

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：超伝導フォトニクスの創成とその応用

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）：

研究代表者

末宗 幾夫（北海道大学 電子科学研究所 教授）

主たる共同研究者

田中 和典（浜松ホトニクス株式会社 中央研究所 研究部員）

赤崎 達志（日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所 グループリーダー）

高柳 英明（東京理科大学 総合研究機構 教授）

3. 研究実施概要

現在量子情報処理ネットワークに関する研究が活発に進められており、集積化の可能な固体量子ビットの有力候補が超伝導量子ビットである。しかしこれまで情報伝送媒体としてのフォトニクスと超伝導をつなぐ境界領域の科学的、技術的な基盤はほとんど構築されていない。本研究の目標は、超伝導とフォトニクスの研究領域をつなぐ基盤技術を開発し、超伝導とフォトニクスの境界領域にまたがる新しい学問分野・技術分野の開拓を進めることである。

具体的には、超伝導電極を持った発光ダイオード（LED）を作製し、クーパー対の持つ巨視的な量子状態を、発生するフォトンに転送する技術の開発を目指している。例えば、電子クーパー対の大きなコヒーレント体積による振動子強度の増強により、より高速の光子発生が可能となり、またクーパー対と正孔対の発光再結合により量子もつれあい光子対の発生が期待される。さらに半導体量子ドットの離散準位に分布する正孔対に対して適用されるパウリの排他律を利用することにより、オンデマンドに、一度に単一の量子もつれ合い光子対を発生するダイオード光源の実現が期待される。

これまでに、Nb 超伝導電極からn 型InGaAs 系への電子クーパー対注入、ならびにp 型InGaAs 系への正孔クーパー対注入をジョセフソン電流の観測により確認した。特に通常のDC ジョセフソン接合特性に加えて、マイクロ波照射による「シャピロステップ」の観測によりAC ジョセフソン接合特性も観測し、n 型InGaAs 系半導体に対する電子クーパー対注入を確実に実証した。さらにNb の微細加工技術を向上し、Nb 電極間のInGaAs 領域幅を80nm まで狭くすることにより、ジョセフソン接合特性観測温度を従来の30mK からNb 超伝導臨界温度に近い8K まで高めることが出来た。

さらに、n 型GaAs 系での超伝導/半導体/超伝導接合においてもクーパー対注入を示唆するアンドレーエフ反射を確認すると共に、半導体超格子構造における「アンドレーエフポーラロン」と名付けたマイクロ波との新しい共鳴現象を見いだした。

このようなNb 電極を持つInGaAs 系LED のn 型領域を流れる電子クーパー対に対して、対向電極から正孔を注入して半導体におけるバンド間再結合の影響を詳細に調べ、上記のジョセフソン接合特性に大きな影響を与えることを明らかにした。さらに、LED として順バイアスして光ファイバー通信波長帯の発光を観測すると共に、Nb の超伝導臨界温度以下において、電子クーパー対が注入されることによる10倍以上の発光増強ならびに発光再結合寿命の大幅な短縮を観測した。これに対して、二次の摂動理論にBogoliubov 変換を使って超伝導効果を導入し、電子クーパー対と正孔対の発光再結合過程を解析した。その結果、電子がスピン・シングレット状態を形成してクーパー対として発光に寄与する過程の遷移確率が非常に大きくなることが示され、上記の発光寿命の短縮、発光強度の増強をこの理論で説明することが出来た。この理論と実験の良好な一致は、LED 内部での電子クーパー対と正孔対の発光再結合により、量子もつれあい光子対が発生していることを示している。

このような量子もつれあい光子対の生成を実証すると共に、超伝導とフォトニクスの基盤技術へと進化させるためには、LED 内部で発生した光子を効率よく外部に取り出し、光子対の同時生成を確認する必要がある。このような構造として、Nb 電極でp-n InGaAs接合を挟んだ構造を考案し、そのFDTD シミュレーションを進めた。その結果LED から外部に光子を取り出す効率40%,開口数

0.4 のレンズに結合する効率25%が得られている。このLED 構造を作製する技術課題もほぼ克服でき、現在そのもつれあい光子対発生の評価を進めつつある。これに加えて、InAs 量子ドットへ直接Nb 超伝導電極を形成することにより、量子ドットからクーパ対によると思われる顕著な発光増強を確認しており、量子ドットによるオンデマンド動作を目指した研究も進みつつある。また将来にむけて、光と超伝導量子ビットを結合する新手法の提案、動作温度の上昇を目指したMgB₂ 超伝導電極の検討も進みつつある。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果（論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む）

本研究は、超伝導 LED を作製し、電子クーパ対のもつ巨視的な量子状態を発生するフォトンに転送し、量子もつれあい光子対を発生させる技術の開発が目標である。この実現のため Nb 超伝導電極付 LED を試作し、超伝導臨界温度以下で電子クーパ対を p-n 接合に注入することで 10 倍以上の発光強度増加が観測され、量子もつれあい光子の発生について理論的説明がなされた。

しかしながら、研究期間終了時において LED から発生した光子が量子もつれあい光子対となっているかについて十分な実証がなされておらず、研究目標達成の一手手前にあると言わざるを得ない。

クーパ対を直接発光再結合させる試みは、前例がなく、研究開始当初より困難が予想されていた。しかしながら超伝導薄膜を専門とする NTT グループと発光デバイスを専門とする浜松ホトニクスグループが連携し、さらに北海道大学グループの Nb の微細加工技術を駆使して、実際に超伝導 LED を実現したことは、CREST 研究としても望ましい展開であるといえ、一定の成果は得られたものと判断される。

外部発表等は、原著論文 46 件、招待講演 25 件と適切に行われており、いずれも優れたものである。本研究プロジェクトは、4 つのグループで構成されているが、前記論文内容をみると異なるグループに所属する研究者が連名で論文発表している成果も 11 件の原著論文がある。これは CREST の特徴である共同研究の実があがった証左であるといえる。

本研究プロジェクトには、研究グループとして浜松ホトニクスが参加しているが、研究成果であるもつれ合い光子発生素子などの特許を出願しており、産業化に向けた基盤づくりがなされている。こうした基本特許を研究の進展にあわせて確実にものとする姿勢は大切である。

以上のように、研究代表者が所属する北海道大学のグループと浜松ホトニクス株式会社、日本電信電話株式会社、東京理科大学の各グループとが有機的に連携して研究を進めてきた。そこにおいて発揮された研究代表者のリーダーシップは優れたものであると判断される。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

研究プロジェクト開始当初より科学研究としては興味のもたれる現象を追求してきたが、研究期間終了となった時点において社会的インパクトを評価できる完成度までには至っていないと思われる。もつれ合い光子対の発生の確認は間接的観測にすぎず、研究提案にあるようにもつれ合い光子対を、自由に、制御して、発生できるようになるには、さらなる進歩が必要であると言わざるを得ない。

しかしながら、本研究プロジェクトにおいて超伝導 LED は実現された。この超伝導 LED において、秘匿通信のキーとなる量子もつれあい光子の発生源として利用できることが実証されれば、社会的なインパクトも大きく、同分野での大きな発展を生み出すきっかけとなるものであり、今後の研究進展が大いに期待される。

本研究プロジェクトは、開始時に超伝導とフォトンクスを融合した新たな科学技術領域を提案し、終了時には具体的に超伝導 LED を実現した。この点は CREST の戦略目標に合致するものであり評価に値する。

4－3．総合的評価

本CREST研究では、超伝導とフォトンクスを融合した新たな科学技術を提案、具体的には、Nb超伝導電極をもつInGaAs系半導体を作製して、電子クーパ対の注入を確認、LEDを順バイアスして電子クーパ対と正孔対との再結合による発光を観察、超伝導臨界温度以下で発光強度が10倍以上に増強されることを見出した。このような、超伝導LEDの実現は科学技術へのインパクトが大きく、高く評価できる。

さらに、超伝導LEDからの量子もつれあい光子の発生が実証できれば、当初の研究目標を100%達成することになり、超伝導LEDは将来の秘匿通信のキーデバイスとなりうるもので、社会的インパクトも大きいものである。今後、着実な技術開発と組み合わせれば近い将来により具体的な成果が得られると期待する。