



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Optical Study on Proximity Effect and Cooper Pair Recombination in Semiconductor Quantum Dots [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Shabnam, Sinthia Mou
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第12187号
Issue Date	2016-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61704
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Mou_Sinthia_Shabnam_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 Mou Sinthia Shabnam

学 位 論 文 題 名

Optical Study on Proximity Effect and Cooper Pair Recombination in Semiconductor Quantum Dots
(半導体量子ドットにおける近接効果とクーパー対再結合に関する光学的研究)

近年安全・安心な通信に対するニーズの高まりから、原理的に安全な量子情報通信の研究、特に量子もつれ光子対を用いた通信距離の拡大や、用いるデバイスの欠陥をカバーする「ベル測定」による次世代通信の研究が活発化している。現在、量子もつれ光子対はパラメトリック下方変換により生成され、生成速度の向上など技術の進展が進んでいる。一方励起レーザのコヒーレンスとの不確定性の関係から、光子対生成過程はポアソン統計により本質的に不確定となる。理想的にはトリガーパルスごとに確定的に光子対を生成したいが、現在そのような光源は存在しない。これまで半導体量子ドットによる量子もつれ光子対生成が活発に研究されてきているが、これは量子ドット基底状態に分布する2つの電子と正孔から、最初励起子分子発光が、続いて励起子発光が起こって生成する時系列光子対発生であり、2つの光子間の遅れ時間が励起子発光寿命時間程度で揺らぐと、光子の同時計測を基本とする「ベル測定」に支障が起こる。本研究は、半導体量子ドットに超伝導体を近接させ、超伝導体中で発生している電子クーパー対をn型にドーピングした半導体中にしみ込ませ、量子ドットの伝導帯エネルギー準位に分布させる。電子クーパー対は二つの電子が量子もつれ状態にあり、これと量子ドットの価電子帯エネルギー準位に分布させた正孔対と再結合させ、量子もつれ光子対に変換することを念頭に、その発光過程の光学的研究を進めた。

第1章では、上記の研究背景ならびに研究目的を明示した。

第2章では、本研究に関連してこれまでに進められてきた「超伝導発光ダイオード」の研究結果について総括した。そこでは、ニオブウム金属が超伝導体に転移する臨界温度(9 K程度)以下で発光強度が大幅に増加すること、また電子・正孔から光子に変換される速度が急激に速くなることが示されていた。一方で、理論的には臨界温度の上下で発光スペクトルの変化が予測されるが、この「超伝導発光ダイオード」では変化が観測されていない課題が残されていることを明確にした。その発光層には量子井戸が用いられていた。

第3章では、研究に用いたサンプルの作製について述べている。半導体ヘテロ構造は、分子線エピタキシー法によりInP(311)B基板上に成長したInGaAlAs系半導体ヘテロ構造である。「超伝導発光ダイオード」ではp-n接合界面に量子井戸層を形成したが、この場合の量子井戸層はp-n接合の拡散電位ならびに外部からのバイアス電圧によってポテンシャル形状が変化する。一方電子クーパー対がコヒーレントに半導体にしみ込む距離(コヒーレント長)は電子濃度の $1/3$ 乗に比例し、p-n接合が空乏化して電子濃度が低下すると、電子クーパー対のしみ込みが困難となり、特性はバイアスに敏感に依存する。このため、観測結果の解釈が複雑となる。このような考察から今回のサンプル作製では、InAs量子ドット以外のInGaAlAs系半導体ヘテロ構造はすべての領域を均一にn型ドーピングした。これにより、ニオブウム超伝導体からn型InGaAlAs系半導体ヘテロ構造のフェルミレベルを通して、電子クーパー対がしみ込みやすい環境を整えた。一方量子ドットへ正孔を注入する方法としては、外部からの光励起でInGaAlAsバリアに生成した正孔を、量子ドット

に拡散させることとした。この目的のために、測定対象とする領域を直径 1 ミクロン程度の円柱構造に作製した後、その表面にニオブウム金属を蒸着し、さらにこれを銀で埋めこんだ。この銀表面を支持基板に貼り付け、350 ミクロンと厚い InP 基板を研磨とドライエッチングを併用して除去した。残された InGaAlAs 系半導体円柱構造をレーザ励起し、発生した光子を励起と同じ光学系を通して観測した。

第 4 章では、このサンプルを連続レーザ光で励起して発光スペクトルを観測した。その結果超伝導臨界温度より低い温度で、発光スペクトルに鋭い段差が発生するのを観測した。またレーザ励起を強めるほど、この段差を示すピークが鋭くなることを見いだした。これに対して、近接効果により半導体中で超伝導ギャップと超伝導状態密度が発生すること、さらにサイズの異なる約 600 個程度の量子ドットがエネルギー的にガウス分布して発光すると仮定して、測定結果を非常によく説明できることを示した。上記の励起強度依存性の観測結果は、量子ドットのガウス分布発光ピークが、励起強度の増加により超伝導状態密度のピークと「共鳴」する状態に近づくことにより説明できた。一方、鋭い発光ピークから約 3meV 程度のエネルギー幅において、発光強度の明確な揺らぎが観測された。このエネルギー領域は超伝導ギャップに相当する。これまでの報告では、量子ドット内に 1 個の電子が分布する場合には、量子ドットに入射した超伝導電流（クーパー対の流れ）がコヒーレントに反転すること、2 個の電子が分布する場合には、コヒーレントに透過することが報告されている。今の場合、外部から光励起された正孔との発光再結合により、量子ドット内の電子はダイナミックに変化している。従って、入射超伝導電流とコヒーレントに反転した超伝導電流とのコヒーレント干渉は、ランダムに起こっている。これが超伝導ギャップ付近で量子ドットへ流れ込む超伝導電流のランダムな変調となり、超伝導効果に特異な発光強度の揺らぎとなって現れたと解釈された。これらの結果から、以前の超伝導発光ダイオードでは状態密度が連続な量子井戸であり、注入された正孔はバンド端に緩和して分布するため、超伝導状態密度との共鳴が起こりにくく発光スペクトルに反映されなかったと結論した。

第 5 章では、5 ps 幅のパルスレーザ励起で時間分解蛍光測定を行った。これにより、発光強度と減衰時間の温度依存性、励起強度依存性を測定した。この測定結果をより明確にする目的で、発光強度の変化が内部発光効率の相対変化を、減衰時間の変化が発光寿命、非発光寿命、超伝導効果の寄与の相対変化を表すと捉え、通常電子による発光レートと超伝導クーパー対による発光レートの比を求める方法を提案した。その結果、超伝導臨界温度以下で、超伝導による発光レートが急激に増大することを見いだした。これを理論解析と比較することにより、半導体中でのクーパー対の散乱効果を考慮すれば、観測結果が非常によく説明できることを示した。同様の説明は以前の超伝導発光ダイオードでも行われているが、今回の測定では臨界温度以下で、より急峻な増大を示した。この違いはクーパー対の散乱効果の低減で説明できる。以前の超伝導発光ダイオードに比べ今回は不純物濃度を 1/5 に減少させており、これにより散乱効果が小さくなり超伝導効果がより顕著になったと理解された。

第 6 章では、学位論文を総括している。

最後に以上を総括すると、半導体に近接した超伝導体からクーパー対が半導体量子ドットへしみ込み、量子ドットにおける発光過程を増大させることが明確になった。これにより、電子量子もつれ状態の電子クーパー対を量子もつれ光子対に変換するための関連物理の理解とこれを実現するための具体的な方策が確立されたことを明らかにした。