

高エネルギー-単色X線による重元素からの二次電子増幅生成機構の研究

伊藤 秋男^a, 間嶋 拓也^a, 余語 覚文^a, 白石 幸司^a,
 埜 幸宏^a, 二澤 宏司^b, 福島 整^b

^a京都大学工学研究科, ^a独立行政法人物質・材料研究機構

背景

X線を利用した様々なナノ材料研究を遂行する上で入射X線強度を正確に測定することは極めて重要である。通常の研究では電離箱型検出器やカロリメータなどによって計測されるが必ずしも正確ではない。その理由のひとつは、固体内部及び表面近傍での二次電子の挙動が正確には解明されていないことがあげられる。光電効果により生成された電子は固体内で衝突を繰り返しカスケード的に電子数を増加させてゆくばかりではなく、一部は固体表面から外部に二次電子として逃げる過程も存在する。現在のところこれら固体内での電子増幅過程や表面脱出過程は未だ十分に理解されてはいない。

そこで単色X線照射によって生成される二次電子の生成機構や固体内で起こる電子カスケード過程の解明を目的として本研究を開始した。第一段階の測定として、広いエネルギー範囲にわたって光子1個あたりに表面から放出される二次電子の個数分布を測定した。この種の研究は本研究が初めてであり、得られた成果をベースにして、微量重元素の積極

的応用を目指した技術開発を展開することが可能である。特に、固体材料や生体試料中における重元素の物理化学的性質を解明することは、ナノスケールでの個々の原子の制御と利用を基礎とするナノテクノロジー技術開発において本質的に重要なものであり、本研究はそれらの目的に直結するものとする。

実験

実験はBL15XUラインにおいて行った。ハッチ内に設置した装置写真を図1に、真空チャンバー内の装置模式図を図2に示す。アンジュレータのギャップ間隔を調整することにより、広いエネルギー範囲(6~60keV)の単色X線を用いた。二次電子の測定は、表面汚染の影響が比較的少ない金標的を用いて行った。金標的は外部から-20kVのバイアス電圧を加えている。金表面から放出された二次電子は接地された荷電粒子用固体検出器(SSD)を用いた。SSDは入射粒子のエネルギーを検出するため、1個の光子によってn個の電子がほぼ同時に放出された場合は、SSDの受けるエネルギーは20keVのn倍となり、エネルギースペクトルは離散的になるため電子放出個数分布(n分布)を知ることができる。エネルギースペクトルはマルチチャンネル波高分析器により行った。高速イオン照射による同様の実験も当グループでは行っ



図1 実験装置の写真

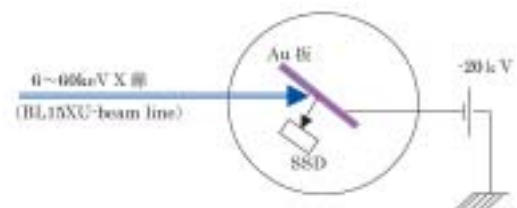


図2 実験配置図

ており、測定方法は基本的に同じである [1]。本研究では入射光子 1 個あたりの放出電子数を計測するため、入射 X 線の強度依存性をチェックして単光子入射であることを確認している。また、X 線モニターとして、金メッシュ電流、電離箱電流を適宜用いた。

結果と考察

図 3 に 12.5keV の X 線照射によって得られた二次電子エネルギースペクトルを示す。これは光子 1 個あたりに表面から出る電子の個数分布であり、明らかに多数の電子が出ていることが解る。目視でも 14 個までみることができる。全体的には $n=1$ を最大として指数関数的に減少する傾向を示している。図の曲線は各 n に対して予想されるスペクトル関数で、最も良く実験値を再現するようにフィットさせた。スペクトル関数が単純なガウス型の関数形ではなく構造を持っているのは、SSD 検出器の表面における入射電子の反射に基づくものである [1]。

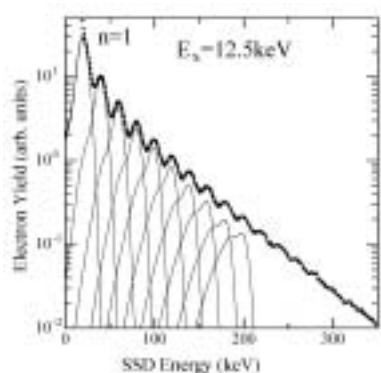


図 3 12.5keV X 線による放出電子エネルギースペクトル。各ピークは電子の個数に対応する。

金原子は 12 keV 付近に L 殻吸収端があり、L 電子励起によるオージェ電子生成の可能性がある。そのため更に複数個の電子放出が見込まれる。そこで X 線のエネルギーをこの付近で細かく変化させ、吸収端近傍での電子スペクトルの変化を測定した。結果的には光子エネルギーに殆ど依存せず有意な変化は見られなかった。これは、光電離による M 殻電子と L 殻オージェ電子の初期エネルギーがほぼ

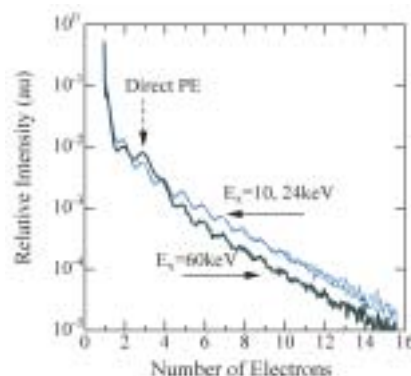


図 4 放出電子エネルギースペクトルの入射 X 線エネルギー依存。

同じであるためであろうと推定される。

図 4 は 3 種類エネルギーの X 線に対して得られた個数分布スペクトルである。図は、10 keV、24keV 及び 60 (58.5) keV の場合を示している。図から解るように指数関数的な振舞いはほぼ同じである。また、高エネルギーになる程 n の大きな強度がより早く減少しており、高エネルギー程表面からは出にくいことが解る。これはエネルギーが大きくなるにつれて光電子が前方方向、即ちバルク内部方向に飛び出すためではないかと考えられる。詳細については現在不明である。図中で Direct PE と記したのは光電離された外殻電子の寄与を意味している。

今後の課題

観測されるスペクトルの殆どはバルク内でのカスケード電子によるものであるが、光電子自身も測定することができる。電子放出過程は確率過程であるため、より詳細な解析を加えることで新しい知見が得る予定である。今後は大強度 X 線入射の場合の全放出電子電流を測定する計画である。

参考文献

- 1) A. Itoh, T. Majima, F. Obata, Y. Hamamoto and A. Yogo, Nucl. Instr. and Meth. B **193** (2002) 626-631.