

用語解説(49)

『電子分光装置』

塩川善郎

日電アネルバ(株)

〒183 東京都府中市四谷 5-8-1

電子源 (Electron Source)

真空中に電子を放出させる部品で、エミッター、カソード(陰極)とも呼ばれる。電極なども含めたユニットとしては電子銃と呼ばれることが多い。AESなどの励起源に使われ、基本的にはSEM用と同じである。

電子源としてはフィラメントを2000°C程度に通電加熱して電子を放出させる「熱電子放出型」が最も一般的である。ヘアピン型Wフィラメントとサブレス電極(ウェーネルト)、引出電極(陽極:アノード)の組合せで実効サイズ約50 μm 、輝度 $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{str}$ の電子源を形成させることができる。

Wフィラメントの代わりに「LaB₆」(ランタンヘキサボライト)のチップを使用すると輝度を一桁近く向上でき、寿命も長くなる。最近のAESではほとんどがLaB₆の電子源を使用している。

より高輝度の電子源としては、先端を非常に鋭くしたWチップ(曲率半径約0.1 μm)からトンネル効果により電子を引き出す「電界放出型」(フィールドエミッション:FE)がある。陽極との組合せで実効サイズ約50 \AA 、輝度 $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{str}$ が得られるため極微小ビーム用電子源としては非常に優れている。しかし、 10^{-8} A 以上、0.1 $\mu\text{m}\phi$ 以上の大電流ビームに対しては陽極付近の収差により熱電子タイプに比べ性能が悪くなってしまう。また、安定性、真空条件に難があるため電子分光用としてはほとんど使用されていない。

室温のWチップの代わりに1500°C程度に加熱したZrWを使用した「熱電界放出型」(サーマルフィールドエミッション:TFE)は大電流ビーム特性、真空条件が改善されるので、最近AESに使われ始めてきた。

電子レンズ (Electron Lens)

電子ビームを収束するためのユニットで、光学レンズの凸レンズに相当する。電子照射系の場合には電子源か

らの電子ビームを試料上に収束・照射させ、インプットレンズの場合には試料からの電子をアナライザへ投影・輸送させる。

電子レンズには電磁型と静電型があり、ともに軸対称の磁界・電界を形成することによりレンズ作用をもたせている。電磁型はコイルとヨーク、ポールピースにより構成され、収差が小さいため主に微小ビームを形成するときに使用される。SEMはすべて電磁型を使用しているが、大きさ、超高真空適合性、漏洩磁場の問題から電子分光用にはあまり使用されていない。

静電型でユニポテンシャルレンズ(アインツェルレンズ)と呼ばれているものは3枚の電極で構成され、両端を同じアース電位、中央を負電位とする。最も一般的で多くの用途に使用される。2枚の電極で両端を異なる電位とするのはバイポテンシャルレンズと呼ばれインプットレンズの対物レンズ(試料に最も近い電子レンズ)などに使用される。

電子照射系では複数の電子レンズを使用するが、通常対物レンズの性能により全体の性能が決まってしまう。また、対物レンズの性能は試料との距離(作動距離:ワーキングディスタンス)に強く依存する。そのため、対物レンズは装置の用途やアナライザ形状などに対応してそれぞれ工夫された独特な構造・形状となっている。

偏向器 (Deflector)

軸に直角方向に一樣な磁場・電場を形成して電子ビームの進行方向を変更させるためのユニット。像観察するための走査用としてはスキャナー、分析点移動用としてはディフレクターと呼ばれることもある。電子照射系内の軸合わせ用はアライナーとして区別される。

電子レンズと同様の理由および偏向速度の点で静電型が多く使われる。4極構成が一般的であるが、静電型では収差を小さくするために8極、16極とすることもあり、マルチポール偏向器と呼ばれている。

また、対物レンズの性能を優先させるためスキャナーを対物レンズより上に設置する場合もある。この場合には2組のスキャナーを連動させビームを振り戻して、常に対物レンズの中心をビームが通るようにするダブルスキャン(2段偏向)方式が用いられる。

偏向器に類似のものとして、8極構成により鞍状の磁界・電界を形成させビームが真円となるように補正・整形するスティグメータ(非点補正器)がある。微小ビームを形成するために非常に重要なものである。8極構成のスキャナーと電極を兼用させることが多い。図1に偏向器、非点補正器の模式図を示した。

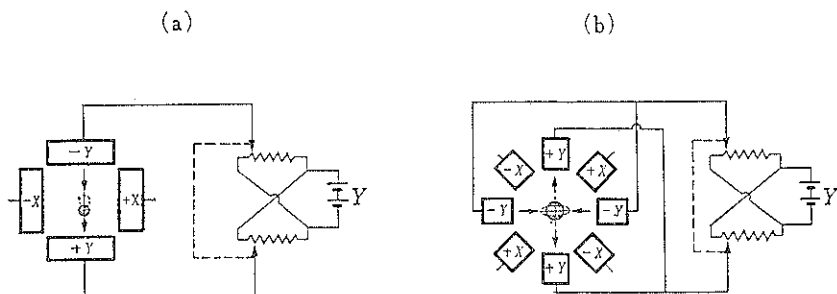


図 1 (a) 偏向器, (b) 非点補正器

なお、これらのアライナー、スキャナー、スティグメーターと前出の電子源、電子レンズなどで電子照射系が構成されている（この電子照射系全体を電子銃と呼ぶこともある）。

収差 (Aberration)

電子レンズ、偏向器、アナライザーなどを通過したときに生じるビームの歪みのこと。この歪みによりビームが変形したり、太くなったりする。

電子レンズの場合には、レンズの中心と端で焦点距離が異なるために起こる「球面収差」、ビームのエネルギーが異なるために起こる「色収差」、ビームが波動性をもつために起こる「回折収差」、またレンズの機械的精度により軸対称性が悪いために起こる「非点収差」などがある。このうち、非点収差はスティグメーターによりほぼ完全に補正可能であるが、球面収差、色収差、回折収差は本質的なもので単独で補正することはできない。ただ、レンズ設計、アパーチャ径の適正化によりこれらの低減化や均等化はある程度可能である。しかしながら最終的には対物レンズの球面収差が支配的となることが多い（低加速ビームの場合には色収差が支配的となる場合もある）。

偏向器においても偏向角が大きい場合には収差が発生するが、電子分光装置ではあまり問題とならない。

アナライザーでは収差は非常に大きな問題となる。そのため機械的精度だけでなく端面の電界補正や浮遊磁場の低減などの対策が重要になる。

X線源 (Xray Source)

X線を発生し試料に照射するユニット。ESCA (XPS) の励起源で、AES の電子照射系に対応する。通常、Al K α 線 (1486.6 eV)、Mg K α 線 (1253.6 eV) などの軟X線が使用される。

フィラメント、強制水冷されたアノード、薄い Al 箔の窓により構成されている。アノード表面に Al や

Mg がコーティングされている。フィラメントからの 10 kV、30 mA 程度の電子線がアノードを衝撃し、これにより放射された X 線が Al 箔を通過して試料に照射される。Al 箔はバックグランドとなる制動放射 X 線や迷電子の除去および汚染の防止用である。2 種類のアノードを組み込みフィラメントの切り替えのみで X 線種を変更できるものもある。X 線用レンズは実現困難であるため、X 線源をできるだけ試料に近づけて使用する。

Al K α 線、Mg K α 線は 1 eV 弱のエネルギー幅をもっているため、これ以上の微細構造の分光をするためには、結晶による回折を利用したモノクロメータを使用する必要がある。モノクロメータを使用するとエネルギー幅を小さくできるだけでなく、サテライトピークやバックグランドも除去される。さらに、結晶の集光作用を利用して 100 μm 程度の微小部分析を行わせている例もある。

新しい X 線源としては SOR による放射光が期待されるが、まだ一般使用にはほど遠い。なお、ESCA に類似の手法である UPS の光源には希ガスの放電管が使用される。

CMA (Cylindrical Mirror Analyzer)

試料から放出された電子をエネルギー分光 (分析) するアナライザーの一種。静電・分散方式のアナライザーで円筒鏡型分光器とも呼ばれる。非常に簡単な構造で高い検出効率が得られるうえ、点光源、分解能特性などでも AES と相性がよいため、AES 専用装置のアナライザーにはほとんど例外なく CMA が使用されている。

CMA は、図 2 に示したように円環状の取込口のある内筒、同軸に取り付けられている外筒、軸上のスリット、検出器などにより構成されている。内筒はアース電位とし外筒にのみ負電位を印加し、内筒、外筒間でエネルギー分散させて、特定エネルギーの電子のみスリットを通過させて検出する。

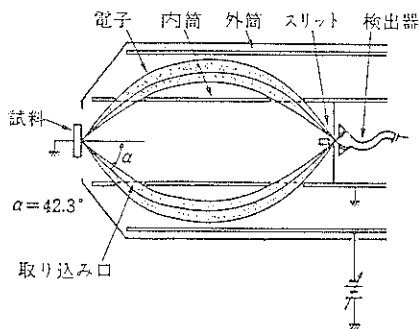


図 2 CMA

CMA の最も大きな特長は、取込角を 42.3° とすると角度に対する二次の収束条件を満足することである。すなわち電子の取込開き角を大きくしても分解能の劣化が非常に少なくなっている。そのため開き角を 12° まで広げても AES に必要な相対分解能 0.3% を確保することができる。そのうえ軸まわり全周にわたって取込みが行われるため透過率(検出効率: 全放出電子に対する検出可能電子の割合)が 10% 以上の非常に高い値が得られている。これは従来の CHA の一桁も高い値である。なお、電子銃までも含んだフランジマウントの AES 分析ユニット全体を CMA と呼んでしまう場合もある。

CHA (Concentric Hemispherical Analyzer)

CMA と同じく静電・分散方式のアナライザーの一種で、同心半球型分光器、また単に半球型分光器 (HSA) とも呼ばれる。その他、SCA, SSA とも略称される。高い分解能で広い面積の分析ができるため、ESCA (XPS) に適している。

CHA は、図 3 に示すように半円球の内球、同心に取り付けられた外球、スリット、検出器、そして試料との間に設置されたインプットレンズ (トランスファーレンズ) などにより構成される。CHA では分解能を上げるため電子は減速して分光される。そのためインプットレンズの各電極および内球、外球などに複雑な電位が印加される。

エネルギーの掃引には一定比率で減速するモード (FRR, または CRR) と一定通過エネルギーに減速する

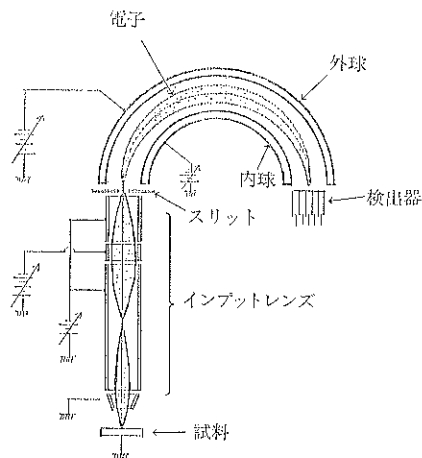


図 3 CHA

モード (FPE, または FAT, CPE, CAT, CAE, CAR) の 2 つのモードがある。FRR では相対分解能、透過率が一定となり、広い範囲の測定が可能。FPE では絶対分解能が一定で定量が可能となる。

MCD (マルチチャンネルディテクター) などの高機能検出器の設置が容易なこと、取込角が一方で角度依存測定が可能なことなどの特長もある。一般に CHA は大型で構造が複雑なうえ調整・操作も簡単ではないが、このように高性能・多機能な分光能力をもっているため、ESCA 以外にも UPS, ELS などの多くの研究用電子分光装置に使用されている。

最近、インプットレンズの改良が進んでおり、検出効率の向上だけでなく、スリット上への投影による $100 \mu\text{m}$ 程度の微小部分分析も可能となってきている。

文 献

- 志水隆一, 吉原一紘編: “実用オーグジュ電子分光法” (共立出版, 1989).
- M. P. シーア, D. ブリックス編: “表面分析 上巻” (アグネ承風社, 1990).
- 日本学術振興会 141 委員会編: “マイクロビームアナリシス” (朝倉書店, 1985).