

報告番号 甲第 831 号

主論文の要旨

題名 Tunneling Spectroscopy of Impurity Band.

(不純物帯のトンネル スペクトロスコピー)

氏名 澤 木 宣 彦

不純物帯のトンネル分光ロスコピー

高不純物濃度半導体中の不純物状態に関する知見は、トンネルダイオードの動作特性のみならず、熱電素子や半導体レーザーの動作特性の研究と関連して、最近とみにその重要性が注目されるようになった。本研究は縮退半導体に於ける電子状態のエネルギースペクトルのトンネル分光学的研究手法を発展させ、不純物帯のエネルギースペクトルの決定法とともに電子の局在性について論じたものである。

従来の半導体研究におけるトンネル分光学的手法は完全結晶系をモデルとして WKB 近似による電流密度の公式によって行なわれてきたが、不純物状態に関する研究にはこの公式が不十分であることが示摘された。我々は不完全結晶系に於ける電流密度の公式を求めることを試みこれを基礎として縮退したゲルマニウムの不純物準位の研究をすすめて有意義な成果を得た。本論文は6つの章よりなり以下各章の内容を簡単に要約する。

第 1 章 序 論

半導体のトンネル分光学的研究手法の発展を概説し、本研究の行なわれるまでのこの分野の到達点と問題点を明らかにした。次に高不純物濃度半導体に特有の不純物帯の電子的、電気的諸性質に関する問題点を明らかにし、不純物帯の状態密度の決定という本研究の目的とその方法の概略を記した。

第 2 章 トンネル現象と状態密度

半導体のトンネル接合に於ける直接遷移の確率をジョージ・オペンハイマーの方法により計算し、従来行なわれてきた WKB 近似の不十分なことを示すことができると共に、接合ポテンシャルの形状、即ち接合の種類にかかわらずトンネル確率の表式の中に電子の状態密度を記述する付加因子のあるべきことを示した。この結果に基づいてトンネルダイオードの電流対電圧特性を解析することにより電子の状態密度を決定する方法を提案した。

第 3 章 不純物帯へのトンネル効果 (I)

高不純物濃度半導体中の電子状態は多体効果を取り入れて考えなければならぬが本章ではグリーン函数を用いた摂動展開の方法で一電子の波動函数を算出した。これを基礎として第2章の方法により p-n 接合のトンネル電流を表わす公式を提案した。これにより不純物帯の関与したトンネル現象を解析することが可能となった。次にこの公式をケルマニウムトンネルダイオードの直接遷移電流成分に適用して n 型ケルマニウム (000) 谷の状態密度を決定した。ここで不純物帯の存在が実験的に初めて確認されその状態密度は禁止帯の奥深く指数函数的に減衰する形であることが明らかとなり、不純物ポテンシャルの作る相互作用は長距離型であることが示された。またここで得られた結果は状態密度がフリーテルの和の法則を満たしていることを示し、(000) 谷に付随した不純物準位の最初の観測である。

第 4 章 不純物帯へのトンネル効果 (II)

本章では 第 3 章で 提案した 不純帯の関与した トンネル電流の公式の導出過程に含まれた欠点を補う為、グリーン函数の方法を一般化し、多重散乱による電子の基底状態の有限の寿命を取り入れたトンネル電流の公式を提案した。トンネル電流は電子の自己エネルギーの函数として与えられ、トンネルダイオードの二次微分コンダクタンスの測定から自己エネルギーの虚数部分、従って、不純物帯の状態密度のエネルギースペクトルを知ることができることを示した。この理論をゲルマニウムトンネルダイオードに適用し、第 3 章に於いて得られた結果の妥当性を示すことができた。即ち不純物帯は伝導帯と独立して存在することができ、その状態密度は指数函数的に減衰する。

第 5 章 電子の局在性と状態密度

第 3 章と 第 4 章で得られた実験結果は高不純物濃度半導体に於ける電子の局在性を示唆するものであ

った。本章ではこのことを確かめる為に同じ試料を用いて液体ヘリウム温度に於ける電流対電圧特性を測定し、ゼロバイアス付近に局在電子スピンの由来するコンタクト異常を観測した。この相互作用は反強磁性的であり、近藤効果の特性エネルギーは不純物濃度の函数で与えられることが明らかとなり従来理論と定性的一致を見た。また不純物帯に基づく局在スピンの交換相互作用のエネルギーは Mn 原子の作る局在電子スピンのそれより大きいことが示された。これらの結果から不純物帯の状態密度と電子の局在性とは密接な関係にあることが明らかにされた。

第 6 章 総 括

本研究の内容の概略を述べ得られた成果と残された課題について記した。