

**【序】**液体や電場印加中のデバイスなど、通常の光電子分光では電子構造に迫ることが困難な系について、近年軟 X 線発光分光による局所電子状態研究が報告され、改めて軟 X 線発光分光が注目されている。しかし軟 X 線領域では軟 X 線発光確率は 0.1 %程度と小さく、実験は容易でない。このため、微小スポットが利用可能な高輝度ビームラインを利用して研究がおこなわれているが、(a)エネルギー分解能は、計数率によって制限されている。高分解能とされる研究例でも  $E/\Delta E = 1000 \sim 2000$  程度である。このエネルギー分解能では、基本的な電子構造を探ることはできるが、電子物性の詳細に迫ることは難しい。(b)計数率が小さいため、試料に高輝度光を長時間照射する必要がある。照射位置の掃引などがおこなわれているが、貴重な微小試料や、有機物など損傷の激しい物質群に関しては、適用が困難である、などの問題を抱えている。我々は、これらの問題を克服するためには、基本的な光学設計概念の革新が必須であるとの認識を持ち、新しい設計思想に基づいた次世代軟 X 線発光分光器を着想するに至り<sup>1</sup>、これを実用化することに成功した。本発表では、光学設計・光学素子開発および分光器システムの性能評価結果を報告する。

**【光学設計】**上記問題点 a),b)を解決するには、発光分光器の効率を向上させることが必須である。従来の発光分光器はすべて凹面回折格子を 1 枚用いた単純な光学系となっている。この場合エネルギー分散方向に関しては集光することができるが、非分散方向には集光光学素子はなく、検出器の大きさで取込角が制限されている。現在最も用いられているローランド型分光器で  $E/\Delta E = 2000 @ 400 \text{ eV}$  を実現しようとする、取込立体角は 0.1 mstr (0.0006 %)となり、きわめて効率が悪い。しかし、非分散方向をトロイダル回折格子などで集光すると収差が大きくなるため、エネルギー分解能が著しく損なわれる。また、軟 X 線検出器として、検出効率および空間分解能に優れた CCD 検出器は、ローランド型分光器に向かない。これは、斜入射角が小さな条件で CCD 検出器を用いる必要があるため、CCD 素子の不感層(厚さ $\sim 50 \text{ nm}$ )に多くの光子が吸収されてしまい、CCD 本来の高量子効率を利用できないためである。

そこで、我々は(1)非分散方向についても集光機能を持つ、(2) CCD 検出器を直入射配置で用いる、の 2 つの条件を次世代軟 X 線発光分光器が満たすべき条件と考えた。そして、この条件を満たす、ウォルター鏡と透過型回折格子を採用した光学配置を提案した<sup>1</sup>。この光学配置では集光機能と波長分散機能を分離しているため、高エネルギー分解能  $E/\Delta E = 10^4$  であっても収差が無視できる。更にこの条件で、取込角を 20 倍向上できるため、高効率と高エネルギー分解能を原理的に両立できる。

### 【光学素子開発】

**高精度スリットの開発** ビームライン BL3U の出射スリットと、発光分光器の入射スリット(最小開口  $1 \mu\text{m}$ )を開発した。ピエゾアクチュエーターによって弾性ヒンジ機構を介して開閉する機構を採用し、超高真空下で使用可能である。

**ウォルター鏡の開発** 共同研究者の協力によって、形状誤差の極めて小さな鏡(0.4 秒 rms 以下)を製作することに成功した。

**透過型回折格子の開発** 協力企業と共に試作・評価実験を行い、自立・透過型回折格子(周期  $160 \text{ nm}$ )の製作に成功した。

**高分解能 CCD 検出器の開発** 軟 X 線用の CCD 検出器は市販されているが、特殊なマウントで超高真空下で使用でき、低ノイズ高速読み出しが要求される。このため、今回 CCD 駆動・読み出し回路を製作した。UVSOR 施設の軟 X 線ビームライン BL4B にて性能評価を行い、500 eV 以上で重心演算による高空間分解能

化(1–2 μm)を実現できることを確かめた。

**発光分光実験ステーションの建設** アンジュレータービームライン BL3U を分子研 UVSOR 施設に建設した。発光実験用エンドステーションは、水平方向には縮小光学系を、縦方向は分光器出射スリットを備えている。ビームサイズ 20 μm(v.) x 72 μm (h.)の微小ビームを得ることができた。

**【分光器の性能評価】**エネルギー分解能を実際に実現するには、これら光学素子を高精度で製作・アライメントする必要がある。まず、光線追跡プログラム TGSGUI を用いて各光学素子のアライメントに要求される精度を求め、それを元にアライメント機構を製作した。次に、アライメント手順を検討した。光線追跡による詳細なシミュレーションの結果、ウォルター鏡と透過型回折格子の相対的なアライメントは、機械加工精度と大気中でのレーザー光を用いたアライメントによって十分に実現できることが示された。そこで、ウォルター鏡と透過型回折格子の相対的なアライメントを大気中で行った。次にビームライン BL3U で単色化した 114 eV の軟 X 線を金属試料に照射し、散乱光の 0 次回折光を検出しながら、発光点、ウォルター鏡・透過型回折格子アセンブリ、CCD 検出器のアライメントをおこなった。エネルギー分解能は、CCD 検出器をローランド・トーラス上で移動させ、1 次回折光を検出することにより評価した。エネルギー分解能が発光分光器用入射スリットで制限されていたため、金属試料にマイクロメートルオーダーの傷をつけ、そこからの散乱軟 X 線を測定し解析することで、分光器本来のエネルギー分解能を評価した。その結果、エネルギー分解能( $E/\Delta E$ )が 3000 以上であることが明らかになった。

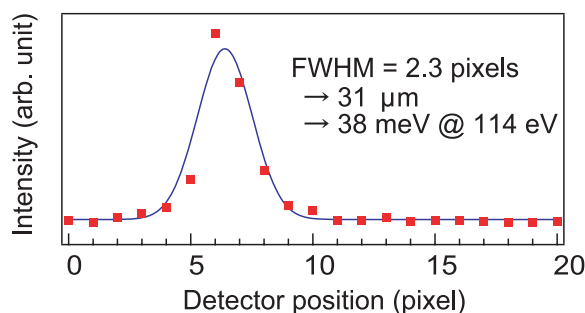


Fig. 1 Line profile of the elastic scattering peak at 114 eV. Energy resolving power of 3000 ( $\Delta E = 38$  meV) has been obtained.

**【考察】**本研究によって、透過型回折格子を用いた次世代軟 X 線発光分光器が実用に耐える性能が得られることを初めて実証した。実質的にノイズフリーで計測できる CCD 検出器を採用しているため、将来性が高い。現在、各施設で様々な次世代軟 X 線発光分光器の開発が行われているが、本開発はそれらに先んじて実用化することができた。現在、発光分光器用の入射スリットの導入、透過型回折格子と CCD 検出器システムのさらなる高度化を行って、本分光器の高度化を推し進めている。本分光器は、従来にない高効率・高エネルギー分解能を実現しており、軟 X 線発光分光の新たな展開が期待される。

また本開発は、軟 X 線分光技術という観点からも意義深い。軟 X 線領域の分光素子は反射型回折格子と結晶分光素子の2つに事実上限られていた。広いエネルギー範囲にわたって収差のない光学系を組むには、反射型回折格子は制約が多い。結晶分光素子は、軟 X 線領域では良い結晶がないため、現在ではほとんど用いられていない。本開発は、透過型回折格子が高分解能分光に耐える分光素子であり、その利用によって新たなブレークスルーが開けることを実際に示したものである。なお、我々の分光システムは、透過型回折格子を利用した X 線分光システムの中で世界最高のエネルギー分解能である。

(Ref.) [1] T. Hatsui, et al., J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 144 (2005) 1059. [2] T. Hatsui, Ray-Tracing Code for General optical Systems with GUI, (<http://www.uvsor.ims.ac.jp/TgsguiHatsui/index.html>)