

MBS A1 高機能超高分解能光電子分光器の開発

Development of the Multi Functional Super High Resolution MBS A1 Photoelectron Analyser

松木 満都世^a, Baltzer Peter^a

Mitsuse Matsuki and Peter Baltzer

1. はじめに

1887年ヘルツにより発見され、アインシュタインによって始めて説明された光電効果を利用し、光励起により放出された電子のエネルギーを詳細に分析することで、電子を放出した物質の状態を分析することが可能である。この手法はスウェーデン国ウプサラ大の教授であったカイ・ジーグバーンが ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) という論文にまとめ、1982年にノーベル賞を受賞した。その後、光電子分光は電子エネルギー分析器(以下アナライザーと呼ぶ)の進歩と共に、固体のみならず気体、液体試料においてもその分子の結合状態や電子状態を知る重要な手法として、多くの研究者に利用されている。また、電子を励起する光についても室内用の X 線源、VUV 光源のみならずシンクロトロンによる放射光やレーザー光を用いることによって、各研究者の最も興味のある試料及びその状態について詳細に分析することが可能となってきた。

当社は 2001 年設立の若い企業ながら、静電半球型のアナライザーとしては確実に世界最高であるアナライザーのエネルギー分解能 1 meV 以下を達成する装置、MBS A1 の開発に成功した。この A1 アナライザー 1 号機は 2003 年春分子科学研究所に納品され、現在 UVSOR BL5U にて稼動中である。その後、現在までに納品を完了した装置は 10 機を数えるが、これらのアナライザーはいずれも高いエネルギー分解能のみならず、電子が試料から放出された時点での角度情報をあわせて検出する角度分解機能も有している。また、研究者の要望に応じて励起光のエネルギーが最大 14 keV の高エネルギー対応アナライザーや時間分解機能(時間分解能 10 ns)を有したアナライザーなど、様々な機能の付加にも成功した。そして最新の 10 号機はアナライザーを通過した電子の一部を取り出し、当社製スピン検出器にてスピン分解データが通常の光電子測定と平行して行える機能を有しながら、やはり確実にアナライザーのエネルギー分解能が 1 meV 以下を達成する装置である。本稿では当社にて開

発したこれら高機能且つ高分解能なアナライザーを紹介すると共に、アナライザーの性能を確認する上で大変重要な項目についてご紹介したい。

2. MBS A1 静電半球型アナライザー

2.1 構造

アナライザー部分は軌道半径 200 mm の静電半球型であり、拡大倍率 5 倍(空間分解モード)又は 1 度/mm(角度分解モード)のフォーカスが可能な機能性電子レンズを有し、検出器部分は MCP+蛍光板による光シグナルの CCD カメラによる 2 次元検出を採用した。

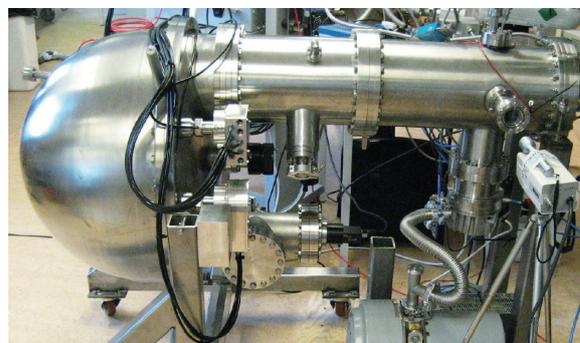


Figure 1. MBS A-1 analyser #0010 at factory test which is attached to a deflector chamber before the CCD camera. This is installed at Takahashi lab in Tohoku University.

電源部分は各電圧基盤全てにプログラマブルロジック及び特許を取得した電流沈下回路を配置し、高速で非常に安定した制御が可能となっている。

また、電源の制御及びデータ検出をコントロールするために開発したコンピュータ基盤は大型メモリを搭載し、一度開始した測定は途中でインターフェースとなる PC を停止しても継続して実行され、次に PC を接続しダウンロードするまで測定データもコンピュータ基盤上に保存される。

同時にデータ収集とアナライザーの制御を独自のコンピュータ基盤にて行うことが可能となったため、LabView のような拡張性の高いソフトをインターフェースプログラムとして採用することが可能となった。

^aMB Scientific AB

連絡先 Seminariegatan 29B, SE752 28, Uppsala, Sweden
電子メール info@mbscientific.se



Figure 2. Electronics for MBS A-1 analyser #0010 installed at Takahashi lab in Tohoku University.

2.2 エネルギー分解能

アナライザーのエネルギー分解能を知るために、当社では希ガス (Xe) を試料とし、やはり当社にて開発・実用化したマイクロ波励起の He の VUV 光源 (21.218 eV) MBS L1 にて励起し、その光電子スペクトル (Xe 5p3/2) を測定することによって見積もる方法を採用している。この輝線の場合、光電子放出によりイオン化された状態が基底状態となるため、光電子放出後の寿命が無限大となり光電子ピークの半値幅は無限小となる。つまり原理的にはこの光電子ピークの半値幅はそのまま励起光の分解能とアナライザーの分解能を反映する。ただし試料が気体の場合、熱運動のために発生するドップラー効果によるブロードニングを見積もる必要がある。

Doppler broadening

$$\Delta E(eV) = 0.722 \sqrt{(Ek \times T) / M} \tag{1}$$

Ek: Kinetic Energy, T: Temperature (K), M: Atomic mass

Deconvolution formula

$$\begin{aligned} \text{measured FWHM (eV)} \\ = \sqrt{\text{FWHM}^2 + (\text{Doppler})^2 + (\text{VUV})^2} \end{aligned} \tag{2}$$

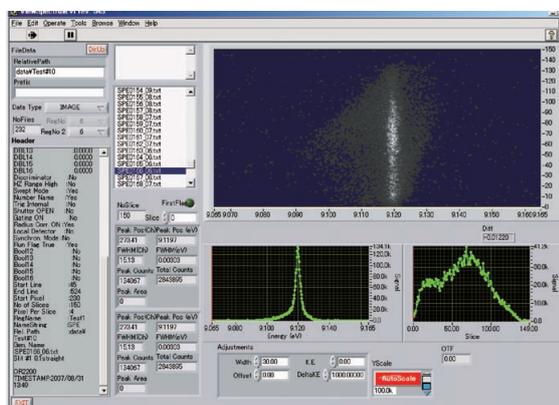


Figure 3. Factory test data of MBS A-1 analyser #0010. Xe 5p2/3 spectra using MBS GC-01 and MBS L-1. E_{pass} 1eV with 0.1 mm straight slit. It is scanned and added 4 times. The measured FWHM is 3.03 meV.

当社での出荷前性能試験においては、He による VUV 光の半値幅をおよそ 0.9 meV と見積もっている。またドップラー効果によるブロードニングは Xe を試料とした場合上記の計算式より室温で 3.25 meV となる為、実際に測定を行って得られたデータよりこれらの値を差し引いてアナライザー本体の分解能を見積もる。ところが当社の A1 アナライザーでは性能が向上し、上記の計算式では説明できない程細かい FWHM 値の測定データとなる場合が頻出している。これは、Xe の導入に使用しているガスセル内において熱運動が上記の計算式よりも低い値となる要因が存在することを示唆していると考えられる。従って、現状では実測の半値幅が 3.60 meV 以下の場合、アナライザーの分解能を 1 meV 以下という表記にとどめている。

また、アナライザーの分解能を検証する方法として、Au などの固体試料を用いてフェルミエッジの終端から近似する方法も行われるが、試料温度によるブロードニングが大きく室温での高分解能検証は難しい。しかし、近年固体試料の真空中での冷却技術が進み、絶対温度数 K という測定が可能となってきた。

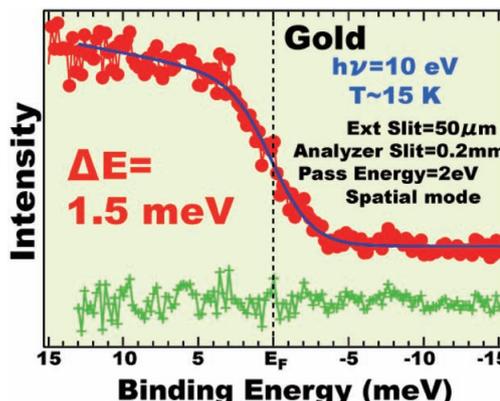


Figure 4. Performed data from BL7U@UVSOR-II with A1#0009. Taken by Dr. T. Itoh and Prof. S. Kimura in UVSOR

2.3 角度分解能

角度分解測定とは電子レンズに取り込まれる電子の試料から放出された角度情報を、アナライザーへの取り込みスリットのところで約 1度/mm としてフォーカスさせるものであるが、その分解能とは測定対象となる光電子が放出されるスポットのサイズに影響され、これが小さければ大変良い分解能 (0.1 度以下) も可能である。当社の仕様は光電子放出範囲が 3 mm φ の場合において、±5 度の範囲における角度分解能を 0.5 度としている^{1,2}。

3. MBS A1 多機能性

3.1 時間分解機能

A1 アナライザーに付加する機能として、MCP Detector の検出をコンピュータ制御により電氣的に開閉させることが可能であり、時間分解能は 10 ns である。

3.2 高エネルギー対応機能

シンクロトロン光の発達により、高輝度且つ高分解能のX線が励起光源として使用可能となってきた。このため当社では最高 14 keV までの光で励起された光電子を、最小 50 eV まで減速し測定できるアナライザー A1-HE を開発した。現在までに3機を製作し、ビームラインの製作が終了していない A1#0008 を除き稼働中である³。現在も引き続き分解能の高度化を目指し、改良を継続中である。

3.3 スピン分解対応機能

Mott タイプと呼ばれる小型の電子スピン検出器、MBS-MUSPIN の開発に成功したのは2002年であるが、当初自社製のアナライザーが存在しておらず、他社のアナライザーに取り付けるタイプであったものを A1 アナライザー様に改良した。また、2次元の検出器を使用しながらスピン分解も同時に測定できるように、一部取り出した電子をスピン検出器に取り込むための電子回折機構を開発し、現在調整中である。

4. おわりに

本稿では当社の主力製品となった最新の光電子分光器、

MBS A1 アナライザーについて詳しくご紹介させて頂いた。光電子分光は広く利用されている手法だけに、その構造や性能の確認方法についてご理解を深めて頂くことが、大変重要と思われる。今回その機会を与えて頂いた分子科学会の皆様に深く感謝の意を表すると共に、今後も分子科学発展のため信頼性の高い装置の製造開発を通じ、微力ながら尽力してゆきたい。

引用文献

- (1) Ito, T.; Im, H. J.; Kimura, S.; Kwon, Y. S. *J. Magn. Magn. Mater.* **2007** 310, 431–433.
- (2) Ito, T.; Im, H. J.; Kimura, S.; Kwon, Y. S. *Physica B* **2006** 378–380, 767–768.
- (3) Yamasaki, A.; Imada, S.; Higashimichi, H.; Fujiwara, H.; Saita, T.; Miyamachi, T.; Sekiyama, A.; Sugawara, H.; Kikuchi, D.; Sato, H.; Higashiya, A.; Yabashi, M.; Tamasaku, K.; Miwa, D.; Ishikawa, T.; Suga, S. *Phys. Rev. Lett.* **2007**, 98, 156402.

(受理日 2007年10月15日)