

## 論文内容の要旨

博士論文題目 減速比可変広角静電型レンズを用いたディスプレイ型  
光電子分析器の開発

氏名 桃野 浩樹

### (論文内容の要旨)

光電子分光法は、試料表面に励起光を照射し、試料から放出される光電子を分光することで、固体内部の電子状態や結晶構造などの情報を引き出す強力な手法である。近年の真空技術や光電子分析器、放射光などの光源の技術の著しい進展から、高エネルギー分解能・高角度分解能の測定が可能となり、光電子分光法は物性物理の理解と材料開発の知見に必要不可欠になりつつある。軟X線～硬X線領域の幅広い測定範囲で広い取り込み角かつ高エネルギー分解能な光電子分析器が理想的であるが、これらすべての条件を満たした光電子分析器は皆無であった。本研究では上記の理想的な光電子分析器を実現すべく、新しいディスプレイ型の光電子分析器(VD-WAAEL Analyzer)を開発した。

本論文は第1章「緒言」から第7章「結言」までの全7章で構成される。第2章では光電子分光の概要を説明し、第3章では従来の光電子分析器の現状と問題点、及び本研究の目的と意義について記した。第4章では新分析器 VD-WAAEL Analyzer を実現するための電子軌道計算、第5章では VD-WAAEL Analyzer の製作、第6章ではその性能評価について述べた。

第4章では、従来の広角静電レンズ(WAAEL)に減速機能を付加した減速比可変広角静電レンズ(VD-WAAEL)、エネルギーアパーチャー、投影レンズを組み合わせた新しい光電子分析器である減速比可変型のディスプレイ型分析器(VD-WAAEL Analyzer)の電子軌道を計算した。これにより放出角 $\pm 45^\circ$ 以上の電子を減速しながら一点に収束させ、 $1/20 \sim 1/5$ の範囲での任意の減速比を選択できる設計条件を示し、それを実現可能とする条件範囲を算出した。

第5章では、VD-WAAEL Analyzer の製作の詳細を記した。この装置の特徴は、広角静電型レンズ(WAAEL)に減速機能を付加したことでエネルギー分解能が向上した点、従って、従来の WAAEL システムでは必要であった CHA が不要となった点にある。こ

れにより、これまでの二次元光電子分析器に比べて小型でシンプルかつ安価な装置の具現化を示した。

第6章では、測定角度範囲、エネルギー分解能、及び顕微機能の評価を行った。アパーチャーサイズ $\phi 0.8\text{mm}$ 、減速比 $\varepsilon = 1/10$ の条件で本装置の取り込み角を測定し、 $\pm 45^\circ$ 以上の角度範囲で測定できることを確認した。また、エネルギー分解能は出射角度が大きくなるにつれて向上し、本装置の一番良いエネルギー分解能は、 $\theta = 40^\circ$ での0.23%と評価された。放出角度が $20^\circ \sim 50^\circ$ の範囲はエネルギー分解能が良く、その立体角は通常のCHAに比べると数百倍大きいと、大変効率の高い光電子回折・ホログラフイーの測定に使用できる新しい分析器であることが判明した。

アパーチャーサイズ $\phi 0.8\text{mm}$ 、 $\varepsilon = 1/20$ の条件でSUS316#100の顕微拡大像の測定を行い、シミュレーション通りの25倍の倍率の拡大像の測定に成功した。VD-WAAEL Analyzerは高分解能広立体角二次元光電子顕微分光器(DELMA)のWAAELシステムと同様に、光電子回折測定・顕微拡大像測定モードを切り替えることができ、所期性能が達成されたことを確認できた。この機能は今後需要が見込まれる微小試料や試料の位置選択に有用である。また、光電子の減速機能である投影レンズの印加電圧制御により、DELMAでは不可能であった硬X線を用いた顕微拡大像の測定が可能となることが判明した。

VD-WAAEL Analyzerは広いエネルギー領域での測定が可能でシンプルかつ小型な分析器であり、更にコストを抑えることができれば放射光施設や製造現場等、広範囲での普及が期待される。例えば軟X線を用いた測定では、試料の表面近傍の結晶構造やドーパントサイト等の情報が得られ、硬X線を用いた測定では検出感度が深いため多層構造や実デバイスに近いスタック構造の埋もれた界面等の情報を得ることができると考えられる。従ってVD-WAAEL Analyzerは短時間で効率良く、新規物質の構造解析や半導体・超伝導材料等の物性物理の解明への応用が期待できる。

### (論文審査結果の要旨)

本論文は軟 X 線～硬 X 線の幅広いエネルギー領域に対応した小型でシンプルかつ高エネルギー分解能のディスプレイ型の新しい光電子分析器の開発についての研究である。本研究では電子軌道計算の補足情報となる計算、装置の組み立て、電源システムの設計・開発、測定制御システムの開発、性能評価を行い、以下に示す成果を得た。

(1) 従来の広角静電レンズ(WAAEL)に減速機能を付加した減速比可変広角静電レンズ(VD-WAAEL)を実現し、エネルギーアパーチャーと投影レンズを組み合わせて新しい光電子分析器である減速比可変型のディスプレイ型分析器(VD-WAAEL Analyzer)を開発した。VD-WAAEL Analyzer は $\pm 45^\circ$ 以上の電子を減速しながら一点に収束し、その減速比は $1/20 \sim 1/5$ の範囲で任意の減速比を選択できる。広角静電型レンズ(WAAEL)に減速機能を付加したことでエネルギー分解能が向上し、従来の WAAEL システムでは必要であった CHA が不要となる。これにより申請者はこれまでの二次元光電子分析器に比べて小型でシンプルかつ安価な装置を実現した。

(2) アパーチャーサイズ $\phi 0.8\text{mm}$ 、減速比 $\varepsilon = 1/10$ の条件で本装置の取り込み角を測定し、 $\pm 45^\circ$ 以上の角度範囲で測定できることを確認した。また、エネルギー分解能は出射角度が大きくなるにつれて向上し、本装置の一番良いエネルギー分解能は、 $\theta = 40^\circ$ での $0.23\%$ と評価した。放出角度が $0^\circ$ 付近はエネルギー分解能が悪いため光電子回折などには利用できないが、 $20^\circ \sim 50^\circ$ の範囲は十分に利用できる。この範囲の立体角は通常の CHA に比べると数百倍大きいいため、大変効率の高い光電子回折・ホログラフィーの測定に使用できる新しい分析器といえる。

(3) アパーチャーサイズ $\phi 0.8\text{mm}$ 、 $\varepsilon = 1/20$ の条件で SUS316 #100 の顕微拡大像の測定を行い、シミュレーション通りの 25 倍の倍率の拡大像の測定に成功した。VD-WAAEL Analyzer は高分解能広立体角二次元光電子顕微分光器(DELMA)の WAAEL システムと同様に、光電子回折測定・顕微拡大像測定モードを切り替えることができ、所期性能を達成したことを確認した。この機能は今後需要が見込まれる微小試料や試料の位置選択に有用である。また、VD-WAAEL Analyzer は光電子を減速していることにより投影レンズへの印加電圧を抑制できることも特徴であり、DELMA では不可能であった硬 X 線を用いた顕微拡大像の測定が期待される。

このように、本論文において報告された減速比可変型のディスプレイ型光電子分析器は工学的に高い価値を有しており、新奇物質の構造解析や半導体・超伝導材料等の物性物理の解明への応用が期待できる。よって審査員一同は本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。