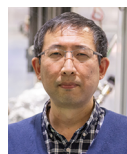


固体の光電子分光の劇的発展と未来展望



菅 滋正

大阪大学産業科学研究所
ssmsuga@gmail.com



松井文彦

分子科学研究所極端紫外光研究施設
matui@ims.ac.jp

導電性物質に可視光よりはるかに高エネルギーの単色光を当てると、占有電子が非占有電子帯に励起され、それが真空準位より高い場合、固体外に放出される。この現象を光電子放出とよぶ。この電子のエネルギー分布を観測し、固体の電子状態を評価する手法が光電子分光である。つまり電子の束縛エネルギー E_B と運動量 (波数 k_x, k_y, k_z) の関係を明らかにするこの手法は 2010 年頃から急速な新発展を遂げつつある。注目すべきは、試料の方位の回転なしに数 \AA^{-1} にわたる広い運動量空間を高信頼度で同時測定できる手法の登場である。

これを世界初で実現したのが、ドイツ Halle のマックス・プランク微細構造物理研究所のキルシュナー (J. Kirschner) 教授グループの光電子運動量顕微鏡 (Photoelectron Momentum Microscope, PMM) である。PMM では 5-25 kV の引き出し電圧を印加するため、試料から放出された運動エネルギーが数十 eV より低い場合光電子のすべてを**光電子顕微鏡 (PEEM)** 型対物レンズに取り込める。

このレンズ内部では、運動量分布 (k_x, k_y) と実空間分布 (x, y) が結像する位置が異なり、それぞれの場所で可変サイズの制限絞りで領域選択ができる。これを通過した光電子は、静電半球型電子エネルギー分析器を通過したのち 2 次元検出器で計測される。対物レンズ PEEM モードで 50 nm までの空間分解能で試料上の微小領域選択が可能であり、エネルギー、運動量共に高分解能と高再現性で 2 次元バンド分散を短時間で測定できる。PEEM で微小領域を選択するため、従来問題になってきた光集光による試料**表面損傷**リスクは少ない。この装置は既に分子科学研究所 UVSOR に導入され稼働している。

ドイツの同グループでは高効率なスピン偏極光電子運動量顕微鏡 (SP-PMM) の開発にも成功した。その装置では、電子エネルギー分析器でエネルギー分析されたあとの電子軌道に 90° 反射型のスピンフィルターを挿入し、高い反射率と高いスピン感度を両立できる。Au 単原子層で表面を被覆した Ir(001) 単結晶を用いることで半年以上の寿命での連続使用ができる上に、1 万点に及ぶマルチチャンネルスピン敏感測定により、シングルチャンネルスピン測定に比べて約 6 桁高効率での**スピン角度分解光電子分光**が可能となった。これは間違いなく 21 世紀の科学とデバイス開発の融合につながる革新的手法である。たとえば有機物半導体をも含む導電性材料や複合材料のサブ μm 微細領域まで、広い (k_x, k_y, k_z) でのスピン偏極バンド分散を放射光で計測できる。

さらに近年、時間分解能を持つ飛行時間差 (ToF)-SP-PMM の発展も欧州で著しい。この装置ではパルス光源を用いることで (E_B, k_x, k_y) 3 次元測定が容易に行える。さらに 2 つのパルス光源を用いて pump-probe 分光を行えば、pump 光で励起された電子の振る舞いを probe 光で動的に追尾できる。電子格子相互作用や、電子がよりエネルギーの低い電子帯の底に緩和する現象や、マグノンや励起子などの相互作用も動的に測定できる。

これらの PMM では電場、磁場、歪といった外部環境下での極微細領域における電子状態の**オペランド** (動作下) **測定**も期待できるので、デバイス応用への貴重な情報を得られる。ToF-PMM は研究室に置けるパルスレーザー光源でも可能であるので今後の応用研究の普及が期待できる。

用語解説

光電子顕微鏡 (PEEM) :
通常の顕微鏡は光で実像を拡大観測するが、PEEM は試料からの光電子像を数 nm までの分解能で測定できる装置。

表面損傷 :
光電子分光ではこれまで微小領域までの測定の必要性が増し、それには光集光の手法が使われてきた。しかし単位面積当たりの、けた違いの光強度増大により原子脱離が起こったり、表面原子配置が乱れたりすることも多くなる。これを表面損傷とよび、その場合には正しい表面電子状態の評価ができなくなる。

角度分解光電子分光 :
光電子が放出される場合に、表面に平行な運動量は保存されるのでそれらを異なる角度で測定すれば表面に平行な運動量成分が評価できることを利用した測定法のこと。表面垂直な運動量は内部ポテンシャルを考慮して評価する。

オペランド測定 :
材料やデバイスが実際に機能発現し使用される動作環境と類似した環境下での計測や観測をすること。