

## 高速光電子分光測定システム

南部 英 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所研究機関研究員  
〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

**要旨** 光電子分光法 (PES) は物質の占有電子状態を調べる強力な手法であり、広くいろいろな研究に適応されている。PES の唯一といってよいかもしい欠点は、比較的測定時間がかかることであるが最近欧米の第三世代光源を中心に高速光電子分光法の開発が進められている。これは通常数分から数十分を要する光電子分光スペクトルの測定時間を数秒あるいは秒以下に短縮する手法であり、表面化学反応の追跡や多量の測定を必要とするコンビナトリアル試料の分析に威力を発揮すると考えられる。アメリカ ALS の超高速電子検出器の開発計画ではこの測定時間を最終的には100  $\mu$  秒程度までに短縮することを目標にしている。本稿では ALS の例を中心にドイツ、イタリアでも進められている高速光電子分光システムの開発を紹介し、ALS で測定された高速 X 線光電子回折の実験結果も簡単に紹介する。

### 1. はじめに

光電子分光法 (photoemission spectroscopy; PES) は物質の占有電子状態を調べる最も強力な実験手法であり、放射光施設でも広く行われている実験手法の一つである。励起光エネルギーが紫外領域の実験手法は UPS (ultraviolet photoemission spectroscopy) と呼ばれ、(軟) X 線領域の場合は XPS (x-ray photoemission spectroscopy) とも呼ばれる。特に XPS の場合は原子核に強く束縛された内殻電子の励起による元素選択的な測定が可能である点が強力な特徴のひとつである。また、光イオン化断面積と電子の非弾性散乱平均自由行程の関係から、PES で用いられる励起光は主に VUV~軟 X 線領域が主であり、原則的に表面敏感な手法として捉えられてきたが、最近は硬 X 線を励起光とした表面鈍感 PES の開発も急激に進んでおり<sup>1)</sup>、今後もその重要性が衰えるとは考えにくい。

PES によって得られる情報は豊富であり、物質中の電子の束縛エネルギー、状態密度、さらに元素濃度等が決定でき、これらを用いて巨大磁気抵抗物質・高温超電導物質の物性研究、新規機能性物質や半導体デバイスの評価、さらに表面元素分析など非常に多岐に 응용されている。このように PES は非常に有用であるが、あえて欠点を探すと測定に比較的時間を要することが挙げられる。例えば XPS は表面反応追跡および速度論的表面反応解析によく適していると考えられるが、ひとつのスペクトルを測定するのに要する時間は短くて数分、10~20分程度かかるのが普通で、これは一般的な表面反応の時間スケールにくらべて著しく長い。このため、XPS による表面反応追跡はあまり行われていない。しかし、近年の第三世代放射光源の登場で状況が変わりつつある。本稿では ALS で進行中の

超高速電子検出器開発プロジェクトを中心に、高速光電子分光法開発の現状とその応用の可能性について報告させていただく。

### 2. 第三世代放射光源と高速光電子分光法の意義

ここで、本稿で用いる“高速測定”と“連続測定”の定義を簡単にさせていただく。

“高速現象”追跡のための最も強力な方法論は Pump and Probe methods であり、これを PES に応用する試みも行われている<sup>2)</sup>。しかし Fig. 1 に示すように Pump and Probe では一回の現象のある特定のタイミングのみを測ることしかできず、ある現象の始めから終わりまでを記録するには Fig. 1 に示したようにタイミングをずらした測定を何度も繰り返す必要がある。この意味で、Pump and Probe では連続測定は(基本的に)不可能である。本稿で取り上げる高速測定法は測定系のデータ取得速度を上げる

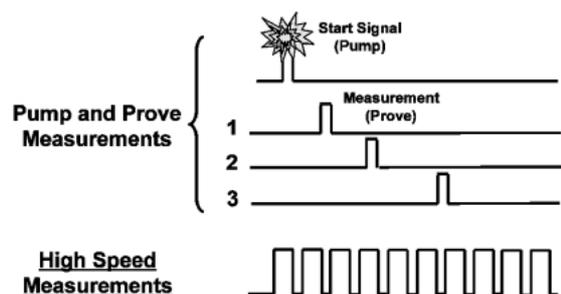


Fig. 1 Illustrated difference between pump and probe method and fast continuous measurements.

ことで、ある現象のはじめから終わりまでの一連の過程を高速かつ連続に測定することを目指した実験技術である。

このような高速光電子分光測定を行う意義はなにか？まずひとつは PES をプローブとして表面（あるいは固体内部）での動的過程のリアルタイム観測の実現可能性にある。しかし、MCP 等を用いて電子を増幅する過程の pulse pair resolution time 等を考慮すると、あまり早い現象を追うのは難しく、現実的には表面化学反応過程の追跡が時間スケールの適切なターゲットになりうるだろう。先にも述べたように、元素選択性、化学シフトによる化学種の決定能力、信号強度と化学種存在量の直線の関係等の PES の特徴は速度論的反応解析には理想的であるが、測定時間がボトルネックとなりこれまであまり反応追跡は試みられていない。この高速化が進んでこなかった要因は主に高速測定に特化した測定装置の欠如によるのだが、光源側にもその一端を求めることができる。つまり、スペクトル取得時間（カメラの露光時間に相当）が短くなれば信号量は取得時間に比例して少なくなる。よって短時間に十分な強度の信号強度を得るためには、装置の観測領域に光子束を集中し、なるべく多くの電子を効率よく観測する必要がある。第2世代までの放射光源はこの要請を満たす性能はなく、そのためあまり検出システムの高速化の必要性も顧みられなかった。しかし、光子束を小さな面積に集中させることが可能な第3世代光源の登場が状況を変え、そこから得られる強力な X 線の活用法の1つとして高速電子検出システムの開発が進められている（本稿で紹介する3件の研究例は全て欧米の第3世代放射光源を中心に進行している）。また、もう1つの意義としては実験を効率的に行えることにある。光電子回折（Photoelectron Diffraction）実験やコンビナトリアル手法による試料の評価等には時に数百から数千の XPS 測定を必要とする。このような実験にとっても、PES の高速化は重要な意味を持つことは間違いない。

### 3. 高速光電子分光法の開発 1 (BESSY & Elettra)

高速光電子分光を実現するための代表的なアプローチとしては 1. 電子分光器の掃引速度を上げる。2. 半球型電子分光器を用いたスナップショット測定を用いる。の二つが考えられ、それぞれについて開発が進められている。

前者は一般的な PES 測定システムの単純な高速化であり、電位の掃引速度とそれに同期するデータ取得速度を上げればよい。一般に PES ではエネルギー掃引は二つの電極間の電位を決める直流電源の電位を走査することで行われるから、電位を決める直流電源の電位の掃引を高速に行うエレクトロニクスとその掃引に同期してデータを取得するソフトウェアの改良が必要となる。この方法ではドイツ BESSYII のグループが先行している<sup>3)</sup>。このグループは

OMICRON 社製のアナライザー (Omicron EA 125 U7 HR) と同社製プログラムを用い、1 ポイントのデータ取得時間を 10 m 秒にまで短縮して、高速な電位の掃引と同期させることでスペクトルを数秒程度で取得可能なシステムを開発している。実際に報告されているデータとしては、清浄 Pt(111) 面上への CO 分子の吸着過程を C の 1s 領域の PES 連続測定で観測している。このときの PES は分解能 ~10 meV 程度、エネルギー幅 6~10 eV で 1 スペクトルの測定にかかる時間は 3 秒である。この 3 秒毎測定を 400 秒にわたって続けることで、吸着量が増えるに従い CO の吸着サイトが変化する過程を観測している。1 ポイントのデータ取得時間を 10 m 秒以下に設定することも可能であるが、エレクトロニクス、およびソフトウェア的な制約からスペクトル取得時間全体の短縮にはつながらないとしている。この手法では、高分解能のスペクトルが得られる反面、エネルギー掃引が不可欠であり、高速化には自ずと限界がある。

後者は半球型電子分光器を使うことを前提にした方法であり、具体的には Scienta 社の SES200 シリーズ等で用いられている手法で、半球型電子分光器の出射スリットを省き、位置敏感型多チャンネル電子検出器を用いることで、スリット面上に結像しているある運動エネルギー幅の電子像を一気に取り込む方法である。半球分光器の性質上、電子像のエネルギー幅はパスエネルギーに比例し、たとえば SES200 の場合パスエネルギーの 6~7% のエネルギー幅を持った電子像が出射スリット面上に結像する<sup>4)</sup>。この手法を用いると、分光器の電位を掃引することなくある幅の運動エネルギーを持った電子を一気に取り込むことができる、つまり電位の掃引なしにスペクトルの“スナップショット測定”ができる。つまり、半球型電子分光器では“出射面上で検出される電子の位置”~“電子の運動エネルギー”となっていることを利用する。また、分光器内で分光されているのにもかかわらず、一般の単チャンネル型の測定では測定されない電子も測定しているの、実験全体の効率があがることも期待できる。この方法で得られるスペクトルのエネルギー分解能は入射スリット等で決まる分光器そのものの分解能と位置敏感型検出器の位置分解能で決まる。さらに、時間分解能は検出器のスペクトル読み取り時間だけで決まってしまう。前述の SES200 シリーズでは、MCP、蛍光スクリーン、CCD カメラを組み合わせた 2 次元型検出器が用いられているが、元来高速測定用には作られていないので、スペクトル取得時間を 1 秒以下に設定することは可能でも、測定間のデッドタイムが長く連続測定には向いていない。

以上に述べたように、この方法における時間分解能は位置敏感型検出器の性能で決まる。イタリアの第三世代放射光源 Elettra のグループは 96 チャンネルの楕円アノードを持った 1 次元位置敏感検出器を独自に開発し、スペクトルの高速測定を行っている。この検出器は MCP とその

下にアルミナ上に金を蒸着した楕型電極から構成されている。96本の電極はそれぞれが0.32 mmの幅を持ち、0.15 mmの間隔で平行に並んでおり、1本1本が電子の検出電極として働く。各電極はそれぞれ検出器が固定されているフランジに取り付けられた電気導入端子に接続されており、フランジにはこのほかにもMCPに電圧をかけるための電極等もあわせて100本の電流導入端子が取り付けられている<sup>5)</sup>。このグループはこれも独自に開発したダブルパス型の半球型アナライザー<sup>6)</sup>とこの検出器を組み合わせによってスナップショット法でのXPSの測定を行っているが、このとき取得できるPESのエネルギー幅は先にも述べたようにパスエネルギーと電極間の距離で決まり、おおよそ4~10 eV程度である。さらに高速測定を可能にするために制御・測定用ソフトウェアも高速測定に特化したものを独自に開発している。報告されているこのシステムによる連続測定の最高値は1スペクトル/0.1秒である。実際のデータはPt<sub>50</sub>Rh<sub>50</sub>合金上に酸素が吸着した際の表面組成の変化をPt 4fのサーフェスコアレベルシフトで観測することに成功している<sup>7)</sup>。

#### 4. 高速光電子分光法の開発 2 ; ALS High-Speed Detector<sup>8)</sup>

さらにこのアプローチを推し進めているのが、アメリカパークレーのALSのC. S. Fadleyを中心にするグループである。このグループは50 μm ; 768チャンネルの1次元位置分解能、検出器全体で2 GHz程度の信号処理能力、~100 μ秒オーダーの信号読み出し速度等を目標とした検出器を開発している。Fig. 2(a)にデテクターの外観、Fig. 3に分解概念図を示す。Fig. 2(b)に示されたように検出器そのものの大きさは直径が64 mm程度の円形であり、一般的な(中型以上の)半球型電子分光器(例えばSES-100)であれば、組み込むことが可能である。この検出器の最大の特徴は、768チャンネルの大チャンネル数を持つことと、100 μ秒というこれまでより3桁早いスペクトル読み出し速度性能であるが、これらは信号処理を行う電子回路の大部分を検出器本体に収めるというユニークな設計によって達成されている。以下この検出器について解説する。

Fig. 2(b)にはカバーとMCPをはずした状態の検出器が示されているが、中央部に見えるのが電子検出電極群であり、その周囲に6組の信号処理用の集積回路が配置されている。電子検出アノードはガラス基板上に金線が短辺側に平行に768本、30 μm幅 ; 18 μm間隔で蒸着されていて、その1本1本の金線が電子検出電極(アノード)として働く。先に示したElettraの検出器では、アノード数が96、アノード間隔は470 μmである。MCPによって増幅された電子は、電子群(雲)となってMCPの下面より飛び出した後、この48 μm間隔に並んだ768本の電子検出電極によって検出される。各アノードは128チャンネルを持つ6

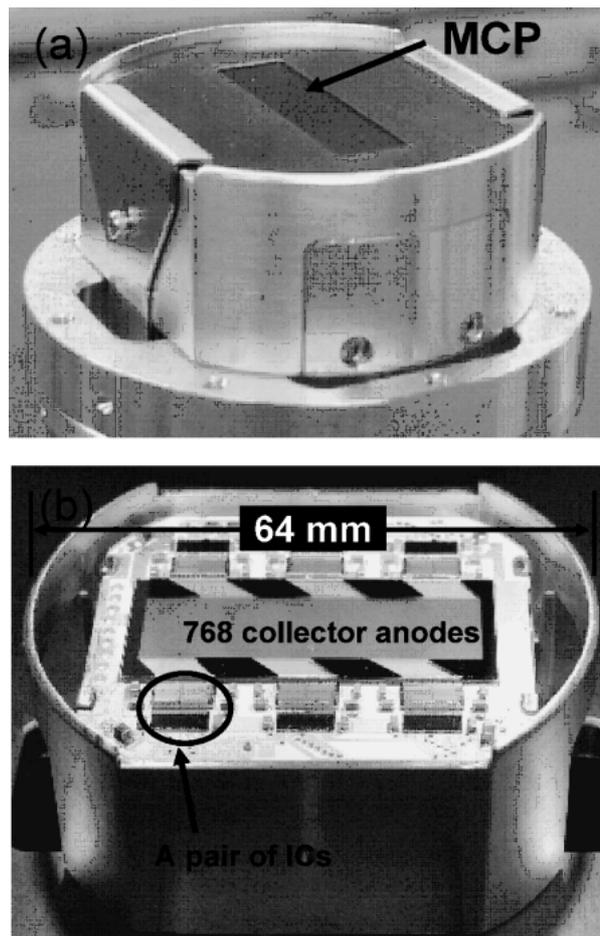


Fig. 2 Pictures of ALS High-speed detector (HSD) (a) HSD picture with top-cover and MCPs. Ready for installation. (b) HSD picture without top-cover and MCPs. The collector anodes and pairs of ICs are shown.

組の電子回路のいずれかのチャンネルに独立に接続されており、前段のIC(CAFE-M)で増幅、弁別等の信号処理が行われる。このCAFE-Mのpulse-pair resolution timeは50 nsであり、この値が1チャンネル当りのcount rateの最大値2 MHzを決めている。このCAFE-Mに続いて、この検出器用に設計・開発された後段のIC; Buffered Multichannel Counter (BMC)が信号をカウントし、不感時間無しに読み出しを可能としている。BMCは各チャンネルにBuffered Counter, programmable control of front-end gain, threshold, calibration signalsがあり、データ転送、通信/命令用のシリアルリンクをもっている。データのカウンター長も変更可能であり、最長24 bitsであるが、高速データ拾得のためには最短の4 bitsを用いることで100 μ秒程度でのデータ読み出しが可能となる。ちなみに前段のCAFE-Mは高エネルギー物理実験(ATLASプロジェクト)用に設計されたものである。このようにしてBMCでデジタル信号に変換されたデータのみが真空外部のコンピュータに送られるというユニークな設計になっている。

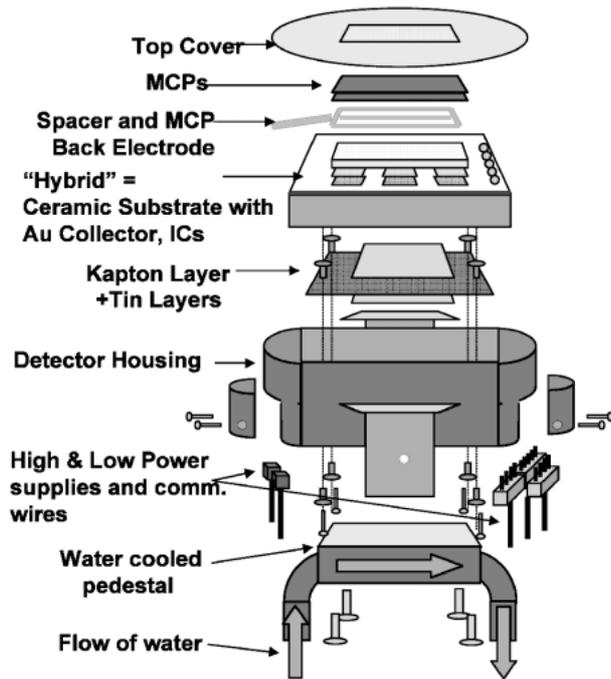


Fig. 3 Exploded view of the detector showing the main elements that insure good thermal conductivity and electrical insulation. There is another tin-Kapton-tin layers between the detector housing and the water-cooled-pedestal that is not show here.

このような多チャンネル位置敏感型検出器のチャンネル数（アノード数と同義）は位置分解能を決める重要なファクターであり、多に越したことはない（もちろんシステム全体のエネルギー分解能は半球型アナライザーそのものの分解能にも依存する）。この検出器のように多数の細い金線をガラス基板上に描いたアノードはホログラフィーやエッチング技術の発達のおかげで比較的容易に入手できる。しかし、チャンネル数の増大に伴って他の問題が生じることからこれまでの検出器ではチャンネル数をあまり増やすことができなかった。それは、位置敏感な情報は768本のアノードのうちのどれで検出されたかによって決まるので、その情報を保持するためには増幅・弁別等の処理をアノードごとに行わなければならない。これまではこの増幅・弁別処理を真空外で行うため、チャンネル数と同数の電流導入端子を用いて信号を個別に取り出す必要があった。このため実際のチャンネル数はこの電流導入端子がいくつフランジに取り付けられるかで決まってしまう。通常アノードには高電圧をかける必要（MCPの引き出し電位と同程度； $\sim 2\text{ kV}$ ）があるから、フィードスルーも高電圧に耐えうるものである必要がある。先にも述べたようにElettraの検出器ではフランジに100本の電流導入端子が取り付けられている。この欠点を克服するために、ALSのHigh Speed Detectorでは、信号処理のほとんどを超高真空内で行う設計になっている。よって、超高真空内からはデジタル化されたデータを取り出すだけであり、768チャ

ネルのチャンネル数に対して、電流導入端子の数は14個に過ぎない。このような設計を可能にしたのは信号処理を真空で行うために専用に設計、開発された電子回路によるところが大きい。

真空内にICを配置することによって、チャンネル数の大幅な増大は実現されたが、他に重大な問題が発生する。空気中のように熱源周辺の気体の対流による熱のエスケープが望めない超高真空内では高々3ワットの消費電力のICが発する熱でも致命的となる。また、検出器の大部分はほとんどが金属製（ステンレス）であるが、高電圧をかける必要があるため、いくつかの部品間には電氣的に絶縁されている必要がある。つまり、検出器の部品同士は高い熱伝導率を保ちつつ、電氣的には絶縁されている箇所を作り出さなくてはならない。検出器内部の熱源そのものであり、最も熱に弱いのはICであるが、もともと超高真空内で使用することを前提に開発されたICは実は $150^\circ\text{C}$ 程度でも作動する（ノイズは増える）。しかし、各部品の接合に用いられる超高真空対応のギンロウが $150^\circ\text{C}$ 程度で軟化することがまず問題となる。実際、テスト段階で熱対策を故意に行わないで動作試験を行ったところ1時間程度で検出器の温度は $150^\circ\text{C}$ を超え、その熱で検出器自身を破壊した。このため、Fig. 3に示された分解図のように超高速度検出器にはさまざまな熱対策が施されている。まず第一に台座部分に冷却水を通すことで水冷機構を備えている。また高電圧がかかる部分との絶縁を取るためにカプトン膜が何箇所使用されているが、カプトンだけでは接触面積が十分ではなく熱伝導率が著しく落ちる。そこで、カプトン膜の上下に錫の薄膜を配置し接触面積が十分になるように対策が施されている。Fig. 3には示していないが錫—カプトン—錫の膜は先述の台座と検出器本体の間にも用いられ、検出器と冷却された台座との熱接触が十分になるように工夫されている。また、部品間の熱接触を十分に取るためには部品間をつなぐねじを十分に強く締める必要があるが、あまり強く締めると絶縁をとるために使用するセラミック製碍子が割れてしまう。そこで、PEAKと呼ばれるプラスチック素材で碍子を作り、十分に強くねじを締めても割れないようになっている。更に、検出器内部には温度センサー複数取り付けられてあり、常に温度がモニターされている。逆に、超高真空で用いるためには $100^\circ\text{C}$ 以上でのBake outに耐えうる必要があるが、電源を落とした状態で $120^\circ\text{C}$ 程度までならBake out可能なことは確認されている。

### 5. 性能評価と実験結果<sup>9)</sup>

このALS-HSDの性能評価の結果を示す。Fig. 4(a)は検出器表面に検出電極と平行な2枚のスリット（ $25\ \mu\text{m}$ ；8 mm 間隔）を通過した細いUV光を照射することで得られた電子像である。照射しているUV光の幅の評価は難し

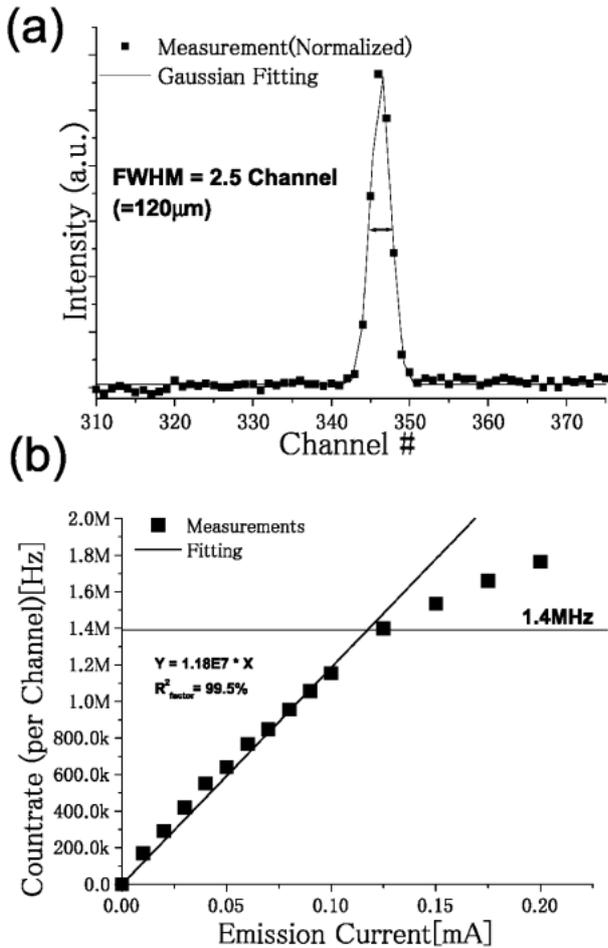


Fig. 4 (a) Spatial resolution of the high-speed detector measured with a UV lamp and a pair of  $25 \mu\text{m}$  slits. (b) Measured count rate linearity of the HSD using  $25 \text{ eV}$  electrons and a MCP voltage of  $1.94 \text{ kV}$ .

いが、おおよそ $50 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ と見積もられ、得られた像の半値幅 $\sim 120 \mu\text{m}$ とよく一致する。電極が細く ( $30 \mu\text{m}$ )、電極どうしの間隔も狭い ( $18 \mu\text{m}$ ) ことから電極間での信号の混信が心配されたが、その効果はほとんどなくほぼ設計値どおりの $50 \mu\text{m}$ 程度の位置分解能はありそうである。次に Fig. 4 (b)は線形応答性の評価を行った結果である。これは、検出器表面に Flood Type の電子銃から出る電子を照射し、検出器出力を電子銃のエミッションカレントの関数としてプロットしたものである。1チャンネル辺り $1.4 \text{ MHz}$ までは応答がほぼ線形であることが確認できる。この1チャンネル辺り $1.4 \text{ MHz}$ の線形応答性は検出器全体では $1.4 \text{ MHz} \times 768$ (チャンネル) $=1.1 \text{ GHz}$ に相当する。当初の目標の $2 \text{ GHz}$ には及ばないものかなり高い線形応答性が得られた。実は CCD ベースの2次元検出システムは線形応答性があまりよくなく、場合によっては実験結果の解釈を間違いに導くという問題があったが、この検出器を用いることでそのような問題も克服される<sup>10)</sup>。

次に、実際にこの検出器をシエンタ社の SES-200に組

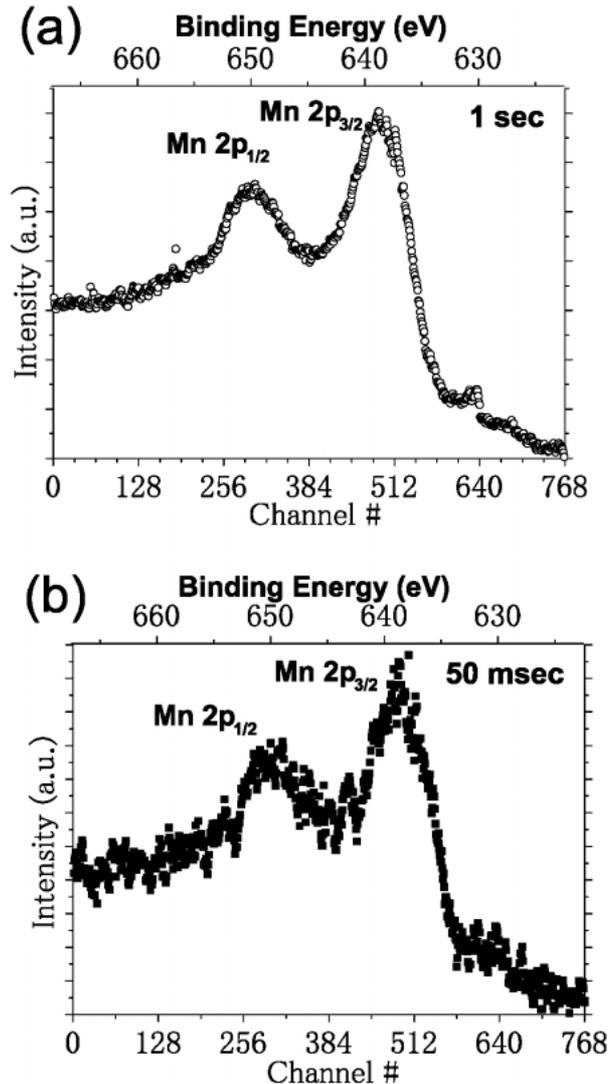


Fig. 5 Mn 2p spectra taken with the HSD in snapshot mode, with the detector held open for counting over (a) 1 second and (b) 50 ms.

み込んで行った利用実験について報告する。この検出器開発の最終的な目的の一つは高速の表面反応観察であるが、それを実現するためには表面反応時間スケールをうまく制御する機構が必要であり、現時点ではそれはまだ難しい。そこでまず、検出器の高速データ取得のデモンストレーションを、短時間での X 線光電子回折 (X-ray Photoelectron Diffraction) 実験として単結晶  $\text{MnO} (001)$  面と  $\text{Mg K}\alpha$  線を用いて試みた。まず、Fig. 4 に XPS の測定例を示す。(a)はスナップショットモードにより1秒で、(b)は同じく50ミリ秒で取得された Mn 2p のスペクトルである。取得時間1秒ではかなりきれいなスペクトルが得られているのが明らかである。検出器は128チャンネル $\times$ 6組の電子回路で構成されているが、それらのもスムーズであり、検出電極間の感度差は無視できると考えられる。さらに、50 m 秒の測定時間でもほぼ満足できるスペクトル

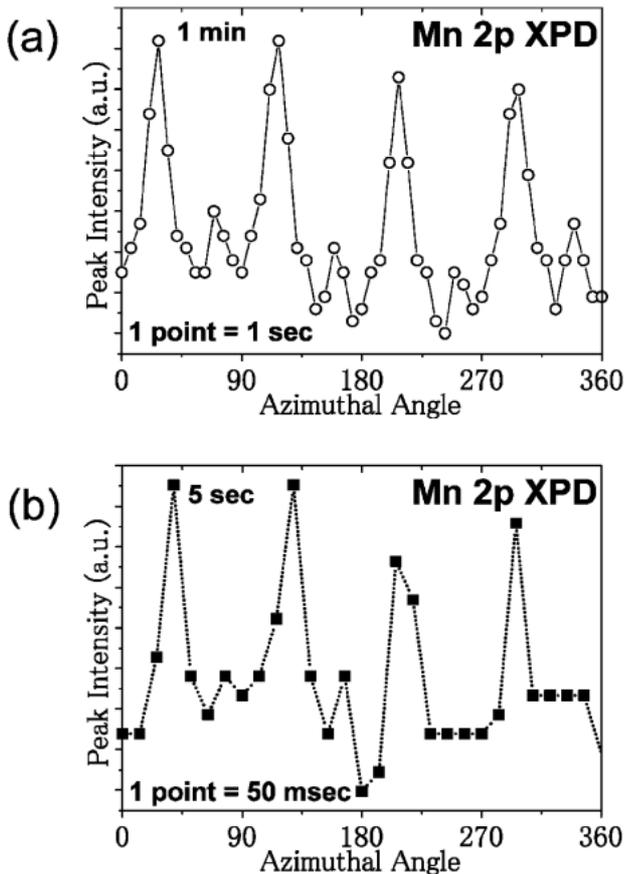


Fig. 6 Azimuthal dependence of Mn 2p XPD patterns obtained over full scan times of (a) 1 minute and (b) 5 seconds.

が得られており、この測定が X 線管を用いていることを考慮すると、より明るい放射光を用いれば 50 m 秒の測定時間でも十分なスペクトルが得られると考えられる。XPD 実験はこのようなスペクトルを、サンプルを方位角方向に回転させながら連続的に測定することで行われた。X 線励起等で固体表面から放出される電子は、放出原子の周囲にある原子の弾性散乱を受ける。よって、規定された試料表面から得られる XPS 強度の方位角依存性には表面構造を反映した強度分布が現れる。これが方位角依存 XPD であり、Fig. 4(a) の測定条件で Mn 2p ピーク強度の方位角依存を測定した XPD が Fig. 5(a) である。このとき試料を 1 分で方位角方向に 360 度回転させている。こうして得られた約 60 のスペクトル強度を方位角の関数としてプロットして得られたのが Fig. 5(a) である。さらに Fig. 5(b) は 5 秒で試料を 360 度回転させながら、Fig. 4(b) に相当する 50 ミリ秒のスペクトルを連続測定することで得られている。どちらの場合も、MnO(001) 結晶表面の 4 回対称性が見事に観測されており、更に Fig. 5(a) では測定された回折像の 4 つの大きなピークの左右対称に第 2 近接原子からの回折による肩構造が観測できる。これはこの回折像が詳細な解析に十分耐えうることを示しており、一般のシ

ステムでは、この回折像と同等の像を得るのに 1~2 時間を要している。また、方位角だけでなく極角も掃引して得られる全天型の XPD 測定は通常 100 以上の XPS 測定を必要とし、全測定に 1 週間程度を必要とする場合もあるが、この ALS-HSD を用いて 1700 スペクトルを 35 分で測定して全天型の XPD 像を得ることに成功している<sup>11)</sup>。以上のように、この検出器を用いることで通常の約 1/100 ~ 1/1000 程度の時間での XPD 測定が出来ることが示された。

## 6. 現状と将来

このように、ALS-HSD を用いて現段階で 50 m 秒の時間分解能の PES 連続測定システムを構築した。これは、現時点では世界でもっとも高い時間分解能をもつ PES システムの 1 つといえる。当初の目標は 100  $\mu$  秒程度でのスペクトル連続測定であるが、現時点でこれが達成できていない理由は、データの保存処理速度が検出器を制御するコンピュータ（正確にはオペレーティングシステム）の処理速度に依存してしまっているためであり、検出器単体としては 100  $\mu$  秒程度でのスペクトル取得が可能である。この欠点の克服のためには、オペレーティングシステムの処理速度に依存しないバッファメモリーをシステムに追加することが必要であり、現在この改良が進められている。

また、本稿で紹介した他の 2 つの計画も含めた全ての研究は、最終的には高速の表面反応観察を目指しているが、これには先にも述べたように反応系の時間構造を制御するシステムも必要となる。この制御システムとしては各グループともパルス分子線を用いることを計画しており、パルス分子線と高速検出器の同期によって表面反応追跡を目指しているが、いずれのグループもまだ開発段階である。この様なシステムが完成すると Pt(111) 面上での CO の酸化反応や、Si(111) 面のアクティブ酸化<sup>12)</sup> 過程等の重要な表面反応系の反応時間が 1 m 秒程度であることが既に知られているから、100  $\mu$  秒超高速 PES を適応することで、実時間での表面反応のその場観察が可能となることが期待でき、表面科学研究に新たな展望を開くことが期待される。また、現状でも高速 XPD で示したように、これまで数十分~数時間かけて測定していたスペクトルの測定時間を 2 桁~3 桁短縮できている。これを、例えばコンビナトリアルな手法で作成した試料に適用すれば、より効率的な評価が可能になる。

このように、高速光電子検出システムの開発はいまだに発展途中であり、100% 完成したシステムにはなっていない。しかし、光源側の性能向上に伴う強い光を活用するためには、スペクトル高速取得技術への要望はますます高まると考えられ、今後の発展が望まれる技術であるといえる。また、今見たように検出システム自体は MCP をベースとする位置分解型検出器が中心であり、このような検出

器は電子分光法以外の実験の検出器としても用いることができる。例えば、MCPをx-ray sensitiveなものに置き換えてX線発光、吸収等の実験への応用も今後は期待したい。

#### 謝辞

本稿は筆者がLawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)に滞在中に行った研究を中心に、高速電子検出システムについて述べさせていただいた。滞米の機会を与えてくださった、C. S. Fadley教授 (LBNL/UCD)、Z. Hussain教授 (LBNL)に感謝したい。また、高性能の検出器の設計はJ.-M. Bussat博士の寄与によるところが非常に大きい。このプロジェクトはLBNLのAdvanced Source Division, Material Science Division, Physics DivisionおよびEngineering Divisionの協力のもとに行われた。関係した全てのスタッフに感謝したい。

#### 参考文献

- 1) Y. Takata: Journal of the Japanese Society for Synchrotron Radiation Research 17, 66 (2004).
- 2) M. Bauer, C. Lei, K. Read, R. Tobey, J. Gland, M. M. Murnane and H. C. Kapteyn: Phys. Rev. Lett. 87, 025501 (2001).
- 3) R. Denecke, M. Kinne, C. M. Whelan and H.-P. Steinrück: Surface Review and Letters 9, 797 (2002).
- 4) Gammadata SCIENTA SES200 User's Manual.
- 5) L. Gori et al.: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 431, 338 (1999).
- 6) A. Baraldi and V. R. Dhanak: J. Electron Spectroscopy and

Related Phenomena 67, 211 (1994).

- 7) G. Paolucci: J. Phys. Condens. Matter 13, 11293 (2001).
- 8) J.-M. Bussat, C. S. Fadley, B. A. Ludewigt, G. Meddeler, A. Nambu, M. Press, H. Spieler, B. Turko, M. West and G. Zizka: Transaction on Nuclear Science 51, 2341 (2004).
- 9) A. Nambu, J.-M. Bussat, M. West, B. C. Sell, M. Watanabe, A. W. Kay, N. Mannella, B. A. Ludewigt, M. Press, B. Turko, G. Meddeler, G. Zizka, H. Spieler, H. van der Lippe, P. Denes, T. Ohta, Z. Hussain and C. S. Fadley: J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena 137-140, 691 (2004).
- 10) N. Mannella, S. Marchesini, A. W. Kay, A. Nambu, T. Gresch, S.-H. Yang, B. S. Mun, J. M. Bussat, A. Rosenhahn and C. S. Fadley: J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena 141, 45 (2004) and the references there in.
- 11) unpublished result.
- 12) K. Ohkubo, Y. Igari, S. Tomoda and I. Kusunoki: Surf. Sci. 260, 44 (1992).

#### ● 著者紹介 ●



#### 南部 英

物質構造科学研究所・研究機関研究員

E-mail: akira.nambu@kek.jp

専門：表面化学・光電子分光

#### 【略歴】

2004年3月東京大学大学院理学系研究科で学位取得。2004年4月より現職。2002年9月から2003年9月までLawrence Berkeley National Laboratoryに滞在して方向で紹介したALS-HSDの開発に携わった。

## High-Speed Photoemission Spectroscopy Measurement Systems

Akira NAMBU KEK-PF, Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

**Abstract** Developments of high-speed photoemission spectroscopy measurement system in 3rd synchrotron light sources in the world are reviewed. Usually it takes several minutes to some ten minutes to take a photoemission spectrum. Using systems for high-speed measurements, the spectrum taking time has been reduced to few seconds or under one second. These techniques must be suitable for chasing chemical reactions on surfaces and analyzing of combinatorial samples which require massive measurements. In this short article, development of high-speed detector for electron spectroscopy at Advanced Light Source (Berkeley) and some results of high-speed x-ray photoelectron diffraction with the detector are reviewed. Other projects proceeding at European synchrotrons (BESSY and Elettra) will also be shown as examples of comparison.