

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

平成 17 年度採択研究代表者

末宗 幾夫

(北海道大学 教授)

「超伝導フォトンクスの創成とその応用」

## 1. 研究実施の概要

現在量子情報処理ネットワークに関する研究が活潑に進められており、固体量子ビットの一つの有力候補が超伝導量子ビットである。しかしこれまで超伝導と情報伝送媒体としてのフォトンクス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、電子クーパ対の大きなコヒーレント体積による振動子強度の増強と、半導体量子ドットの離散準位によるパウリの排他律を使った、**On demand** で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と、この超伝導とフォトンクスをつなぐ基盤技術の開発により、超伝導とフォトン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。

今年度北大グループでは、単一量子ドットの相関測定により、光励起された電子スピン状態の反転時間が発光寿命の3倍程度と長く励起子状態のスピンが安定に保存されること、また磁界を印可することなく $\sim 60\%$ と高い円偏光度を持つ単一光子発光が可能であることを示し、単一光子発光プロセスがより明瞭になってきた。浜松ホトニクスグループでは、すでに電子クーパ対、正孔クーパ対の注入を示すジョセフソン接合特性が観測できている InGaAs 系を用いて、超伝導電極を持つ発光ダイオードの動作特性の検討を進めた。NTT グループでは、光 $\rightarrow$ 超伝導変換の基礎となるジョセフソン接合への光照射効果を検討し、光による超伝導特性制御の可能性を確認した。東京理科大学グループでは、特に超伝導量子ビットとフォトンクス系との結合に関する基礎検討を進め、量子ドットを用いた新しい提案を行った。全般的にはほぼ計画通りに進んでおり、今後プロジェクトの中心である超伝導 LED の実現に向けて研究を進めていく。

## 2. 研究実施内容

### (研究目的)

現在量子情報処理ネットワークに関する研究が活潑に進められており、固体量子ビットの一つの有力候補が超伝導量子ビットである。しかしこれまで超伝導と情報伝送媒体としてのフォトンクス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、電子クーパ対の大きなコヒーレント体積による振動子強度の増強と、

半導体量子ドットの離散準位によるパウリの排他律を使った、On demand で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である。大きなコヒーレント体積を持った電子クーパー対の量子ドットへの近接効果により、発光寿命の短縮ならびに発光量子効率の大幅な増大と、パルス電流励起による量子ドット価電子帯単一離散準位に分布する2つの正孔との再結合により、パルスあたり1対の量子もつれ合い光子対を有効に発生することができる。特に、スピナーシングレット状態であるクーパー対は、通常の量子ドットにおいて大問題となっている励起子分子・励起子の時系列発光で生じる交換相互作用とこれによる励起子状態のエネルギー分裂の影響を受けず、量子もつれ合い光子対生成が可能である。この超伝導とフォトニクスをつなぐ基盤技術を開発することにより、量子情報処理の基幹デバイスとしての応用、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。

## (研究実施の方法と結果)

### A. 北海道大学グループ

GaSb 量子ドットを GaAs で埋め込んだ場合について、発光に寄与する量子ドット数を少なくするためメサ構造に加工し、メサ径 1.5  $\mu\text{m}$  まで発光を確認した。ZnSe 中に埋め込んだ ZnTe 量子ドットについては、ドットサイズの大きな場合の Type-II 型の発光特性から、サイズを小さくして行くにつれて Te の等電子中心としての発光特性に移行していくことを

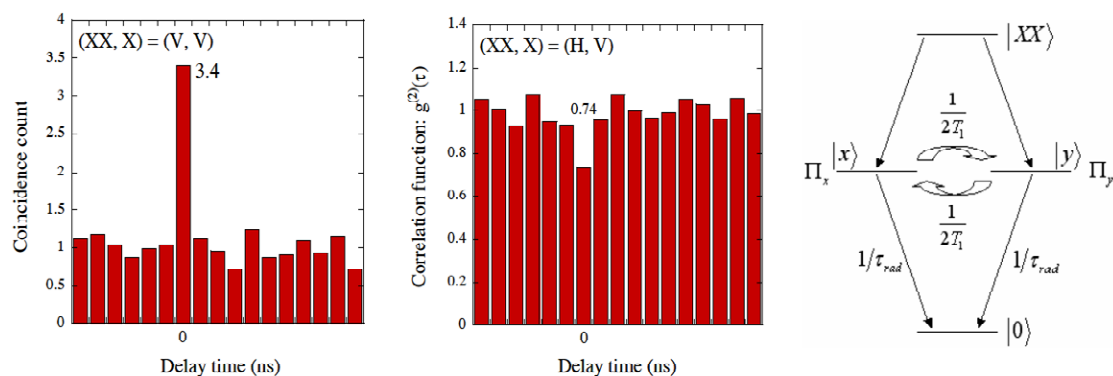


図1. 偏光状態を考慮した励起子分子(XX)と励起子(X)発光の光子相関測定結果と、異なるスピンを持つ励起子状態間のスピン反転の模式図。励起子分子(XX)から直線偏光した光子放出によって2つの励起子スピン状態が生成するが、寿命  $\tau_{\text{rad}}$  で発光する前に、その状態間でスピン緩和時間  $T_1$  でスピン反転する可能性を示す。

確認した。メサ径 300nm まで発光特性を観測しているが、発光は不均一広がりを示しており、その発光中心の密度を低下させることが今後の課題である。

量子ドットからの光子生成過程の光子相関測定に関連して、単一量子ドットにおける励起子分子(XX)—励起子(X)の時系列発光によって生成する光子の、光子偏光状態相関測定を行なった。その結果図1に示すように、XX と X の縦偏光状態(V)間の強いバンチングと、XX の横偏光(H)と X の縦偏光(V)のアンティバンチングを観測した。これから励起子状態に

おけるスピン反転時間が 3.6ns と見積もられた。別の測定から励起子寿命は 1.0ns と見積もられているので、励起子状態として励起された電子スピンはその寿命内では安定にその状態を保つことができることがわかった。

このようにスピン状態を保存した励起子状態から光子を発生する過程を検討するために、円偏光励起してその励起子発光の円偏光保存状態の確認を行った。右円偏光励起した場合にスピン状態を保存してそのまま右円偏光で発光する円偏光率が、 $\sim 60\%$ と非常に高い値を示すシャープなピークが観測された。現在その詳細を検討中である。

前年に続き  $n^+$ -GaAsNSe による GaAs へのオーミックコンタクト改善の検討を進めた。トンネル確率の計算もふまえて界面半導体ヘテロ構造の最適化を進め、NTT での超伝導特性の検討では、前年測定された低バイアス領域で微分抵抗が増加する特性から微分抵抗が減少する特性へと改善し、超伝導/半導体界面での反射が低下していることを確認した。今後さらに特性の最適化を進め、GaAs へのクーパー対注入の再現性を確認する。

## B. 浜松ホトニクス株式会社グループ

InP/InGaAs p-n 接合を用いてクーパー対の注入に適した超伝導 LED 構造の検討を行った。図 2 にデバイス構造を示す。p-InP 基板の上に p-InP と n-InGaAs から構成される p-n 接合を成膜し、n-InGaAs 上に NTT の協力を得て Nb 電極を蒸着することで超伝導電極を有する LED を作製した。デバイスの評価過程において、熱処理によって Nb 電極の超伝導特性が消失する課題を発見したが、デバイス作製工程を工夫することで Nb 電極に対する熱の影響を極力抑えたデバイス作製方法を確認した。その結果、図 3 に示すように Nb の超伝導特性を損なうことなく 100 $\mu$ A 以下の低電流で発光するデバイスを作製することができた。

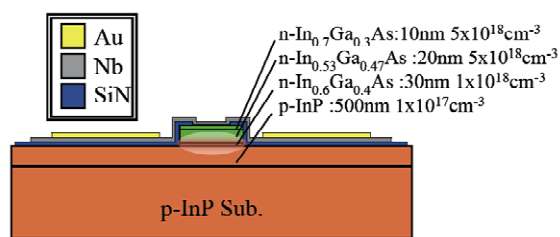


図 2 InP/InGaAs p-n 接合デバイス

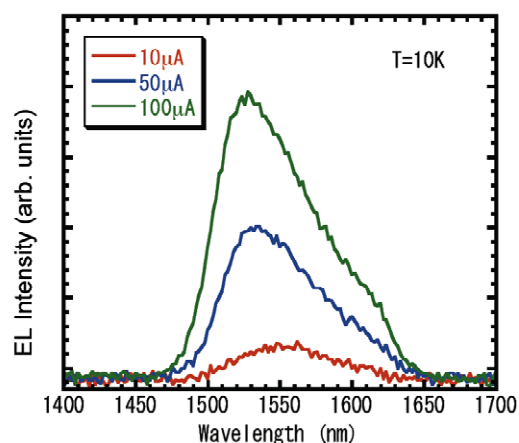


図 3 発光特性

クーパー対を注入する n-InGaAs の膜厚は 60nm と、以前に近接効果を確認した Nb/n-InGaAs/Nb の n-InGaAs 膜厚よりも薄く、注入されたクーパー対の発光への寄与が

期待できる。今後シングルヘテロ構造を採用することでスペクトル幅を狭めるなど、更なるデバイス構造の最適化を進め、Nb 超伝導温度以下（8K 以下）での超伝導発光ダイオードの評価を進めていく。

### C. 日本電信電話株式会社グループ

超伝導体/半導体(S/Sm)接合と光との相互作用についての知見を得るため、S/Sm 接合への光照射効果について検討を行った。S/Sm 接合に、半導体のバンド間遷移を引き起こす波長の光を照射すると、光誘起キャリアが生成され、Josephson 電流や Andreev 反射が変調されることが期待される。我々は、半導体として  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  チャネル層中に形成された二次元電子ガス(2DEG)を用いた S/Sm 接合を作製し、波長  $1.3\mu\text{m}$  の半導体レーザーを照射した場合の超伝導特性の評価を行った。

図4に、本接合の模式図を示す。ソース・ドレイン電極の Nb は、 $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  チャネル層中に形成された二次元電子ガス (2DEG) とオーミック接触している。レーザー光は、光ファイバーによりクライオスタットに導入され、極低温に冷却した試料に照射されている。図5に、1.8K での光照射による  $IV$  特性の変化を示す。熱雑音に起因すると思われる  $IV$  特性のラウンディングが見られるものの、Josephson 電流が増大していることが分かる。また、同時にノーマル抵抗の減少も観測されている。これらのことから、 $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  チャネル層中にバンド間遷移で光誘起されたキャリアを生成することにより、超伝導特性を制御できることが分かった。

また、素子の動作温度の上昇を目指し、高い  $T_C$  を有する  $\text{MgB}_2$  を超伝導電極に用いることを可能にするため、電子ビーム共蒸着法を用いた  $\text{MgB}_2$  超伝導薄膜形成装置の設計及び導入を行った。来年度は、半導体基板上への良質な  $\text{MgB}_2$  超伝導薄膜の形成方法の確立とリフトオフ法によるサブミクロンサイズの  $\text{MgB}_2$  超伝導接合の実現を目指す。

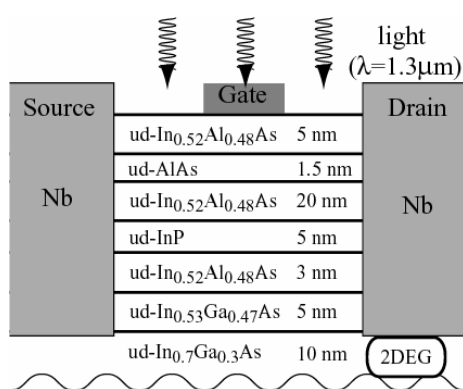


図4 素子構造 (模式図、Nb 電極間隔  $L=0.8\mu\text{m}$ , ゲート長  $L_g=0.2\mu\text{m}$  (設計値))

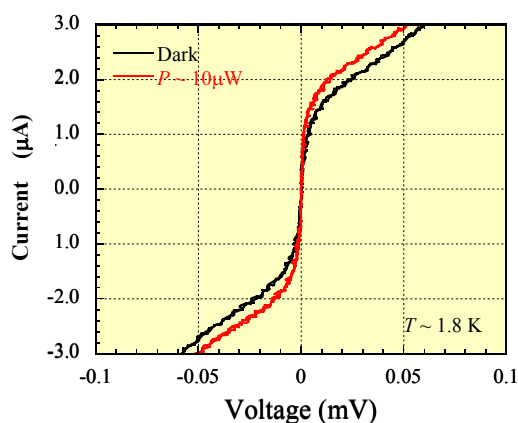


図5 光照射による  $IV$  特性の変化  
(レーザー強度  $P \sim 10 \mu\text{W}$  照射時)

#### D. 東京理科大学グループ

超伝導量子ビットとフォトニクス系との結合の基礎検討を開始した。高柳が参加している超伝導量子ビット研究では、18年度、外部共振器と超伝導磁束量子ビットとの量子もつれ形成に成功している。これを踏まえて、光と超伝導量子ビットとの結合をまず古典的な状態で考えた。図6はその一例で、光と量子ビットとの直接的結合は困難なので、中間に量子ドットを入れる案である。光としては円偏光した古典的光を考え、これによって誘起されたドット中のスピンを超伝導磁束量子干渉計(SQUID)である量子ビットで検知するものである。また、外部共振器の中に量子ドット系を作製し、ここのスピンを誘起する案が図7である。この系だと、外部共振器と結合した量子ビットとスピン系が、外部共振器を介して結合することになる。今後は、このような結合構造において、結合強度の定量性と、レーザー光がSQUIDに与える影響を確認する必要がある。

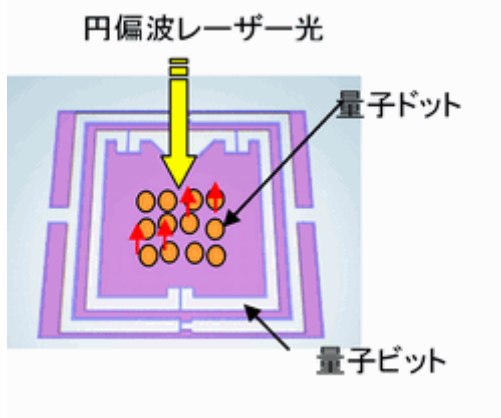


図6. 光と超伝導量子ビットを量子ドットのスピンを介して結合する提案。

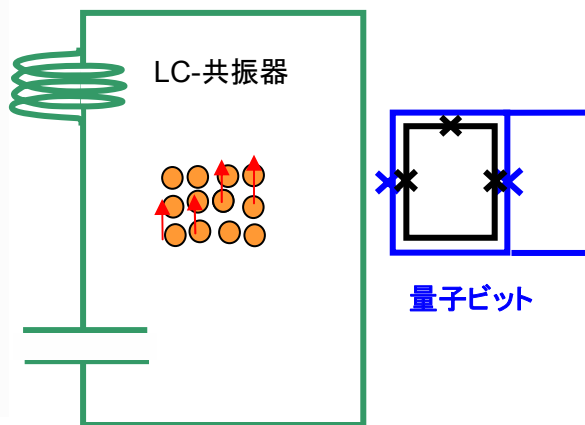


図7. 超伝導量子ビットと結合する LC 外部共振器に量子ドットを作製する量子ビット結合系の提案。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 末宗 幾夫「北海道大学」グループ

##### 研究項目

- ・ 1.55 $\mu\text{m}$ 光ファイバー通信波長帯での、GaSb量子ドットを中心としたtype-II量子ドットの製作
- ・ 光子検出器の量子効率が低い600nm~800nm可視波長域での、ZnTe量子ドットを中心とした type-II量子ドットの作製
- ・ InAlAs系量子ドットを用いた光子相関測定評価
- ・  $n^+$ -GaAsNSeオーミック層,  $n^+$ -GaAsNSe/ $n^+$ -InGaAsひずみ補償擬似傾斜バンドギャップ超格子によるオーミック層等を用いた超伝導電極と半導体へのオーミックコン

タクトの検討

- ・ GaAs/GaSb系、ZnSe/ZnTe系への不純物制御の検討

(2) 田中 和典「浜松ホトニクス株式会社」グループ

研究項目

- ・ 超伝導 LED の作製と評価 (InGaAs/InP p-n 接合を用いたクーパー対注入による発光ダイオードの検討)

(3) 赤崎 達志「日本電信電話株式会社」グループ

研究項目

- ・ 半導体上へのNb超伝導電極の形成
- ・  $n^+$ -GaAsNSeオーミック層を用いた超伝導電極と半導体へのオーミック接合の検討
- ・ Nb超伝導電極を用いた、電子クーパー対注入の検討
- ・ 超伝導体・半導体接合への光照射効果

(4) 高柳 英明「東京理科大学」グループ

研究項目

- ・ Nb超伝導電極と $n^+$ -GaAsNSeオーミック層、 $n^+$ -GaAsNSe/ $n^+$ -InGaAsひずみ補償擬似傾斜バンドギャップ超格子による接合における、界面特性の解明 (超伝導近接効果、アンドレーエフ反射)。このNb超伝導電極を用いて、電子クーパー対注入に関する検討を行う。
- ・ Nb-p形InGaAs-Nb接合における超伝導特性解明。
- ・  $MgB_2$ 超伝導薄膜の特性評価と $MgB_2$ -半導体接合の特性解明。
- ・ 超伝導を用いた単一光子検出器の基礎検討。
- ・ 超伝導量子ビットとフォトニクス系との結合の基礎検討。

## 4. 研究成果の発表等

### (1) 論文発表(原著論文)

- H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Triggered Single Photon Emission and Cross-correlation Properties in InAlAs Quantum Dot” Physica E: Low-Dimensional Systems & Nano-Structures Vol. 32 (2006) pp. 144-147.
- Hidekazu Kumano, Satoshi Kimura, Michiaki Endo, Hirotaka Sasakura, Satoru Adachi, Shunichi Muto, and Ikuo Suemune: “Deterministic Single-photon and Polarization-correlated Photon-pair

Generations from a Single InAlAs Quantum Dot” Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics Vol. 1 (2006) pp. 39-51.

- I. Suemune, H. Kumano, S. Kimura, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usui: “Origin of Asymmetric Splitting of a Neutral Exciton in a Single Semiconductor Quantum Dot” phys. stat. sol. (c) 3, No. 11 (2006) pp. 3908-3911.
- I. Suemune, T. Akazaki, K. Tanaka, M. Jo, K. Uesugi, M. Endo, H. Kumano, E. Hanamura, H. Takayanagi, M. Yamanishi, and H. Kan: “Superconductor-based Quantum-dot Light-emitting Diodes (SQ-LED): Role of Cooper-pairs to Generate Entangled Photon Pairs” Japan. J. Appl. Phys. Vol. 45, No. 12 (2006) pp. 9264-9271.

**(2) 特許出願**

平成 17 年度特許出願:0件 (CREST 研究期間累積件数:1件)