

氏 名	直 井 美 貴		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻		
学 位 論 文 題 目	飛行時間法による高分解能光電子分光		
指 導 教 官	東北大各教授 荒井 賢一		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 荒井 賢一	東北大学教授 脇山 徳雄	
	東北大学教授 宮本 信雄	東北大学助教授 上原 洋一	

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

UPS や XPS 等を代表とする光電子分光法は、物質の電子状態を探る有力な手段である。しかし、そのエネルギー分解能は数十 meV 以上であるため、フォノン等の情報を得ることは困難である。これらの分光法に対し、パルスレーザーと飛行時間法を組み合わせた高分解能飛行時間電子分光法を用いれば、従来にない高いエネルギー分解能で電子のエネルギー分析が可能である。

本研究では、高分解能光電子分光の研究対象として、NEA 半導体表面を選んだ。Cs と O₂ を試料表面に共吸着させることにより実現される NEA 表面は、光電面、スピン偏極電子源として広く用いられているにもかかわらず、その光電子のエネルギー広がり機構は未解明である。そこで、NEA 半導体表面からの放出光電子を飛行時間電子分光法により高エネルギー分解能で分光分析することにより、光電子放出機構を解明することを目的とした。

第 2 章 NEA-GaAs 表面

本章では、NEA 半導体表面に対して従来提案されている表面形成および光電子放出機構モデルについて概観した。表面形成モデルとしては、NEA-GaAs に対して提案されている代表的なヘテロ接合モデルおよび表面双極子モデルについて述べ、表面における電子親和力の低下機構について説明した。光電子放出機構モデルとしては、放出光電子の量子効率を定式化した Spicer の 3 段階光電子放出モデル、電子と光学フォノンとの多重散乱を考慮した場合の光電子スペクトルを議論した James and Moll の理論について述べた。James and Moll の理論から、放出光電子スペクトル

は、光学フォノンエネルギーに相当する間隔の微細構造をもつことが予測されることを示した。

第3章 高分解能飛行時間電子エネルギー分析器

高分解能飛行時間電子分光法は、パルスレーザーと飛行時間法を組み合わせて実現される。飛行時間法の原理は単純である。すなわち、飛行時間法では電子がある一定距離 L 飛行するのに要した時間 T の計測から電子の速さ $v (=L/T)$ を求め、電子のエネルギー E を $E=mv^2/2$ から決定する。実際の計測においては、パルス幅 ΔT_1 をもつ電子パルスを飛行させ、時間 T をかけて到着した電子数を時間精度 ΔT_2 で計測する。したがって、時間 T を連続的に変化させ電子数を計測することにより電子の飛行時間スペクトルを求めることができる。この場合、計測時におけるエネルギー分解能 ΔE は次式で表現される。

$$\Delta E = 2 \left(2/m \right)^{1/2} E^{3/2} (\Delta T_1 + \Delta T_2) L^{-1}$$

したがって、電子を低エネルギーで飛行させ、高い時間精度で飛行時間を計測することにより、高エネルギー分解能電子分光が実現できる。

本研究の計測システムでは、光エネルギー1.51eV、パルス幅60psのGaAlAsレーザーを試料表面に入射し、光電子パルス ($\Delta T_1 \sim 60$ ps) を発生させる。この電子パルスを56cm飛行させ200psの精度で飛行時間を計測する。実験時において、典型的飛行エネルギーは3eVであるので、エネルギー分解能は4meVである。

第4章 NEA-GaAs表面からの光電子分光分析

高分解能飛行時間電子分光器を用いて、NEA-GaAs (100) 表面からの放出光電子のエネルギー分布を測定した。

試料はP型GaAs (不純物密度 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) で、超高真空中 ($< 7 \times 10^{-11}$ Torr) において加熱清浄化 (350°C, 12時間) を行った。その後、放出光電子数が最大になるよう試料表面にCsとO₂を交互吸着させることによりNEA表面を形成し (Yo-Yo法)、光電子スペクトルを計測した。実際の測定では、試料を超高真空容器内に挿入してこのような (試料清浄化、表面活性化、光電子スペクトル計測) 過程を繰り返し光電子スペクトルを計測した。

図1に観測されたNEA-GaAs (100) 表面からの光電子スペクトルを示す。図1 (a) は、試料を超高真空容器内に挿入直後に得られたスペクトルであり、微細な構造は観測されない。図1 (b) は、(試料清浄化、表面活性化、光電子スペクトル計測) 過程を繰り返すことにより最終的に得られた光電子スペクトルである。スペクトル全体にわたって約50meV間隔の微細構造を持ち、その1つのピークの半値幅は20meV以下と非常に狭いことがわかる。

第5章 NEA-GaAs表面からの光電子放出機構

第4章で示した光電子スペクトルの周期構造の原因について考察し、NEA-GaAs (100) 表面からの光電子放出機構を検討した。

光電子スペクトル中の微細構造の原因として、GaAs表面バンド曲がり領域に存在する素励起と

の多重散乱および GaAs 表面バンド曲がり領域に形成された電子準位が考えられる。前者の素励起として、GaAs の光学フォノン、表面・界面ポラントン、バンド曲がり領域に蓄積した電子による 2 次元表面プラズモン、Cs+O₂ 層のフォノンを、後者の電子準位として 2 次元表面サブバンドを考察した。考察の結果、電子と素励起との多重散乱では光電子スペクトル中の微細構造は説明できないことを示した。

結論として得られた光電子放出機構モデルを図 2 に示す。GaAs 表面バンド曲がり領域では、空乏層幅と電子の波長がほぼ等しくなるため 2 次元サブバンドが形成されている。

光電子放出機構は以下のとおりである。

- ① 価電子帯から伝導帯へ電子が光励起され、伝導帯の底に緩和される。
- ② 伝導帯底に緩和された電子の一部が表面方向に拡散し、 Γ 点の 2 次元サブバンドへ緩和される。
- ③ Γ 点 2 次元サブバンドに緩和された電子が 2 つめのフォトンを受取り、X 点に移り、その 2 次元サブバンドに緩和される。
- ④ X 点 2 次元サブバンドから表面活性化層をトンネルして真空中に放出される。

したがって、図 1 (b) に示された微細構造は、X 点の 2 次元サブバンド構造を反映したものである。

第 6 章 NEA-Si 表面からの光電子分光分析

高分解能飛行時間電子分光器を用いて、NEA-Si (100) 表面からの放出光電子のエネルギー分布を測定した。

試料は P 型 Si (不純物密度 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) で、超高真空中 ($< 7 + 10^{-11} \text{Torr}$) において通電加熱 (100°C, 20 分) することにより表面清浄化を行った。その後、Cs と O₂ を飽和吸着させることにより NEA 表面を形成した。

図 3 に観測された NEA-Si (100) 表面からの光電子スペクトルを示す。この図から、20~40 meV 間隔の微細構造がスペクトル中にあることが分かる。

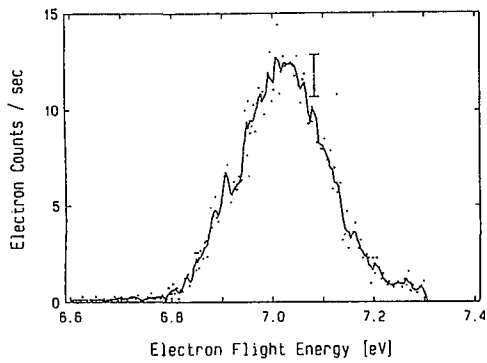
第 7 章 NEA-Si 表面からの光電子放出機構

第 6 章で得られた NEA-Si (100) 表面からの光電子スペクトルの微細構造を 2 次元サブバンドモデルで解釈する。Si の場合、伝導帯においてエネルギーが 2 番目に高い極小点が、エネルギーの最も低い極小点である X 点近傍よりも 1.5eV 高いため、GaAs とは異なり、X 点近傍だけが光電子放出機構に関与すると考えられる。表面バンド曲がり領域に形成された X 点の 2 次元サブバンド準位の計算値と観測された光電子スペクトルを比較したものを図 4 に示した。この図から、サブバンド準位が光電子スペクトルの微細構造とよく一致することが分かる。すなわち、観測された光電子スペクトルの微細構造は、X 点近傍の 2 次元サブバンドを反映したものである。

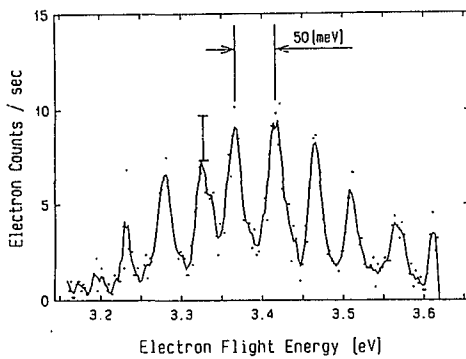
第 8 章 総 括

本研究では、飛行時間法による高分解能光電子分光を目的とし、その研究対象に NEA-半導体

表面を選び、放出光電子を高エネルギー分解能で分光分析することにより光電子放出機構の解明を目指した。その結果、NEA 半導体表面からの放出光電子スペクトル中に微細構造があること、また、その物理的原因は表面バンド曲がり領域に形成された2次元サブバンドであることを明らかにした。



(a)



(b)

図1 NEA-GaAs (100) 表面からの光電子スペクトル

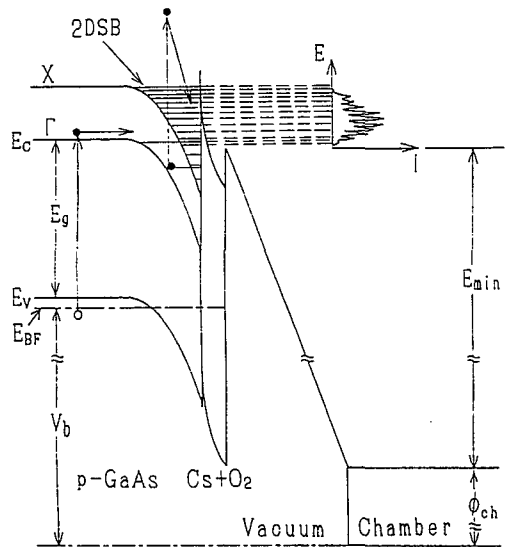


図2 2次元サブバンドモデル

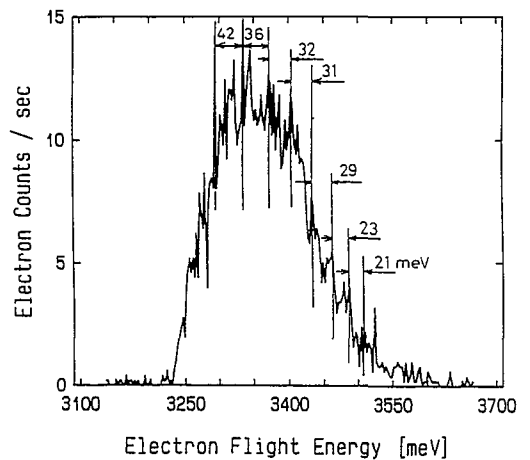


図3 NEA-Si (100) 表面からの光電子スペクトル

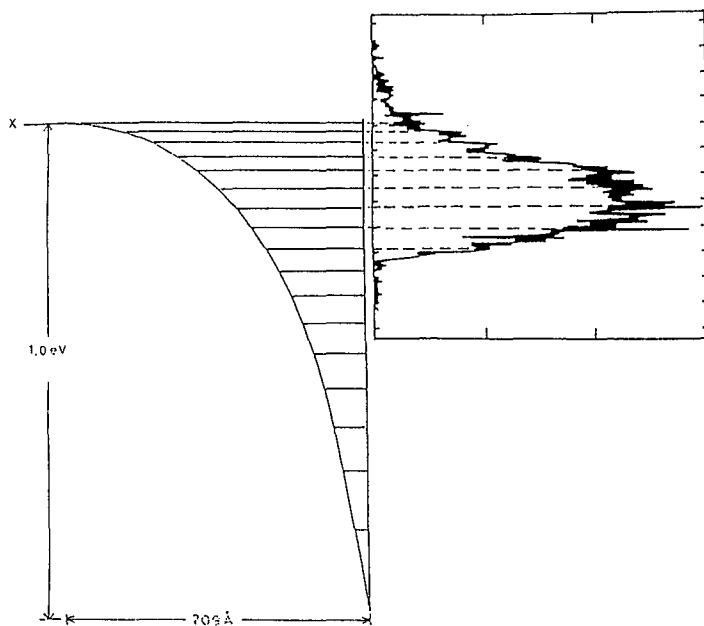


図4 NEA-Si(100)表面からの光電子スペクトルと
2次元サブバンドモデルの比較

審査結果の要旨

光電子分光法は物質表面の電子状態に関する知見を得るための強力な計測手段として知られているが、一般的な光電子分光実験のエネルギー分解能は50meVよりも悪いのが現状である。このため、CsとO₂を共吸着することにより達成される負の電子親和力（以下NEAと略す）をもつ半導体表面は、光電面やスピン偏極電子源等に広く実用化されているにもかかわらず、その光電子のエネルギー広がり機構は未解明である。著者は約5 meVの高いエネルギー分解能を有する飛行時間型光電子分光法を用い、NEA半導体表面から放出される光電子のエネルギー分布を計測し、その広がり機構について検討した。本論文はその研究結果をまとめたもので全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章ではNEA半導体表面に対して従来提案されている表面形成と光電子放出機構のモデルについて概観している。

第3章では研究に用いた飛行時間型光電子分光法の原理と構成について述べている。

第4章では電子源としての実用上の観点からもっとも活発に研究されているNEA-GaAs(100)表面から放出される光電子のエネルギー分布を飛行時間型光電子分光法を用い測定を行った結果、そのスペクトル中に約50meV間隔の周期構造を初めて見いだしたことを述べている。

第5章では前章で得られた周期構造の原因について考察し、この構造が従来提唱されている光電子放出機構では説明が困難であり、表面近傍のバンド曲がり領域の2次元サブバンドに緩和した電子が表面障壁を共鳴的にトンネルして真空中に脱出するという新たな機構を提案し、その妥当性について検討したことを述べている。

第6章ではCsとO₂の吸着構造が完全に解明されているNEA-Si(100)表面の光電子分光実験を初めて行い、20~40meV間隔の微細構造をもつ光電子スペクトルが観測されたことを述べている。

第7章ではNEA-Si(100)表面の光電子放出機構について考察し、この場合も第5章のNEA-GaAs(100)表面と同様に、表面近傍のバンド曲がり領域の2次元サブバンドに緩和した電子が表面障壁を共鳴的にトンネルして真空中に脱出することを述べている。NEA半導体表面の光電子スペクトル中に微細なエネルギー構造が存在することおよび、その物理的起源がバンド曲がり領域の2次元表面サブバンドにあることを初めて明らかにしたことは、表面物性工学上重要な発見である。

第8章は総括である。

以上要するに本論文は、高いエネルギー分解能を有する飛行時間型光電子分光器を用いてNEA-GaAs(100)およびNEA-Si(100)表面からの放出光電子を従来にはない高いエネルギー分解能で分光し、光電子の放出機構に関する新しい知見を得たものであり、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。