

氏 名 高 橋 尚 志

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第254号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 構造分子科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 スピン分解光電子分光装置の製作と0/Cs/GaAs(100)の共吸着状態
の研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 宇理須 恆雄
助 教 授 鎌田 雅夫
助 教 授 木下 豊彦
助 教 授 鹿野田 一司
教 授 曾田 一雄（名古屋大学）

論文内容の要旨

光電子分光法は、固体や表面の電子状態を研究するための重要な手段となっているが、従来の光電子分光実験の多くは固体や表面の電子のエネルギーや運動量を測定するものであり、電子のスピン測定については、基本的な量子数であるにもかかわらず、実験上の様々な困難により、ほとんど行われてこなかった。しかし近年、超高真空技術の発展や放射光光源の普及、スピン分解検出器の開発にともなって、スピン分解光電子分光法による研究がようやく行われるようになってきた。例えば放射光分野では、BESSY (独)、Brookhaven (米国)、陽エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリーなどで、スピン分解光電子分光実験装置を用いた研究が活発に行われるようになってきた。それらのスピン分解光電子分光実験は主として磁性体を対象としているが、スピン分解光電子分光法は円偏光と組み合わせれば、非磁性体、磁性体を問わず、広く物質一般に適用可能な手法である。これを用いることで、例えば非磁性体であるGaAsやSi表面上の吸着系についてのスピン情報を直接的に得ることができるなど、従来知られていなかった知見を得る上で極めて有用な方法である。

そこで、光電子のエネルギー、運動量そして電子スピンを測定するための、小型のスピン-角度分解型の光電子分光装置を分子科学研究所UVSORのビームラインBL-5Aにおいて製作した。この光電子分光装置は、電子エネルギー分析器、レンズ系、スピン検出器で構成され、それらは、磁気シールド(Mu-metal)で囲まれて、超高真空チャンバー中で一軸回転のゴニオメータ上に設置されている。また、エネルギー分析器部には、スピン検出器とは独立に角度分解光電子分光装置として機能し、効率よく通常の角度分解光電子分光実験が可能となるように検出器(チャンネルトロン)を設置した。

スピン検出部は、90度偏光器、金のターゲット、4分割されたアノード、レンズ系で構成されている。スピン検出の方法としては、低エネルギー散乱型を採用した。低エネルギー散乱型検出器の動作原理は、従来のMott型検出器と同様に入射電子のターゲット(金)原子内でのスピン軌道相互作用によっているが、この方式は、Mott型検出器に比べて動作電圧が低く(150-250 eV)、小型で(約 $0.15 \times 0.05 \times 0.05 \text{ m}^3$)簡便であり、計数効率も高いという利点を持っている。一般的にこのタイプのスピン検出器の動作原理は、スピン軌道相互作用の l - s 項によるので、ターゲットでの散乱面に直交するスピン偏極成分が観測され、入射電子の進行方向にそった成分は観測されない。他方、試料表面に垂直方向の光電子は、固体の逆格子ベクトル空間に於けるバンド分散を知る簡便な方法として測定されており、そのスピン偏極度を調べることは非常に重要である。そこで、エネルギー分析器とスピン検出器の間に90度偏向器を導入し、スピンの試料表面に平行な成分と垂直な成分を同時に測定できるようにした。

電子光学系のパラメータは、ヘリウム(ネオン)放電管を用いて、GaAs(100)表面からの光電子を測定することにより最適化した。また、レイトレースの結果を参照しつつ、最適条件を調べた。その結果、各パラメータの値が設計値に近いことが判明し、エネルギー分析器としての完成をみた。スピン検出器の性能評価のためには、負の電子親和力(Negative Electron Affinity: NEA)を有するため光電子イールドが非常に高く、またスピン偏極度の高い電子線源として期待できるO/Cs/GaAs(100)表面を作成した。この表面にチ

タン-サファイヤレーザーの光を円偏光させたものを励起光として照射し、O/Cs/GaAs(100)NEA表面から放出される、スピン偏極した光電子を観測した。その結果、スピン分解した光電子分光スペクトルの測定に成功し、スピン及び角度分解型光電子分光装置の完成を確認した。

スピン偏極電子源として用いたGaAsのNEA表面は、GaAs(100)基板上へのCsと酸素の共吸着により形成されたものであり、良質のフォトカソードとして実用されている。しかしGaAsのNEA表面は、応用面ではすでに実用段階にありながらも、基板にCsと酸素がどのように共吸着しているか、どのようにして仕事関数を下げるのか、などの基本的な機構はよく理解されていない。そこで負の電子親和力を持つ共吸着状態を理解する目的で、真空紫外光電子分光法(UPS)を使ってO/Cs/GaAs(100)の電子状態を研究した。得られた結果によれば、一回目のCs吸着によりGa-3dとAs-3dの光電子ピークは低結合エネルギー側にシフトし、一方n回目の吸着では高エネルギー側にシフトした。さらに、一回目の酸素吸着で、酸化Asのピークが現れ、Ga-3dのピークの幅が広がり、またCs-4dのピークが大きくなった。一方n回目の酸素吸着ではこのような傾向は観測されなかった。これらの結果は、NEA表面が2段階の過程で形成されていくことを示している。一回目のCsと酸素の吸着時にはGaとAsは、共にCsと酸素と反応して、表面層の再構成が起こっていると思われる。一方n回目の吸着に於いては、すべての光電子ピークは仕事関数とともに同じ方向のシフトを見せることから、これらのスペクトルの変化はCs吸着と酸素吸着に対応したバンドの曲りでよく説明しうる。n回目の吸着では、Ga、As、CsとOの各原子で構成される表面層あるいはクラスターが作られ、NEA面になっていると考えられる。以上の結果は、既存のNEA形成のモデルでは説明できないものであり、新しいモデルの構築を必要とするものであることがわかった。

審査結果の要旨

本論文は、スピンおよび角度分解光電子分光装置の製作とGaAs(100)表面におけるCsと酸素の共吸着状態の研究を行ったもので、4章で構成されている。

第1章序論の前半では、光電子分光法の概説、スピン状態と散乱断面積の記述、電子スピン検出法の原理の説明、および種々のスピン検出法の比較などが行われている。その内容から、申請者が、固体の光電子分光法の全体像を良く理解し、新しいスピンおよび角度分解光電子分光装置の原理と製作の意義を正確に把握していること、が判断できる。また後半では、スピン偏極電子の発生の原理、負の電子親和力を持つ半導体表面の生成の意味、GaAs(100)表面におけるCsと酸素の共吸着状態の研究の目的などが記述されており、申請者の固体分光学ならびに表面科学における基本的理解の確かさを示している。

第2章の前半では、申請者が製作した、低エネルギー散乱型のスピンおよび角度分解光電子分光装置の設計の基本概念と回路構成について記述されている。後半では、装置の最適化調整と電子軌道計算の結果が報告され、次いで、スピン偏極電子源のための円偏光の発生と負の電子親和力表面の生成方法が述べられ、最後に、スピン偏極電子源を用いて行った、スピン分解光電子分光スペクトルの測定結果が報告され、本装置の性能評価を行っている。その内容から、申請者が、装置の製作だけでなく、電子光学系のパラメータの最適化、軌道計算結果との比較、さらにスピン偏極電子源を用いての装置の確認を行い、極めて質の高い研究を行ったことが分かる。

第3章では、負の電子親和力表面についての研究歴史を概観した後、GaAs(100)上にCsと酸素を交互に共吸着させた場合の内殻光電子分光スペクトルと仕事関数の変化を、別の真空紫外光電子分光装置を使って研究した結果を報告している。申請者は、Ga-3d、As-3d、Cs-4dの各ピークのエネルギー位置、強度、および幅の変化が、一回目のCs吸着や酸素吸着の場合と、 n 回目の吸着の場合とで明らかに異なっていることを見出し、負の電子親和力表面が2段階の過程で形成されていくとの考えを提唱している。この内容は、負の電子親和力表面の形成過程を解明する上で、重要な手がかりを与えるものである。

第4章で、以上の研究を総まとめすると共に、今後の展望を示している。

このように、本研究は、低エネルギー散乱型のスピンおよび角度分解光電子分光装置の製作と性能評価を行い、装置の完成を確認すると共に、GaAs表面上のCsと酸素の共吸着状態を調べた、極めてレベルの高い内容であり、理学博士の学位論文として十分である。

また、審査委員会においては、本論文の発表を行わせ、その内容および関連する基礎的知識などについて試問を行った。低エネルギー散乱型の検出器を採用し、90度偏光器を導入し、かつ試料面に垂直のスピン成分も検出できる小型のスピン・角度分解型の光電子分光装置の製作に初めて成功した。さらに性能評価により所望の性能を確認している。また、GaAs表面のCsと酸素の共吸着状態の研究も加え、非常にレベルの高い研究内容で、深い基礎知識と高度な装置製作能力を有することを示す。公开发表における発表もすぐれており、また、装置の製作に関し、査読のある英文の雑誌に発表しており、語学力も十分と判定される。理学博士の学位授与に十分な学力があるものと判定した。