

学位論文題名

ELECTRON TUNNELING SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF NARROW-GAP SEMICONDUCTOR ANTIMONY TELLURIDE AND SEMIMETAL ANTIMONY

(ナローギャップ半導体 Sb_2Te_3 ならびに半金属 Sb の電子トンネル分光解析)

学位論文内容の要旨

近年、ナノ領域におけるエレクトロニクス分野では微細加工技術の進歩にともない共鳴トンネルダイオードや単一電子トンネルデバイスにおいて代表されるようにトンネル現象が広く一般的な動作原理として利用されるようになってきている。

一方、このトンネル現象を用いたトンネル分光法は Esaki、Giaever、Josephson のノーベル賞受賞以後、固体中を通過するトンネル電子を利用して固体中のフェルミ面近傍の準粒子状態密度あるいはフォノン、マグノン、プラズモン等の各種素励起スペクトルを検出するための分光法として各種物質の評価法として広く用いられ、比較的浅い歴史ながらも非常に強力な分光法であることが立証されてきている。しかしながら、この分光法の検出原理と関連していくつかの点が未解決の問題として残されている。本論文では弾性・非弾性トンネル過程、それぞれに関する 2 つの基本的なテーマをナローギャップ半導体 Sb_2Te_3 およびその構成要素である半金属 Sb を用いることにより検討、考察を行っている。

はじめに本論文の構成について述べる。第 1 章の Introduction では固体物性におけるトンネル分光法の位置づけを述べた後、本論文全体の概略について述べている。第 2 章 Basic Concepts ではまずトンネル分光法について弾性トンネル電流と非弾性トンネル電流から得られる情報に関して以後の章との関連で述べられている。次に、本研究で用いられている Sb_2Te_3 と Sb の物性に関して記述されている。第 3 章 Experimental Technique ではトンネル接合の作製法に関して述べた後、トンネル分光システムの構成に関して記述されている。第 4 章 Results and discussion では実験結果、および考察結果について詳述されている。

通常、トンネル分光法により固体中の準粒子状態密度の観測を行う場合、弾性トンネル電流を検出することになる。この場合、トンネル電流はトンネル確率の中の主として指数関数因子 $\exp(-\alpha \cdot d)$ (α : 減衰定数、 d : トンネル障壁の厚さ) により決定される。一般に指数関数因子中の波数 α はトンネル障壁の高さ V とトンネル電子のエネルギー E を用いてこれらの関数 $\alpha = \alpha(V, E)$ として表されることが多いが、本来、トンネル障壁中のトンネル電子の運動はエネルギー E と波数 k の分散関係 $E(k)$ により記述されるものと考えられる。したがって、指数関数因子中の k は上記分散関係と密接な関係があるものと考えられる。本論文でははじめにこの点に関して Sb_2Te_3 をトンネル障壁に用いた金属-ナローギャップ半導体

ー金属タイプのトンネル接合を作製し、そのトンネルコンダクタンスー電圧特性の観測を行い、トンネル障壁中の分散関係についての検討を行っている。観測されたトンネルコンダクタンスはゼロバイアスで非常に半値幅の狭い特徴的なコンダクタンス極大ピークを示している。このピークを解析するために通常用いられているトンネル方程式をトンネル電子の障壁中での任意の分散関係が導入できるような形に定式化を行った。次にナローギャップ半導体の分散関係として知られているKaneの2バンドモデルにおける同一の有効質量を用いた分散曲線を伝導帯、価電子帯、両端からエネルギーギャップ中に射影を行い、ギャップの中心で解析接続を行うことによりギャップ中での分散関係を求めた。この分散関係を先に求めたトンネル方程式中に代入し、測定結果との比較を行った。その結果、 Sb_2Te_3 中におけるフェルミレベルが価電子帯端の直上に位置すると考えることによりコンダクタンスピークの振舞いが良く記述されることが示された。さらに、このトンネル方程式を用いてフェルミレベルの位置のトンネル特性に対する効果についての検討を行った。その結果、フェルミレベルがmiddle-gapよりも上側に位置する場合、通常の放物線的な特性を示すがmiddle-gap以下に位置する場合、分散関係における伝導帯と価電子帯のcoupling-termの効果によりコンダクタンスピークが観測されることが示唆された。

以上は弾性トンネル電流とトンネル障壁中の分散関係についての考察であるが、物質中の素励起を検出しようとする場合、非弾性トンネル電流を検出することになる。トンネル電子はそのDirectional Sensitivityによりトンネル電子の入射方向に垂直な波数の保存則 (Specular Tunneling) に関連してフォノンとの選択的なカップリングが生ずるものと考えられている。したがって、当然トンネル接合界面に現われている結晶面に依存したフェルミ面およびフォノンが観測されることが期待されるが、驚くことにこのようなフェルミ面・フォノンの異方性 (Anisotropy) はこれまでトンネル分光で観測されていない。第2番目のテーマとしては半金属Sbを用いた金属ー絶縁物ー半金属タイプの接合を作製しトンネル実験を行い、上記の異方性に関する検討が行われている。観測されたトンネルコンダクタンスではSb薄膜において現われる結晶面の変化に伴い、トンネルコンダクタンスの一定の変化が観測されている。すなわち単結晶面が現われている場合、Sbのホールのフェルミエネルギーおよび光学吸収端に相当するエネルギー領域で変曲点が観測されており、多結晶面の出現に伴い、これらの変曲点が消失し、通常、金属ー絶縁物ー金属トンネル接合に特徴的な曲線に近づいていくことが確認された。これは明らかに、フェルミ面の異方性を反映しているものと解釈される。すなわち、多結晶面の出現に伴い、トンネル電子の入射方向に対して垂直なSbの電子・ホールポケットの断面に現われる波数空間が変化している結果、観測されているようなコンダクタンスの変化が生ずるものと考えられる。このようなトンネルコンダクタンスの系統的な変化はこれまでに観測されていない。一方、2次微分トンネルスペクトルにおいても、単結晶面から多結晶面の出現に伴い、intervalley音響・光学フォノンおよび第2高調波光学フォノンピークに加えてintravalley音響フォノンピークが明瞭に観測された。このようなintravalleyフォノンピークは中性子線回折やラマン散乱のような他の分光法だけではなくトンネル分光法においてもこれまでに一度も観測されていない。また、トンネルスペクトルにおける半金属フォノンの検出はこれが最初の例である。このような異なる面指数の出現に伴うintravalleyフォノンピークの出現は明らかにフォノンの異方性が観測されていることを示している。また、intervalley 音響・光

学フォノンピークに関しても接合界面に現われる結晶面の変化に伴いこれらのピークの半値幅に明らかな減少が観測されている。この観測結果も接合界面に平行な波数成分に関する保存則が非弾性電子トンネル過程を通してのフォノン検出における選択性の向上に有効に機能していることを明確に示しているものと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 池 田 正 幸
副 査 教 授 岡 田 亜紀良
副 査 教 授 福 井 孝 志

学 位 論 文 題 名

ELECTRON TUNNELING SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF NARROW-GAP SEMICONDUCTOR ANTIMONY TELLURIDE AND SEMIMETAL ANTIMONY

(ナローギャップ半導体 Sb_2Te_3 ならびに半金属 Sb の電子トンネル分光解析)

ナノ領域のエレクトロニクスにおいて共鳴トンネルダイオードや単一電子トンネルデバイス等の様にトンネル現象が積極的に利用されるようになってきている。

トンネル現象を用いたトンネル分光法は Esaki、Giaever、Josephson のノーベル賞受賞以後、固体中を通過するトンネル電子を利用して固体中のフェルミ面近傍の準粒子状態密度あるいはフォノン、マグノン、プラズモン等の各種素励起スペクトルを検出するための分光法として各種物質の評価法に用いられ、比較的浅い歴史ながらも非常に強力な分光法であることが立証されてきている。しかしながら、この分光法の検出原理と関連していくつかの点が未解決の問題として残されている。本論文では弾性・非弾性トンネル過程、それぞれに関する 2 つの基本的なテーマをナローギャップ半導体 Sb_2Te_3 およびその構成要素である半金属 Sb を用いることにより検討、考察を行った。

- 1) トンネル分光法により固体中の準粒子状態密度の観測を行う場合、弾性トンネル電流を検出することになる。トンネル障壁中のトンネル電子の運動はエネルギー E と波数 k の分散関係 $E(k)$ により記述されるものと考えられる。したがって、トンネル確率の内で指数関数因子中の k は上記分散関係と密接な関係があるものと考えられる。本論文でははじめにこの点に関して Sb_2Te_3 をトンネル障壁に用いた金属-ナローギャップ半導体-金属タイプのトンネル接合を作製し、そのトンネルコンダクタンス-電圧特性の観測を行い、トンネル障壁中の分散関係に関しての検討を行った。観測されたトンネルコンダクタンスはゼロバイアスで非常に半値幅の狭い特徴的なコンダクタンス極大ピークを示している。Kane の 2 バンドモデルにおける分散曲線をギャップの中心で解析接続を行うことによりギャップ中での分散関係を求めた。この分散関係を定式化を行ったトンネル方程式中に代入し、測定結果との比較を行った。その結果、 Sb_2Te_3 中におけるフェルミレベルが価電子帯端の直上に位置すると考えることによりコンダク

ダンスピークの振舞いが良く記述されることが示された。またフェルミレベルがmiddle-gapよりも上側に位置する場合、通常の放物線的な特性を示すがmiddle-gap以下に位置する場合、分散関係における伝導帯と価電子帯のcoupling-termの効果によりコンダクタンスピークが観測されることが示唆された。

- 2) 物質中の素励起を検出しようとする場合、非弾性トンネル電流を検出することになる。トンネル電子はそのDirectional Sensitivityによりトンネル電子の入射方向に垂直な波数の保存則 (Specular Tunneling) に関連してフォノンとの選択的なカップリングが生ずるものと考えられている。したがって、当然トンネル接合界面に現われている結晶面に依存したフェルミ面およびフォノンが観測されることが期待されるが、フェルミ面・フォノンの異方性 (Anisotropy) はこれまでトンネル分光で観測されていない。第2番目のテーマとしては半金属Sbを用いた金属-絶縁物-半金属タイプの接合を作製しトンネル実験を行い、上記の異方性に関する検討を行った。観測されたトンネルコンダクタンスではSb薄膜において現われる結晶面の変化に伴い、トンネルコンダクタンスの一定の変化が観測されている。すなわち単結晶面が現われている場合、Sbのホールのフェルミエネルギーおよび光学吸収端に相当するエネルギー領域で変曲点が観測されており、多結晶化に伴い、これらの変曲点が消失し、通常、金属-絶縁物-金属トンネル接合に特徴的な曲線に近づいていくことが確認された。これは明らかに、フェルミ面の異方性を反映しているものと解釈される。一方、2次微分トンネルスペクトルにおいても、単結晶面から多結晶面の出現に伴い、intervalley音響・光学フォノンおよび第2高調波光学フォノンピークに加えてintravalley音響フォノンピークが明瞭に観測された。このような異なる面指数の出現に伴うintravalleyフォノンピークの出現は明らかにフォノンの異方性が観測されていることを示している。また、intervalley 音響・光学フォノンピークに関しても接合界面に現われる結晶面の変化に伴いこれらのピークの半値幅に明らかな減少が観測されている。この観測結果も接合界面に平行な波数成分に関する保存則が非弾性電子トンネル過程を通してのフォノン検出における選択性の向上に有効に機能していることを明確に示しているものと考えられる。

これを要するに、本論文は弾性および非弾性トンネル過程について原理的解釈をはかり、有益な多くの新知見を得ており、ナノエレクトロニクスならびに電子物性の分野に貢献するところ大なものがある。

よって本論文は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。