

「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

(北海道大学電子科学研究所 教授)

「超伝導フォトンニ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ニ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ニクスをつなぐ基盤技術の開発により、超伝導とフォトン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。今年度は浜松ホトニクスグループと NTT 基礎研グループの共同研究により Nb 超伝導電極から n 型 InGaAs 系への電子クーパ対注入、ならびに p 型 InGaAs 系への正孔クーパ対注入を確認できた。また北大グループで開発した GaAsNSe 層を用いて Nb/n-GaAs ヘテロ界面のノンアロイオーミックコンタクトが室温で実現でき、NTT 基礎研グループにおいて 0.5K で多重 Andreev 反射が観測された。これは GaAs 系でも電子クーパ対注入を行う基礎となる。さらに北大グループで単一光子発生を確認するための光子相関測定を行い、InAlAs 単一量子ドットを用いて、励起子発光の単一光子発生を確認した。この成果に基づいて量子もつれ合い光子対を評価する相関測定系の検討を進め、研究計画に沿って、超伝導単一光子発生ダイオードの製作ならびに物性評価の準備を進めた。

## 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ニ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、スピン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

サンプルの作製に関しては、初年度において、GaSb 量子ドットを中心とした長波長帯 type-II 量子ドットのプロトタイプを作製した。また光子検出器の量子効率が高い 600nm～800nm 可視波長域では、ZnTe 量子ドットを中心とした type-II 量子ドットを作製した。ZnSe/ZnTe 系でも単一量子ドットを得るためのナノ微細加工が出来ることを確認した。

光子相関測定に関しては、InAlAs 系で初めて励起子発光の単一光子発生を確認すると共に、励起子分子発光と励起子発光の強い光子相関を確認した。そのために、メサ構造の

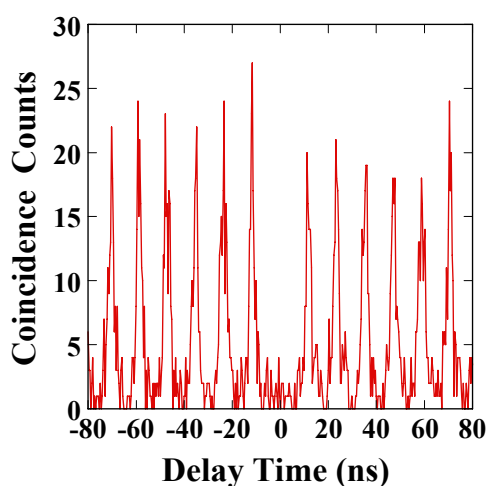


図1 InAlAs 単一量子ドットから励起子発光した光子の自己相関測定。遅延時間零でのディップは一度に単一の光子しか発生していないことを示している。

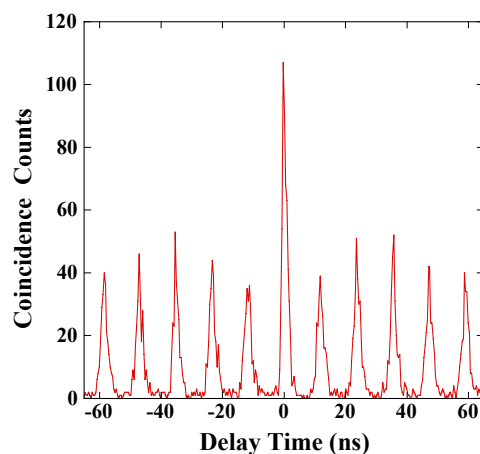


図2 InAlAs 単一量子ドットから励起子分子発光ならびに励起子発光した光子対の光子相関測定。遅延時間零での増大は光子対が高い確度で伴って発生していることを示している。

AlInAs 量子ドットを含んだサンプルを製作し、単一ドットからの鋭い発光スペクトルを観測し、その発光起源の同定を行った。時間分解測定による発光寿命評価からの励起子、励起子分子の識別、光励起強度依存性による励起子分子、励起子の識別を行い、同じ量子ドットを起源とする励起子・励起子分子発光を同定した。これらの発光ピークに関して Hambray-Brown Twiss 系として知られる光学系で光子相関測定を行い、励起子発光に関しては図 1 に示すように単一光子発生を確認し、励起子分子発光と励起子発光間には強い光子相関があることを確認した。

半導体層へクーパー対を注入する準備として、Nb 超伝導電極と GaAs 系化合物半導体とのオーミック接触の検討を進めた。界面に  $n^+$ -GaAsNSe/GaAs それぞれ 1nm 厚さで 5 周期の超格子とそれぞれ 2nm 厚さで 5 周期の超格子を縦続接続した試料を北大グループで作製し、常温ではオーミック特性を確認した。このサンプルにおける超伝導特性を NTT グループで検討した。

## B. 浜松ホトニクス株式会社グループ

超伝導 LED 作製の基礎実験として InGaAs へのクーパー対の注入について検討を行った。 $n^+$ -InGaAs および  $p^+$ -InGaAs を半絶縁性 InP 基板上に成膜し、InP 基板を部分的に選択的にエッチングすることで取り除き、InGaAs を金属超伝導体である Nb で直接挟み込むことで Nb/ $n^+$ -InGaAs/Nb 及び Nb/ $p^+$ -InGaAs/Nb の構造を作製した。(ただし、 $n^+$ -InGaAs および  $p^+$ -InGaAs の膜厚はコヒーレント長を考慮して 1000 Å 程度としてある。) 作製した試料は NTT 基礎研にて電流電圧特性を評価してもらいジョセフソン電流を確認することができ、InGaAs へのクーパー対の注入の可能性を示すことができた。また、追加予算にて購入したフォトンカウンターを用いたフォトンカウンティングによる発光測定系の整備を進めた。今後は InGaAs/InP p-n 接合にてクーパー対の注入を可能とするデバイス構造を作製し、電子クーパー対と正孔対の発光再結合について検証を行っていく予定である。

## C. 日本電信電話株式会社グループ

超伝導電極から n 型半導体を介して、電子クーパー対を量子ドットに供給する発光ダイオードを実現するためには、多数の電子クーパー対を n 型半導体中に誘起する必要がある。このためには、超伝導電極と n 型半導体の間に形成されるショットキーバリアの低減が克服すべき課題となる。今年度は、 $n^+$ -GaAsNSe オーミックコンタクト層を用いることにより、Nb 超伝導電極との間でオーミックコンタクトが実現できるかどうかを検討した。北大グループが成長した  $n^+$ -GaAsNSe/n-GaAs ヘテロ構造を用いて、Nb/GaAs/Nb 超伝導接合を作製し、その輸送特性の評価を行った。

図 3 に、本接合の模式図を示す。接合形状は、チャンネル幅  $W=10 \mu\text{m}$ , Nb 電極間隔  $L=0.7 \mu\text{m}$  である。 $n^+$ -GaAsNSe/n-GaAs ヘテロ構造上に Nb 膜 (80nm) を蒸着、リフトオフ後、Nb 膜をマ

スクとして、余分な GaAsNSe オーミックコンタクト層を除去している。図 4 に 0.5 K での微分抵抗特性を示す。約  $\pm 3\text{mV}$  以下の領域でわずかに抵抗の増大が見られるものの、 $n = 2$  までの多重 Andreev 反射によるサブハーモニックギャップ構造 ( $|V| = 2\Delta_{\text{Nb}}/ne$ ,  $\Delta_{\text{Nb}}$ : Nb の超伝導ギャップエネルギー) が観測された。この結果は、GaAsNSe オーミックコンタクト層を挿入することにより、熱処理を行うことなく、Nb と n-GaAs 間で良好なオーミックコンタクトが実現できることを示している。

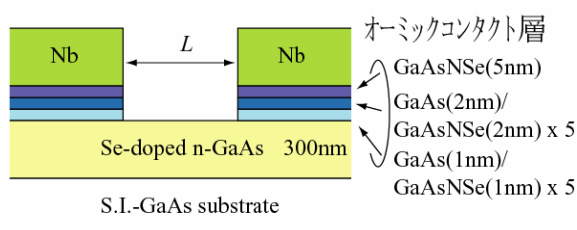


図 3 Nb/GaAs/Nb 接合の模式

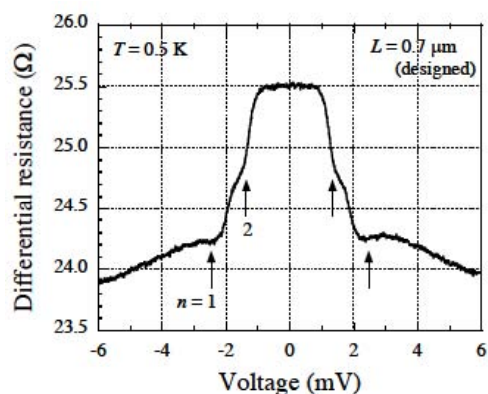


図 4 微分抵抗特性

### (全体研究計画に対する研究進捗状況)

初年度に計画した光子相関測定系の整備、グループ間の共同実験の基礎が固まりつつある。北大グループでは量子ドットの作製と単一量子ドットの評価を進めている。材料系によって多少異なった状況ではあるが予定通り進みつつあるといえる。また北大と NTT の共同研究により、InGaAs 系に加えて、GaAs 系でも半導体中にクーパー対を注入する準備ができつつある。また超伝導発光ダイオードに関しては、すでに pn 接合も実現できている InGaAs 系を用いて、電子クーパー対、正孔クーパー対の注入を示すジョセフソンジャンクション特性が観測できた。今後その発光特性の検討をさらに進める予定で、全般に初年度としては計画通りの進捗状況といえる。

### 3. 研究実施体制

「北海道大学」グループ

- ① 研究分担グループ長：末宗 幾夫（北海道大学電子科学研究所、教授）
- ② 研究項目：
  1. 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

2. 光子検出器の量子効率が高い 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
3.  $n^+$ -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

「浜松ホトニクス株式会社」グループ

- ① 研究分担グループ長: 田中 和典 (浜松ホトニクス株式会社中央研究所、部員)
- ② 研究項目:
  1. 超伝導 LED の作製と評価 (InGaAs p-n 接合または 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)

「日本電信電話株式会社」グループ

- ① 研究分担グループ長: 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)
- ② 研究項目:
  1. 半導体上への Nb 超伝導電極の形成
  2.  $n^+$ -GaAsNSe オーミックコンタクト層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
  3. Nb 超伝導電極を用いた, 電子クーパー対注入の検討

#### 4. 主な研究成果の発表

(1) 論文 (原著論文) 発表

- S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Single-Photon Generation from InAlAs Single Quantum Dot” *phys. stat. sol. (c)* No. 11 (2005) pp. 3833-3837.
- S. Muto, S. Adachi, T. Yokoi, S. Kayamori, H. Sasakura, and I. Suemune: “Photon-spin Qubit-conversion Based on Overhauser Shift of Zeeman Energies in Quantum Dots” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 87, No. 11 (2005) 112506.
- G. Sasikala, I. Suemune, P. Thilakan, H. Kumano, and K. Uesugi, Y. Nabetani, T. Matsumoto and H. Machida: “Improved Structural and Luminescence Homogeneities of InAs Quantum Dots with Nitrogen-precursor Supplies on Their Surfaces” *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* Vol. 44, No. 50 (2005) pp. L1512-L1515.
- S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: “Dynamic Nuclear Polarization in a Self-Assembled InAlAs Dot” *phys. stat. sol. (c)* Vol. 2, No. 11 (Nov. 2005) pp. 3838-3842.

- N. Matsumura, S. Muto, S. Ganapathy, I. Suemune, K. Numata, and K. Yabuta: “Anisotropic Lattice Deformation of InAs Self-assembled Quantum Dots Embedded in GaNAs Strain Compensating Layers” Jpn. J. Appl. Phys. Lett. Vol. 45, No. 2 (2006) pp. L57-L59.
- 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. (印刷中)
- W. Zhang, K. Uesugi, and I. Suemune: “Application of InGaAs/GaAsN Strain-compensated Superlattice to InAs Quantum Dots” J. Appl. Phys. (印刷中)
- 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 (印刷中)
- I. Suemune, G. Sasikala, H. Kumano, K. Uesugi, Y. Nabetani, T. Matsumoto, J.- T. Maeng, and T. - Y. Seong: “Role of a Nitrogen Precursor Supplied on InAs Quantum Dots Surfaces in Their Emission Wavelengths” Jpn. J. Appl. Phys. Lett. (印刷中)
- V. M. Krasnov, T. Bauch, S. Intiso, E. Hurfeld, “Collapse of thermal activation in moderately damped 95, 157002 (2005).