

「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、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ン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、超伝導とフォトン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。具体的には、超伝導電極を持った発光ダイオードを作製し、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期待され、またクーパー対と半導体量子ドットの離散準位に対するパウリの排他律を組み合わせることにより、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、n-GaAs 系での超伝導/半導体/超伝導接合におけるクーパー対注入を示唆するアンドレーエフ反射を一部で確認した。Nb 電極を持つ InGaAs 系超伝導発光ダイオードにおいて、電子クーパー対による 10 倍以上の発光増強ならびに発光再結合寿命の短縮を観測した。

H20 年度は、超伝導発光ダイオードにおける発光増強のメカニズムについて、LED の再結合寿命に関する検討を進め、クーパー対の効果で発光再結合速度が速くなっていること、これによって内部発光量子効率が增大していることを確認した。さらに、半導体量子ドットにクーパー対を注入して、量子ドットの発光が増強することも確認した。LED から光子を外部に取り出す効率の向上を目指して InGaAs 系分布ブラッグ反射ミラー(DBR)を作製し、90%以上の反射特性を確認した。これと並行して、超伝導 LED 構造そのものでジョセフソン電流を観測することに成功した。また超伝導/半導体界面のバリアを低減する検討を進め、光照射で界面での通常反射が減少しアンドレーエフ反射確率が增大していることを確認した。より高い温度で超伝導 LED を動作させることを目指して MgB<sub>2</sub> 薄膜の

検討を進め、GaAs 基板上で超伝導臨界温度 30 K を持つ MgB<sub>2</sub> 膜の形成に成功した。

今後は、超伝導 LED に電子クーパ対、正孔クーパ対を注入する構造、量子ドットを取り入れた構造の開発とともに、クーパ対の効果によって量子もつれ合い光子対を生成する超伝導 LED の作製、量子もつれ合いを評価する測定系、評価技術の高度化を進め、もつれ合い光子対を発生する超伝導 LED に関連する基盤技術を確立する。また MgB<sub>2</sub> 等、より高い超伝導転移温度を持つ超伝導電極の検討も進め、より高い温度での LED 動作実現を目指す。

## 2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

### [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を作製し、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により、より高速の光子発生が期待され、またクーパ対と半導体量子ドットの離散準位に対するパウリの排他律を組み合わせることにより、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を目指している。

### [研究実施の方法と結果]

## A. 北海道大学グループ

### Ga(As)Sb 系 Type-II 量子ドットと GaAsSb/GaAs 界面制御

GaAsSb/GaAs 系ヘテロ構造は正孔が GaAsSb に局在し、電子が GaAs に局在する Type-II のヘテロ構造となる。電子クーパ対を半導体量子ドットで正孔対と再結合させる場合、クーパ対が量子ドットでエネルギー緩和しないように、伝導帯での量子閉じこめがない Type-II 構造が最適である。これを使って、正孔を GaAsSb 量子ドット領域に閉じ込め、GaAs 伝導帯から電子クーパ対を GaAsSb 領域にしみ込ませて、クーパ対の関与した発光プロセスを実現しようと検討を進めている。その際に伝導帯バンド不連続の制御がポイントとなる。今年度、GaAsSb/GaAs 系ヘテロ構造を用い、正孔を量子閉じ込めしながら、電子の分布を制御して実効的に Type-I と Type-II を切り替えることに成功した [ポスター発表 7]。図 A-1 に示すように Sb 組成が 9.2% (サンプル A) と 3.5% (サンプル B) の GaAsSb/GaAs 単一量子井戸について、発光ピークの光励起強度依存性を測定すると、顕著な変化を示す。サンプル A では励起強度の 1/3 乗に比例するブルーシフトを示し、典型的な Type-II の特性を示す。これは電子が GaAsSb 外部の GaAs に局在していることを示している。一方サンプル B ではピークシフトは大きく減少しており、これと同

様の特性は通常 Type-I のヘテロ構造で観測される。この結果は、電子の波動関数が相当に GaAsSb 領域に浸みだしていることを示しており、Sb 組成の制御で、伝導帯での電子分布を制御できることを示している。

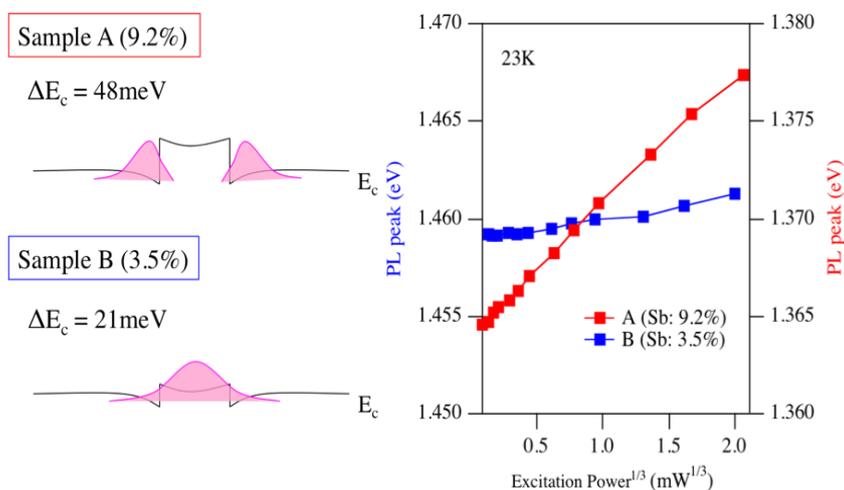


図 A-1 Sb 組成が 9.2% と 3.5% の 2 種類の GaAsSb/GaAs ヘテロ構造と、それぞれの発光ピークの光励起強度によるエネルギーシフト。

#### 超伝導 LED の発光特性と超伝導効果: 発光寿命に関する検討

昨年度浜松ホトニクス G、NTT-G と共同で試作した InGaAs 系超伝導発光ダイオードにおいて、Nb 電極の超伝導臨界温度 8.3K 以下で温度の低下に伴う急激な発光増強を観測した〔原著論文 7〕。これはニオブウム電極が臨界温度以下で超伝導状態になり、そこから InGaAs 発光層にしみこむ電子クーパー対が発光遷移確率を増大する〔原著論文 1〕、いわゆる「超伝導効果」を初めて確認した。そのメカニズムを確かなものにするために、長波長ストリークカメラを用いて、再結合寿命の検討を行った。ピコ秒パルスレーザを用いた光励起でも、超伝導臨界温度以下で発光増強が観測されるとともに、発光再結合寿命の短縮が確認された〔国際学会招待講演 2〕。また発光ダイオードのパルス電流注入による寿命測定も行い、超伝導臨界温度以下での発光寿命の短縮を観測している〔国際学会口頭発表 4〕。これらの結果は、超伝導による発光増強の観測結果は、電子クーパー対による発光再結合レートの増大によるものであることを明確に示している。

#### 量子ドットの発光に対する超伝導効果

今後、超伝導効果によってクーパー対の関与した発光、とりわけ量子もつれ合い光子対を on-demand に発生するためには、量子ドットにクーパー対をしみ込ませ、発生する光子対の個数状態制御に関する研究を進める必要がある。その点、開放型 InAs 量子ドットは超伝導電極と直接接合させることができること、光ファイバー通信の 1.55 $\mu\text{m}$  波長帯での発光が比較的容易に得られる特徴を持つが、表面再結合のためにその発光効率が低い課題がある。この点に関して最近、ドット形成前の半導体表面を原子レベルで平坦化するこ

とにより、開放型 InAs 量子ドットの発光が顕著に増大することを見いだした。さらに、この InAs 量子ドットに Nb 電極を形成することにより、超伝導臨界温度 (~8K) 以下の低温領域で、温度の低下に伴う発光増強を観測した [原著論文 13]。図 A-2 はその測定サンプルの模式図とサンプル表面の図面であり、Nb 電極に接している一部の InAs 量子ドットにクーパー対が染み込み、その発光に超伝導効果を与えることを期待した。図 A-3 はその測定結果であり、幅 5  $\mu\text{m}$  の Nb 電極の中央にビーム径約 3  $\mu\text{m}$  に収束させたレーザー光でサンプルを励起し、Nb 電極近傍の InAs 量子ドットの発光を観測した。Nb の影響を受けない領域で観測したドットの発光は、この狭い温度範囲では特段温度依存性を示さない。一方で、Nb 電極近傍では、Nb 臨界温度以下で発光増大を示した。これは Nb に接している InAs 量子ドットの割合が少ないことを考えれば、予想外の効果であるが、InGaAs-InPL LED で観測された発光増強が、量子ドットでも再現されることを示唆している。

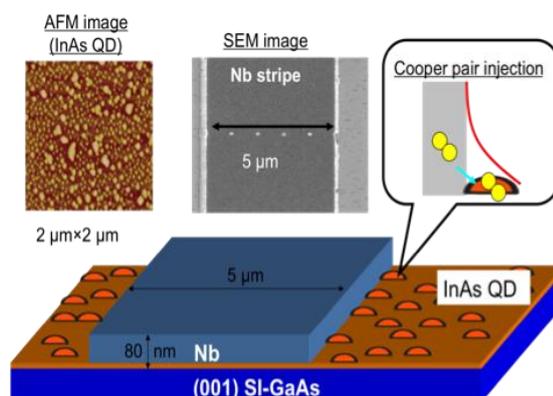


図 A-2 開放型 InAs 量子ドットに Nb を直接コンタクトさせ、Nb 電極から InAs 量子ドットへクーパー対がしみ込む効果をフォトルミネッセンスで観測する模式図。

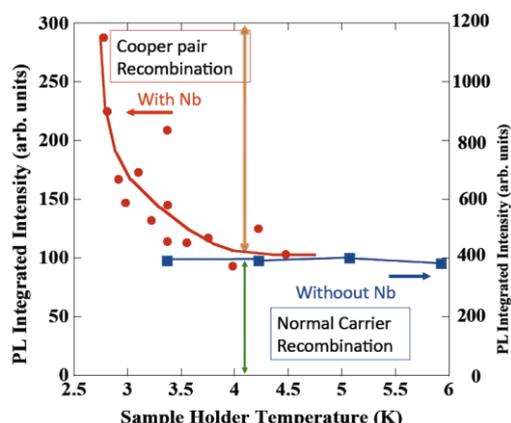


図 A-3 Nb に接していない InAs 量子ドット発光強度の温度依存性 (■) と Nb に接している InAs 量子ドットの発光強度の温度依存性 (●)。光学評価を行うマイクロ PL 用クライオスタットは、外部からの輻射の影響を受け、Sample Holder 温度の ~4.1K が Nb 臨界温度の ~8K に対応する。

### 単一量子ドットから発生する光子に関する光子相関測定

このような量子ドットから発生する光子の特性、特にアンチバンチング、光子相関等の評価には、光子相関測定が有力である。量子ドットにおける電子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、~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 [原著論文 5]。さらに正の荷電励起子より光学フォノンエネルギーだけ高いエネルギー位置を準共鳴励起することにより、円偏光率が 85% とさらに高い円偏光率を持つ発光の観測に成功した [原著論文 8]。電子クーパー対が関与した光子発生に関しても、このような電子スピンと発生する光子の円偏光状態を観測することによって、その発光過程を明らかにするとともに、もつれあい光子対の確認を行うことが出来る。

## B. 浜松ホトニクス株式会社グループ

超伝導デバイスのプロセスにおいては、Nb 電極形成後の合金処理が超伝導特性の消失をもたらすことが分かり、プロセス工程において p-InP と電極の合金を Nb 形成前に行う必要があることがわかった。これについてはその後のプロセスに反映させている。活性領域に電子クーパ対を注入する制約と検出器の検出波長限界から n-InGaAs の障壁層と活性層の In の組成差を大きくできないことから、ダブルヘテロ構造では障壁層と活性層の両方が発光することでスペクトルが広がる現象が確認された。この問題はシングルヘテロ構造にすることで解決し、結果的に活性領域のみで発光するデバイスを作製することができた。また、デバイス構造としては北大のドライエッチング技術にて表面に形成された Nb 電極のスリット(～100nm)から発光を取り出す図 B-1 に示した構造と、Nb のスリット形成を必要とせず作製が容易な端面光取り出し構造の2種類の作製を行った。表面光取り出し構造は3端子構造となっており、表面の Nb 電極と裏面の電極間に順バイアスを加えることで発光特性を評価することができる。そして Nb スリットを介して Nb 電極間で電流を流すことで、電

子クーパ対の半導体への注入を電氣的に確認することができるようになってい

る。発光への超伝導効果の寄与は、超伝導温度以下での顕著な発光量の増加もしくは発光再結合寿命の短縮として北大にて確認されている。また、このデバイス構造で半導体への電子クーパ対の注入を示すジョセフソン電流は東京理大で確認された。

光子取り出し効率改善のために、p-n 接合と基板の間に分布ブラッグ反射器 (DBR) 構造を導入することを検討している。デバイス作製の前に DBR 構造の設計及び実際に DBR 構造を作製して反射率の評価を進めた。図 B-2 に DBR の成膜構造と反射率特性を示した。DBR は InP/InGaAsP の32周期構造で中心波長は  $1.55\mu\text{m}$  で設計を行った。反射率特性を評価した結果、計算値とほぼ一致していることを確認することができた。今後は InP/InGaAs p-n 接合構造に DBR 構造を導入して発光デバイスの作製を進める予定である。

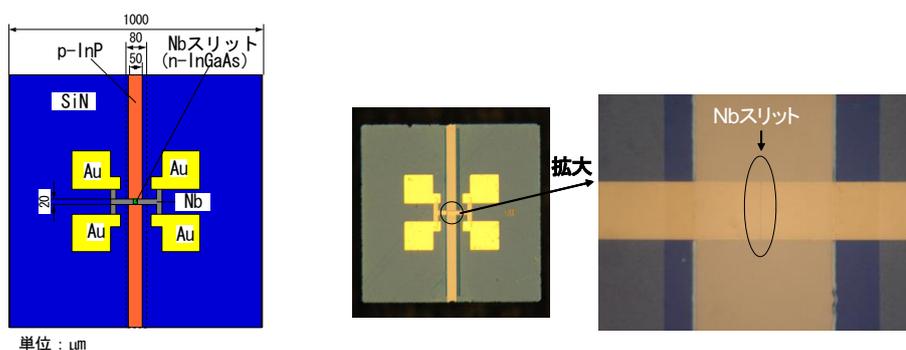
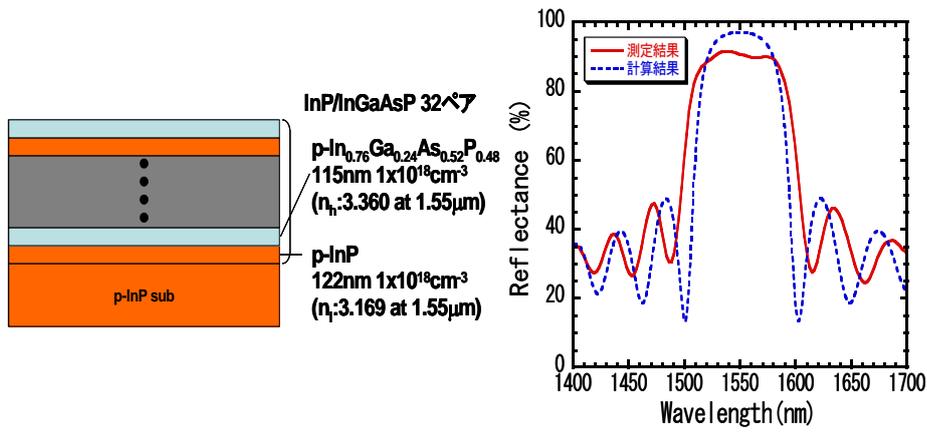


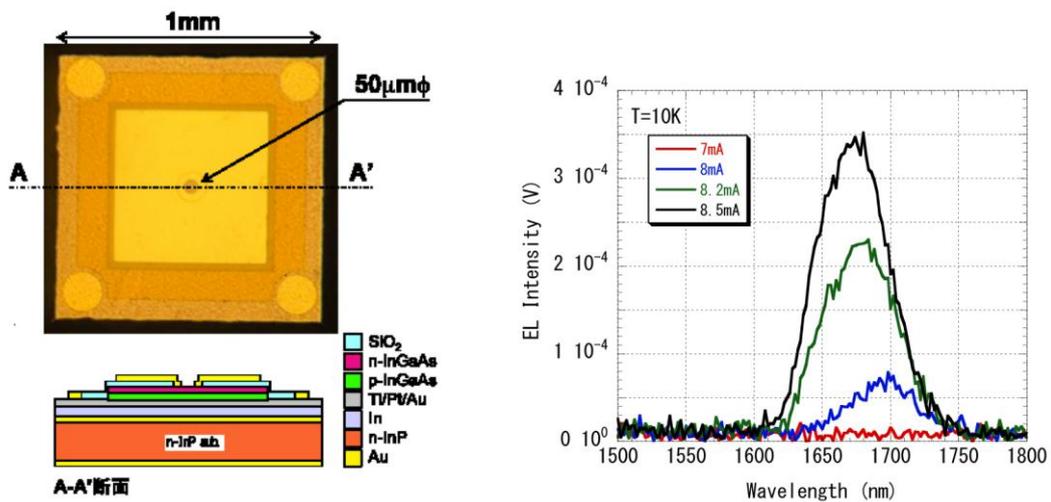
図 B-1 : Nb スリット表面光取り出し構



(a) DBR 成膜構造 (b) 反射率特性

図 B-2 : DBR 構造の評価

また、InGaAs p-n 接合でもつれあい光子対の発生を目指して Nb/InGaAs p-n/Nb の基板貼り付け構造の作成に取り掛かった。今年度はプロセスの条件出しのために図 B-3(a)に示す金電極デバイスの作成を進め、図 B-3(b)に示す EL 発光を InGaAs p-n 接合 (各膜厚 100nm) から確認することができた。今後は、発光波長を 1.5~1.6 $\mu$ m 帯に合わせるために成膜構造の最適化と Nb 電極でのデバイス作成を行っていく予定である。



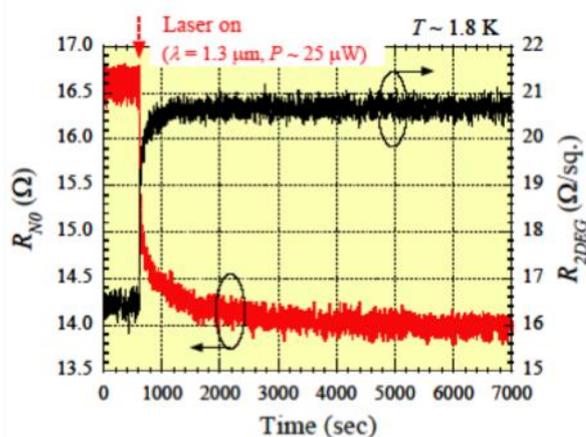
(a) デバイス構造 (b) EL特性

図B-3 : 基板貼り付けデバイス

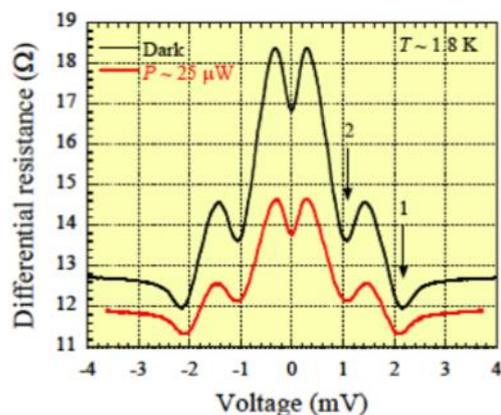
C. 日本電信電話株式会社グループ

Nb/InGaAs-InP 系 SNS 接合における超伝導特性と光照射効果

超伝導体/半導体(S/Sm)接合と光との相互作用について、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前年度の研究で明らかになった。In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As チャン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 $\mu$ m の半導体レーザを照射した場合の超伝導特性の評価を行った。図 C-1 に、1.8K での S/Sm/S 接合のゼロバイアス微分抵抗  $R_{N0}$  および 2DEG のシート抵抗  $R_{2DEG}$  の光照射 (レーザ強度  $P \sim 25 \mu$ W) による変化を示す。 $R_{N0}$  は、光照射により大きく減少するが、 $R_{2DEG}$  は、逆に増大し、負の光伝導を示している [原著論文 3]。次に、S/Sm 界面への光照射効果を調べるため、光照射による Andreev 反射の変調を調べた。図 C-2 は、光照射前後の S-Sm-S 接合の微分抵抗のバイアス電圧依存性を示している。S/Sm 界面に比較的大きなバリアがあることに起因する  $2\Delta_{Nb}$  以下での抵抗の増大が観測され、また  $n=2$  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 ( $|V| = 2\Delta_{Nb}/ne$ ) が観測された。光照射により、全体的に抵抗が減少し、 $2\Delta_{Nb}$  以下での抵抗の増大が抑制されることがわかった。これらの結果は、光照射により、S/Sm 界面での Andreev 反射確率が増大していること、つまり界面バリアによる通常反射が低減していることを示している。これらのことから、光照射による  $R_{N0}$  の改善は S/Sm 界面バリアの低減に起因することが分かる。この界面バリアの低減は、S/Sm 界面近傍に存在するトラップ準位から電子が光励起されたためと考えられる。このことは、多重 Andreev 反射によるサブハーモニックギャップ構造のフィッティングにより見積もった界面バリアの大きさ  $Z$  の大きさが、光照射前に 1.05 だったものが、0.9 に低下していることと



図C-1 光照射による抵抗の変化



図C-2 光照射前後の微分抵抗特性

も一致している。

### MgB<sub>2</sub>による超伝導臨界温度上昇と SNS 接合作製の試み

素子の動作温度の上昇を目指し、高い  $T_C$  を有する MgB<sub>2</sub> 超伝導電極を実現するため、H18 年度末に導入した電子ビーム共蒸着法 (図 C-3 参照) を用いた MgB<sub>2</sub> 超伝導薄膜形成装置を用いて、半導体基板上への良質な MgB<sub>2</sub> 超伝導薄膜の形成方法の確立を行った。成長温度 250°C において、GaAs 基板上に約 30K の超伝導臨界温度を持つ MgB<sub>2</sub> 膜の形成に成功した (図 C-4 参照)。今後は、サブミクロンサイズの MgB<sub>2</sub> 超伝導接合の実現を目指す。

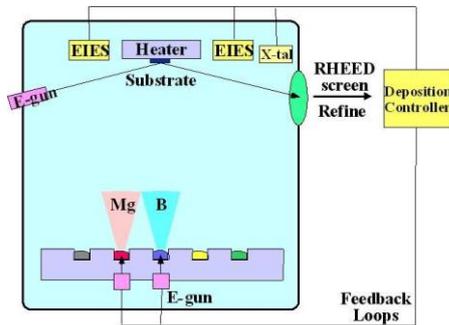


図 C-3 電子ビーム共蒸着法

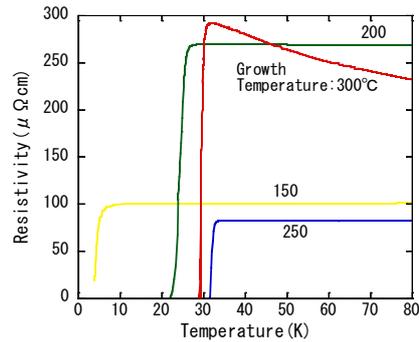


図 C-4 成長温度変化による抵抗率の温度依存性

#### D. 東京理科大学グループ

今年度、Nb-InGaAs-Nb 接合(図 D-1)における直流微分抵抗のバイアス依存性を測定し、図 D-2 に示すような明瞭なジョセフソン接合特性を観測した。この素子の構造は、北大グループおよび浜松ホトニクスグループでフォトルミネセンス・エレクトロルミネセンス発光強度増強を測定している素子構造と基本的に同じであり、超伝導発光ダイオード構造において電子クーパ対が界面を越えて超伝導から半導体へ浸入しているという推測を支持

Nb (800 Å)	Nb (800 Å)
n-In <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> As ( $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) : 10nm	
n-In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As ( $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) : 30nm	
p-InP ( $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) : 500nm	
p-InP (substrate)	

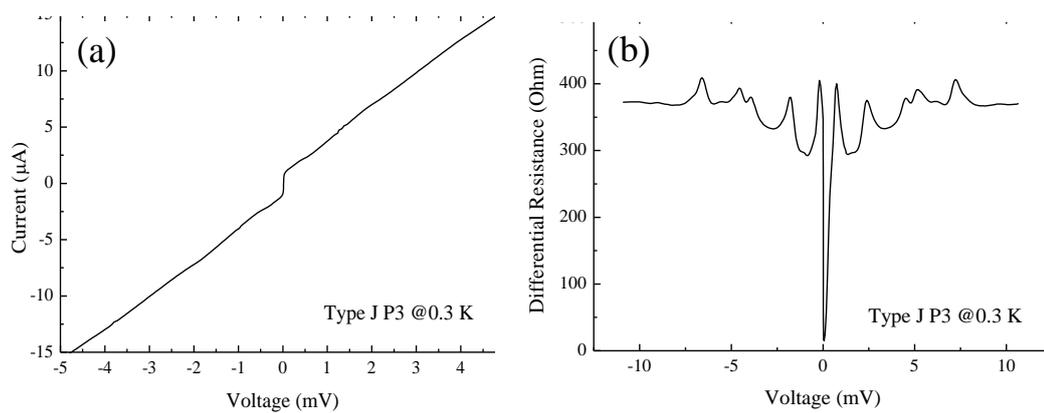


図 D-2 Nb-InGaAs-Nb 接合の(a)電流—電圧特性と(b)微分抵抗のバイアス依存性

している。さらにマイクロ波照射による S/Sm 接合の微分抵抗振動についても検討を進めた〔原著論文9〕。

## E. 物材機構グループ

このグループは今年度新たに発足したグループであるが、研究者および研究テーマは、理科大グループと重複する部分が多い。それは、高柳が物質・材料研究機構の国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点の主任研究員に採用され、研究場所も東京理科大学と物質・材料研究機構の2箇所になったためである。しかし物質・材料研究機構では希釈冷凍機を使った極低温測定や波長可変パルスレーザーを照射しての実験が可能であるため、今後分担して実験を進める。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「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、教授)

②研究項目

1. GaAs 基板を用いた GaAsSb 系量子ドットを中心とした type-II 量子ドットの製作と評価
2.  $n^+$ -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
3. 開放型 InAs 量子ドットの発光効率改善と超伝導電極の直接形成による電子クーパ対注入
4. InAlAs系量子ドットを用いた光子相関測定による単一光子、光子対発生の評価
5. Nb/InGaAs系超伝導発光ダイオードにおけるクーパ対の関与した発光プロセスの評価
6. 量子ドットを用いた発光ダイオードにおけるクーパ対の関与した発光プロセスの評価と量子もつれ合い光子対の発生

#### (2)「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、専任部員)

2. 研究項目

3. InP/InGaAs p-n 接合を用いた超伝導 LED の検討

#### (3)「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、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、電子クーパ対注入の検討

- 4.自己形成InAs量子ドットを用いた超伝導体・半導体接合の作製
- 5.超伝導電極の高T<sub>c</sub>化のため、MgB<sub>2</sub>超伝導薄膜形成方法の確立
- 6.超伝導体・半導体接合への光照射効果

(4)「東京理科大学」グループ

①研究分担グループ長：高柳 英明（東京理科大学、教授）

②研究項目

- 1.Nb超伝導電極とn<sup>+</sup>-GaAsNSeオーミック層，n<sup>+</sup>-GaAsNSe/n<sup>+</sup>-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、電子クーパ対注入に関する検討を行う。
- 2.Nb-p形InGaAs-Nb接合における超伝導特性解明。
- 3.MgB<sub>2</sub>超伝導薄膜の特性評価とMgB<sub>2</sub>-半導体接合の特性解明。
- 4.超伝導を用いた単一光子検出器の基礎検討。
- 5.超伝導電極との直接接合を目指した開放型InAs量子ドットの伝導特性評価。
- 6.超伝導量子ビットと光子系との結合の基礎検討。

(5)「物材機構」グループ

①研究分担グループ長：高柳 英明(物質・材料研究機構、主任研究員)

②研究項目

- 1.Nb超伝導電極とn<sup>+</sup>-GaAsNSeオーミック層，n<sup>+</sup>-GaAsNSe/n<sup>+</sup>-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、電子クーパ対注入に関する検討を行う。
- 2.Nb-p形InGaAs-Nb接合における超伝導特性解明。
- 3.MgB<sub>2</sub>超伝導薄膜の特性評価とMgB<sub>2</sub>-半導体接合の特性解明。
- 4.超伝導を用いた単一光子検出器の基礎検討。
- 5.超伝導電極との直接接合を目指した開放型InAs量子ドットの伝導特性評価。
- 6.超伝導量子ビットとフォトン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）

1. I. Suemune, T. Akazaki, K. Tanaka, M. Jo, K. Uesugi, M. Endo, H. Kumano, and E. Hanamura: “Role of Cooper Pairs for the Generation of Entangled Photon Pairs from Single Quantum Dots” *Microelectronics Journal*, Vol. **39** (2008) pp. 344-347.
2. H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, M. Jo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: “Highly Circular-polarized Single Photon Generation from a Single Quantum Dot at Zero Magnetic Field” *Microelectronics Journal*, Vol. **39** (2008) pp. 327-330.

3. Tatsushi Akazaki, Masumi Yamaguchi, Kouhei Tsumura, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, "Negative photoconductivity in  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  heterostructures", *Physica E* 40, p.1292 (2008).
4. Y.L. Zhong, H. Nakano, T. Akazaki, K. Kanzaki, Y. Kobayashi and H. Takayanagi, "Superconducting proximity effect and reentrant behaviors in random network carbon nanotubes" *Physica C*, **468** (April 2008) 709-713.
5. H. Kumano, H. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Jo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: "Single Photon Emission with High Degree of Circular Polarization from a Single Quantum Dot Under Zero Magnetic Field" *Physica E* Vol. **40** (2008) pp. 1824-1827.
6. J. Ibanez, R. Cusco, E. Alarcon-Llado, L. Artus, A. Patane, D. Fowler, L. Eaves, K. Uesugi, and I. Suemune: "Electron Effective Mass and Mobility in Heavily Doped n-Ga(AsN) Probed by Raman Scattering" *Journal of Applied Physics*, Vol. **103** (2008) pp. 103528-1~5.
7. Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, H. Kumano, and I. Suemune: "Luminescence Observed from A Junction Field-Effect Transistor with Nb/n-InGaAs/Nb Junction" *phys. stat. sol. (c)* Vol. **5**, No. 9 (July 2008) pp. 2816-2818.
8. H. Kumano, H. Kobayashi, S. Ekuni, Y. Hayashi, M. Jo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and I. Suemune: "Optical-phonon Mediated Exciton Energy Relaxation with Highly Preserved Spin States in a Single Quantum Dot" *Phys. Rev. B* **78**, 081306-1-4 (R) (2008).
9. R Inoue, H Takayanagi, M Jo, T Akazaki, K Tanaka and I Suemune, "Differential resistance oscillations with microwave irradiation in a superconductor-semiconductor junction", *J. of Physics Conf. Series* **109**, 012033 (2008).
10. J. Ibanez, E. Alarcon-Llado, R. Cusco, L. Artus, D. Fowler, A. Patane, K. Uesugi, and I. Suemune: "LO Phonon-plasmon Coupled Modes and Carrier mobilities in Heavily Se-doped Ga(As,N) Thin Films" *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (to be published)
11. M. Jo, Y. Hayashi, H. Kumano, and I. Suemune: "Exciton-phonon Interactions Observed in Blue Emission Band in Te delta-doped ZnSe" *J. Appl. Phys.* (to be published)
12. H. Kumano, S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Muto: "Spin-flip Quenching in Trion State Mediated by Optical Phonons in a Single Quantum Dot" *phys. stat. sol.* (to be published)
13. Y. Idutsu, S. Miyamura, and I. Suemune: "Improved Luminescence Efficiency of InAs Quantum Dots Grown on Atomic Terraced GaAs Surface Prepared with In-situ Chemical Etching" *phys. stat. sol.* (to be published)
14. Y. Idutsu, M. Takada, Y. Hayashi, T. Akazaki, H. Sasakura, H. Kumano, and I. Suemune: "Observation of Enhanced Luminescence Emitted from InAs Quantum Dots

with Direct Contact to Superconducting Niobium Stripe” phys. Stat. sol. (to be published)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 3 件)