

氏名(本籍)	津村公平(鳥取県)		
学位の種類	博士(理学)		
学位記番号	博甲第5278号		
学位授与年月日	平成22年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	Optical investigations of modulation of the transport properties of superconductor/semiconductor junction and quantum interference effect in semiconductor two-dimensional system (光学的手法による超伝導体/半導体接合に於ける輸送特性変調と半導体二次元系中量子干渉効果の研究)		
主査	筑波大学教授	理学博士	舩本泰章
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	池沢道男
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	岡田晋
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	野村晋太郎
副査	東京理科大学教授	理学博士	高柳英明

論文の内容の要旨

様々な物質系に於いて量子干渉効果の研究が行われている。例えば、超伝導体/半導体/超伝導体(S-Sm-S)接合に於ける Andreev 反射と通常反射による Fabry-Perot 型の量子干渉効果による接合の臨界電流値の電子密度に対する振動、半導体二次元電子ガス(2DEG)中に形成された端状態と量子ポイントコンタクトの結合系に於ける Aharonov-Bohm (AB) 効果による磁場に対するコンダクタンス振動といった量子干渉効果の研究報告がなされている。これらはゲート電圧や磁場といった外的因子によって半導体の特性を適切にコントロールすることにより量子干渉性の制御を実現している。従って、物性物理学における量子干渉効果の研究では、半導体電子構造のチューナビリティーを生かすことが本質的に重要である。これまで半導体の特性制御にはゲート電圧が主として用いられてきたが、最近、量子ドットを介したソースドレーン間の輸送現象に対する光照射の影響についての報告例も成されている。本研究では量子干渉効果と光照射効果を結合できるような系として S-Sm-S 接合に着目し、接合に対する光照射効果の研究を行った。これまでも S-Sm-S 接合に対する光照射効果に関連した報告例はあるものの、その数は非常に少ない。そこで本研究では、光照射効果の存在を確認する点から研究を始めた。そして、光照射効果によって何がどのように変化するのか、さらに S-Sm-S 接合のどの部分が光に応答するのか、また光照射によって何か新たな現象を導くことができるのかを明らかにすることを目的とし、研究を行った。また興味深い構造である量子二次元に於ける量子干渉効果を明らかにすることも、本研究の目的である。本論文は、以下に示す全7章から構成されている。第一章では序論として、前述した本研究の背景、目的を述べた。第二章では、本研究の中心を成す S-Sm-S 接合に於ける現象の理論的背景について概説した。第三章では、本研究で行った測定について、測定系の構築、試料への配線方法、検出の方法について述べた。以降の章から実験結果とその議論に入る。第四章では、NbN/(GaAs/AlGaAs HEMT)/NbN からなる S-Sm-S 接合に対する光照射効果について述べる。この S-Sm-S 接合

では、光照射効果の存在を確認することから研究を始めた。まず試料全体に $\lambda = 800 \text{ nm}$ の光を照射し、 $T = 2.9 \text{ K}$ において微分抵抗-バイアス電圧 (dV/dI - V) 特性を測定した (一様光照射測定)。光照射下では光励起されたキャリアが2DEGの電子密度 (N_s) を増加させ、光照射時には接合の通常抵抗 (R_N) が非照射時と比較して半分以下まで減少した。また $2\Delta_{\text{NbN}}$ (Δ_{NbN} は NbN の超伝導ギャップエネルギー) に対応するバイアス電圧以下では dV/dI が光照射前より減少幅が大きくなることから、光照射によって S-Sm 界面での Andreev 反射確率が增大することを実験的に示した。Andreev 反射確率は S-Sm 界面でのポテンシャルバリア高さに強く依存することが知られており、実験結果より、光照射が S-Sm 界面近傍のポテンシャルバリアを低減したことを確認した。本結果はこれまでは報告例のない結果である。

上記の実験結果をさらに検証するため、局所光照射効果測定系を開発し、局所光照射効果測定を行った。この測定系では光学顕微鏡を用い、 $4 \mu\text{m}$ 以下の高分解能で液体ヘリウム温度にある試料に光照射ができ、その様子を顕微鏡に設置した CCD カメラにより観察可能である。測定ではオプティカルチョッパーにより照射光を $f = 159 \text{ Hz}$ に変調し、それと同期した電圧変化 ΔV (Photovoltage) を定電流バイアス下でロックインアンプにより検出した。そして局所励起位置を $2 \mu\text{m}/\text{step}$ で変化させながら上記測定を繰り返し、 ΔV の空間変化を実空間上でマッピングし、S-Sm-S 接合の局所的な光応答特性を取得した。この ΔV は定電流バイアス下で測定しているため、光照射に伴う接合の抵抗変化の様子をマッピングしていることと同義である。本測定により NbN/(GaAs/AlGaAs HEMT)/NbN 接合ではソース側 S-Sm 界面では $-\Delta V$ が、ドレーン側 S-Sm 界面では $+\Delta V$ が生じることがわかった。また Photovoltage の励起波長依存性からは 2DEG のバンドギャップエネルギーとほぼ等しい励起エネルギーで Photovoltage の絶対値が急激な変化をし始めることがわかり、Photovoltage は光励起によるバンド間遷移でつくられたキャリアによって生じていることがわかった。さらに Photovoltage の励起強度依存性から、ソース側とドレーン側にそれぞれ生じる $-\Delta V$ と $+\Delta V$ は異なる励起強度依存性を示し、特に照射光強度 50 nW の弱励起下では $-\Delta V$ しか現れないことが分かった。これらの Photovoltage が生じる要因は光励起で生成されたホールが界面近傍にトラップされるというモデルで、定性的に理解できる。例えば、ソース電極近傍に局所光照射でつくられたホールがトラップされると仮定すると、局在したホールによるポテンシャルによりソース電極側のポテンシャルは減少するため、ソース-ドレーン間電圧 (V_{SD}) は減少する。よって、ソース電極側では $-\Delta V$ が検出される。逆にドレーン側局所励起でホールがドレーン電極近傍にトラップされると、局在したホールによるポテンシャルがドレーン電極側のポテンシャルを下げ、 V_{SD} が大きくなり $+\Delta V$ が検出される。この仮定で実験結果が定性的に説明できた。そして、こういったホールの局在効果をつくるものが、S-Sm 界面近傍のポテンシャルバリアであると結論付けた。また、これまではポテンシャルバリアの存在は輸送特性の測定結果のフィッティングからその存在が確認されるものであったが、本測定はポテンシャルバリアの空間的分布を可視化した。

第五章では、Nb/(In_{0.7}Ga_{0.3}As/In_{0.52}Al_{0.48}As i-HEMT)/Nb 接合に対する光照射効果について述べる。一般的に、InAs では金属を接触させた際にショットキーバリアは形成されないため、この試料では InGaAs/InAlAs ヘテロ接合の一部をエッチングし、2DEG に対して直接 Nb が接触した構造がつくられており、前述の GaAs/AlGaAs を用いた接合とは構造が異なっている。この試料では光照射により 2DEG の電子密度は減少する。その一方で、光照射強度の増加とともに dV/dI - V 特性には多重 Andreev 反射による構造がより鮮明に現れ、光照射によって Andreev 反射確率が增大していることが確認できた。ある条件下では多重 Andreev 反射によって形成された Andreev 束縛状態を介して 2DEG 中を超伝導電流が流れる。これは Andreev 反射された電子とホールの量子干渉効果と理解できるが、本試料の実験結果から、光による S-Sm-S 接合に於ける量子干渉効果の制御可能性が示唆された。第六章では、二次元系に於ける量子干渉効果について述べ、量子二次元系である量子チューブに於ける量子干渉効果について議論する。均質に成長された高品質の InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤ (CMS-NWs) の発光測定を行った。CMS-NWs ではチューブ状の InAs

量子井戸 (QW) が形成されており、発光スペクトルのピークはこの QW からの発光であると同定された。そしてピークエネルギーは印加磁場に対して振動的な変化を示した。計算結果より、このエネルギー振動は荷電励起子の AB 効果によるものであると結論付けた。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、超伝導体 / 半導体 / 超伝導体 (S-Sm-S) 接合に於ける Andreev 反射と通常反射による量子干渉効果による接合の輸送特性の光照射による変調効果と、半導体二次元系である量子チューブに於ける Aharonov-Bohm 効果による発光エネルギーの磁場の振動に関する研究についてまとめた論文である。今回、新たに構築された磁場中低温顕微光照射系を用いた S-Sm-S 接合に対する光照射効果の空間分解に関して研究が行われた。本研究によって、光照射により S-Sm 界面での Andreev 反射確率が増大することを実験的に示され、S-Sm 界面近傍のポテンシャルバリアと関連づけて説明された。これは、S-Sm-S 接合に対する空間的な知見が得られた初めての例として高く評価できる。さらに、高品質の InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの磁気発光測定を行い、発光ピークエネルギーが印加磁場に対して振動的な変化を示すことが初めて見いだされた。計算結果との比較により、このエネルギー振動は荷電励起子の AB 効果によるものであると結論付けられた。以上のように新規に見いだされた実験結果が十分に議論され、本論文は博士 (理学) に相当するものである。

よって、著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。