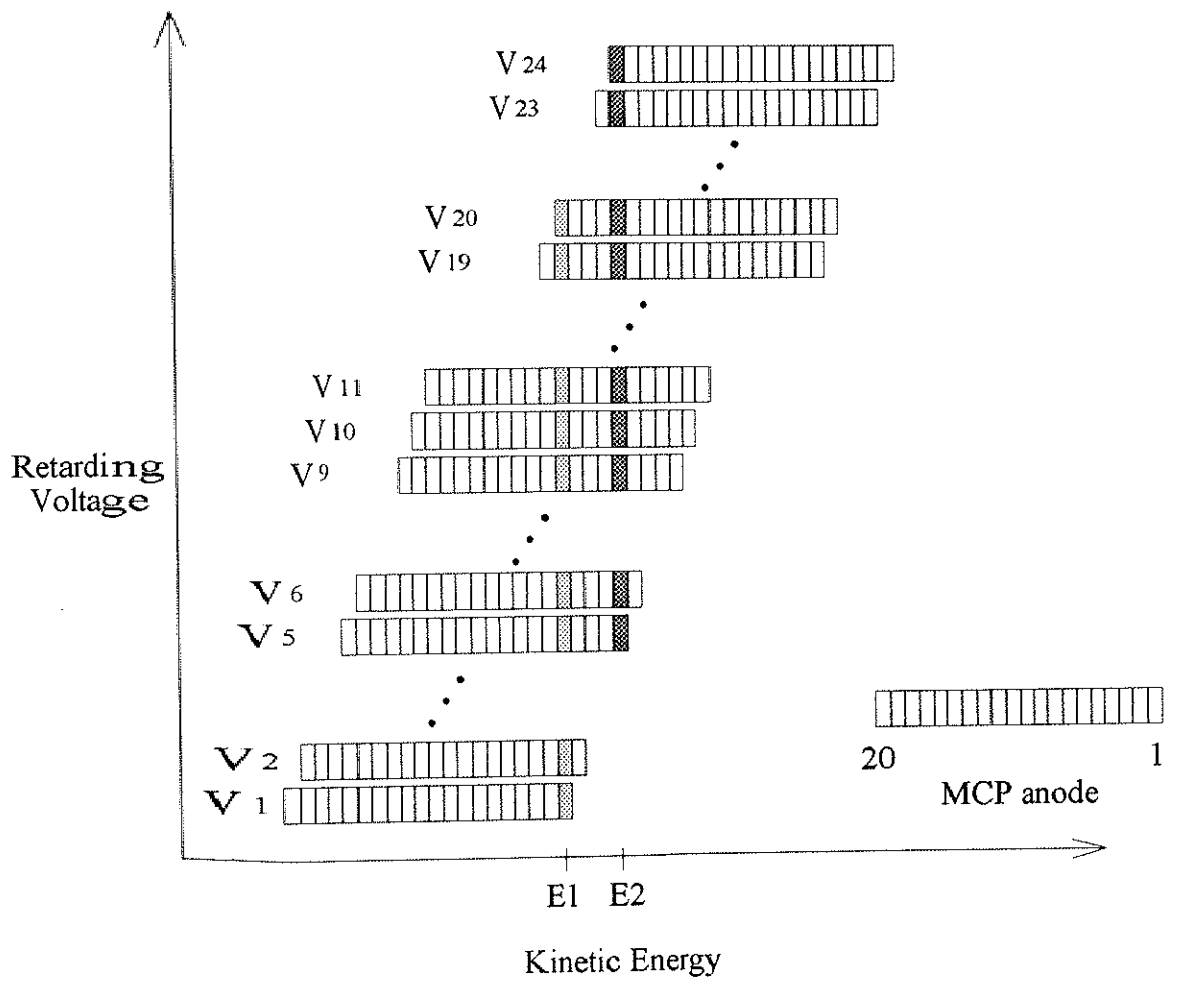


図 3 — 17 エネルギー走査モードにおける MCP アノードと検出される光電子の運動エネルギーとの関係

ルギー E_1 の電子は2番目、3番目と検出されるアノードが変わる。そして阻止電位が V_{20} の時20番目のアノードで検出されそれ以降は検出されなくなる。この装置において、運動エネルギー E_1 の電子の信号は薄く塗りつぶされた部分で検出されたカウントの総和をデータとする。また運動エネルギーが E_2 の電子の場合、阻止電位 V_5 から V_{24} までの間に検出される。よって運動エネルギー E_2 の電子の信号は濃く塗りつぶされた部分で検出されたカウントの総和になる。このように足し合わせたものをデータとして用いる理由は、各アノードで感度のばらつきがあるので足し合わせることでそのばらつきをなくすためである。

一方、エネルギー固定モードは電子レンズの阻止電位を走査せずに各アノードのデータをため込む測定モードで、試料面上の分布を調べる場合、限りのあるターゲットでなるべく多くの測定点を取りたい時に用いた。実験を行う際は感度のばらつきを緩和するために、基本的に各アノードのデータを複数個足し合わせて用いるようにした。

本装置の分析器は、

内球の半径 (R_1)	: 80 mm
外球の半径 (R_2)	: 120 mm
中心の半径 (R_0)	: 100 mm

であり、MCPは3段のMCPで、

アノード数	: 20個 (測定時)
アノードの幅	: 1.5 mm
アノードの間隔	: 1.6 mm

である (図3-18) [3-9]。

分析器のエネルギー分解能は式(3-6)から求めることができ、入射ス

リット幅 ω 1ごとに計算したものを図3-19に示す。

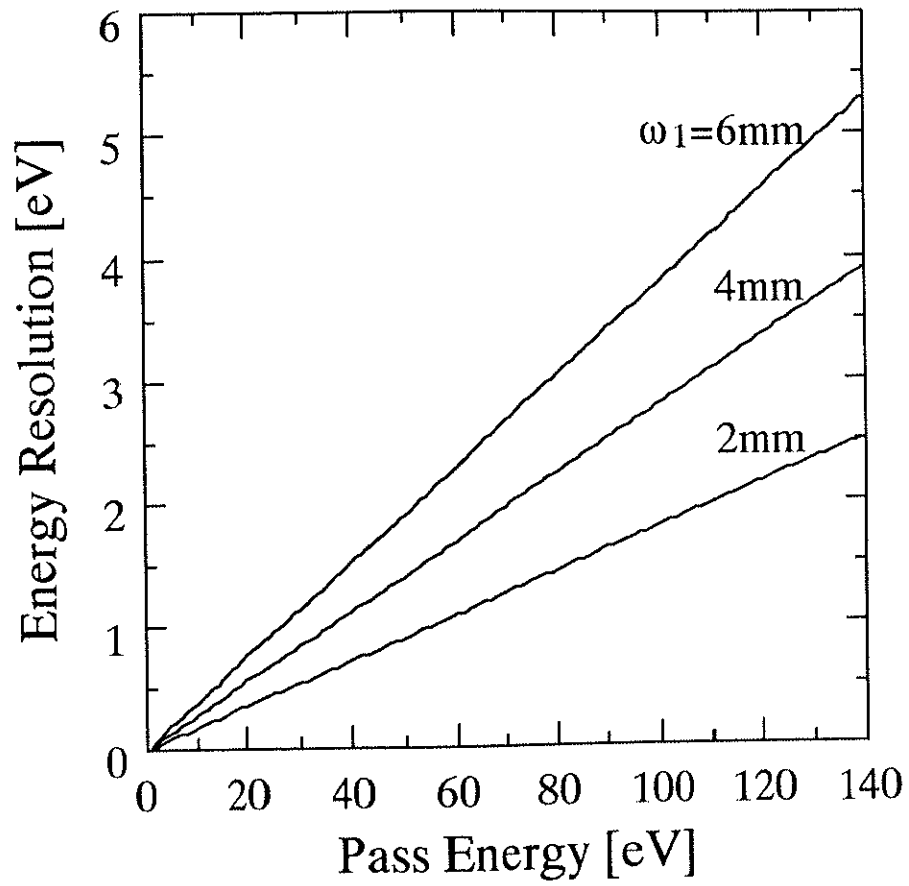


図 3-19 エネルギー分析器のエネルギー分解幅

参考文献

- [3-1] 浜松ホトニクスからの資料より
- [3-2] T. Kita, T. Harada, N. Nakano and H. Kuroda : Appl. Opt. **22** (1983) 512.
- [3-3] R.L. Kelly : Atomic and Ionic Spectrum Lines Below 2000 Angstroms ; Hydrogen Through Argon, (1982).
- [3-4] 塩沢崇永 : 筑波大学大学院修士課程理工学研究科修士論文.
- [3-5] V.H. Wolter : Ann. Phys. 10 (1952) 94.
- [3-6] V.H. Wolter : Ann. Phys. 10 (1952) 286.
- [3-7] T. Onuki, K. Sugisaki and S. Aoki : SPIE **1720** (1992) 258.
- [3-8] 鈴木洋、脇谷一義、吉野益弘 : 分光研究 **19** (1970) 18.
- [3-9] (株)リガクからの資料より