

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
研究課題「超伝導フォトニクス創成とその応用」

研究終了報告書

研究期間 平成17年10月～平成23年3月

研究代表者：末宗 幾夫
(北海道大学電子科学研究所・教授)

§ 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(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 を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たことによる 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。この理論と実験から、発光全体の 60% 以上が電子クーパー対と正孔対の再結合による発光と見積もることができ、LED 内部では量子もつれ光子対の同時生成が相当程度起きていることが示された。

このような量子もつれ光子対の生成を直接確認するためには、LED 内部で発生した光子を効率よく外部に取り出す構造が必要であり、Nb 電極で p-n InGaAs 接合を挟んだ構造を考案した。その FDTD シミュレーションを進め、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。このデバイス構造の最適化とともに、パラメトリック下方変換による量子もつれ光子対源を用いて固体光子源の実験シミュレーションを進め、量子もつれ光子対発生の直接評価を進めつつある。これに加えて、InAs 量子ドットへ Nb 超伝導電極を直接形成することにより、量子ドットからクーパー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。さらに将来にむけて、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 MgB_2 超伝導電極の検討も進みつつある。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

本研究の究極の目標は、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と、半導体量子ドットの離散準位によるパウリの排除律を使った、オンデマンド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。これは、伝導帯に連続電子状態を持ち、価電子帯に“単一の正孔対のみを局在させる” Type-II 量子ドットを用い、超伝導物質から 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し、対向する p 型半導体から通常粒子としての正孔対を量子ドットの離散準位に分布させることにより可能となると考えた。正孔は、量子ドットに隣接するバリア層の価電子帯バンド端からフォノン放出によるエネルギー緩和によって量子準位に分布させる。一方、クーパー対の場合は“エネルギー緩和”が許されず、伝導帯バンド不連続の小さい Type-II 量子ドットにおける超伝導近接効果により、超伝導体から量子ドット中に電子クーパー対を注入することが可能となる。また、大きなコヒーレント体積を持った電子クーパー対と正孔対の発光再結合は、発光寿命の短縮ならびに発光量子効率の大幅な増大が期待される。さらにパルス電流励起により量子ドット価電子帯単離散準位に分布させた正孔対との再結合により、パルスあたり 1 対の量子もつれ光子対を発生させることが期待できる。通常の量子ドットにおいては、励起子分子・励起子の時系列発光によって光子対が発生し、その中間状態である励起子に対する電子—正孔交換相互作用によるエネルギー分裂が量子もつれを崩してしまい、大きな課題となっている。電子クーパー対はスピンシングレット状態にあるため電子—正孔交換相互作用の影響を受けないこと、励起子中間状態を経ない光子対同時生成過程であることから、量子もつれ光子対生成が可能である。

以上のような電子クーパー対と量子ドットの組み合わせにより、オンデマンドで一度に単一の量子もつれ光子対を発生するダイオード光源を、光ファイバー通信に適用される波長 1.55 μm 帯、ならびにノイズの少ないシリコン単一光子検出器が高い検出量子効率を示し自由空間量子情報伝送が可能な 700nm–800nm 波長帯で実現することを目指した。さらに、この超伝導とフォトニクスにまたがる基幹技術を開発することにより、量子テレポーテーション、量子中継器、さまざまな量子情報処理の基幹デバイスとしての幅広い応用展開、超伝導とフォトニクスにまたがる境界領域での新たな物性科学の展開を進める基礎を築くことを目標とした。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

全般的には初期に計画した研究構想に沿って展開できた。クーパー対を直接発光再結合させる試みは過去になく、研究開始当初には可能性でしかなかったが、超伝導薄膜作製を専門とする NTT グループと発光デバイス作製で高度な技術を持つ浜松ホトニクスグループの協力のもと、北大におけるナノテク支援によるオープンファシリティを使用した Nb の微細加工技術を組み合わせ、超伝導とフォトニクスの境界領域を象徴する超伝導 LED を実現した。特にこれまで試みのない研究領域のプロジェクトであるので、実験事実の検証にも時間を要した。LED 構造における半導体中への電子クーパー対の注入は、この分野を専門とする東京理科大学と物質・材料研究機構の合同グループによって詳細に検討が進められ、この過程を通して、電子クーパー対が LED の発光層近傍を流れていることを明らかにすると共に、電子クーパー対の発光再結合にかかわる特異性、特に発光再結合によって発生した光子が電子クーパー対に与える影響など、今後の新たなテーマも浮かび上がってきている。さらに、GaAs 系での電子クーパー対の注入に関連して試みた Nb/GaAs 界面における半導体超格子構造が、我々が「アンドレーエフポーラロン」と名付けた新しい共鳴現象を引き起こしていることを確認し、境界領域に関連した新しいコンセプトも生まれつつある。

材料系に関しては、当初 III-V 系、II-VI 系、Type-I, Type-II ヘテロ構造など幅広く検討を進めていたが、予想以上に金属/半導体界面のオーミック特性が電子クーパー対の半導体への注入

に重要であることが次第に、より明確になった。具体的には、研究開始時点で北大グループでは GaAs 系で熱処理することなくオーミック特性を実現する技術を持っていたが、低温での電子クーパ対の注入はより敏感な界面依存性を示し、研究の後半ではショットキー高さが低い InP 基板上の InGaAs 系に集中した。これは光ファイバー通信波長帯で量子もつれ光子対光源を開発することにもつながり、実用的な価値も高まると判断したためである。しかしそのために、長波長帯でシリコン単一光子検出器のような高性能単一光子検出器がまだ確立されていないという、世界的な課題にも直面することになった。

InP 基板を用いた超伝導 LED において電子クーパ対による発光増強を観測したが、これまでに関連の理論研究そのものが存在しなかったため、新たな理論を構築するのに2年近くを要した。しかしこれによって発光増強自体を非常に良く理論説明できるだけでなく、電子クーパ対が正孔対と同時に発光再結合して量子もつれ光子対を生成していることが示された。この理論は2次の摂動理論によるものであり、電子クーパ対による発光再結合確率の増大はさらに高次の項に波及することが予期され、その検討は今後のさらなる理論課題である。

この理論によって LED 内部での量子もつれ光子対の生成は示されたが、外部の光子検出器で直接確認することが残された課題である。そのためには光子対を外部の二つの光子検出器で同時検出する必要がある。この光子相関測定において、光子を同時に検出できる確率は二つの光子検出確率の積に比例するため、発生した二つの光子ともに高い量子効率で外部に取り出し検出器に結合させることが特に重要である。そのため、高い光子取り出し効率を持つ超伝導 LED の新たな開発が急務となった。高い光子取り出し効率は通常の LED 開発でも重要な研究開発要因であるが、通常の LED では方向に係わらずともかく光を外部に取り出せばよいのに対して、量子もつれ光子対発生では二つの光子を共に光検出器へと導かねばならない。さらに、超伝導 LED では電子クーパ対のコヒーレンス長と両立させる必要があり、金属が近接した中で特定方向へ光子を取り出す通常の LED にはない新しいコンセプトの LED 開発が必要となり、その開発にほぼ2年を要した。

このように具体的な研究過程において多くの興味深い科学的新発見があり、新たな理論分野の構築も進めることができたが、上記の LED に量子ドットを挿入した研究へ進めるにはさらなる時間を要したので、量子ドットにおける電子クーパ対の発光再結合自体の研究を並行して進めた。その結果超伝導 LED と同様に、Nb 臨界温度以下での発光増強を PL 測定によって観測した。当初目標とした量子ドットを組み込んだ超伝導 LED によるオンデマンド動作については、これらの研究成果を合体させて進める必要があり今後の残された課題となっている。

§ 3 研究実施体制

(1)「北海道大学」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
末宗 幾夫	北海道大学	教授	H17.10～
井上 修一郎	日本大学	教授	H21.1～
植杉 克弘	室蘭工業大学	准教授	H17.10～
熊野 英和	北海道大学	准教授	H17.10～
笹倉弘理	北海道大学	助教	H20.1～
行方 直人	日本大学	助教	H21.1～
遠藤礼暁	北海道大学	博士研究員	H17.10～H19.3
定 昌史	北海道大学	博士研究員/学振 特別研究員	H17.10～H21.3
井筒 康洋	北海道大学	博士研究員	H.18.4～H21.9
林 雄二郎	北海道大学	博士研究員/学振 特別研究員	H.18.4～H20.4
小田島 聡	北海道大学	博士研究員	H.21.4～
許 載勳	北海道大学	博士研究員	H.19.12～
星山満雄	北海道大学	学術研究員	H19.4～
海老原正人	北海道大学	H18 D3, H19 博士 研究員	H19.4～H19.6
小林 創	北海道大学	H18 M1, H19 M2	H.18.4～H20.3
高田 真	北海道大学	H19 M1, H20 M2	H19.4～H21.3
佐藤 充	北海道大学	H19 M1, H20 M2	H19.4～H21.3
伊藤 早紀	北海道大学	H19 M1, H20 M2	H19.4～H21.3
佐藤 弘康	北海道大学	H19 M1, H20 M2	H19.4～H21.3
倉光 周平	北海道大学	H20 M1, H21 M2	H20.4～H22.3
江国 晋吾	北海道大学	H20 M1, 休学、 H21 M1, H22 M2	H20.4～
宮村 壮太	北海道大学	H20 M1, H21 M2	H20.4～H22.3
加藤 大望	北海道大学	H20 M1, H21 M2	H20.4～H22.3
足立 俊介	日本大学	H20 M2	H21.1～H21.3
和田 雅樹	北海道大学	H21 M1, H22 M2	H21.4～
井田 惣太郎	北海道大学	H21 M1, H22 M2	H21.4～
中島 秀明	北海道大学	H21 M1, H22 M2	H21.4～
桜井 誠也	北海道大学	H22 M1	H22.4～
飯島 仁史	北海道大学	H22 M1	H22.4～
竹中 浩人	北海道大学	H22 M1	H22.4～

② 研究項目

1. 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
2. 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
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による発光増強

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微細加工と微細スリットの形成、その超伝導LEDへの応用
6. Nb/InGaAs系超伝導発光ダイオードにおけるクーパー対の関与した発光プロセスの評価
7. 超伝導LEDにおけるクーパー対発光再結合の理論検討
8. 超伝導 LED の超伝導による発光増強、発光寿命の短縮の実験・理論的検討
9. 光子外部取り出し効率を高めた Nb 埋め込み InAs 量子ドット構造の試作
10. Nb-InGaAs-Nb 超伝導 LED の評価と量子もつれ合い光子対の検討

(2)「浜松ホトニクス株式会社」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
田中 和典	中央研究所	専任部員	H17.10～
菅 博文	中央研究所	研究主幹	H17.10～
山西 正道	中央研究所	技術顧問	H17.10～

② 研究項目

1. Nb/n-InGaAs/p-InP 構造超伝導 LED の作製と評価
2. InGaAs p-n 接合薄膜の InP 基板貼り付け技術の開発
3. Au/n-InGaAs/p-InGaAs/Au 基板貼り付け構造 LED プロトタイプの実験と評価
4. Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 基板貼り付け構造超伝導 LED の作製と評価

(3)「日本電信電話株式会社」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
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	H17.10～
高柳 英明	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所	所長	H17.10～H18.3
羽柴 秀臣	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所	博士研究員	H18.8～H20.3
柴田 浩行	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所	主任研究員	H18.8～
内藤 方夫	東京農工大学工学部	教授	H18.8～
羽柴 秀臣	日本大学 量子科学研究所	助教	H20.4～

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. 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_c 化のため、 MgB_2 超伝導薄膜を用いた超伝導体・半導体接合の検討

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 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
高柳 英明	東京理科大学 理学部応用物理学科 H20 から総合研究機構	教授	H17.10～
井上 亮太郎	東京理科大学 理学部応用物理学科	助教	H19.4～
石黒 亮輔	東京理科大学 理学部応用物理学科	助教	H20.4～
西沢 望	物質・材料研究機構	ポスドク研究員	H20.4～H22.3
中西 佳代子	東京理科大学 総合研究機構	研究補助員 (データ整理補助)	H20.4～
森田 邦夫	東京理科大学 理学部応用物理学科	B4	H18.5～H18.10
増山 博孝	東京理科大学 理学部応用物理学科	B4～M2	H18.10～H21.3
小川 英輔	東京理科大学 理学部応用物理学科	M1～M2	H19.4～H21.3
本田 賢一	東京理科大学 理学部応用物理学科	M1～M2	H19.4～H21.3
菅谷 健太	東京理科大学 理学部応用物理学科	M1～M2	H20.4～H22.3
南雲 淑元	東京理科大学 理学部応用物理学科	M1～M2	H20.4～H22.3

②研究項目

1. 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。
2. Nb-p形InGaAs-Nb接合における超伝導特性解明。
3. MgB₂超伝導薄膜の特性評価とMgB₂-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)「物質・材料研究機構」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
高柳 英明	物質・材料研究機構	主任研究員	H20.4～

井上 亮太郎	物質・材料研究機構	客員研究員	H20.4～
石黒 亮輔	物質・材料研究機構	客員研究員	H20.4～
西沢 望	物質・材料研究機構	ポスドク研究員	H20.4～H22.3

②研究項目

1. 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。
2. Nb-p形InGaAs-Nb接合における超伝導特性解明。
3. MgB₂超伝導薄膜の特性評価とMgB₂-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クス系との結合の基礎検討。

§ 4 研究実施内容及び成果

(1)研究実施内容及び成果

4-1. 量子ドットの形成と評価（北海道大学）

(4-1-1) GaAsSb 系 Type-II 量子ドットの形成と界面制御

クーパー対を超伝導体から半導体発光層にトンネル注入する場合には、伝導帯のフェルミエネルギーが空間的に一定である必要がある。一方正孔を量子ドットの離散準位に注入する際に、パウリの排他律により基底準位を占める正孔の数は2個に制限されることを利用すると、一度に一对の光子対を生成することが期待できる。これを実現する材料系として、伝導帯のバンド不連続が余り大きくならないように制御した Type-II ヘテロ構造が最適である。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。電子クーパー対を半導体量子ドットで正孔対と再結合させる場合、クーパー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ー対を GaAsSb 領域にしみ込ませて、クーパー対の関与した発光プロセスを実現しようと検討を進めた。その際に伝導帯バンド不連続の制御がポイントとなるが、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。図 4-1-1 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。

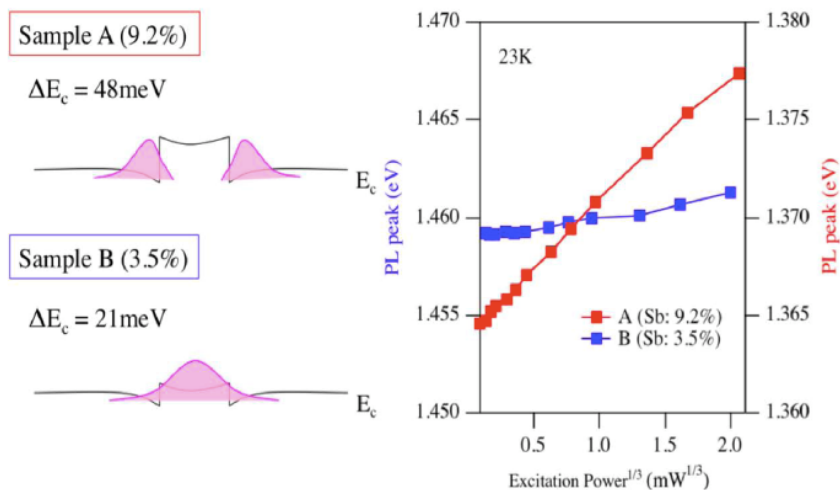


図 4-1-1. Sb 組成が 9.2%と 3.5%の 2 種類の GaAsSb/GaAs ヘテロ構造と、それぞれの発光ピークの光励起強度によるエネルギーシフト。

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、電子の波動関数がかなりの程度 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。

(4-1-2) 単一量子ドットと発光スペクトル評価

MBE 成長した量子ドット層から単一の量子ドットを取り出して評価するために、電子ビーム露光装置によるパターンニングと RIE を用いて直径 100nm~1μm のメサ構造を作製し、マイクロ PL 測定を行った。図 4-1-2 に典型的な発光スペクトルを示す。中性励起子 (X^0) 発光と中性励起子分子 (XX^0) 発光が主に観測され、それぞれの発光寿命は 1.02ns, 0.55ns と測定される。この場合の量子ドットは繰り返し 82MHz, パルス幅 80fs、波長 730nm、平均パワー2μW のパルスレーザで励起されている。レート方程式解析から、パルス毎に量子ドットに励起されている平均励起子数は 0.4 程度と見積もられ、さらに励起強度を増すと平均励起子数の増加によって XX^0 ピーク強度がより大きくなっていく。励起条件によっては電子と正孔の数が異なる荷電励起子、荷電励起子分子も発生するが、次の節でも中性励起子、中性励起子分子のみを扱い、添え字の 0 を省略する。

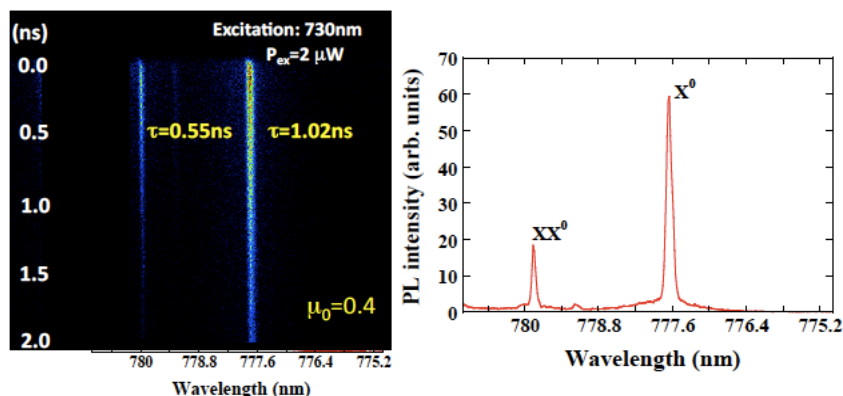


図 4-1-2. 中性励起子 (X^0) 発光と中性励起子分子 (XX^0) 発光のストリークカメラ測定による時間依存性とその時間積分スペクトル。

(4-1-3) 単一量子ドットからの単一光子対生成とその評価

量子ドットから生成する励起子分子(XX)—励起子(X)の時系列発光によって生成する光子対について、光子偏光状態相関測定を行なった。その結果図 4-1-3 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Xにおけるスピン反転時間が3.6ns と見積もられた。図 4-1-2 の測定から励起子寿命は1.02ns と見積もられているので、励起された励起子状態電子スピンは、その寿命内では安定にその状態を保持することがわかった。さらに、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、円偏光励起した後の励起子発光の円偏光保存状態を検討した。その結果、励起子状態より光学フォノンエネルギー分だけ高いエネルギー位置を準共鳴励起することにより、右円偏光励起直後に生成したスピン状態を保存したまま再び右円偏光で自然放出する光子の円偏光率が、 $\sim 85\%$ と非常に高い値を示すシャープなピークが観測された。

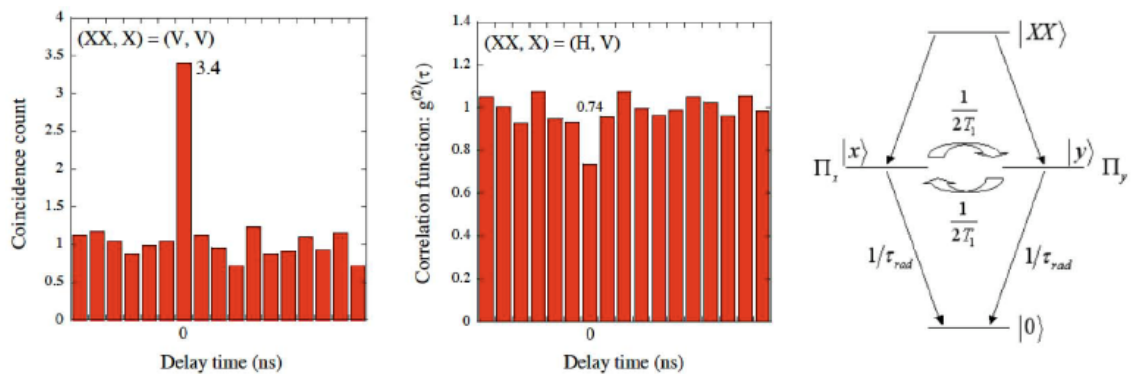


図 4-1-3. 偏光状態を考慮した励起子分子(XX)と励起子(X)発光の光子相関測定結果と、異なるスピンを持つ励起子状態間のスピン反転の模式図。励起子分子(XX)から直線偏光した光子放出によって2つの励起子スピン状態が生成するが、寿命 τ_{rad} で発光する前に、その状態間でスピン緩和時間 T_1 でスピン反転する可能性を示す。

4-2. 超伝導体から半導体への電子クーパ対の注入

(NTT 物性科学基礎研究所、東京理科大学、北海道大学)

(4-2-1) クーパ対注入用 GaAs 系オーミックコンタクトの形成と評価(NTT 物性基礎研)

超伝導電極から n 型半導体を介して、電子クーパ対を量子ドットに供給する発光ダイオード(LED)を実現するためには、多数の電子クーパ対を 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。GaAs 基板を用いて 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 4-2-1-1 に、本接合の模式図を示す。接合形状は、チャネル幅 $W=10 \mu\text{m}$, 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 4-2-1-2 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 ($|V| = 2\Delta_{\text{Nb}}/ne$, Δ_{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。しかし微分抵抗が増大していることから、Nb/n-GaAs 界面を通して近接効果で半導体中に電子クーパ対を注入するためには、なお界面にバリアが残留していると思われる。そのため、ジ

ヨセフソン接合特性を観測するには至らなかった。

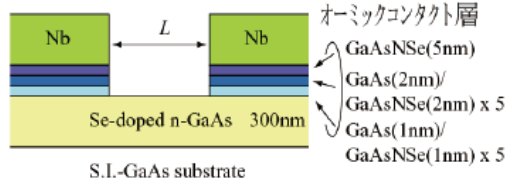


図 4-2-1-1 Nb/GaAs/Nb 接合の模式図

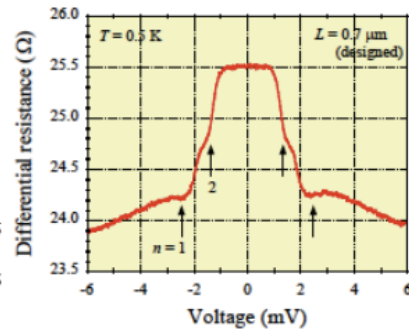


図 4-2-1-2 微分抵抗特性

(4-2-2) 超格子構造を挿入した超伝導(S)-半導体(Sm)-S 接合におけるアンドレーエフポラロン輸送現象の観測 (東京理科大)

Nb 超伝導体と半導体 n^+ -GaAs の界面に n^+ -GaAsNSe/ n^+ -GaAs 超格子構造を導入した超伝導体-半導体-超伝導体接合 (図 4-2-2-1) の微分抵抗特性をマイクロ波照射下で測定し、微分抵抗が電圧に対して振動する現象を発見した。超格子構造を導入していない接合試料では振動は観測されない点、特定の周波数のマイクロ波照射下でのみ振動が観測される点、振動の観測される電圧領域が超伝導体電極 Nb の超伝導ギャップ 3 meV 以下に限られている点などから、この振動は超伝導体準粒子の輸送特性がマイクロ波によって変調を受けている結果と考え、さらに検討を進めることにした。

超伝導電極としては Nb に加えてより純粋な特性を得やすい Al を用い、接合長さを変化させた試料を作製して、高周波同軸ケーブルを導入した希釈冷凍機を用いて測定した。図 4-2-2-2 は Al での測定結果である。得られた結果を解析した結果、マイクロ波程度の光子エネルギーを持つ長波長フォノンと超伝導準粒子が接合内で強く結合・局在していると考えると測定結果がうまく説明できることがわかった。このような結合によって形成される複合粒子は常伝導金属中ではポーラロンとして知られているものであるが、超伝導準粒子がフォノンと結合して新たな複合粒子を形成することはこれまで知られていなかった。我々はこれをアンドレーエフポーラロンと名付けた。現在さらにより詳細な理論的・実験的な解析を進めている。

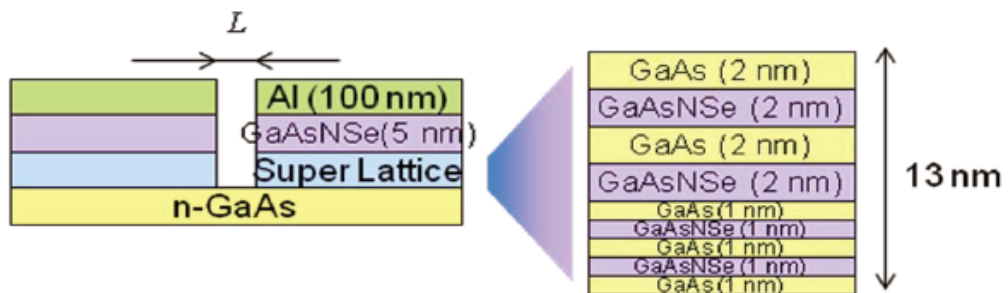


図 4-2-2-1 GaAs/GaAsNSe 超格子構造を導入した超伝導体(Al)-半導体-超伝導体(Al)接合の模式図。

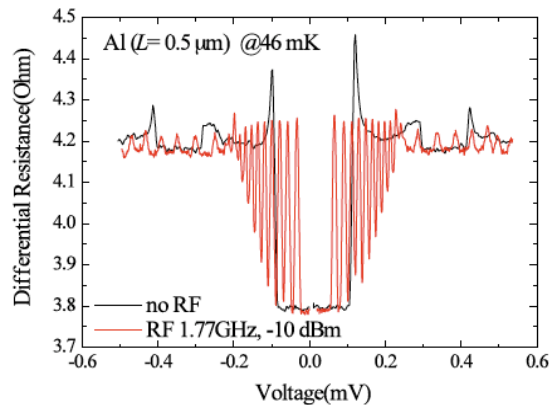


図 4-2-2-2 超伝導電極に Al を用いた超格子接合の微分抵抗特性(黒線)とマイクロ波照射による振動現象の観測(赤線)。

(4-2-3) InP 系半導体への Nb 超伝導電極の形成とクーパー対注入によるジョセフソン接合効果の観測 (東京理科大、NTT 物性基礎研)

Nb 超伝導電極を付加した p-InP/n-InGaAs 超伝導 LED 構造(図 4-2-3-1)における直流微分抵抗のバイアス依存性を測定し、n-InGaAs 側に作製した 2 つの Nb 超伝導電極間に明瞭なジョセフソン接合特性ならびにマイクロ波照射下でシャピロステップを観測した(図 4-2-3-2)。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を測定している素子構造と基本的に同じ構造であり、これらの素子で超伝導近接効果によって電子クーパー対が超伝導から半導体へ侵入していることを実験的に確認できた。

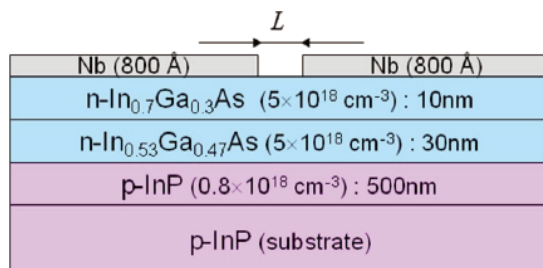


図 4-2-3-1 Nb 超伝導電極を付加した p-InP/n-InGaAs 超伝導 LED の模式図

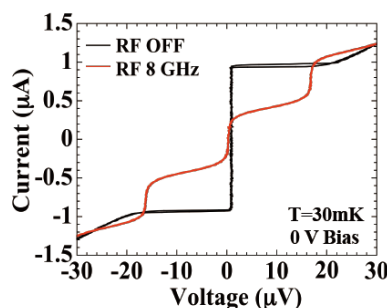


図 4-2-3-2 Nb-InGaAs-Nb 接合のジョセフソン接合特性 (黒線) とマイクロ波照射下におけるシャピロステップ (赤線)

(4-2-4) Nb 微細加工と微細スリット形成によるジョセフソン接合特性への効果(北大)

Nb などの高融点金属の微細加工は難しく、これまでの Nb 電極は光リソグラフィによるレジストパターニングとリフトオフを用いて形成した。そのため、Nb 電極間隔は $\sim 500\text{nm}$ から $\sim 1000\text{nm}$ と比較的広い場合が多かった。今後より設計自由度の高い Nb 電極形成法を開発する目的で、高解像度のパターニングを検討した。電子ビーム露光では ZEP520A レジストが広く用いられているが、その現像時の温度を下げることによってレジストパターニングの解像度が増すことを見いだした。図 4-2-4-1 に示すように、室温から 0°C に下げることによって改善するが、さらに -20°C まで低下させることによって、 10nm まで CAD パターンに忠実な高解像度が得られた。これは電子線の後方散乱の影響を最小限に出来るためである。この成果を用いて Nb の RIE を行うことにより、均一なスリット線幅 $\sim 20\text{nm}$ が実現できた。この製作法を超伝導 LED の電極形成に応用し、スリット線幅 $\sim 80\text{nm}$ の電極を形成したところ、ジョセフソン接合特性で観測される超伝導電流の臨界電流が $50\mu\text{A}$ まで大幅に向上し、ジョセフソン接合特性も Nb の超伝導臨界温度（この場合 $\sim 8\text{K}$ ）近くまで観測された。これは電極間の位相に敏感なジョセフソン特性が常伝導領域である InGaAs の伝搬長に大きく依存することを示している。

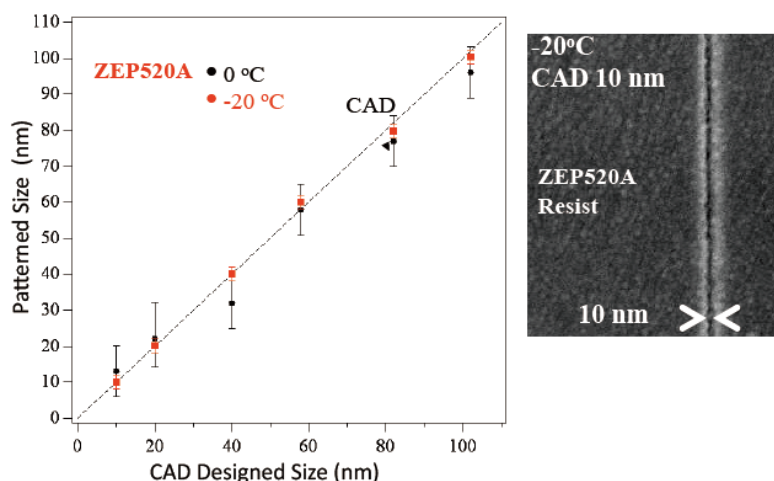


図 4-2-4-1 電子ビームレジスト ZEP520A の現像温度を下げる（CTD: Cold-Temperature Development）方法により、レジストパターニングの解像度が大幅に向上する。

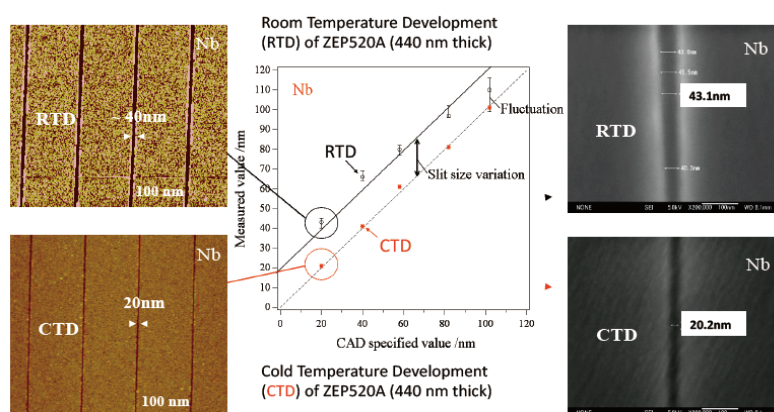


図 4-2-4-2 CTD（現像温度 -20°C ）によるレジストパターニングを用いることにより、CAD を忠実に転写した Nb のエッチング線幅 $\sim 20\text{nm}$ が実現できる。

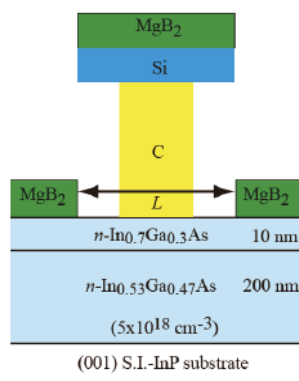


図 4-2-5-3 MgB₂/n-InGaAs 接合構造 (模式図)

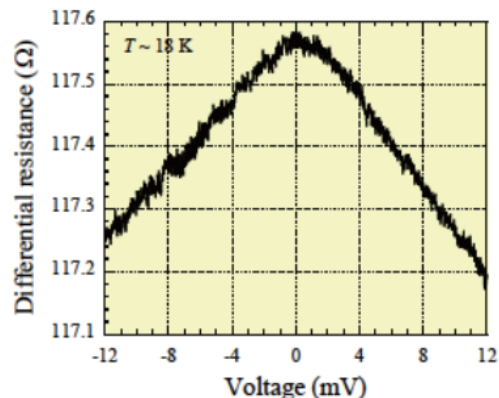


図 4-2-5-4 MgB₂/n-InGaAs 接合の微分抵抗特性

そこで、Mg 拡散による *n*-InGaAs の特性劣化を防ぎ、良好な界面特性を有する MgB₂ 超伝導接合を実現するため、MgB₂/n-InGaAs 界面への金属バッファ層の導入を検討した。金属バッファ層は、酸化しにくく MgB₂ の成膜温度で安定な材料でかつ近接効果を弱めないことが重要であるため、可能な限り膜厚を薄くする必要がある。我々は、Au が最適な材料と判断し、MgB₂ と *n*-InGaAs との層間に Au 層 (~5nm) を挿入した試料を作製した (図 4-2-5-6

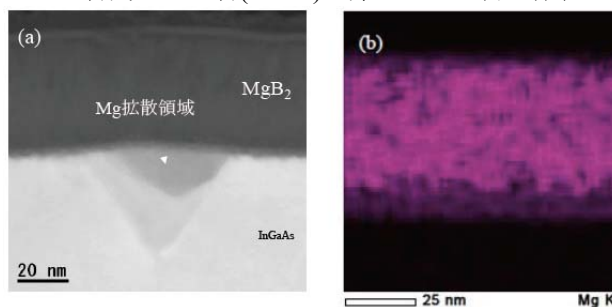


図 4-2-5-5 MgB₂/n-InGaAs 接合界面の断面 TEM 観察
(a) HAADF-STEM 像、(b) STEM-EDS mapping of Mg

参照)。図 4-2-5-7 に、本構造の微分抵抗のバイアス電圧依存性 (測定温度: 18K) を示す。微分抵抗は、約 5.6Ω の低抵抗となり、図 4-2-5-4 に示した従来構造に比べて、約 1/20 の改善が得られている。また、バイアス電圧の絶対値が、 $|V| < \sim 9\text{mV}$ の領域で、微分抵抗の低下が観測されている。これは、MgB₂/Au/n-InGaAs 界面の良好なオーミック接触により、超伝導ギャップ電圧以下での Andreev 反射による微分抵抗の低減が観測出来ていることを示している。また、図 4-2-5-8 に MgB₂/Au/n-InGaAs 界面での Mg の TEM 観察結果を示す。この STEM-EDS マッピングでは、*n*-InGaAs 層中に Mg の拡散領域は確認できなかった。これらのことから、Au 挿入層により、MgB₂ 成長時の *n*-InGaAs 層への Mg の拡散が抑制され、*n*-InGaAs 層の特性劣化が起こらないことが分かった。また、Au 挿入層の厚さは、2nm でもほぼ同等の改善効果があることが分かっている。

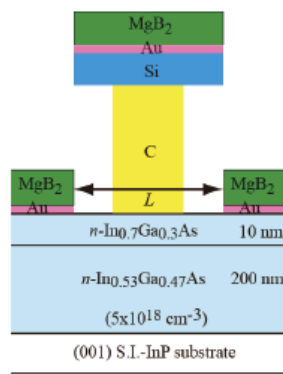


図 4-2-5-6 MgB₂/Au/n-InGaAs 接合構造 (模式図)

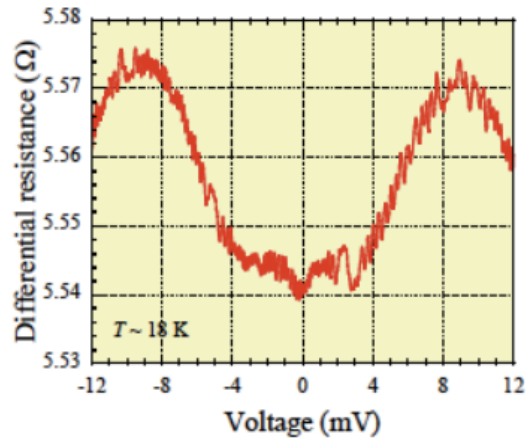


図 4-2-5-7 MgB₂/Au/n-InGaAs 接合の微分抵抗特性

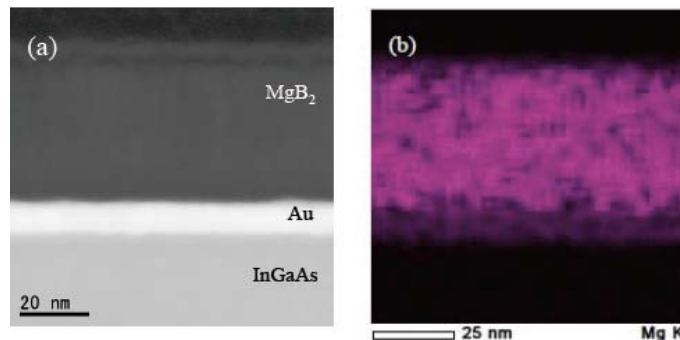


図 4-2-5-8 MgB₂/Au/n-InGaAs 接合の TEM 観察
(a) HAADF-STEM 像、(b) STEM-EDS mapping of Mg

4-3. 超伝導体/半導体接合と光の相互作用 (NTT 物性科学基礎研究所、北海道大学)

(4-3-1) 超伝導体/半導体接合と光の相互作用 (NTT 物性基礎研)

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 In_{0.7}Ga_{0.3}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 1.3μm 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 4-3-1-1 に、本接合の模式図を示す。ソース・ドレイン電極の Nb は、In_{0.7}Ga_{0.3}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 4-3-1-2 に、1.8K での光照射による *I-V* 特性の変化を示す。熱雑音に起因すると思われる *I-V* 特性のラウンディングが見られるものの、Josephson 電流が $\sim 1.5\mu\text{A}$ から $\sim 1.7\mu\text{A}$ へ増大していることが分かる。この光照射による超伝導特性改善の原因を明らかにするため、光照射による抵抗の変化を 2DEG 部分と S/Sm 界面部分とに切り分けて評価した。

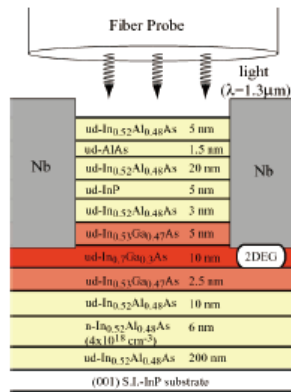


図 4-3-1-1 S/Sm/S 接合構造 (模式図)

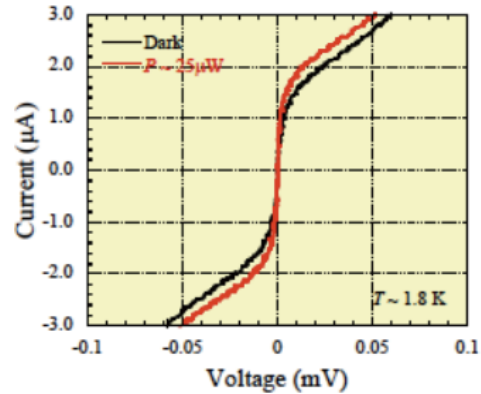


図 4-3-1-2 光照射前後の電流電圧特性 (赤線が 25 μW 光照射時)

図 4-3-1-3 に、1.8 K 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 (レーザー強度 $P \sim 25 \mu\text{W}$) 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。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 4-3-1-4 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 $2\Delta_{\text{Nb}}$ 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 ($|V| = 2\Delta_{\text{Nb}}/ne$) が観測された。光照射により、全体的に抵抗が減少し、 $2\Delta_{\text{Nb}}$ 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 Z の大きさが、光照射前に 1.0 だったものが、0.85 に低下していることとも一致している (図 4-3-1-5 を参照)。

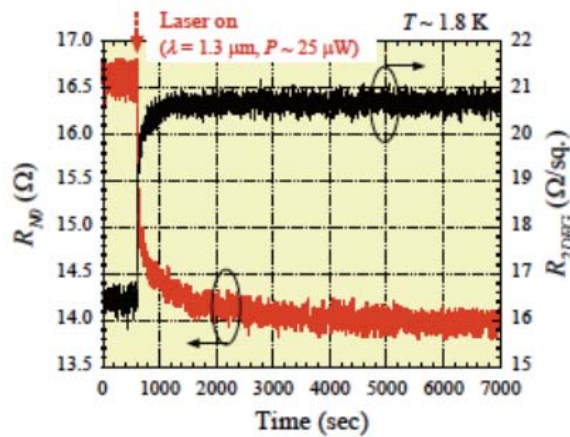


図 4-3-1-3 光照射による抵抗の変化

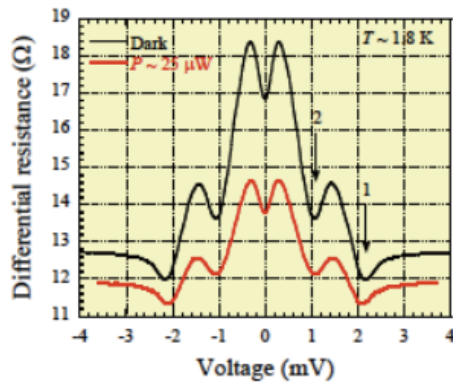


図 4-3-1-4 光照射前後の微分抵抗特性
(赤線が 25 μ W 光照射時)

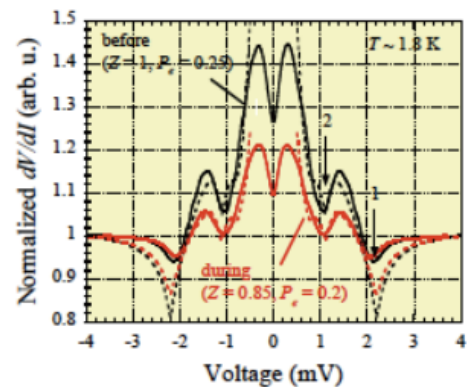


図 4-3-1-5 光照射前後の微分抵抗特性と
超伝導近接効果理論との比較（黒破線、
赤破線がそれぞれ光照射無し、有り時の
特性のモデルフィッティング）。

(4-3-2) Nb/InAs 量子ドット接合と発光再結合の増強（北大）

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オンデマンド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 μ m 波長帯での発光が比較的容易に得られるなどの特徴を持つが、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 量子ドットに直接 Nb 電極を形成することにより、超伝導臨界温度（ ~ 8 K）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。図 4-3-2-1 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 4-3-2-2 はその測定結果であり、幅 5 μ m の Nb 電極の中央にビーム径約 3 μ 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-InP 構造 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。

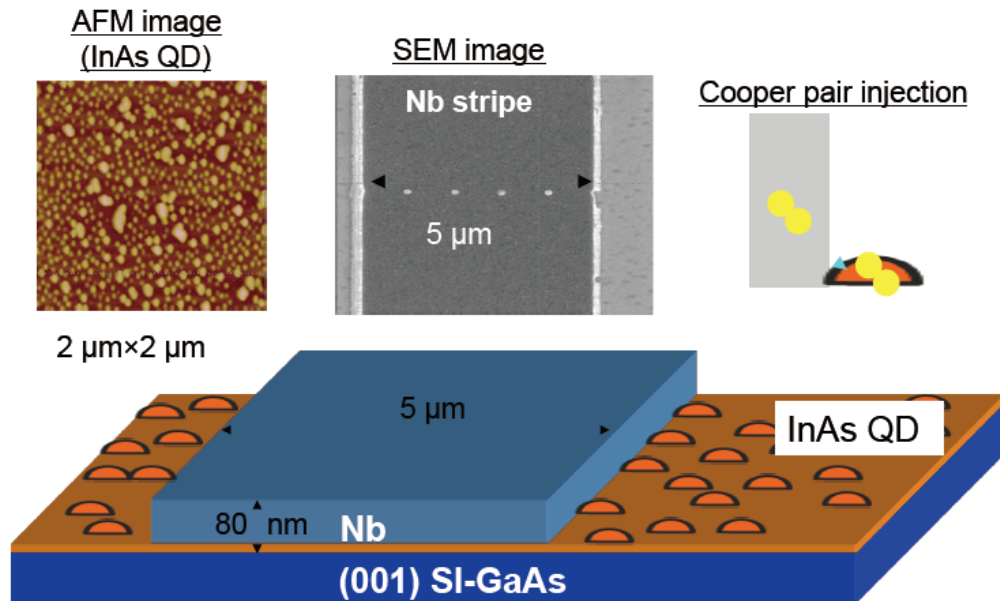


図 4-3-2-1 開放型 InAs 量子ドットに Nb を直接コンタクトさせ、Nb 電極から InAs 量子ドットへクーパー対がしみ込む効果をフォトルミネッセンスで観測する模式図。

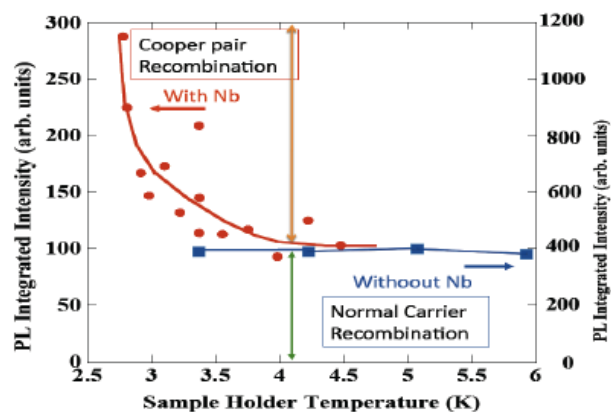


図 4-3-2-2 Nb に接していない InAs 量子ドット発光強度の温度依存性 (■) と Nb に接している InAs 量子ドットの発光強度の温度依存性 (●)。光学評価を行うマイクロ PL 用クライオスタットは、外部からの輻射の影響を受け、Sample Holder 温度の ~ 4.1 K が Nb 臨界温度の ~ 8 K に対応する。

4-4. 超伝導 LED の作製と基本特性評価

(浜松ホトニクス、NTT 物性科学基礎研究所、東京理科大学、北海道大学)

(4-4-1) Nb/n-InGaAs/p-InP LED 構造の作製(浜ホト、NTT 物性基礎研)

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 4-4-1-1 にデバイス構造を示す。p-InP 基板上に p-InP と n-InGaAs から構成される p-n 接合を成膜し、n-InGaAs 上に 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で、熱処理が Nb 電極の超伝導特性を消失させることが分かり、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立した。その結果、Nb の超伝導特性を損なうことなく図 4-4-1-2 に示すように $100\mu\text{A}$ 以下の低電流で発光する LED デバイスを作製することができた。

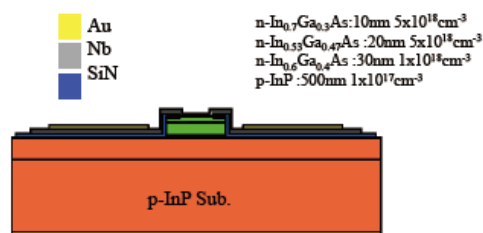


図 4-4-1-1 InP/InGaAs p-n 接合デバイス

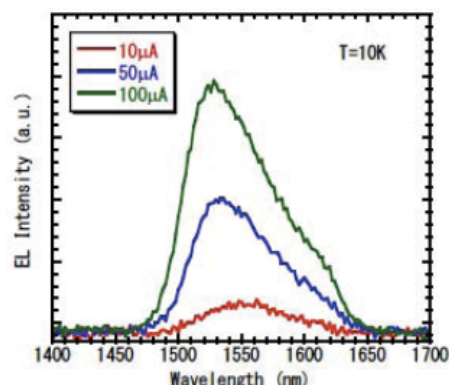


図 4-4-1-2 InP/InGaAs LED の発光特性

しかし、図 4-4-1-1 のダブルヘテロ構造では超伝導電極からクーパー対を注入する構造上、クラッド層の n-InGaAs と活性層の n-InGaAs の In 組成の差を大きくすることができないため、活性層及びクラッド層の両方からの発光が確認され、発光スペクトル幅が広がる問題があった。そこで、シングルヘテロ構造を採用し、発光領域を限定することでスペクトル幅が狭い発光特性を示すデバイスの作製に取り組んだ。シングルヘテロ構造を図 4-4-1-3 に示した。p-InP 基板上に 3 層構造の p-n 接合が形成してある。コンタクト層の n-InGaAs 上に蒸着した Nb 超伝導電極から p-n 接合部までは 60nm と薄く設計しており、Nb 電極からクーパー対が効率良く活性領域に注入できる構造となっている。図 4-4-1-4 に 10K での電流注入による発光特性を示した。発光スペクトルのピーク波長は 1.55μm 帯域にあり、10μA の低電流においても発光を確認することができた。発光スペクトルの半値全幅は注入電流 100μA 時で 57nm とダブルヘテロ構造で確認した 86nm と比較すると 2/3 程度狭くなっている。

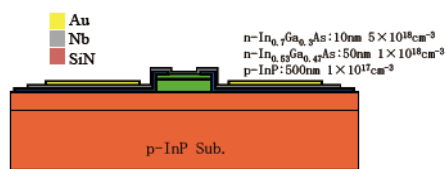


図 4-4-1-3 シングルヘテロ接合デバイス

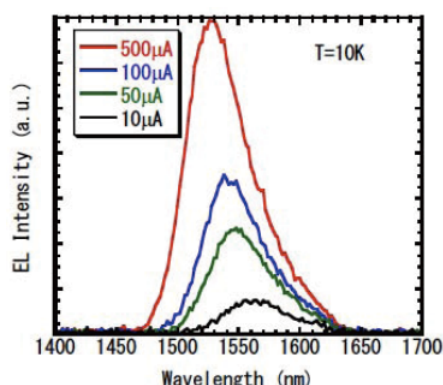


図 4-4-1-4 シングルヘテロ接合 LED の発光特性

発光を取り出すデバイス構造としては、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 4-4-1-3 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、電子クーパー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。

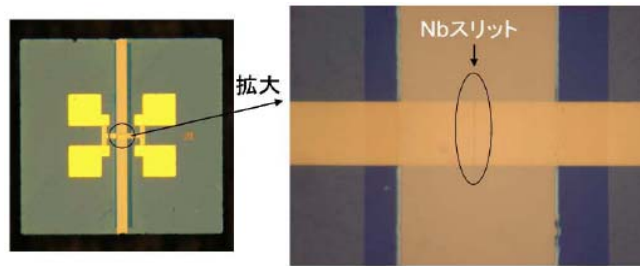


図 4-4-1-5 Nb スリット表面光取り出し構造 LED

(4-4-2) Nb/n-InGaAs/p-InP LED 構造の Junction FET 動作 (北大)

上記のようにして作製した LED は、表面の Nb 電極のスリットを利用すると、Junction FET として動作する。図 4-4-2-1 はその断面構造であり、p-InP 基板の上に n-InGaAs 層が成長され、中央の p-n 接合領域を除いてリッジ構造にエッチングされている。その表面を電気的な絶縁膜として SiN 膜でカバーし、リッジ構造の表面部のみ SiN 膜をエッチングして n-InGaAs 表面を露出させる。この表面に Nb 電極を形成し、中央の n-InGaAs に接している Nb 電極にスリットを作製する。左右の Nb 電極にリード線を接続するための金パッドを形成する。二つの Nb 電極は FET のソース (S)、ドレイン (D) として働き、n-InGaAs 層が電子電流が流れる n-チャネル層となる。図の p-n 接合に背面ゲート電極から逆バイアスを印可すると、p-n 接合に空乏層が広がり n-チャネル層厚が薄くなるために、図 4-4-2-2 に示すように流れるドレイン電流が減少するデプリーションタイプの FET として動作する。この室温動作に対して、極低温では 4-2-3 節で議論したジョセフソン接合特性が観測されるが、そのゲート電圧依存性を次の節で議論する。

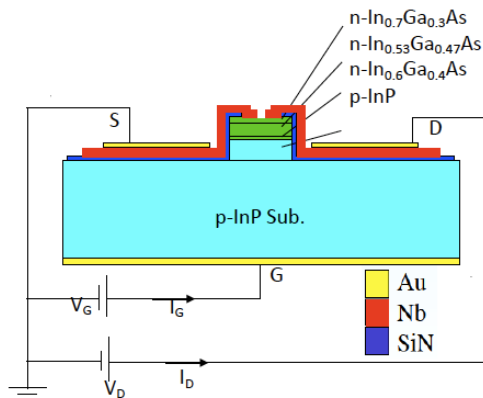


図 4-4-2-1 超伝導 LED の断面構造と Junction FET として動作させるための回路構成。

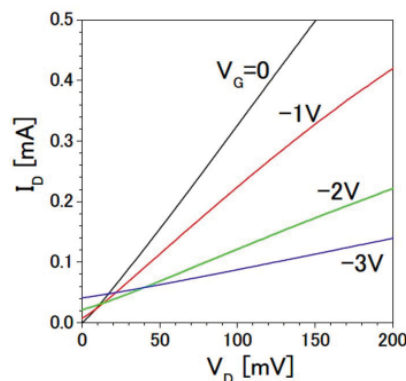


図 4-4-2-2 図 4-4-2-1 の裏面ゲート電極に逆バイアスを印可したときの表面 Nb 電極 (ソースとドレイン) 間を流れるドレイン電流とドレイン電圧の関係。

(4-4-3) Nb/n-InGaAs/p-InP LED 構造における Josephson-Junction 特性のゲートバイアス依存性 (東京理科大)

4-2-4 節で述べたように、マイクロ波照射下において明瞭なシャピロステップを確認し、これによって、二つの Nb 電極とその間の n-InGaAs 層が超伝導-半導体-超伝導ジョセフソン接合を構成していると直接的に実証できた。さらに p-InP 層に取り付けられた背面ゲート電極の電圧によってジョセフソン接合特性が図 4-4-3-1 に示す通り変化することが分かった。超伝導 LED 構造における p-InP 層と n-InGaAs 層は pn 接合を構成しており、界面のキャリア出払い層は背面ゲート電極の電圧によって変化する。図 4-4-3-1 の変化によって、超伝導 LED 構造において電子クーパ対が Nb 超伝導電極から p-InP/n-InGaAs 界面の発光層に近接効果によって侵入していると証明できた。

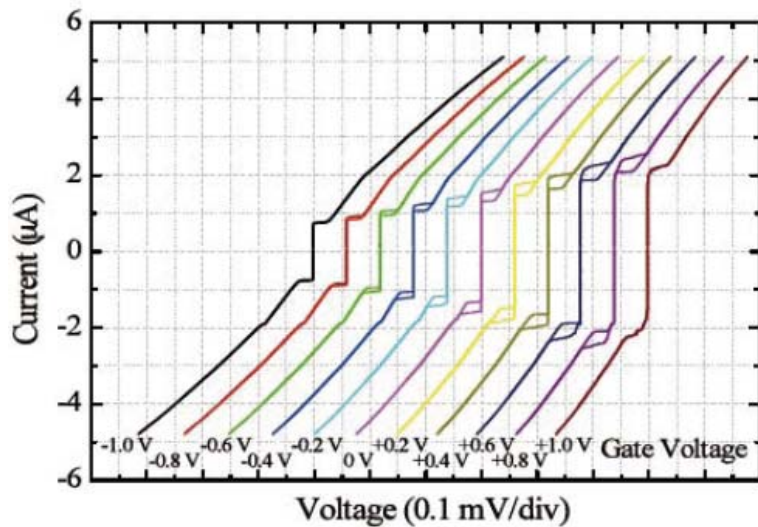


図 4-4-3-1 Nb 超伝導電極間のジョセフソン接合特性の背面ゲート電圧依存性。

図 4-4-3-1 に示したジョセフソン接合特性の p-InP 側ゲート電極電圧依存性についてさらに検討した。結果を図 4-4-3-2 に示す。常伝導抵抗 R_n は□で示すように測定した背面ゲート電圧全領域で単調に減少していくのに対して、臨界電流 I_c は●で示すように背面ゲート電圧に対して非単調にふるまうことが分かった。その特性は背面ゲート電圧の 3 領域に分類できる。領域 I において、 I_c は背面ゲート電圧と共に増大しているが、この時背面ゲートから注入される電流は 10 pA 以下である。領域 II に入ると背面ゲートから 10 pA 以上の電流注入が始まると I_c は背面ゲート電圧に依存しなくなり、10 nA 以上の電流注入がある領域 III において I_c は背面ゲート電圧の増大と共に減少する。領域 I における臨界電流 I_c の増大は、p-InP/n-InGaAs 界面に生じた出払い層厚みのゲート電圧による変動によって半定量的に説明できる。これに対して領域 II, III における臨界電流 I_c の振舞いは、 I_c の 1% 以下という微量の注入電流が I_c に影響を与えていることを示している。これは p-InP/n-InGaAs 界面での発光再結合と考えられ、ジョセフソン接合特性によって発光再結合過程を極めて高感度にモニタリングできることが分かる。現在さらに定量的な解析を進めている。

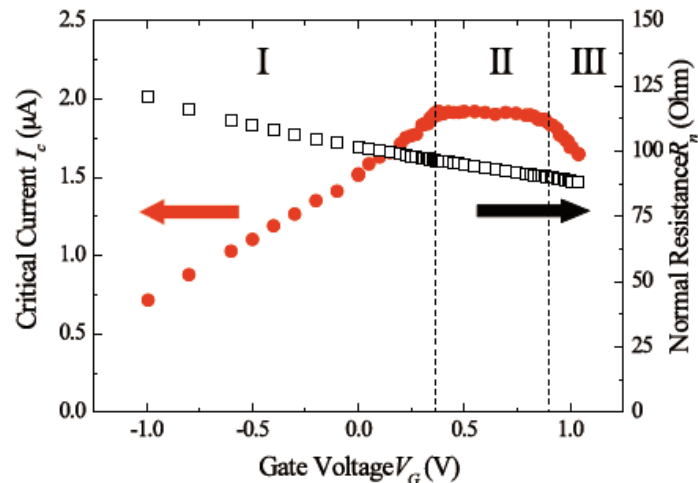


図 4-4-3-2 超伝導臨界電流の背面ゲート電圧 (p-n 接合注入電流) 依存性。

4-5. 超伝導 LED の発光特性とクーパー対の果たす役割 (北海道大学)

(4-5-1) 超伝導 LED における発光増強の観測

4-2-4 節で議論したように、超伝導 LED 表面に形成された Nb/n-InGaAs/Nb の超伝導-半導体-超伝導接合において、DC ジョセフソン効果・AC ジョセフソン効果を観測し、n-InGaAs 層を電子クーパー対の超伝導電流が流れていることを確認した。さらに、その際の超伝導臨界電流が LED p-n 接合バイアスによって変化することを示した。すなわち順バイアスによって、内部電界によって生じている空乏層を薄くすると電子クーパー対が流れる n-InGaAs チャネル幅 (厚さ方向) が広がり、超伝導臨界電流の増大が観測される。これは電子クーパー対が p-n 接合発光部分の極近傍の伝導帯を流れていることを示しており、対向電極からノーマル粒子である正孔を価電

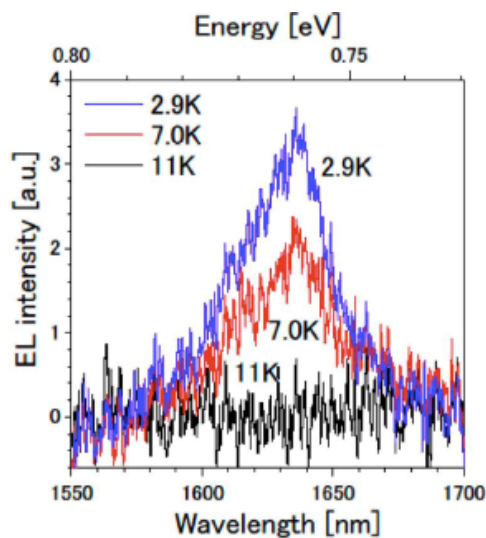


図 4-5-1-1. Nb 電極/n-InGaAs バリア/n-InGaAs 量子井戸/p-InP 基板/Au 電極を持つ LED の表面 Nb 電極に幅約 150nm の細長い開口を形成。この開口部分から、InGaAs 量子井戸の発光を観測した。6K~8.7K のわずかの温度変化で、発光スペクトルの強度が大きく変化する。

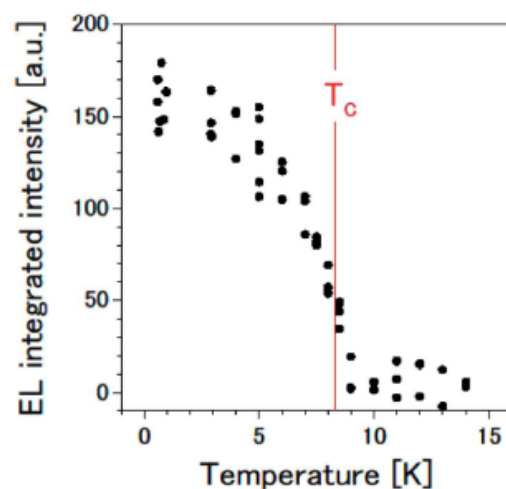


図 4-5-1-2. 図 4-5-1-1 で測定したエレクトロルミネッセンス積分強度を温度に対してプロットした図。Nb 電極が超伝導体に転移する臨界温度 8.3K より低い温度で、発光強度の急激な増加が観測された。

子帯を通して発光層に注入する効果について 4-4-3 節で議論した。従って、さらに順バイアスを大きくすることによって、電子クーパ対と正孔との発光再結合が観測できると期待される。そこで試作した InGaAs 系超伝導 LED の p-n 接合を順バイアスしてゆきその発光特性評価を行った。LED の表面にストライプ幅 $50\mu\text{m}$ の Nb 超伝導電極を形成し、その中央部分に幅 150nm 程度のスリット開口を設け、この部分から InGaAs 発光層のエレクトロルミネッセンスを観測した。その結果、図 4-5-1-1 の発光スペクトル、図 4-5-1-2 の発光積分強度に示すように、注入電流 $250\mu\text{A}$ 一定の条件下、超伝導臨界温度の 8.3K 以下の温度領域において、温度の低下に対する急激な発光増強を観測した。これは Nb 電極が臨界温度以下で超伝導状態になり、そこから近接効果で InGaAs 発光層に注入される電子クーパ対が、正孔との発光再結合過程においてその遷移確率を増大する効果を示したものと考えられ、全く新しい物理現象が初めて確認されたことになる。

(4-5-2) 超伝導 LED における超伝導効果の理論解析

半導体のバンド間発光再結合を 2 次の摂動理論で取り扱い、Bogoliubov 変換を用いて超伝導効果を取り入れて、解析を行った。その結果、電子と正孔が発光再結合する際に、電子対がスピンシングレット状態（クーパ対）を形成することによって、正孔対と再結合するレートが大きく増大することが導出された。図 4-5-2-1 に示すように、通常、電子（青丸）と正孔（白丸）が再結合して光子（黄丸）を発生するプロセスは、電子—正孔対毎にそれぞれ独立である。それに対して Bogoliubov 変換を用いて超伝導効果を取り入れると、図 4-5-2-2 のようにスピンが互いに反転した電子対を形成し、これと通常の正孔対との再結合過程が大幅に増強されることがわかった (Y. Asano, et al: “Luminescence of a Cooper Pair” Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 187001.)。この、電子がクーパ対を形成して正孔対と再結合する過程は、超伝導効果を取り入れた場合にだけ起こる特有な現象である。電子がクーパ対を形成することによって発光過程が増強される物理的な要因は、フェルミ粒子の電子がクーパ対を形成することによってボーズ粒子に変化し、その状態へ凝縮することである。言い方を変えれば、ノーマル粒子の正孔対と発光再結合する電子対は凝縮によって大幅に増大し、これが発光遷移確率を増大すると解釈できる。なお電子クーパ対はボーズ粒子として空間的にコヒーレントに広がっており、光学遷移におけるエネルギー保存と運動量保存を満たすそのコヒーレント体積中に存在するすべての正孔対が光学遷移の対象となり、正孔対は必ずしも空間の同じ場所に分布する必要はない。またこの発光再結合で光子対を発生する過程はコヒーレントであり、発生する光子対は互いに識別できない、量子もつれ状態の光子 2 個を同時に生成する発光過程となっている。

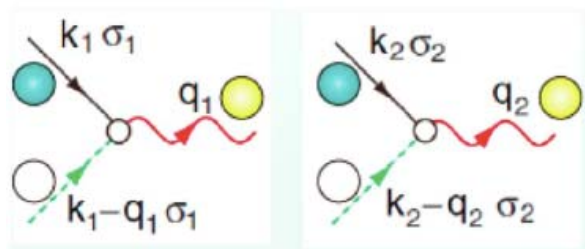


図 4-5-2-1 通常の電子—正孔の再結合による光子生成過程。

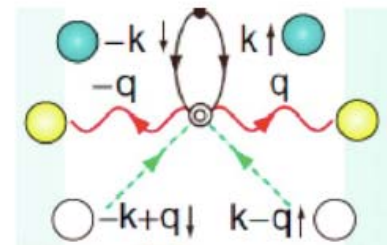


図 4-5-2-2 電子がスピンシングレット対を作り、二つの正孔と再結合して光子対を生成する過程。

(4-5-3) 超伝導 LED における発光再結合寿命短縮の観測

超伝導臨界温度以下で発光増強を観測した LED について、その発光増強メカニズムをより明確にするために、発光寿命の測定を行った。当初パルス電流駆動による寿

命測定を試みたが、発光強度が不足して測定が困難であった。そこで、LED 構造を外からパルスレーザ励起して、発光の過渡応答から発光寿命の測定を行った。図 4-5-3-1 の■は超伝導電極を持たない SiN 絶縁膜で表面が覆われた InGaAs について測定した発光寿命である。一方、超伝導電極部分で発光寿命を見積もると、●で示すように Nb の超伝導臨界温度 8.3K 以下で発光寿命の急激な短縮（発光再結合確率の増大）が起きていることが判った。これに対して、4-5-2 節で述べた理論で特性を検討したのが同図の実線であり、測定結果をよく説明していることがわかる。この発光再結合寿命の測定結果を用いると（非発光再結合寿命も系統的な測定で求まっている）、LED の量子効率を求めることが出来る。これを図 4-5-1-2 に示された LED の積分発光強度と比べたのが図 4-5-3-2 であり、●で示された超伝導臨界温度以下での発光増強の観測結果が、実線で示した理論によって非常によく説明されることが判る。

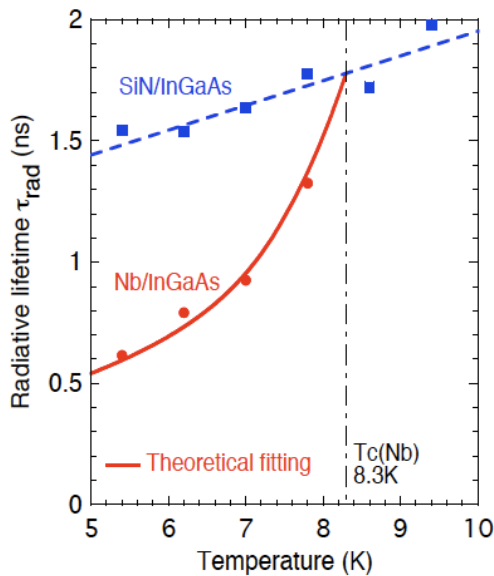


図 4-5-3-1 発光再結合寿命の測定結果。
■は表面が SiN 絶縁膜で覆われた部分で測定した結果であり、●は Nb 超伝導電極部分で測定した発光寿命。実線は電子クーバー対と正孔対の再結合を考慮した発光寿命の理論値。

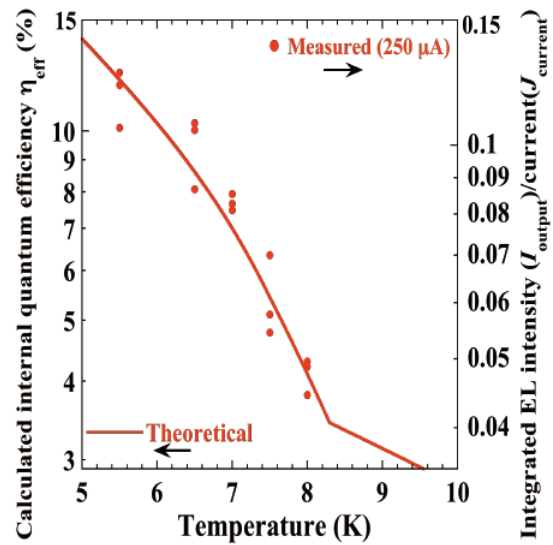


図 4-5-3-2 注入電流 250μA 一定の条件下で観測された LED の積分発光強度の温度依存性（●）と発光再結合寿命の検討結果に基づく理論の比較（実線）。

以上の検討結果から、この LED における内部量子効率は～10%前後と比較的低いことが判った。一方、その後に作製した LED では同じ注入電流で比較した際の発光強度が強く、内部量子効率がこの LED より高いと思われるサンプルも確認できた。後者の場合には、注入電流を変化させることにより LED 動作での過渡応答を測定し、これから発光寿命を求めることが可能であった。その寿命の測定結果を図 4-5-3-3 に示す。この LED における Nb 超伝導臨界温度は 7.3K（Nb は蒸着条件によって微妙に変化し、このサンプルでは図 4-5-3-4 の●で示すように臨界温度が少し低めの 7.3K になっている）と確認され、臨界温度以下で発光再結合寿命が急激に減少した。このような再結合寿命の温度による急激な変化にもかかわらず、図 4-5-3-4 の■で示すように LED 発光積分強度は温度によってほとんど変化しない。この LED の再結合寿命と発光積分強度の温度依存性の関係は、非発光再結合が関与しない、すなわち、発光再結合過程がこの LED では支配的となり内部量子効率が～100%と考えた場合のみ合理的に説明できる。従って図 4-5-3-3 に示した特性は発光再結合寿命そのものであり、超伝導臨界温度以下で急速に発光再結合寿命が短縮していることを直接表現している。実線は 4-5-2 節の理論曲線であり、測定結果をよく説明していることが判る（0.7K

における測定結果のみ測定誤差が大きくなっているが、これはこの測定に使用したクライオスタットの冷却方法が 3K 以下で変化し、 He^3 凝縮状態からの気化熱による冷却方式となっているため、冷却能力の減少と LED 動作による素子の発熱のため、測定できる時間が制限されるためである。）

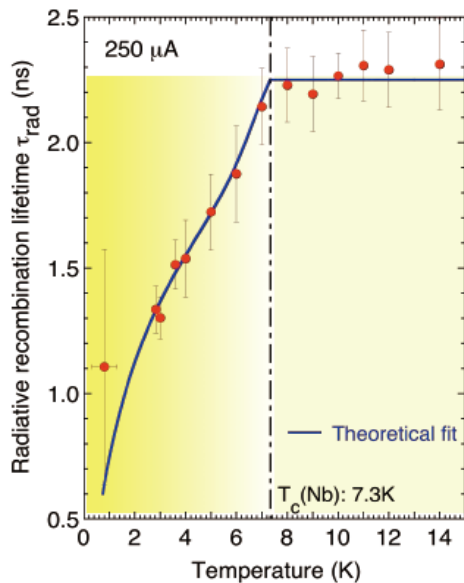


図 4-5-3-3 超伝導 LED の発光再結合寿命の温度依存性測定結果と理論（実線）との比較。

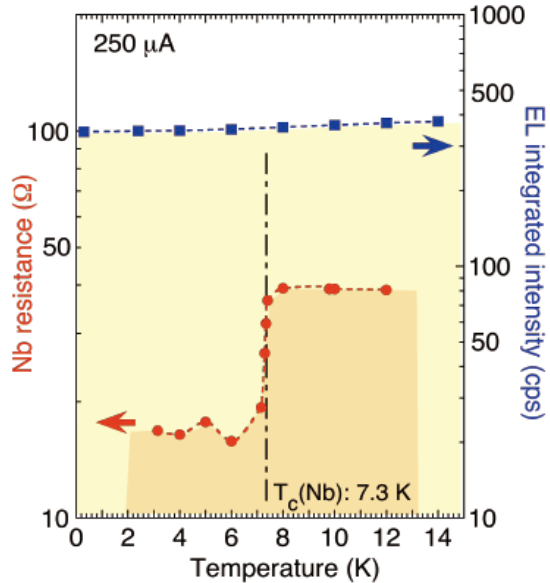


図 4-5-3-4 LED 発光積分強度の温度依存性。下部は Nb 電極の抵抗値とその温度依存性。この特性から、この LED における Nb の超伝導臨界温度は 7.3 K と確認される。

以上のように、現在検討を続けている超伝導 LED の発光特性は 4-5-2 節で述べた電子クーパ対と正孔対の発光再結合の理論によってよく説明できることが判った。この理論によれば、この発光再結合過程により同じエネルギーをもつ二つの光子がコヒーレントに同時生成することになる。さらに、電子クーパ対のスピン・シンプレット状態を反映して、発生する光子は互いに補完的な偏光特性を持ち、いわゆる量子もつれ光子対を発生していることになる。

4-6. 量子もつれ光子対生成の検討（北海道大学、浜松ホトニクス）

(4-6-1) 発生した光子を効率よく外部に取り出す試み：金属埋め込み構造（北大）

超伝導 LED 内部で発生した量子もつれ光子対も、外部の光子検出器に効率よく受光されないと、光子対が生成していることを確認できないことになる。一方、半導体は 3.5 程度の高い屈折率を持つために半導体/空気界面での全反射が起こり、空気側に光子を取り出せる確率はわずか～1%にとどまる。そこでこの点を改善するために、半導体量子ドットを金属に埋め込む構造を考案した。図 4-6-1-1 にその模式図と FDTD シミュレーション結果を示す。この構造を作製する方法としては、半導体量子ドットを成長した半導体薄膜（この場合には InAs 量子ドットを GaAs 薄膜で埋め込んだ）の表面に、電子ビーム露光で直径 100nm～1000nm の円形レジストマスクを作製し、ICP-RIE 装置を使って深さ～250nm のピラー構造にエッチングする。この表面に金属（今の場合には Nb）を蒸着してピラー構造を金属で埋め込む。この後基板部分と金属膜とを分離することによって、量子ドットを金属中に埋め込んだ構造を実現した。この金属埋め込み構造について FDTD シミュレーションしたところ、2次元のモデリン

グでは 75% の光子取り出し効率が期待できることが示された。

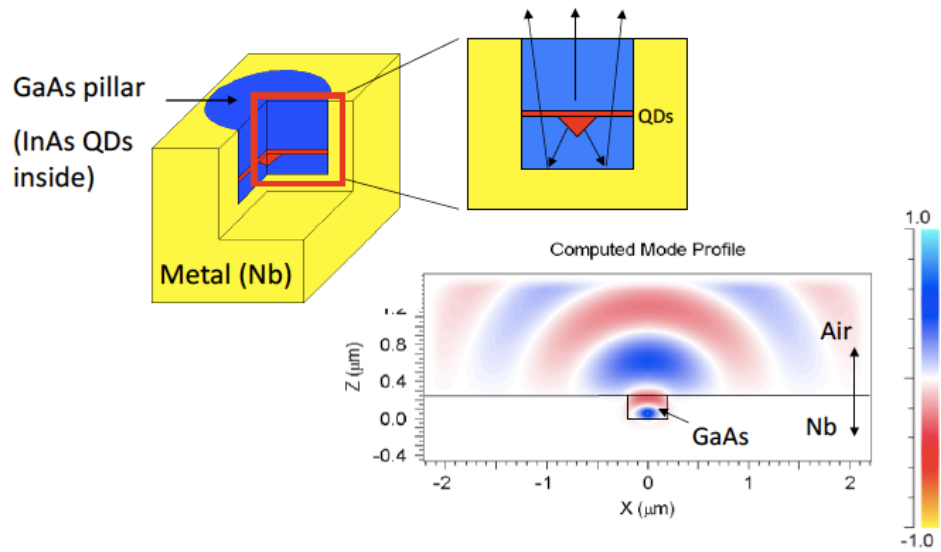


図 4-6-1-1 ニオブ金属に埋め込んだ、InAs 量子ドットを内包した GaAs ピラーの模式図と FDTD シミュレーションの例。

図 4-6-1-2 に Nb に埋め込む前のスペクトルと埋め込んだ後のスペクトルの比較を示す。離散的な発光ピークはそれぞれ単一量子ドットの発光ピークである。金属に埋め込むことにより発光強度が大幅に増大していることがわかる。同様の測定を多数のサンプルについて行った結果を、ピラーの直径依存性としてまとめた。これから明らかなように、金属埋め込みによって 30 倍以上の PL 発光増強を確認した。これには、励起レーザー光の埋め込みピラー内部での多重反射による励起効率の向上と、発生した光子の取り出し効率の向上の両方の要因が寄与している。

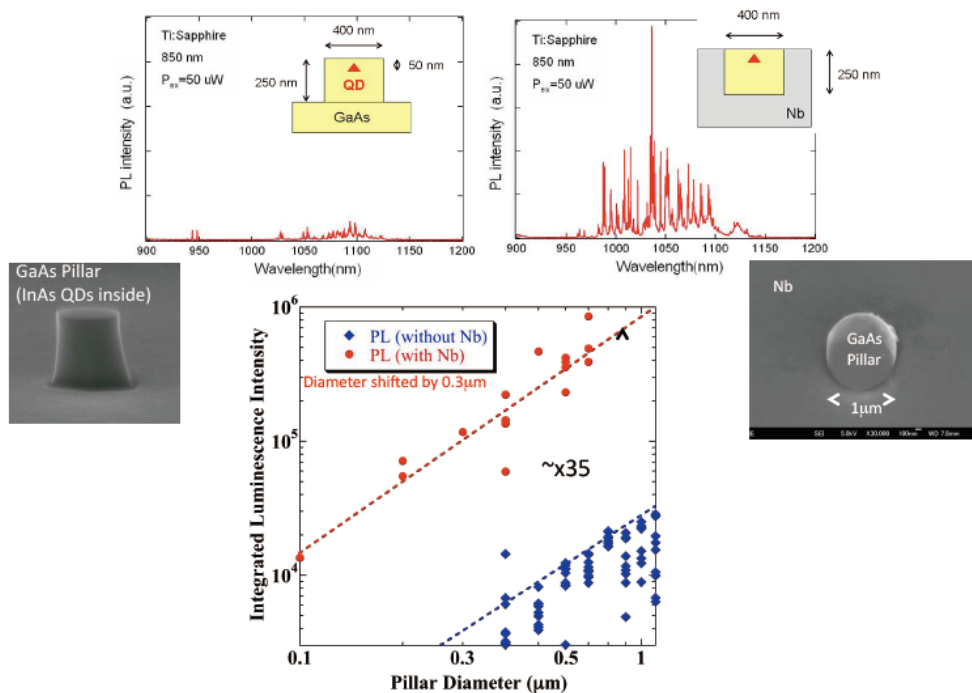


図 4-6-1-2 Nb に埋め込む前後の InAs QD の PL スペクトルの比較

(4-6-2) Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 基板貼り付け構造とその作製（浜ホト、北大）

4-6-1 節で述べた金属埋め込み構造は、光子取り出し効率は向上できるが、LED 動作させることは出来ない。そこで、金属埋め込み構造と LED 構造を両立させる構造として、Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 基板貼り付け構造を考案した。すなわち、埋め込み金属を半導体 p-n 接合で分離してバイアスが加えられる構造にすると同時に、半導体層厚を光子波長の半分以下にして、光の横方向への漏れを抑える構造である。その基本特性について FDTD シミュレーションした結果を図 4-6-2-1 に示す。上下の Nb 薄膜で挟まれた InGaAs 層の中央に電流源で置き換えた量子ドット発光部分を仮定し、上側の Nb 薄膜の円形開口から光子を外部に取り出す。この場合には、発光波長 $1.55\mu\text{m}$ 、InGaAs 薄膜の厚さを 150nm にすることによって、横方向への光の漏れが抑えられ、上の Nb 薄膜に形成した開口から効率よく光子が外部に取り出されることが、計算した電磁界分布から予想される。この例での光子の外部取り出し効率は約 25%程度である。

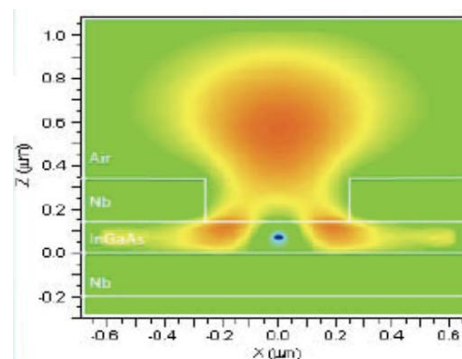


図 4-6-2-1 上下の Nb 薄膜で挟まれた InGaAs 層の中央に置かれた、量子ドットに対応する電流源から発生した電界分布の計算例。発光波長 $1.55\mu\text{m}$ 、InGaAs 厚さ 150nm 、Nb 開口直径 500nm 。

このシミュレーション結果に基づき、Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 基板貼り付け構造作製の検討を進めた。作製方法は、はじめに InGaAs から成る p-n 接合の p-InGaAs 表面に Nb 超伝導電極を形成し、Nb 電極表面と支持基板を貼り合わせる。その後に、InP 基板を選択的に取り除くことで n-InGaAs 層表面を露出させる。この n-InGaAs 表面に Nb 電極を形成することにより、InGaAs p-n 構造を直接 Nb で挟み込んだ LED 構造が実現できる。実際に作製したデバイス構造の模式図を図 4-6-2-2 に示す。このプロトタイプにおける InGaAs の p、n 各層厚は 500nm であり、室温で電気特性をプローブ測定したところ、図 4-6-2-3 に示すように

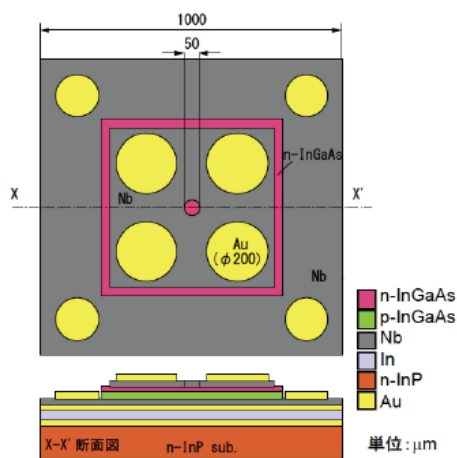


図 4-6-2-2 試作した Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 基板貼り付け構造の模式図。

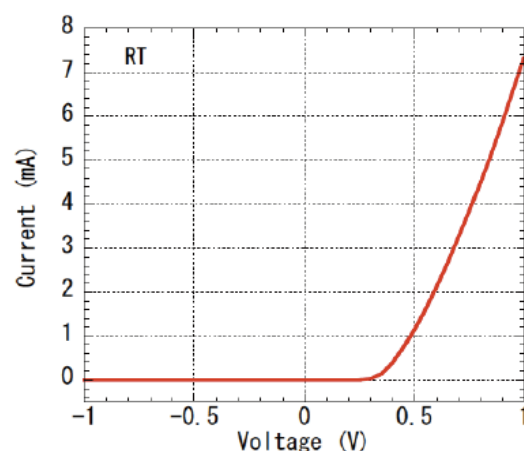


図 4-6-2-3 試作した LED の電流-電圧特性
良好なダイオード特性を示した。これから、製作プロセスは通常の LED より複雑であるが、

p-n 接合が有効に機能していることが確認できた。

次に、p-n 接合の InGaAs 全膜厚を 200nm 程度に薄くし、Nb 電極で直接挟み込む構造の作製に取り組んだ。まず Nb 電極の超伝導デバイスを作製する前に、より蒸着が容易な Au 電極で InGaAs p-n 接合薄膜を挟みこむデバイスを作製・評価し、関連プロセス技術の確立を推し進めた。図 4-6-2-4 は実際に作製したデバイスの表面写真(サイズ:1x1mm)と断面構造の模式図を示している。図 4-6-2-2 の場合と異なる点は、InGaAs p-n 接合薄膜表面に金属を蒸着する前に、InGaAs を選択エッチングによりパターンニングして LED 動作させる部分以外の周辺領域の InGaAs p-n 接合層を除去する。その後に絶縁膜(Si_3N_4)の成膜と電極形成部分に開口をパターンニングした。この表面に Ti/Pt/Au 電極を蒸着し、In を介して金薄膜が蒸着してある支持基板に貼り付けを行った。貼り付け後のプロセスは図 4-6-2-2 の場合とほぼ同様であり、InP 基板を完全に除去した後、n-InGaAs 表面に電極を形成することで InGaAs p-n 接合薄膜を Au 電極で挟みこんだ LED 構造が作製できる。このプロセスの特徴は、n-InGaAs 表面に電極を形成する際に、その表面は n-InGaAs、 Si_3N_4 、電極金属面の混成から成るが、しかし表面が平坦であることから電極のパターニングプロセスにおけるトラブルが生じにくい点である。図 4-6-2-5 は 10K での電流注入による発光特性を示しており、100 μA 以下の微小電流注入で 1600nm 帯域に比較的強い発光ピークを確認することができた。

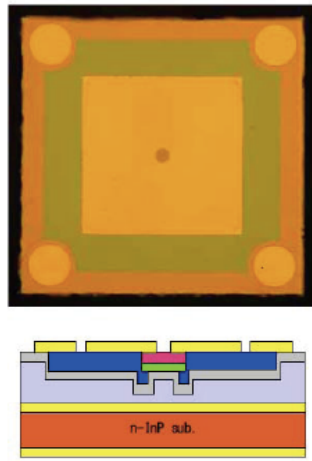


図 4-6-2-4 Au 電極基板貼り付けデバイスの表面写真と断面構造。

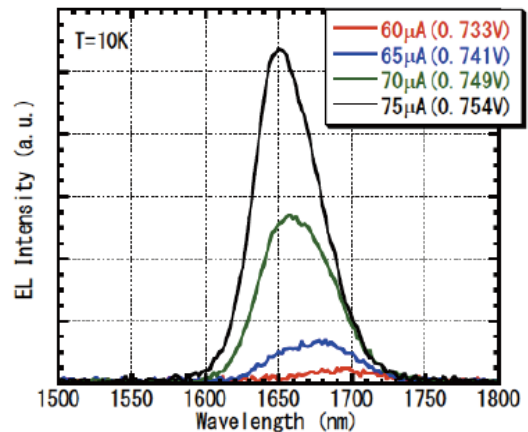


図 4-6-2-5 10K での発光スペクトルの電流注入量依存性。

これまでは支持基板への貼り付けに In を用いてきた。In は融点が低く基板貼り付け用の金属材料としては非常に使い易い。その反面、柔らかいため貼り付け後の試料の扱いに注意が必要となる。例えば超音波ワイヤーボンディングが使用できない等の問題点がある。そこで In の代わりに Au を用いた基板貼り付け技術を確認し、より強固なデバイスの作製を進めた。その結果、圧力 1MPa、温度 200 $^{\circ}\text{C}$ 、時間 30 分の貼り付け条件でデバイス作製に十分な貼り付け強度が得られることを確認した。この貼り付け条件と、これまで In を用いた基板貼り付け LED で蓄積したプロセス技術を融合して、Au 電極を Nb 電極に置き換えた Nb/InGaAs p-n 薄膜($\sim 200\text{nm}$)/Nb 構造 LED の作製を進めた。図 4-6-2-6 は支持基板への貼り付けに Au を用いて作製を行った、Nb/InGaAs p-n 薄膜/Nb 構造 LED の断面 SEM 写真である。光取り出し用の Nb スリット領域を拡大して観測している。この観測例から良好な貼り付け積層構造が作製できているのが分かる。これから、Nb/InGaAs p-n 薄膜/Nb 構造の作製には、Au を用いた基板貼り付け方法が有効であることが確認できた。

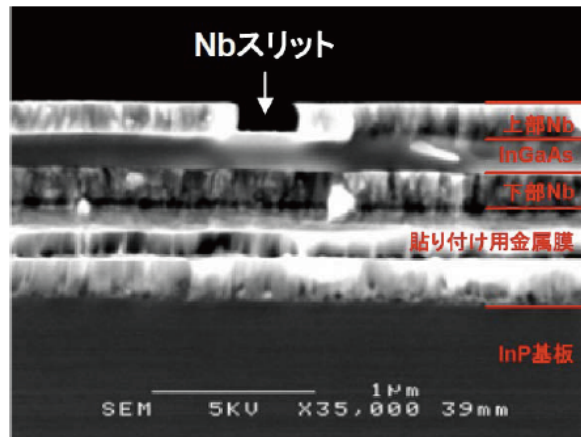


図 4-6-2-6Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 構造を Au 膜で InP 支持基板に貼り付けた LED 構造の断面 SEM 写真。

(4-6-3)Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 構造の発光特性と光子相関測定（北大）

前節で述べた Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 基板貼り付け構造が製作可能となり、図 4-6-3-1 に示すように Nb 表面電極に直径 100nm～5μm の開口を RIE で加工し、この開口からもつれあい光子対の観測を試みている。測定系は図 4-6-3-2 に示すように、開口数 0.42 の対物レンズを用いたマイクロ PL 測定系であり、測定した信号光を単一モードファイバーに結合させ、偏光制御を行った後に偏光ビームスプリッタを用いて光子相関測定を行う。

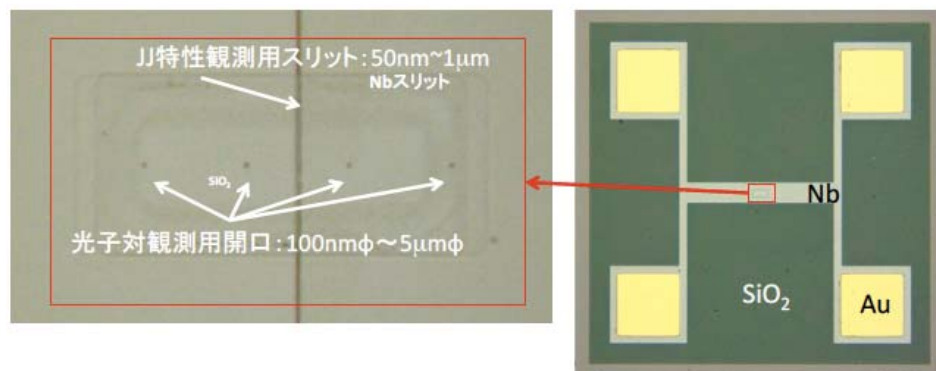


図 4-6-3-1Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 構造 LED の表面 Nb 電極と、光子対観測用開口部分の拡大 SEM 写真。

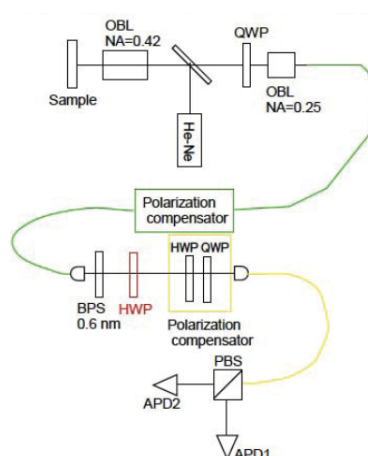


図 4-6-3-2 Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 構造 LED の表面 Nb 開口から放射される光子対の測定系。単一モードファイバー系で偏光制御しながら光子相関測定を行う。

現在のところ、図 4-6-3-1 の Au パッド部分にリード線を圧着する際のひずみによって、p-n 接合にリーク電流が生じてしまうという技術的な課題が残っており、この LED では、電流注入による発光は観測できていない。そこで外部から He-Ne レーザで Nb 開口部分の InGaAs を光励起し、発光スペクトルを観測した。図 4-6-3-3 に示すように 3K で測定された発光スペクトルは $1.55\mu\text{m}$ を中心に分布しており、光ファイバーとの整合性が良い特性を示している。この発光スペクトルを、中心波長 $1.55\mu\text{m}$ 、帯域幅 0.6nm の狭帯域バンドパスフィルターを通して観測したシャープな発光線も同図に示す。この発光線について、図 4-6-3-2 に示す単一モード光ファイバー系からなる光子相関測定系で光子対の特性評価を進めつつある。

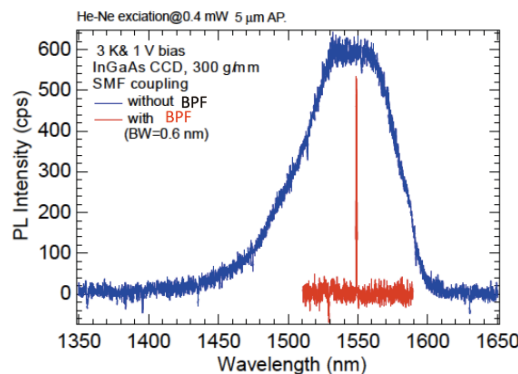


図 4-6-3-3 Nb/n-InGaAs/p-InGaAs/Nb 構造 LED の発光スペクトルと、バンド幅 0.6nm のバンドパスフィルターを用いて測定したシャープな発光線。

現在の測定上の課題は、この $1.55\mu\text{m}$ 長波長帯では、短波長系で使用可能な高性能シリコン単一光子 APD 検出器が使用できない点である。長波長系で使用される InGaAs APD は、光子の検出に関係のない暗検出確率が高く、これを防ぐために通常ゲートモードが使用されるが、ゲートバイアスパルスの印可そのものによって生じるチャージパルスノイズが大きい。また光子検出後のかなり遅れた時間に InGaAs 半導体の深い準位に捕獲されていた電子が放出されるアフターパルス雑音が大きく、SN 比の良い測定が難しい。さらに光子検出量子効率がシリコン検出器では 80% くらいに達するのに対し、InGaAs 検出器では 10% 程度にとどまる。特に光子相関測定における光子対検出カウント数は二つの検出器の量子効率の積に比例するので、シリコン検出器に比べ InGaAs 検出器では二桁近く光子対検出効率が落ちる。そのために技術的なバリアが高い。これらの課題のために、世界的にも長波長系の単一光子検出の研究は大幅に遅れている。これらの点を考慮し、現在 APD 動作の最適化、LED 構造の最適化、InGaAs APD 単一光子検出器に加えて超伝導単一光子検出器 (SSPD) による検出など、現在許される検出方法で、もつれあい光子対の検出に向けて検討を進めている。

このような超伝導 LED から量子もつれ光子対確認の実験と並行して、パラメトリック下方変換 (PDC) によって生成する光子対の光子相関測定の検討を進めている。現在量子情報分野では、PDC が量子もつれ光子対発生 of 標準的な方法となっている。これは、光子対の発生がポアソン分布 (ランダムな時間間隔で発生する) という欠陥があるものの、他に使用できる光源が無いという現在の事情と、これまで広く使われてきているという歴史的な背景がある。従ってこの分野で標準手法となっている PDC と超伝導 LED を比較検討することにより同分野の研究者に受け入れられやすいとの判断がある。さらに近い将来、複数の量子もつれ光子対光源による量子スワッピングなどのより高度な量子情報処理に向けた基礎実験への展開を考える際、超伝導 LED から発生する光子対と PDC で発生する光子対を組み合わせることによって、量子スワッピングに必要な不可欠なベル測定を通して超伝導 LED のより高度な性能評価が可能になる

と考えられる。特に現在世界的に量子ドットからの量子もつれ光子対生成の研究が活発化しているが、そのほとんどが励起子分子→励起子遷移による光子発生が先行し、後に励起子→基底状態遷移による光子が追従するカスケード型発光であり、光子対が同時生成する PDC に比べると光子対間に時間的なジッタが生じることが不可避であり、その点では特性が劣る。我々が検討を進めている超伝導 LED は基本的に PDC と同様に光子対を同時生成する機構であり、半導体光源としては特異な性質を持ちつつ、さらにパルス電流駆動と光子取り出し効率の向上により、PDC にはないオンデマンドな量子もつれ光子対発生 LED の実現が期待される。

PDC による光子対生成の検討を進めている光学系は図 4-6-3-4 のような標準的な PDC による偏光光子相関測定系である。Type-II の BBO 非線形結晶を波長 400nm の半導体レーザ光源で励起し、発生した光子対の偏光相関を半波長板と偏光子の組み合わせ

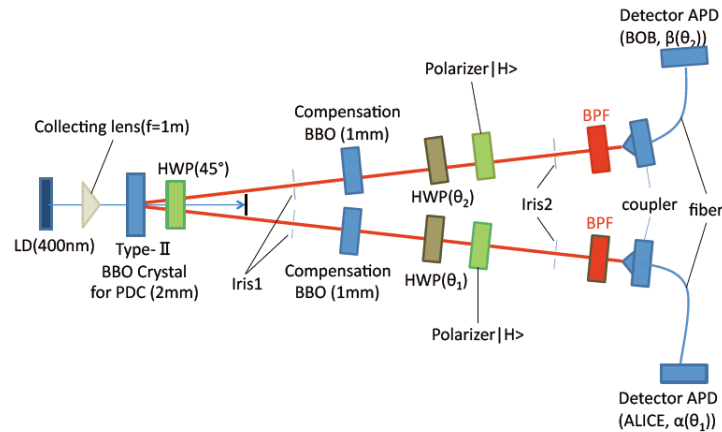


図 4-6-3-4 パラメトリック下方変換で生成する光子対の偏光相関を測定する光子相関測定系。

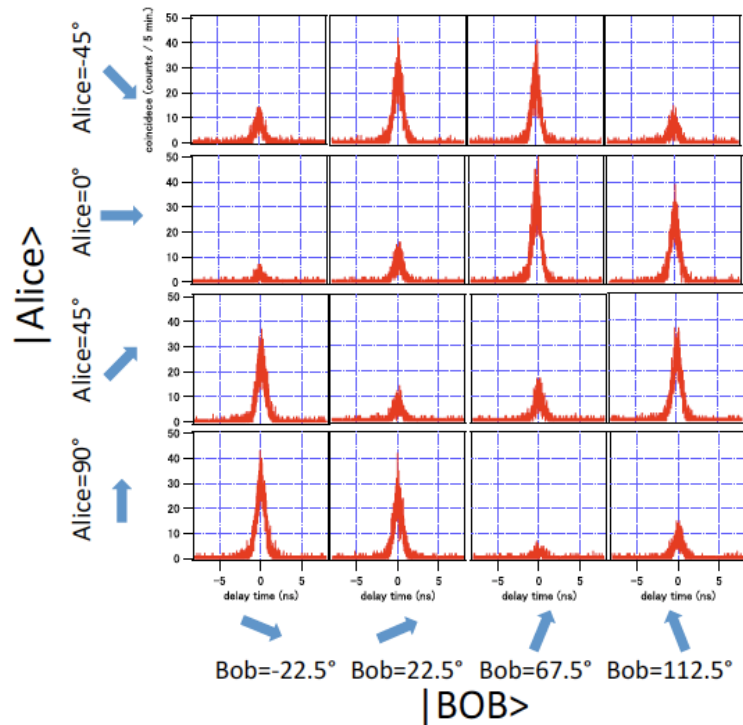


図 4-6-3-5 Alice の 4 種類の偏光、Bob の 4 種類の偏光の組み合わせ 16 通りについての光子偏光相関測定結果。

せを変えながら二つの APD 単一光子検出器 (Alice と Bob) で測定する。図 4-6-3-5

に、Alice と Bob の偏光を (4x4=)16 通り変えて測定した光子相関測定結果を示す (通常「ベル測定」と呼ばれる)。各図の遅延時間零でのカウント数が大きいほど、二つの光子が同時に計数される確率が高いことを示している。この結果を用いると、いわゆる「ベルの不等式」の成否を占う S パラメータが計算される。古典力学によれば S パラメータは 2 を超えることはないが、量子もつれ状態になると古典力学の破綻を示す 2 を超える値を示す。今回の測定結果から S パラメータを計算すると 2 を超える 2.31 となり、量子もつれ光子対の生成が示された。今後、同様の検討を超伝導 LED について行っていく。

4-7. 光子系と超伝導量子ビットの結合 (東京理科大学)

量子ビット間の変換、結合はそれ自体で大きな研究課題である。特に光子量子ビットは周りの系との結合が弱く長いコヒーレント時間を持つことから長距離を転送する量子ビットとして有利であり、超伝導量子ビットは量子情報処理の研究が進んだ系であり、両者が結合できれば将来の量子情報ネットワーク形成へ向けた大きな一歩となる。光子系の状態を超伝導量子ビットに転写する方法について、二つの系を提案した。その一つは技術的に難しい光子と量子ビットとの直接的結合を回避して中間に量子ドットを入れる系である(図 4-7-1)。まずは円偏光した古典的光を考え、光照射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)である超伝導量子ビットで検知する。第二の提案は外部共振器の中に量子ドット系を作製し、その中のスピンを誘起する案である(図 4-7-2)。この系では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。このような結合構造においては、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り、その詳細についてさらに検討を続けているところである。

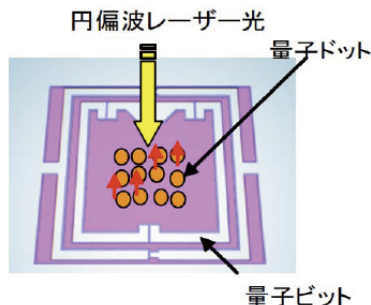


図 4-7-1. 量子ドットのスピンを介して光と超伝導量子ビットを結合する提案

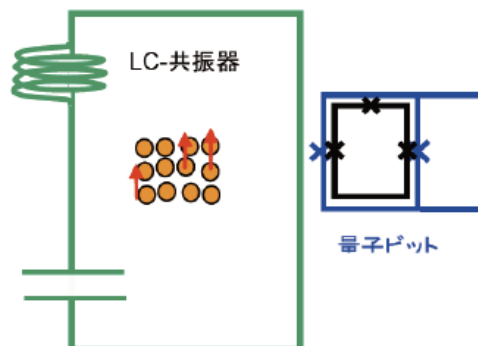


図 4-7-2. 超伝導量子ビットと結合する LC 外部共振器に量子ドットを作製する提案。

(2)研究成果の今後期待される効果

研究成果の直接的な効果としては、量子情報通信・量子情報処理における「量子もつれ光子対光源」への展開が期待される。現在この分野ではパラメトリック下方変換が標準的な光源となっている。しかし非線形結晶に入射させるレーザ光のコヒーレンスのために、光子対の発生はランダムなポアソン分布となってしまう、情報処理・通信用光源としては使いづらい難点があり、実用的な応用は難しいと判断されている。これを解消するために、半導体光源として量子ドットを使ったもつれあい光子対発生が活発に研究されている。この場合、量子ドットの伝導帯に2個の電子、価電子帯に2個の正孔を分布させて光子対を発生させるが、電子と正孔のクーロン相互作用により、光子の発生は一度に一つずつのカスケード発光となり、光子間の発生タイミングに時間ジッタが生じる。今のところ半導体光源から2個の光子を同時に自然放出させる方法は、いわゆるバンド間の2光子吸収として知られている過程の逆、2光子発光過程のみである。しかしこの過程は通常のバンド間1光子発光過程に比べて再結合確率が 10^{-5} と非常に低く、効率の良い光源とはなり得ない。このような状況下では、本プロジェクトでその物理過程を明確にした電子クーパー対による2光子生成過程が、2光子同時生成するダイオード光源を実現する唯一の可能性となる。基本的な動作原理がこれまでの光デバイスとは異なるので、もつれあい光子対の実用的光源を実現するにはさらに、光子取り出し量子効率の向上、発生した光子対の分離について、もう少し検討を続ける必要であるが、実際に使える状況になれば、その与えるインパクトは大きい。現在までに知られている電子間に引力相互作用を与える物理機構としてはBCS理論による超伝導効果に限られるため、LEDの動作に冷却が必要な点は変えようがないが、本プロジェクトで検討した MgB_2 や、今後の Fe 系超伝導体により高い臨界温度が実現され、かつ半導体との良好な界面が実現できれば、より高い温度での LED 動作が期待される。

以上のような具体的な応用に加え、半導体の発光過程と超伝導におけるクーパー対との組み合わせは、これまでほとんどその可能性が検討されてこなかった新しい研究領域である。これを半導体の観点からみると、これまでの励起子物性とは異なった電子系相関の基に起こる発光過程であり、多くの新規光物性の展開が期待される。本プロジェクトで展開した理論はそのさきがけとなるものである。一方超伝導の観点からみると、これまでは超伝導単一光子検出器の例にみるように、大きなエネルギーを持った光子との相互作用は単に電子クーパー対の破壊といった面だけに限られていた。しかし本プロジェクトの成果は、弱い力で結合したクーパー対電子でも、半導体バンド間の光学遷移に大きな効果を与えうることを実証した。これをさらに展開発展させれば、本プロジェクトの当初に構想していた、クーパー対の巨視的量子効果であるコヒーレンスを光子のコヒーレンスに転送できる日も近いかもしれない。その意味では、本プロジェクトは電子クーパー対のみを扱ったが、正孔もクーパー対として両者を発光させれば、このような物質波から光波へのコヒーレント転送による新たな可能性が開けてくると予想される。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表(国内(和文)誌0件、国際(欧文)誌46件)

- 1] S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Photon Antibunching Observed from an InAlAs Single Quantum Dot” Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett. Vol. 44, No. 25 (2005) pp. L793-L796.
- 2] Y. Nabetani, T. Matsumoto, G. Sasikala, X. Q. Zhang, and I. Suemune: “Theoretical Studies of Strain States in InAs Quantum Dots and Dependence on Their Capping Layers” J. Appl. Phys. Vol. 98, No. 6, 063502-1~7 (2005).
- 3] 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.
- 4] 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.
- 5] 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.
- 6] 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 (2005) pp. 3838-3842.
 - 7] T. Akazaki, H. Nakano, J. Nitta, and H. Takayanagi: multiple Andreev reflection in a ballistic SNS junction AIP Conference Proceedings, vol. 780, 476 (2005).
 - 8] 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.
 - 9] 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.
 - 10] W. Zhang, K. Uesugi, and I. Suemune: "Application of InGaAs/GaAsN Strain-compensated Superlattice to InAs Quantum Dots" J. Appl. Phys. Vol. 99, No. 10 (2006) pp. 103103 1-7.
 - 11] 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. (**Invited Review Paper**)
 - 12] 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. Vol. 45, No. 21 (2006) pp. L529-L532.
 - 13] 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.
 - 14] 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.
 - 15] 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.
 - 16] 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.
 - 17] M. Jo, M. Endo, H. Kumano, and I. Suemune: "Luminescence Study on Evolution from Te Isoelectronic Centers to Type-II ZnTe Quantum Dots Grown by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy" J. Cryst. Growth Vol. 301-302 (2007) pp. 277-280.
 - 18] R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: "Detailed Measurements of Nuclear Spin Polarizations in a Single InAlAs Quantum Dot Through Overhauser Shift of Photoluminescence" J. Supercond. Nov. Magn. Vol. 20 (2007) pp. 447-451.
 - 19] Y.L. Zhong, H. Nakano, T. Akazaki, K. Kanzaki, Y. Kobayashi and H. Takayanagi, "Superconducting proximity correction to conductance and magnetoconductance fluctuations in random network carbon nanotubes, Physica E **40**, pp. 169-174 (2007).
 - 20] Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, H. Kumano, and I. Suemune: "Superconductor-based Light Emitting Diode: Demonstration of Role of Cooper Pairs in Radiative Recombination Processes" Appl. Phys. Express **1** (2008) 011701-1~3.
 - 21] 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.
- 22] 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.
 - 23] 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).
 - 24] 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.
 - 25] 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 (2008) pp. 2816-2818.
 - 26] 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. Phys. Conference Series Vol. **109** (2008) pp. 012033-1~4.
 - 27] Y.L. Zhong, H. Nakano, T. Akazaki, K. Kanazaki, Y. Kobayashi and H. Takayanagi, “Superconducting proximity effect and reentrant behaviors in random network carbon nanotubes” Physica C, **468** (2008) 709-713.
 - 28] 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.
 - 29] 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.
 - 30] 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).
 - 31] 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. Vol. **104** (2008) 033531-1~4.
 - 32] 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. B **246** (2009) pp. 775-778.
 - 33] 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. C **6** (2009) pp. 868-871.
 - 34] 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. C **6** (2009) pp. 849-852.
 - 35] 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 **20** (2009) pp. S425-S429.
 - 36] Y. Asano, I. Suemune, H. Takayanagi, and E. Hanamura: “Luminescence of a Cooper Pair” Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 187001.
 - 37] H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, J. Motohisa, Y. Kobayashi, M. van Kouwen, K. Tomioka, T. Fukui, N. Akopian, and V. Zwiller: “Exciton Coherence in Clean Single InP/InAsP/InP Nanowire Quantum Dots Emitting in Infra-red Measured by Fourier Spectroscopy” J. Phys. **193** (2009) 01232.
 - 38] T. Akazaki, H. Hashiba, M. Yamaguchi, K. Tsumura, S. Nomura, and H. Takayanagi, “Interplay between negative photoconductivity and enhanced Andreev reflection in InGaAs-based S-Sm-S junctions when exposed to infrared light”, J. of Physics: Conf. Series **150**, 052004 (2009).
 - 39] K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, “Optical imaging of the transport properties of S-Sm-S junctions”, J. of Physics: Conf. Series **150**, 052273 (2009).

- 40] R. Inoue, H. Takayanagi, T. Akazaki, K. Tanaka, and I. Suemune: “Transport Characteristics of a Superconductor-based LED” *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 034025.
- 41] H. Kumano, H. Nakajima, S. Ekuni, Y. Idutsu, H. Sasakura, and I. Suemune: “Quantum-dot-based Photon Emission and Media Conversion for Quantum Information Applications” *Advances in Mathematical Physics* Vol. 2010, No. 391607 (2010) 1-13 (**Review Paper**).
- 42] I. Suemune, Y. Hayashi, S. Kuramitsu, K. Tanaka, T. Akazaki, H. Sasakura, R. Inoue, H. Takayanagi, Y. Asano, E. Hanamura, S. Odashima, and H. Kumano: “A Cooper-pair Light Emitting Diode: Temperature Dependence of both Quantum Efficiency and Radiative Recombination Lifetime” *Appl. Phys. Exp.* Vol. **3** (2010) 054001.
- 43] K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, “Position dependent optical effect on the transport properties of S-Sm-S junctions”, *Physics Procedia* **3**, 1171 (2010).
- 44] S. N. Dorenbos, H. Sasakura, M. P. van Kouwen, N. Akopian, S. Adachi, N. Namekata, M. Jo, J. Motohisa, Y. Kobayashi, K. Tomioka, T. Fukui, S. Inoue, H. Kumano, C. M. Natarajan, R. H. Hadfield, T. Zijlstra, T. M. Klapwijk, V. Zwiller, and I. Suemune: “Position-controlled Nanowires for Infrared Single-photon Emission” *Appl. Phys. Lett.* Vol. **97**, No. 17 (2010) 171106.
- 45] S. Ekuni, H. Nakajima, H. Sasakura, I. Suemune, and H. Kumano: “First-order Photon Interference of a Single Photon from a Single Quantum Dot” *Physica E* Vol. **42** (2010) 2536-2539.
- 46] H. Takayanagi, R. Inoue, T. Akazaki, K. Tanaka, and I. Suemune: “Superconducting Transport in an LED with Nb Electrodes” *Physica C* **470** (2010) 814-817.
- 47] H. Nakajima, S. Ekuni, H. Kumano, Y. Idutsu, S. Miyamura, D. Kato, S. Ida, H. Sasakura, and I. Suemune: “Strongly Suppressed Multi-photon Generation from a Single Quantum Dot in Metal-embedded Structure” *Phys. Stat. Solidi C* **8**, (2011) 337-339.
- 48] J.-H. Huh, C. Hermannstaedter, H. Sato, S. Ito, Y. Idutsu, H. Sasakura, K. Tanaka, T. Akazaki, and I. Suemune: “Precise Slit-width Control of Niobium Apertures for Superconducting LED” *Nanotechnology* **22** (2011) 045302.
- 49] R. Inoue, K. Muranaga, H. Takayanagi, E. Hanamura, M. Jo, T. Akazaki, and I. Suemune: “Transport Properties of Andreev Polarons in Superconductor-Semiconductor-Superconductor Junction with Superlattice Structure” *Phys. Rev. Lett.* (in press)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1] 末宗幾夫:「超伝導による発光ダイオードの発光増強技術」『OHM』HEADLINE Review 2008年7月号 pp. 6-7.
- 2] 末宗幾夫:「超伝導フォトニクス工学」超伝導 Web21、2008年10月1日発行、読者の広場 Q & A.
- 3] 末宗幾夫:「自己組織化ハンドブック」エヌ・ティー・エス出版、国武豊喜監修、2009年11月13日(分担執筆) 937ページ.
- 4] 末宗幾夫:「量子ドットエレクトロニクスの最前線」エヌ・ティー・エス出版 2011年3月25日(分担執筆) 426ページ.
- 5] 末宗 幾夫・熊野 英和・笹倉 弘理:「量子情報通信のための単一光子・量子もつれ光子対光源」光学「特集:半導体光源の最前線」2011年9月号(予定)

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 5 件、国際会議 27 件)

- 1] H. Kumano (北大), S. Kimura, M. Endo and I. Suemune: “Single-photon and Correlated-photon-pair Generations Based on Semiconductor Quantum Dots for Quantum Information Devices” the 13th International Workshop on the Physics of

Semiconductor Devices, (New Delhi, India, Dec. 13-17, 2005)

- 2] I. Suemune (北大) : “Prospects of Superconducting Photonics” Ninth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (Tokyo, January 11-13, 2006) D-1, pp. 39-42.
- 3] I. Suemune (北大) , H. Kumano, and K. Uesugi: “Control of Photon Wavelength and Correlations Emitted from Single Quantum Dots” 4th NIMS Conference (March 8-10, 2006, Tsukuba).
- 4] 熊野英和 (北大), 末宗幾夫 : 「単一量子ドットから発生する単一光子対の光子相関特性の評価」 2005年(平成17年)秋季 第66回応用物理学会学術講演会シンポジウム「新世代光通信へのイノベーションー革新的な光デバイスを基点としてー」(平成17年9月7日ー10日, 徳島大学)
- 5] H. Takayanagi (東京理科大), T. Akazaki, S. Yanagi, and H. Munekata, “Transport Properties of Ferromagnetic Semiconductors with Superconducting Electrodes”, Workshop on Mesoscopic Superconductivity and Magnetism, August 28 - September 1, 2006, Chicago, USA.
- 6] H. Takayanagi (東京理科大), Y-L. Zhong, and T. Akazaki: "Noise and Conductance Fluctuations Due to Andreev Reflection" 19th International Symposium on Superconductivity (ISS19), October 29- November 1, 2006, Nagoya, Japan
- 7] I. Suemune (北大) , H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “ Controlled Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications” The International Photonics Technology Conference (IPTC2007) September 4-5, 2007, Gwangju, Korea (**Invited**).
- 8] I. Suemune (北大) , H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots: Their Control and Applications” 8th Chitose International Forum, Chitose on Nov. 29 and 30, 2007(**Invited**).
- 9] I. Suemune (北大) , H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Possibility of Semiconductor-based Single Photon Sources for Quantum Information Networks” International Conference on Microwaves and Optoelectronics (ICMO2007) December 17-20, 2007, Aurangabad, India (**Plenary Invited Talk**) PS1, p. 34.
- 10] I. Suemune (北大) , H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Toward Regulated Photon Generations from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications” 2008 SPIE Photonic West Conference, January 19-24, 2008, San Jose, USA (**Invited**) [6900-11] S3.
- 11] I. Suemune (北大) , Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and H. Kumano: “New Light Emitting Diode with Superconducting Electrodes” 2008 Japanese-German-Spanish Joint Workshop, Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, Hakone, Kanagawa, Japan, March 5-6, 2008 (**Invited**).
- 12] H. Takayanagi (東京理科大), Y. L. Zhong, T. Akazaki, H.Y. Nakano, K. Kanzaki and Y. Kobayashi, “Andreev reflection and proximity effect in network-like carbon nanotubes”, APCTP Workshop on Superconductivity and Mesoscopic Quantum Phenomena, 18 August, 2007, Pohang, Korea.
- 13] H. Takayanagi (東京理科大) , Y. L. Zhong and T. Akazaki, “Enhanced magnetoconductance fluctuations due to proximity effect in network-like carbon nanotubes”, Fifth International Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, Vortex V, 10 September 2007, Rhodes, Greece.
- 14] I. Suemune (北大) : “Interdisciplinary Research on Superconducting Photonics and Development of LEDs based on New Concept” Japan-Brazil Memorial Symposium on Science on Science and Technology, June 23-25 (2008) Sao Paulo, Brazil, p.28.
- 15] I. Suemune (北大) , Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, H. Sasakura, and H. Kumano: “Superconducting Photonics and Development of Light Emitting Diodes based on New Concept” The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Newport Beach, CA, 9-13 November 2008.

- 16] I. Suemune (北大): “New Directions with Alliance of Photonics and Superconductivity” The 12th SANKEN International Symposium 2008 “Frontiers of Science for Future Industries”, Osaka, January 22, 2009.
- 17] I. Suemune (北大), Y. Idutsu, M. Takada, D. Kato, S. Ida, J.-H. Huh, H. Sasakura, H. Kumano: “Semiconductor Quantum Dots in Metallic Nanostructures”, 22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2009), Sapporo, November 16-19, 2009, 18B-4-1, pp. 74-75.
- 18] H. Takayanagi(東京理科大): “Transport Characteristics of a Superconductor-Based LED”, New directions of superconducting nanostructures 2009 (NDSN2009), September 4-5, 2009, Nagoya, Japan.
- 19] H. Takayanagi(東京理科大): “Transport Characteristics of a Superconductor-Based LED”, 2009 East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2009), 12-15 October 2009, Nanjing University, China.
- 20] H. Takayanagi(東京理科大): “Transport Characteristics of a Superconductor-Based LED”, The 9th Sweden-Japan Workshop on Quantum Nanophysics and Nanoelectronics(QNANO), November 13-14, 2009; The University of Tokyo.
- 21] H. Takayanagi(東京理科大学): “Transport Characteristics of a Superconductor-Based LED”, Waseda Meeting"Quantum Technologies: Information and Communication", December 9-11, 2009, Waseda University, Tokyo.
- 22] H. Kumano (北大): “Conversion of Photon Polarization and Exciton Spins in Semiconductor Quantum Dots” International Workshop on Photons and Spins in Nanostructures, Sapporo, July 27-28, 2009.
- 23] I. Suemune (北大): “Superconducting Photonics in Semiconductor Nanostructures” International Workshop on Photons and Spins in Nanostructures, Sapporo, July 27-28, 2009.
- 24] 高柳英明(東京理科大学):「超伝導 LED の伝導特性」, 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス146委員会第86回研究会, 2009年10月26日(月)場所:学士会館本館.
- 25] 末宗幾夫(北大), 熊野英和、笹倉弘理、井上修一郎、行方直人:「単一量子ドットからの単一光子発生・電子スピンへの状態変換・単一光子検出とその量子情報応用」日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会(第64回)研究会資料(平成21年7月3-4日 登別) pp. 27-33.
- 26] 末宗幾夫(北大), 熊野英和、笹倉弘理:「半導体光子源の現状と超伝導フォトリクスの最近の展開」第4回量子 ICT 運営会議(平成21年10月1-2日 東京)。
- 27] I. Suemune (北大): “Superconducting Optoelectronics” 2010 SPIE Photonic West Conference, Opto, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XVIII, January 23-28, 2010, San Francisco, CA, USA.
- 28] H. Takayanagi(東京理科大学): “Transport Characteristics of a Superconductor-Based LED”, Workshop on the Physics of Micro and Nano Scale Systems, Ystad, Sweden (20-24, June, 2010).
- 29] H. Takayanagi (東京理科大学): “Transport properties of a superconductor-semiconductor junction with superlattice structure”, ESF-NES WORKSHOP 2010Nanoscale Superconductivity, Fluxonics and Plasmonics, 21-26 September 2010, Crete, Greece.
- 30] 林雄二郎(北大)、田中和典、赤崎達志、定昌史、熊野英和、末宗幾夫:「Superconductor-based Light Emitting Diode: Demonstration of Role of Cooper Pairs in Radiative Recombination Processes」2010年(平成22年)秋季第71回応用物理学学会学術講演会「優秀論文賞受賞記念講演」17a-T-1.
- 31] I. Suemune (北大), H. Sasakura, K. Tanaka, Y. Asano, R. Inoue, H. Takayanagi, T. Akazaki, J.-H. Huh, C. Hermannsdäbter, and H. Kumano: “Cooper-pair Light Emitting Diodes” International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, January 11-14, 2011, NTT Atsugi R&D Center/ Atsugi, Kanagawa Japan, We-13, p.65.

- 32] I. Suemune (北大) : “Control of Photon Emission Processes in Semiconductor Nanostructures” Villa Conference on Interactions Among Nanostructures, April 21-25, 2011 Las Vegas, Nevada, USA.

② 口頭発表

(国内会議 70 件、国際会議 65 件)

1. N. Matsumura(北大), S. Muto, S. Ganapathy, I. Suemune, K. Numata, and K. Yabuta: “Anisotropic Lattice Deformation of InAs Self-assembled Quantum Dots Strain Compensated with GaAsN Burying Layers” 47th TMS 2005 Electronic Materials Conference, June 22-24, 2005, University of California Santa Barbara, MM3.
2. T. Yokoi(北大), S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: “Overhauser Shift in a Self-assembled Quantum Dot” Spintech III, Awaji Island, August 1-5, 2005.
3. S. Kimura(北大), H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Highly Pure Single Photon Generation from Single Quantum Dot” 5th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, June 8-11 (2005) Glasgow, Scotland, S11-2.
4. W. Zhang (北大), K. Uesugi, N. Matsumura, and I. Suemune: “Strain-compensation of InAs Quantum Dots: Dot Size Dependence” International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005) July 11-15, 2005, Toshi Center Kaikan, Tokyo, Japan, JTuh2-1.
5. Hidekazu Kumano(北大), Satoshi Kimura, Michiaki Endo, Ikuo Suemune, Hirotaka Sasakura, Satoru Adachi, Shun-ichi Muto, Hai Zhi Song, Shin-ichi Hirose, Tatsuya Usuki: “Relations of Neutral and Charged Excitons in a Single Quantum Dot Studied with Dynamic and Photon Correlation Measurements” 9th Optics of Excitons in Confined Systems and 2nd International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, Southampton, UK, September 5-11, 2005, p. 34.
6. Wei Zhang(北大), Katsuhiko Uesugi, and Ikuo Suemune: “Influence of Strain Modulations in Capping Layers of InAs Quantum Dots with Compressive-InGaAs and Tensile-GaAsN Layer Structures” TMS 2006 Electronic Materials Conference, June 28-30, 2006, Pennsylvania State University, PA, USA.
7. M. Jo(北大), M. Endo, H. Kumano, and I. Suemune: “Discrimination of isoelectronic centers and type-II quantum dots with ZnTe embedded in ZnSe” TMS 2006 Electronic Materials Conference, June 28-30, 2006, Pennsylvania State University, PA, USA.
8. T. Akazaki (NTT物性基礎研), H. Nakano, J. Nitta, and H. Takayanagi: "Observation of giant thermal noise due to multiple Andreev reflection in a ballistic SNS junction with an InGaAs-based heterostructure" 18th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF2005), September 19-23, 2005, Salamanca, Spain.
9. 木村聡(北大)、熊野英和、遠藤礼暁、末宗幾夫、横井伴紀、笹倉弘理、足立智、武藤俊一、宋海智、廣瀬真一、臼杵達哉: 「単一量子ドット発光による光子相関測定での同時計数確率と光子 antibunching の励起光強度依存性」 [Excitation power dependence of coincidence count probabilities in correlation measurements and antibunching of photons emitted from single

quantum dots]第12回量子情報技術研究会QIT12:NTT厚木研究開発センター
2005.5.12-13.

10. 熊野英和(北大), 末宗幾夫: 「InAlAs単一量子ドットの形成と単一光子および光子対発生の検証」電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ主催「材料デバイスサマーミーティング」次世代ナノ技術に関する研究専門委員会主催講演会「量子ナノ構造の作製とデバイス化」2005年6月24日(金)機械振興会館, 東京。電子情報通信学会信学技報 pp. 9-13
11. 熊野英和(北大), 末宗幾夫: 「高効率量子鍵配送に向けた半導体単一光子光源の作製」電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会技術報告2005年8月25,26日, 札幌。
12. 末宗幾夫(北大), 熊野英和, 植杉克弘: 「単一量子ドットから発生する単一光子起源の同定と制御された単一光子源の実現」文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」第一回公開シンポジウム, 2006年1月20日, 東京, pp.5-8。
13. 赤崎達志(NTT物性基礎研), 丸山達朗(NTT-AT), 高柳英明(NTT物性基礎研), 定昌史(北大電子研), 植杉克弘(北大電子研), 末宗幾夫(北大電子研), 「GaAsNSeオミックコンタクト層を用いたNb/GaAs/Nb超伝導接合」, 2006年応用物理学関係連合講演会(武蔵工大, 2006/3/24)
14. 熊野英和(北大), 木村聡, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 高津求: 「単一量子ドットによる偏光相関光子対発生」2006年(平成18年)春季第53回応用物理学関係連合講演会(平成18年3月22-26日, 武蔵工業大学) 24p-B-2講演予稿集p.1474。
15. 木村聡(北大), 熊野英和, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 横井伴紀, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 高津求: 「単一InAlAs量子ドットのドットサイズと面内異方性に関する検討」2006年(平成18年)春季第53回応用物理学関係連合講演会(平成18年3月22-26日, 武蔵工業大学) 24p-B-3講演予稿集p.1474。
16. 遠藤礼暁(北大), 植杉克弘, 熊野英和, 定昌史, 木村聡, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉: 「近赤外—可視光領域量子ドット形成基板へのナノ微細加工」2006年(平成18年)春季第53回応用物理学関係連合講演会(平成18年3月22-26日, 武蔵工業大学) 24p-B-11講演予稿集p.1477。
17. 植杉克弘(北大), 末宗幾夫, 町田英明: 「GaSb/GaAs量子ドットへの窒素供給の効果」2006年(平成18年)春季第53回応用物理学関係連合講演会(平成18年3月22-26日, 武蔵工業大学) 25p-T-20講演予稿集p.344。
18. 定昌史(北大), 遠藤礼暁, 熊野英和, 末宗幾夫: 「ZnSe中のZnTe量子ドットからの蛍光」2006年(平成18年)春季第53回応用物理学関係連合講演会(平成18年3月22-26日, 武蔵工業大学) 24p-B-16講演予稿集p.1479。
19. 熊野英和(北大), 末宗幾夫: 「単一量子ドットから発生する単一光子対の光子相関特性の評価」2005年(平成17年)秋季第66回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「新世代光通信へのイノベーション2」(平成17年9月7日-9月11日, 徳島大学)
20. 熊野英和(北大), 木村聡, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 横井伴紀, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉: 「光子相関測定を用いた量子ドットにおける荷電励起子発光の同定」2005年(平成17年)秋季第66回応用物理学関係連合講演会(平成17年9月7日-9月11日, 徳島大学)
21. 木村聡(北大), 熊野英和, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 横井伴紀, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉: 「単一量子ドットからの単一

- 光子発生に関する多励起子効果の影響」2005年（平成17年）秋季第66回応用物理学関係連合講演会（平成17年9月7日-9月11日，徳島大学）
22. 横井伴紀(北大)，足立智，笹倉弘理，棕元崇，武藤俊一，宋海智，廣瀬真一，臼杵達哉，熊野英和，末宗幾夫：「自己集合量子ドットでのオーバーハウザーシフトの観測」2005年（平成17年）秋季第66回応用物理学関係連合講演会（平成17年9月7日-9月11日，徳島大学）（講演奨励賞受賞講演）
 23. 谷津直樹(北大)，笹倉弘理，足立智，武藤俊一，熊野英和，末宗幾夫，廣瀬真一，臼杵達哉：「単一InAlAs量子ドットの発光寿命の温度依存性」2005年（平成17年）秋季第66回応用物理学関係連合講演会（平成17年9月7日-9月11日，徳島大学）
 24. 北川広野(東京理科大)、赤崎達志(NTT物性基礎研)、丸山達朗(NTT-AT)、田中和典(浜松ホトニクス中研)、菅博文(浜松ホトニクス中研)、花村榮一(千歳科学技術大)、高柳英明(NTT物性基礎研)、「Nb/p-InGaAs/Nbジョセフソン接合の超伝導特性」、2005年（平成17年）秋季第66回応用物理学関係連合講演会（平成17年9月7日-9月11日，徳島大学）
 25. 赤崎達志(NTT物性基礎研)、中ノ勇人(NTT物性基礎研)、新田淳作(NTT物性基礎研)、高柳英明(NTT物性基礎研)、「バリスティック InGaAs-based 超伝導弱結合における多重 Andreev 反射による巨大熱雑音の観測」、日本物理学会2005年秋季大会（平成17年9月19日-9月22日，同志社大学）
 26. M. Jo(北大), M. Endo, H. Kumano, and I. Suemune: "Discrimination of isoelectronic centers and type-II quantum dots with ZnTe embedded in ZnSe" TMS 2006 Electronic Materials Conference, June 28-30, 2006, Pennsylvania State University, PA, USA.
 27. H. Kumano(北大), S. Kimura, M. Endo, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, and I. Suemune: "Polarization Preservation between Photon Pairs from a Biexciton-Exciton Cascaded Decay Process in a Single InAlAs Quantum Dots" 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria, July 24-28, 2006.
 28. M. Jo(北大), M. Endo, H. Kumano, and I. Suemune: "Luminescence Study on Evolution from Te Isoelectronic Centers to Type-II ZnTe Quantum Dots Grown by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy" 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Waseda University, Tokyo, Japan, 3-8 September, 2006.
 29. I. Suemune(北大): "Superconductor-based Quantum-dot Light Emitting Diodes (SQLED) - Role of Cooper-pairs in the Recombination Processes in Quantum Dots" Workshop on Photon and Spins: Their Generation, Manipulation, and Detection, December 12-13, 2006, Sapporo.
 30. S. Oberholzer (NTT物性基礎研), E. Bieri, C. Schonenberger, M. Giovannini, J. Faist, T. Akazaki, and H. Takayanagi: "Electronic Correlation Measurements in Quantum Nano-Structures" International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), February 20-23, 2007, Atsugi, Japan.
 31. H. Takayanagi (東京理大理), "Multiple Andreev reflections and reentrant behavior in network-like carbon nanotubes", Advanced Heterostructure Workshop 2006, Hawaii, December 5, 2006.
 32. 定昌史(北大)、遠藤礼暁、熊野英和、末宗幾夫：「ZnSe-Te系におけるTe等電子中心とZnTe量子ドットからの発光」ナノ光・電子デバイスシンポジウムー量子ドットとフォトニック結晶2006年5月29日、東京、P-38, pp. 113-114.
 33. 井筒泰洋(北大)、遠藤礼暁、植杉克弘、末宗幾夫：「電子ビーム用レジスト

- を用いた量子ドットの表面 passivation と発光効率の増大」2007 年（平成 19 年）春季第 54 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 3 月 27-30 日，青山学院大学）28p-Q-16 講演予稿集 p.348。
- 3 4. 小林 創(北大)，熊野英和，遠藤礼暁，定 昌史，末宗幾夫，笹倉弘理，足立 智，武藤俊一：「零磁場における単一量子ドットからの高円偏光度光子発生」2007 年（平成 19 年）春季第 54 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 3 月 27-30 日，青山学院大学）29a-T-5 講演予稿集 p.1464。
 - 3 5. 定 昌史(北大)，佐藤弘康，遠藤礼暁，末宗幾夫，丸山達郎，赤崎達志：「GaAsNSe を用いた n-GaAs へのオーミック接触の形成」2007 年（平成 19 年）春季第 54 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 3 月 27-30 日，青山学院大学）27a-SM-10 講演予稿集 p.1483。
 - 3 6. 谷津直樹(北大)，笹倉弘理，足立 智，武藤俊一，末宗幾夫：「単一 InAlAs 量子ドットにおける励起子，励起子分子，荷電励起子の位相緩和時間」2007 年（平成 19 年）春季第 54 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 3 月 27-30 日，青山学院大学）29p-T-7 講演予稿集 p.1469。
 - 3 7. 定 昌史(北大)，遠藤礼暁，熊野英和，末宗幾夫：「ZnSe 中における極微量 Te 等電子中心からの蛍光線」2006 年（平成 18 年）秋季第 6 7 回応用物理学関係連合講演会（平成 18 年 8 月 29 日-9 月 1 日，立命館大学）30p-ZF-4, p. 281.
 - 3 8. 小林 創(北大)，熊野英和，遠藤礼暁，末宗幾夫，笹倉弘理，足立 智，武藤俊一：「単一量子ドットにおける中性励起子発光のスピン分裂」2006 年（平成 18 年）秋季第 6 7 回応用物理学関係連合講演会（平成 18 年 8 月 29 日-9 月 1 日，立命館大学）31a-RE-8, p. 1270.
 - 3 9. 林雄二郎(北大)，遠藤礼暁，小林 創，定 昌史，熊野英和，末宗幾夫：「近赤外領域 2 次元フォトリソニック結晶による発光強度増強効果」2006 年（平成 18 年）秋季第 6 7 回応用物理学関係連合講演会（平成 18 年 8 月 29 日-9 月 1 日，立命館大学）30p-RE-10, p. 1265.
 - 4 0. 植杉克弘(北大)，福田 永，井筒泰洋，末宗幾夫：「GaSb 量子ドット表面の GaAs 埋め込み層成長過程の評価」2006 年（平成 18 年）秋季第 6 7 回応用物理学関係連合講演会（平成 18 年 8 月 29 日-9 月 1 日，立命館大学）31a-ZF-8, p. 297.
 - 4 1. 赤崎達志（NTT 物性基礎研）、山口真澄（NTT 物性基礎研）、津村公平（筑波大物質創成）、野村晋太郎（筑波大物質創成）、高柳英明（東京理科大）、「超伝導体／半導体接合への光照射の影響」、2006 年（平成 18 年）秋季第 6 7 回応用物理学学会学術講演会（平成 18 年 8 月 29 日-9 月 1 日，立命館大学）
 - 4 2. 赤崎達志（NTT 物性基礎研）、山口真澄（NTT 物性基礎研）、津村公平（筑波大物質創成）、野村晋太郎（筑波大物質創成）、高柳英明（東京理科大）、「InAlAs/InGaAs ヘテロ構造における負の光伝導」、日本物理学会 2007 年春季大会（平成 18 年 3 月 18 日-3 月 21 日，鹿児島大学）
 - 4 3. 津村公平（筑波大物質創成）、野村晋太郎（筑波大物質創成）、赤崎達志（NTT 物性基礎研）、高柳英明（東京理科大）、「超伝導・半導体接合の顕微光照射によるイメージング」、日本物理学会 2007 年春季大会（平成 18 年 3 月 18 日-3 月 21 日，鹿児島大学）
 - 4 4. 高柳英明（東京理科大）、Y. L. Zhong（東京理科大）、赤崎達志（NTT 物性基礎研）、中ノ勇人（NTT 物性基礎研）、神崎賢一（NTT 物性基礎研）、小林慶裕（NTT 物性基礎研）、「超伝導体-カーボンナノチューブ・ネットワーク系の輸送特性」日本物理学会 2007 年春季大会（平成 18 年 3 月 19 日，鹿児島大学）
 - 4 5. H. Kobayashi(北大)，H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: "Highly Circular-polarized Photon Generation from a

- Single Quantum Dot at Zero Magnetic Field” Sixth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LSDS2007), April 15 -20, 2007, San Andres, Mexico.
- 4 6. I. Suemune (北大), 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” Sixth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LSDS2007), April 15 -20, 2007, San Andres, Columbia.
 - 4 7. Ikuo Suemune (北大): “Photon Generation Processes from Single Quantum Dots” International Symposium for the Promotion of Academic Exchange, Sapporo, March 22 (2007).
 - 4 8. H. Kumano (北大), H. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: “High Degree of Circular Polarization Single Photon Emission from a Single Quantum Dot Under Non-Resonant Excitation and Zero Magnetic Field” International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures, Genova, Italy, July 15-20 (2007), S. M2, pp. 18-20.
 - 4 9. N. Yatsu (北大), S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: “Fourier Spectroscopy of Decoherence of Exciton and Exciton Complexes in Single InAlAs Quantum Dots” 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-15) Tokyo, July 23-27 (2007).
 - 5 0. M. Jo (北大), M. Endo, Y. Hayashi, H. Kumano, and I. Suemune: “Observation of Exciton-Phonon Interaction at Te Isoelectronic Centers in ZnSe” The 13th International Conference on II-VI Compounds, September 10-14, 2007 Jeju, Korea, Tu-10, p. 96.
 - 5 1. Y. Hayashi (北大), K. Tanaka, T. Akazaki, H. Kumano, and I. Suemune: “Luminescence Observed from A Junction Field-Effect Transistor with Nb/n-InGaAs/Nb Josephson Junction” 34th International Symposium on Compound Semiconductors, October 15-18, 2007, Kyoto, Japan, WeB I-3, p. 260.
 - 5 2. I. Suemune (北大), H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Controlled Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications” The International Photonics Technology Conference (IPTC2007) September 4-5, 2007, Gwangju, Korea (**Invited**)
 - 5 3. I. Suemune (北大), H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots: Their Control and Applications” 8th Chitose International Forum, Chitose on Nov. 29 and 30, 2007 (**Invited**).
 - 5 4. H. Takayanagi (東京理科大), R. Inoue, T. Akazaki, K. Tanaka, M. Jo, and I. Suemune: “Differential Resistance Oscillations in a Superconductor-semiconductor Junctions” International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, December 2-7, 2007, Waikoloa, Hawaii, USA.
 - 5 5. I. Suemune (北大): “Possibility of Semiconductor-based Single Photon Sources for Quantum Information Networks” International Conference on Microwaves and Optoelectronics (ICMO2007) December 17-20, 2007, Aurangabad, India (**Plenary Invited Talk**) PS1, p. 34.
 - 5 6. I. Suemune (北大), H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Toward Regulated Photon Generations from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications” 2008 SPIE Photonic

- West Conference, January 19-24, 2008, San Jose, USA (**Invited**) [6900-11] S3.
- 5 7. I. Suemune(北大), H. Kumano, Y. Hayashi, M. Jo, and Y. Idutsu: "Photon Generations from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications to Next-Generation Information Technology" 2008 International Symposium on Global COE Program of Center for Next-Generation Information Technology based on Knowledge Discovery and Knowledge Federation (GCOE-NGIT 2008, Hokkaido University) January 22-23, 2008, Sapporo, Japan.
 - 5 8. Y. Idutsu(北大), H. Sato, S. Ito, and I. Suemune: "Development of Nanofabrication Techniques for Nanophotonic Structures and Devices" 2008 RIES-Symposium, January 28-29, Sapporo, Japan, P41.
 - 5 9. M. Sato(北大), M. Takada, Y. Idutsu, H. Kumano, and I. Suemune: "Growth and Characterization of Semiconductor Nanostructures with Type-I and Type II Heterojunctions" 2008 RIES-Symposium, January 28-29, Sapporo, Japan, P24.
 - 6 0. I. Suemune(北大), Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and H. Kumano: "New Light Emitting Diode with Superconducting Electrodes" 2008 Japanese-German-Spanish Joint Workshop, Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, Hakone, Kanagawa, Japan, March 5-6, 2008.
 - 6 1. S. Adachi(北大), R. Kaji, K. Yamada, S. Muto, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune: "Nuclear Field-mediated Measurement of Effective g factors of Quantum Dots" International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), April 7 - 11, 2008, Tokyo, Japan.
 - 6 2. M. Takada(北大), Y. Idutsu, Y. Hayashi, T. Akazaki, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune: "Observation of Enhanced Luminescence Emitted from InAs Quantum Dots with Direct Contact to Superconducting Niobium Stripe" 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 6 3. Y. Hayashi(北大), K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, H. Kumano, and I. Suemune: "Luminescence of n-InGaAs/p-InP Diode with Superconducting Nb Electrode" The 20th IEEE Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM'08), 25-29 May 2008, Versailles, France.
 - 6 4. H. Sasakura(北大), Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, S. Kuramitsu, H. Kumano, I. Suemune: "Superconducting Effect on Radiative Recombinations in Long-wavelength Light Emitting Diode" 66th Device Research Conference, June 23-25 University of California, Santa Barbara, CA.
 - 6 5. Tatsushi Akazaki (NTT 物性基礎研), 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", International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), TU-PE46, Genova, Italy, July 15-20 2007.
 - 6 6. H. Takayanagi(東京理科大), M. Jo, I. Suemune, R. Inoue, T. Akazaki and K. Tanaka, "Differential resistance oscillations with microwave irradiation in a superconductor-semiconductor junction", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, December 4, 2007, Waikoloa, Hawaii, USA.
 - 6 7. 林雄二郎(北大), 田中和典, 赤碕達志, 熊野英和, 末宗幾夫: 「Nb/n-InGaAs/Nb ジョセフソン接合を持った JFET-LED の特性」2007 年(平成 19 年) 秋季第 68 回応用物理学関係連合講演会(平成 19 年 9 月 4 日・7 日, 北海道工業大学) 7a-C-11 講演予稿集 p.1159.
 - 6 8. 定昌史(北大), 林雄二郎, 熊野英和, 末宗幾夫: 「ZnSe 中の Te 等電子中

- 心における励起子—格子相互作用の観測」2007 年（平成 19 年）秋季第 68 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 9 月 4 日・7 日，北海道工業大学）5a-E-9, 講演予稿集 p.323.
69. 定 昌史(北大), 林雄二郎, 熊野英和, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, S.Suraprapapich, C. W. Tu : 「InAs/GaAs 量子リング構造の単一分光測定」2007 年（平成 19 年）秋季第 68 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 9 月 4 日・7 日，北海道工業大学）6a-N-18, 講演予稿集 p.1415.
70. 小林 創(北大), 熊野英和, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一 : 「単一量子ドット起源の円偏光単一光子発生およびその励起波長依存性」2007 年（平成 19 年）秋季第 68 回応用物理学関係連合講演会（平成 19 年 9 月 4 日・7 日，北海道工業大学）6a-N-7, 講演予稿集 p.1412.
71. 赤崎達志(NTT 物性基礎研), 羽柴秀臣, 山口真澄, 津村公平, 野村晋太郎, 高柳英明, 超伝導体/半導体接合への光照射の影響 (II), 第 68 回応用物理学学会学術講演会、札幌市、2007 年 9 月
72. 増山博孝(NTT 物性基礎研), 柴田浩行, 赤崎達志, 高柳英明, GaAs を基板にした超伝導 MgB₂ 薄膜の作製、第 68 回応用物理学学会学術講演会、札幌市、2007 年 9 月
73. 江国晋吾(北大)、小林 創, 熊野英和, 末宗幾夫 : 「単一量子ドット起源の光学フォノンを介した高円偏光度光子発生」第 43 回応用物理学学会北海道支部合同学術講演会（平成 20 年 1 月 10 日・11 日，北海道大学）C-14, 講演予稿集 p.68.
74. 伊藤早紀(北大)、遠藤礼暁、林雄二郎、井筒康洋, 熊野英和, 末宗幾夫 : 「Carbon acceptor を用いた微小共振器の作製に関する研究」第 43 回応用物理学学会北海道支部合同学術講演会（平成 20 年 1 月 10 日・11 日，北海道大学）C-6, 講演予稿集, p.60.
75. 高田 真(北大)、井筒康洋, 林雄二郎、熊野英和, 末宗幾夫 : 「GaAs 埋め込み InAs/GaAs QD の微小領域フォトルミネッセンス・スペクトルの測定」第 43 回応用物理学学会北海道支部合同学術講演会（平成 20 年 1 月 10 日・11 日，北海道大学）A-8, 講演予稿集 p.8.
76. 佐藤 充(北大)、井筒康洋, 定 昌史、熊野英和, 末宗幾夫 : 「GaAsSb/GaAs QD ヘテロ構造の発光特性と伝導帯制御」第 43 回応用物理学学会北海道支部合同学術講演会（平成 20 年 1 月 10 日・11 日，北海道大学）A-9, 講演予稿集 p.9.
77. 井上亮太郎（東京理科大），高柳英明, 定昌史, 赤崎達志, 田中和典, 末宗幾夫 : 「マイクロ波照射による超伝導—半導体接合の微分抵抗の振動」2008 年（平成 20 年）春季第 55 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 3 月 27 日・30 日，日本大学理工学部）27p-NC-3, 講演予稿集 p.293.
78. 井筒康洋(北大), 宮村壮太, 末宗幾夫 : 「GaAs 表面の原子ステップその場エッチングと InAs 量子ドットの発光増大効果」2008 年（平成 20 年）春季第 55 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 3 月 27 日・30 日，日本大学理工学部）28p-ZT-6, 講演予稿集 p.356.
79. 佐藤 充(北大), 井筒康洋, 定 昌史, 笹倉弘理, 熊野英和, 末宗幾夫 : 「GaAsSb/GaAs Type-II 単一量子井戸における伝導帯オフセット制御とその評価」2008 年（平成 20 年）春季第 55 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 3 月 27 日・30 日，日本大学理工学部）29p-ZT-3, 講演予稿集 p.365.
80. 定 昌史(北大), S. Suraprapapich, C. W. Tu, 林雄二郎, 笹倉弘理, 熊野英和, 末宗幾夫, 足立 智, 武藤俊一 : 「ZnSe 中の Te 等電子中心における励起子—格子相互作用の観測」2008 年（平成 20 年）春季第 55 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 3 月 27 日・30 日，日本大学理工学部）28p-E-4, 講演予稿集 p.1448.

- 8 1. 小林 創(北大), 江国晋吾、熊野英和、末宗幾夫、笹倉弘理、足立 智、武藤俊一:「光学フォノンに起因した単一量子ドット内エネルギー緩和過程でのスピンの反転制御」2008年(平成20年)春季第55回応用物理学関係連合講演会(平成20年3月27日-30日, 日本大学理工学部) 28p-E-5, 講演予稿集 p.1449.
- 8 2. 高田 真(北大), 井筒康洋, 林雄二郎, 赤碕達志, 笹倉弘理, 熊野英和, 末宗幾夫:「InAs 量子ドットへの超伝導 Nb 電極の直接コンタクトとドット発光強度増大の観測」2008年(平成20年)春季第55回応用物理学関係連合講演会(平成20年3月27日-30日, 日本大学理工学部) 28p-E-12, 講演予稿集 p.1451.
- 8 3. 倉光周平(北大), 林雄二郎, 田中和典, 赤碕達志, 定昌史, 熊野英和, 末宗幾夫:「超伝導 Nb/n-InGaAs 接合におけるフォトルミネセンス増大効果」2008年(平成20年)春季第55回応用物理学関係連合講演会(平成20年3月27日-30日, 日本大学理工学部) 28p-E-13, 講演予稿集 p.1451.
- 8 4. 林雄二郎(北大), 田中和典, 赤碕達志, 倉光周平, 定昌史, 熊野英和, 末宗幾夫:「Nb/n-InGaAs/p-InP 超伝導発光ダイオードの発光特性」2008年(平成20年)春季第55回応用物理学関係連合講演会(平成20年3月27日-30日, 日本大学理工学部) 28p-E-14, 講演予稿集 p.1452.
- 8 5. 井上亮太郎(東京理科大), 高柳英明, 定昌史, 赤碕達志, 田中和典, 末宗幾夫, “マイクロ波照射による超伝導体-半導体接合の微分抵抗の振動”, 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 講演番号 27p-NC-3, 2008年3月27日, 日本大学理工学部船橋キャンパス
- 8 6. S. Adachi(北大), R. Kaji, K. Yamada, S. Muto, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune: “Nuclear Field-mediated Measurement of Effective g factors of Quantum Dots” International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), April 7 - 11, 2008, Tokyo, Japan.
- 8 7. M. Takada(北大), Y. Idutsu, Y. Hayashi, T. Akazaki, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune: “Observation of Enhanced Luminescence Emitted from InAs Quantum Dots with Direct Contact to Superconducting Niobium Stripe” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
- 8 8. Y. Hayashi(北大), K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, H. Kumano, and I. Suemune: “Luminescence of n-InGaAs/p-InP Diode with Superconducting Nb Electrode” The 20th IEEE Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM'08), 25-29 May 2008, Versailles, France.
- 8 9. H. Sasakura(北大), Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, S. Kuramitsu, H. Kumano, I. Suemune: “Superconducting Effect on Radiative Recombinations in Long-wavelength Light Emitting Diode” 66th Device Research Conference, June 23-25, 2008 University of California, Santa Barbara, CA.
- 9 0. 末宗幾夫(北大), 林雄二郎, 倉光周平, 田中和典, 赤碕達志, 笹倉弘理, 熊野英和:「Nb 電極を持つ InGaAs/InP LED の超伝導発光増強効果と内部量子効率に関する検討」2008年(平成20年)秋季第69回応用物理学関係連合講演会(平成20年9月2日-5日, 中部大学) 3pZQ20 講演予稿集 p.1242.
- 9 1. 井筒康洋(北大), 伊藤早紀, 佐藤弘康, 許載勳, 高田真, 笹倉弘理, 末宗幾夫:「Nb 埋め込み InAs QDs メサ構造の作製と評価」2008年(平成20年)秋季第69回応用物理学関係連合講演会(平成20年9月2日-5日, 中部大学) 2pZQ8 講演予稿集 p.1259.
- 9 2. 佐藤 充(北大), 井筒康洋, 定昌史, 笹倉弘理, 熊野英和, 末宗幾夫:「Type-II GaAsSb/GaAs へ Se delta-doped GaAs 層を導入した効果」2008年(平成20年)秋季第69回応用物理学関係連合講演会(平成20年9月2日-5日, 中部大学) 3aCF13 講演予稿集 p.285.
- 9 3. 佐藤弘康(北大), 井筒康洋, 笹倉弘理, 熊野英和, 末宗幾夫:「リフトオフ

- プロセスによる開放型 InAs 量子ドットに直接コンタクトする Nb 微細構造の形成と評価」2008 年（平成 20 年）秋季第 69 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 9 月 2 日・5 日，中部大学）2pZQ6 講演予稿集 p.1258.
94. 倉光周平(北大)、笹倉弘理、田中和典、赤崎達志、熊野英和、末宗幾夫：「超伝導 Nb 電極による n-InGaAs 発光再結合寿命の短縮」2008 年（平成 20 年）秋季第 69 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 9 月 2 日・5 日，中部大学）3pZQ19 講演予稿集 p.1241.
95. 江國晋吾(北大)、中島秀朗、熊野英和、笹倉弘理、足立智、武藤俊一、末宗幾夫：「単一量子ドット発光における Which-Path 情報と干渉効果」2008 年（平成 20 年）秋季第 69 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 9 月 2 日・5 日，中部大学）4pZQ3 講演予稿集 p.1246.
96. 鍛冶怜奈(北大)、足立智、武藤俊一、笹倉弘理、熊野英和、末宗幾夫：「単一 InAlAs 量子ドットにおける中性励起子発光の偏光回転」2008 年（平成 20 年）秋季第 69 回応用物理学関係連合講演会（平成 20 年 9 月 2 日・5 日，中部大学）4pZQ8 講演予稿集 p.1248.
97. Jae-Hoon Huh(北大), Y. Hayashi, Y. Idutsu, I. Suemune: "Nanofabrication of Niobium Electrodes for Superconducting Light Emitting Diodes" 51st Electronic Materials Conference, University Park, Pennsylvania, June 24-26, 2009, NN5, p. 91.
98. Y. Idutsu(北大), M. Takada, S. Ito, H. Sato, J.-H. Huh, D. Kato, S. Ida, H. Sasakura, H. Kumano, and I. Suemune: "Nano-fabrication and Optical Characterization of InAs QDs Pillar Structures Embedded with Niobium" 51st Electronic Materials Conference, University Park, Pennsylvania, June 24-26, 2009, B2, p. 15.
99. D. Kato(北大), M. Takada, Y. Idutsu, S. Ida, S. Ito, J.-H. Huh, H. Sasakura, and I. Suemune: "High Photon Extraction Efficiency from InAs Quantum Dots Embedded in Niobium Metal: FDTD Simulation and Measurements" SPIE Optics+Photonics 2009, NanoScience+Engineering, Nanophotonic Materials VI, San Diego, CA, 2-6 August 2009, 7393-17, Proc. of SPIE, Vol. 7393, 73930I-1~8, 2009.
100. R. Inoue(東京理科大), H. Takayanagi, T. Akazaki, K. Takana, I. Suemune: "Transport Characteristics of a Superconductor-based LED" European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2009), September 13-17, 2009, Dresden, Germany.
101. H. Takayanagi(東京理科大), R. Inoue, T. Akazaki, K. Tanaka, I. Suemune: "Superconducting Transport in an LED with Nb Electrodes" Sixth International Conference in School Format on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX VI), September 17-24, 2009, Rhodes, Greece.
102. 井上亮太郎(東京理科大)、高柳英明、末宗幾夫、田中和典、赤崎達志：「超伝導発光ダイオード構造の直流電気特性」2009 年（平成 21 年）日本物理学会秋季大会（平成 21 年 9 月 25 日 - 28 日，熊本大学黒髪キャンパス）25pYA2 講演予稿集 p. 691.
103. 和田雅樹(北大)、笹倉弘理、熊野英和、末宗幾夫：「量子リング構造における核磁場の双安定特性」2009 年（平成 21 年）秋季第 70 回応用物理学関係連合講演会（平成 21 年 9 月 8 日・11 日，富山大学）8p-TH-11.
104. 井筒康洋(北大)、許載勳、末宗幾夫：「金属埋め込み半導体ピラー構造作製における界面 SiO₂ 表面状態制御効果」2009 年（平成 21 年）秋季第 70 回応用物理学関係連合講演会（平成 21 年 9 月 8 日・11 日，富山大学）10p-TH-17.
105. 中島秀朗(北大)、熊野英和、宮村壮太、井筒康洋、笹倉弘理、末宗幾夫：「金

- 属埋め込み単一 InAs 量子ドットからの単一光子発生」2009 年（平成 21 年）秋季第 70 回応用物理学関係連合講演会（平成 21 年 9 月 8 日・11 日，富山大学）8p-TH-7.
- 1 0 6. 笹倉弘理(北大),熊野英和, 末宗幾夫、本久順一、小林靖典、富岡克広、福井孝志、N. Akopian, M. van Kouwen, V. Zwiller, :「1.2mm 帯単光子源としての単一 InP/InAsP/InP ナノワイヤ量子ドット発光のコヒーレンス測定」2009 年（平成 21 年）秋季第 70 回応用物理学関係連合講演会（平成 21 年 9 月 8 日・11 日，富山大学）8p-TH-6.
 - 1 0 7. 笹倉弘理(北大), 倉光周平, 田中和典, 赤崎達志, 熊野英和, 末宗幾夫 : 「低電流駆動による超伝導発光ダイオードの発光寿命の評価」2009 年（平成 21 年）秋季第 70 回応用物理学関係連合講演会（平成 21 年 9 月 8 日・11 日，富山大学）8p-TH-9.
 - 1 0 8. 許載勳(北大), 末宗幾夫:「超伝導 Nb 電極のナノパターニングにおける低温現象の効果」2009 年（平成 21 年）秋季第 70 回応用物理学関係連合講演会（平成 21 年 9 月 8 日・11 日，富山大学）11a-ZF-9.
 - 1 0 9. 井田惣太郎(北大)、加藤大望、末宗幾夫 : 「有限差分時間領域(FDTD)法による金属埋め込み InAs QDs ピラー構造の解析」第 4 5 回応用物理学会北海道支部合同学術講演会（平成 2 2 年 1 月 8 日・ 9 日，札幌）C-23.
 - 1 1 0. 江国晋吾(北大)、中島秀朗、熊野英和、末宗幾夫 : 「多色励起による単一量子ドット中の荷電状態制御」第 4 5 回応用物理学会北海道支部合同学術講演会（平成 2 2 年 1 月 8 日・ 9 日，札幌）C-15.
 - 1 1 1. I. Suemune(北大): “Superconducting Optoelectronics” 2010 SPIE Photonic West Conference, Opto, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XVIII, January 23-28, 2010, San Francisco, CA, USA, paper 7597-15 (Invited).
 - 1 1 2. H. Sasakura(北大), H. Kumano, I. Suemune, J. Motohisa, Y. Kobayashi, K. Tomioka, T. Fukui, M. van Kouwen, N. Akopian, and V. Zwiller: “Photon Emission Properties of Single InP/InAsP/InP Nanowire Quantum Dots Measured by Fourier Spectroscopy” 3rd International Symp. on Global COE Program of Center for Next-generation Information Technology Based on Knowledge Discovery and Knowledge Federation, Sapporo, January 18-20, 2010, D-16, pp.58-61.
 - 1 1 3. H. Kumano(北大), H. Nakajima, S. Ekuni, S. Miyamura, J.-H. Huh, H. Sasakura, and I. Suemune: “Quantum-dot Single Photon Emitter of Higher Photon Extraction Efficiency and Lower Multiple-photon Emission Probability with Metal-embedded Structure” The 6th International Conference on Quantum Dots (Quantum Dot 2010) Nottingham, UK, April 26-30, 2010.
 - 1 1 4. H. Nakajima(北大), S. Ekuni, H. Kumano, S. Miyamura, D. Kato, S. Ida, H. Sasakura, N. Namekata, I. Suemune: “Strongly suppressed multi-photon generation from a single quantum dot in metal-embedded structure with second-order photon correlation measurements” 37th International Symp. on Compound Semiconductors, Kagawa, May 31-June4, 2010.
 - 1 1 5. I. Suemune(北大), Y. Idutsu, M. Takada, H. Sasakura, H. Kumano: “Toward Conversion from Electron Pairs to Photon Pairs in Quantum Dots” Electronic Materials Conference, June 23-25, 2010, Notre Dame, Indiana, USA.
 - 1 1 6. I. Suemune(北大), Y. Asano, K. Tanaka, R. Inoue, H. Takayanagi, H. Sasakura, T. Akazaki, and H. Kumano: “Exploring Spontaneous Simultaneous Photon-pair Generation in Semiconductors” 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), July 25-30, 2010, Seoul, Korea.
 - 1 1 7. H. Sasakura(北大), K. Tanaka, J.-H. Huh, T. Akazaki, H. Kumano, and I. Suemune: “Electron-Cooper-pair Operated Long-wavelength Light Emitting Diodes” International Semiconductor Laser Conference, September 26-30, 2010, Kyoto.
 - 1 1 8. J.-H. Huh(北大), C. Hermannstaedter, K. Akahane, N. A. Jahan, M. Wada, H. Sasakura, S. Ida, M. Sasaki, I. Suemune: “ Fabrication of Metal-buried Nano-cone

- Structures for Single Photon Generation” 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC 2010) November 9-12, 2010, Fukuoka, 11B-6-3.
- 1 1 9. R Inoue, H Takayanagi, T Akazaki, K Tanaka and I Suemune, “Transport Characteristics of Superconductor-based Light-Emitting-Diode Structure”, International Conference on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), March 9-11, 2010, Komaba, Tokyo, JAPAN.
 - 1 2 0. R Inoue, H Takayanagi, T Akazaki, K Tanaka and I Suemune, “Transport Characteristics of Superconductor-based LED Structure”, The Annual March Meeting of the American Physical Society, March 15-19, 2010, Portland, Oregon, US.
 - 1 2 1. 井上亮太郎, 高柳英明, 赤崎達志, 田中和典, 末宗幾夫, “超伝導発光ダイオード構造の直流輸送特性による発光再結合のモニタリング”, 日本物理学会第 65 回年次大会, March 20-23, 2010, 岡山大学津島キャンパス.
 - 1 2 2. 井上亮太郎, 高柳英明, 赤崎達志, 田中和典, 末宗幾夫, “マイクロ波照射下における超格子構造を付加した超伝導体-半導体-超伝導体接合の輸送特性”, 日本物理学会第 65 回年次大会, March 20-23, 2010, 岡山大学津島キャンパス.
 - 1 2 3. 中島秀朗(北大), 江国晋吾, 熊野英和, 飯島仁史, 笹倉弘理, 末宗幾夫, 「金属埋め込み InAs 量子ドットからの高効率単一光子発生」電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会技術報告 2010 年 6 月 25 日, 東京.
 - 1 2 4. 中島秀朗, 江国晋吾, 熊野英和, 飯島仁史, 井田惣太郎, 笹倉弘理, 末宗幾夫: 「金属埋め込み量子ドットによる強度飽和領域における高純度単一光子発生」2010 年(平成 22 年)秋季第 71 回応用物理学関係連合講演会(平成 22 年 10 月 14 日-17 日, 長崎大学) 16p-NC-13, p. 14-089.
 - 1 2 5. H. Kumano(北大), H. Nakajima, S. Ekuni, S. Miyamura, J.-H. Huh, H. Sasakura, and I. Suemune: “Quantum-dot Single Photon Emitter of Higher Photon Extraction Efficiency and Lower Multiple-photon Emission Probability with Metal-embedded Structure” The 6th International Conference on Quantum Dots (Quantum Dot 2010) Nottingham, UK, April 26-30, 2010.
 - 1 2 6. H. Nakajima(北大), S. Ekuni, H. Kumano, S. Miyamura, D. Kato, S. Ida, H. Sasakura, N. Namekata, I. Suemune: “Strongly suppressed multi-photon generation from a single quantum dot in metal-embedded structure with second-order photon correlation measurements” 37th International Symp. on Compound Semiconductors, Kagawa, May 31-June 4, 2010.
 - 1 2 7. I. Suemune(北大), Y. Idutsu, M. Takada, H. Sasakura, H. Kumano: “Toward Conversion from Electron Pairs to Photon Pairs in Quantum Dots” Electronic Materials Conference, June 23-25, 2010, Notre Dame, Indiana, USA.
 - 1 2 8. I. Suemune(北大), Y. Asano, K. Tanaka, R. Inoue, H. Takayanagi, H. Sasakura, T. Akazaki, and H. Kumano: “Exploring Spontaneous Simultaneous Photon-pair Generation in Semiconductors” 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), July 25-30, 2010, Seoul, Korea.
 - 1 2 9. H. Sasakura(北大), K. Tanaka, J.-H. Huh, T. Akazaki, H. Kumano, and I. Suemune: “Electron-Cooper-pair Operated Long-wavelength Light Emitting Diodes” International Semiconductor Laser Conference, September 26-30, 2010, Kyoto.
 - 1 3 0. J.-H. Huh(北大), C. Hermannstädter, K. Akahane, N. A. Jahan, M. Wada, H. Sasakura, S. Ida, M. Sasaki, I. Suemune: “Fabrication of Metal-buried Nano-cone Structures for Single Photon Generation” 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC 2010) November 9-12, 2010, Fukuoka, 11B-6-3.
 - 1 3 1. H. Nakajima(北大), S. Ekuni, H. Kumano, Y. Idutsu, S. Ida, H. Sasakura, I. Suemune: “Metal-embedded Semiconductor Single Quantum Dot as a Novel Highly

Pure Single Photon Source” 2011 SPIE Photonic West Conference, Opto, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XVIII, January 22-27, 2011, San Francisco, CA, USA, 7947-05.

- 1 3 2. I. Suemune(北大), J.-H. Huh, C. Hermannstädter, K. Akahane, N. A. Jahan, S. Ida, M. Wada, H. Sasakura, H. Iijima, M. Sasaki: “FDTD Simulation of Metal-embedded Single Quantum Dot and Improved Photon Extraction with Corn Structure” 2011 SPIE Photonic West Conference, Opto, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XVIII, January 22-27, 2011, San Francisco, CA, USA, 7933-43.
- 1 3 3. I. Suemune(北大), Y. Asano, H. Sasakura, C. Hermannstädter, J.-H. Huh, K. Tanaka, T. Akazaki, R. Inoue, H. Takayanagi, and H. Kumano: “Radiative Interband Transition of Cooper Pairs in a Semiconductor” American Physical Society Meeting, March 21-25, 2011, Dallas, Texas, USA.
- 1 3 4. I. Suemune(北大): “Control of Photon Emission Processes in Semiconductor Nanostructures” Villa Conference on Interactions Among Nanostructures, April 21-25, 2011 Las Vegas, Nevada, USA.
- 1 3 5. C. Hermannstädter(北大), J.-H. Huh, N. A. Jahan, H. Sasakura, and I. Suemune: “Long Wavelength Emission from Nano-cone Structures with Embedded Single InAs/InGaAlAs Quantum Dots Grown on InP Substrates” International Conference on InP and Related Materials (IPRM2011) May 22—26, 2011, Berlin Germany.

③ ポスター発表

(国内会議 5 件、国際会議 29 件)

- 1] K. Uesugi(北大), W. Zhang, and I. Suemune: “Bright Luminescence from InAs/GaAs Open Quantum Dots at Room Temperature: Dependence on GaAs Surface Reconstructions” The 23rd International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-23) July 24 - July29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan, ThP-81.
- 2] H. Kumano(北大), S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Correlations and Anti-bunching of a Charged Exciton State and Exciton and Biexciton States in a Single Quantum Dot” Modulated Semiconductor Structure (MSS12) July 10-15 (2005) Albuquerque, USA, PC3-245.
- 3] I. Suemune(北大), H. Kumano, S. Kimura, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Origin of Asymmetric Splitting of a Neutral Exciton in a Single Semiconductor Quantum Dot” 4th International Conference on Quantum Dots, May 1-5, 2006, Chamonix-Mont Blanc, France.
- 4] I. Suemune(北大), H. Kumano, S. Kimura, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Origin of Asymmetric Splitting of a Neutral Exciton in a Single Semiconductor Quantum Dot” 4th International Conference on Quantum Dots, May 1-5, 2006, Chamonix-Mont Blanc, France.
- 5] K. Tsumura(NTT 物性基礎研), S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi: “Optically modulated transport properties of Superconductor-normal metal-superconductor junctions” International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), February 20-23, 2007, Atsugi, Japan.
- 6] K. Tsumura(NTT 物性基礎研), S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi: “Optical effects on transport phenomena in superconductor-normal metal-superconductor junctions” First International Symposium on Atomic Technology (ISAT2007), March 16-17, 2007, Tsukuba, Japan.
- 7] Y. Idutsu(北大), M. Endo, K. Uesugi, and I. Suemune: “Surface Passivation

- Effect of Electron-beam Resist on InAs Quantum Dots and Their Improved Luminescence Efficiency” 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM’07), May 14-18, 2007, Matsue, Japan, PB21, Conference Proceedings, pp. 285-288.
- 8] K. Uesugi(室蘭工大), M. Sato, Y. Idutsu, and I. Suemune: “Growth Process of GaAs Cap Layers on GaSb/GaAs Quantum Dot Surfaces” 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM’07), May 14-18, 2007, Matsue, Japan, ThA1-4, pp. 462-465.
 - 9] H. Kumano(北大), S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Muto: “Optical-phonon Mediated Efficient Spin-state Transfer Between Electron Spin and Photon Polarization with a Single Quantum Dot without External Field” International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), April 7 - 11, 2008, Tokyo, Japan.
 - 10] H. Kumano(北大), H. Kobayashi, S. Ekuni, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Muto: “Spin-flip Quenching during Energy Relaxation Processes Mediated by Optical-phonons in a Single Quantum Dot” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 11] Y. Idutsu(北大), S. Miyamura, and I. Suemune: “Improved Luminescence Efficiency of InAs Quantum Dots Grown on Atomic Terraced GaAs Surfaces Prepared with In-situ Chemical Etching” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 12] M. Jo(北大), Y. Hayashi, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, S. Adachi, S. Muto, S. Suraprapapich, and C. W. Tu: “Reduced Fine Structure Splitting of Excitons in Self-assembled InAs/GaAs Quantum Rings” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 13] H. Kumano(北大), S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Muto: “Optical-phonon Mediated Efficient Spin-state Transfer Between Electron Spin and Photon Polarization with a Single Quantum Dot without External Field” International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), April 7 - 11, 2008, Tokyo, Japan.
 - 14] H. Kumano(北大), H. Kobayashi, S. Ekuni, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Muto: “Spin-flip Quenching during Energy Relaxation Processes Mediated by Optical-phonons in a Single Quantum Dot” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 15] Y. Idutsu(北大), S. Miyamura, and I. Suemune: “Improved Luminescence Efficiency of InAs Quantum Dots Grown on Atomic Terraced GaAs Surfaces Prepared with In-situ Chemical Etching” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 16] M. Jo(北大), Y. Hayashi, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, S. Adachi, S. Muto, S. Suraprapapich, and C. W. Tu: “Reduced Fine Structure Splitting of Excitons in Self-assembled InAs/GaAs Quantum Rings” 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea.
 - 17] T. Akazaki(NTT 物性基礎研), H. Hashiba, M. Yamaguchi, K. Tsumura, S. Nomura, and H. Takayanagi: “Interplay between Negative Photoconductivity and Enhanced Andreev Reflection in InGaAs-based S-Sm-S Junctions when Exposed to Infrared Light” 25th International Conf. on Low Temperature Physics, August 6-13, 2008, Amsterdam, The Netherlands.
 - 18] Y. Idutsu(北大), M. Takada, Y. Hayashi, T. Akazaki, H. Sasakura, H. Kumano, and I. Suemune: “InAs Quantum Dots with Direct Contact to Niobium Electrode: Enhancement of Luminescence Intensity Below Superconducting

- Critical Temperature” The 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, August 3-8, 2008, University of British Columbia, Vancouver, Canada, THP15, p. 223.
- 19] M. Sato(北大), M. Jo, and I. Suemune: “Conversion from Type-II to Type-I Transition due to Sb Composition in GaAsSb/GaAs Single Quantum Wells” The 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, August 3-8, 2008, University of British Columbia, Vancouver, Canada, MP5, p.21.
 - 20] M. Takada(北大), Y. Idutsu, D. Kato, S. Ida, S. Ito, H. Sato, J.-H. Huh, H. Sasakura, H. Kumano, and I. Suemune: “Drastic Enhancement of Luminescence from InAs Quantum Dots Embedded in Niobium Metal, the 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Kobe, July 19-24, 2009, TumP42, p.156.
 - 21] H. Kumano(北大), H. Nakajima, S. Ekuni, H. Sasakura and I. Suemune: “Two-mode photon interference in a quantum-dot single photon emitter”, the 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Kobe, July 19-24, 2009, TumP13 p.127.
 - 22] H. Sasakura(北大), H. Kumano, I. Suemune, J. Motohisa, Y. Kobayashi, K. Tomioka, T. Fukui, N. Akopian, M. van Kouwen, and V. Zwiller: “Exciton Coherence in Clean Single InP/InAsP/InP Nanowire Quantum Dots Emitting in Infra-red Measured by Fourier Spectroscopy” 16th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (Edison 16), Montpellier, August 24-28, 2009.
 - 23] Jae-Hoon Huh(北大), Y. Hayashi, I. Suemune: “Suppression of Back-scattering Effect in Electron-beam Lithography and Precise Control of Nb Etching Processes” 22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2009) Sapporo, November 16-19, 2009, 18D-7-56.
 - 24] Y. Idutsu(北大), S. Odashima, H. Nakajima, D. Kato, S. Ida, H. Sasakura, H. Kumano, and I. Suemune: “Drastic Enhancement of Luminescence and Single Photon Emission from InAs QDs Pillar Structures Embedded in Niobium Layer” 22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2009) Sapporo, November 16-19, 2009, 18D-7-36.
 - 25] K. Tsumura (NTT 物性基礎研), S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, “Position dependent optical effects on the transport properties of S-Sm-S junctions”, 14th International Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Systems, July 13-17, 2009, Sendai, Japan.
 - 26] J.-H.Huh(北大), Y.Idutsu, and I. Suemune, “Nano-Patterning of Nb by Combination of Special Effect Appeared to Line Pattern Edges” 第28回電子材料シンポジウム n (EMS-28) Laforet Biwako、2009年7月8-10日、D-11.
 - 27] R. Inoue(北大), H. Takayanagi, M. Jo, T. Akazaki, and I. Suemune: “Transport Properties of a Superconductor-Semiconductor Junction with Superlattice Structure” 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), July 25-30, 2010, Seoul, Korea.
 - 28] J.-H. Huh(北大), H. Sato, S. Ito, Y. Idutsu, K. Tanaka, T. Akazaki, and I. Suemune: “Precise Slit-width Control of Niobium Apertures for Superconducting LED” 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC 2010) November 9-12, 2010, Fukuoka, 12D-11-55.
 - 29] 赤崎達志(NTT 物性基礎研), 柴田浩行, 田中和典, 高柳英明: 「MgB₂を用いた超伝導体・半導体接合の作製-MgB₂/n-InGaAs 界面へのAu挿入層効果-」2010年(平成22年)秋季第71回応用物理学関係連合講演会(平成22年9月14日-17日, 長崎大学) 14a-P3-19.
 - 30] 許 載勲, Claus Hermannstaedter, 赤羽 浩一, Nahid A Jahan, 和田 雅樹, 笹

- 倉弘理, 飯島 仁史, 井田 惣太郎, 佐々木 雅英, 末宗 幾夫:「1.5 μ m 帯単一光子源に向けたナノコーン構造の作製」2010 年(平成 22 年)秋季第 71 回応用物理学関係連合講演会(平成 22 年 10 月 14 日- 17 日, 長崎大学) 17a-P13-10, p. 14-124.
- 31] 桜井 誠也, 小田島 聡, 末宗 幾夫:「InAs 量子ドット形状異方性の GaAs 埋め込みプロセス依存性」2010 年(平成 22 年)秋季第 71 回応用物理学関係連合講演会(平成 22 年 10 月 14 日- 17 日, 長崎大学) 17a-P13-11, p. 14-125.
- 32] 飯島 仁史, 宮村 壮太, 中島 秀朗, 井田 惣太郎, 小田島 聡, 熊野 英和, 西尾 崇, 松尾 保孝, 居城 邦治, 末宗 幾夫:「剥離層を用いた金属埋め込み半導体ピラー構造の作製」2010 年(平成 22 年)秋季第 71 回応用物理学関係連合講演会(平成 22 年 10 月 14 日- 17 日, 長崎大学) 17a-P13-12, p. 14-126.
- 33] R. Inoue, H. Takayanagi, M. Jo, T. Akazaki, and I. Suemune: “Transport Properties of a Superconductor-Semiconductor Junction with Superlattice Structure” 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), July 25-30, 2010, Seoul, Korea.
- 34] J.-H. Huh, H. Sato, S. Ito, Y. Idutsu, K. Tanaka, T. Akazaki, and I. Suemune: “Precise Slit-width Control of Niobium Apertures for Superconducting LED” 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC 2010) November 9-12, 2010, Fukuoka, 12D-11-55.

(4)知財出願

①国内出願 (4 件)

- 1] 発明の名称:「半導体発光素子」、発明者:末宗幾夫, 赤崎達志, 田中和典、
出願人:浜松ホトニクス株式会社, 国立大学法人北海道大学, NTT 物性科学基礎研究所、
出願日:平成18(2006)年6月21日、出願番号:特願2006-171184
(半導体量子ドット領域を含んだ半導体層に超伝導電極を形成したことを特徴とする半導体発光素子)
- 2] 発明の名称:「半導体発光素子」 発明者:末宗幾夫 田中和典
出願人:浜松ホトニクス株式会社, 国立大学法人北海道大学
出願日:平成19(2007)年7月17日、出願番号:特願2007-185948
(量子ドットを含んだ JFET 構造超伝導発光素子)
- 3] 発明の名称:「半導体発光素子」 発明者:末宗幾夫、田中和典、井筒康洋
出願人:浜松ホトニクス株式会社, 国立大学法人北海道大学
出願日:平成21(2009)年1月28日、出願番号:特願2009-016212
(超伝導電極からクーパー対を注入し、量子もつれ合い光子対を生成する超伝導発光素子)
- 4] 発明の名称:「半導体結合超伝導三端子素子」、発明者:赤崎達志, 柴田浩行、
出願人:日本電信電話株式会社、出願日:2010年8月10日、出願番号:特願2010-179169

②海外出願

該当無し

③その他の知的財産権
該当無し

(5)受賞・報道等

①受賞

- 1] 2009年9月 応用物理学会フェロー（末宗幾夫）
「光半導体と光デバイス応用に関する先駆的研究」
- 2] 林雄二郎、田中和典、赤崎達志、定 昌史、熊野英和、末宗幾夫：
「Superconductor-based Light Emitting Diode: Demonstration of Role of Cooper Pairs in Radiative Recombination Processes」2010年（平成22年）応用物理学会「**優秀論文賞**受賞」

②マスコミ(新聞・TV等)報道

- 2008年1月16日 日刊工業新聞 「北大などが LED 超伝導効果で高効率発光」
- 2008年1月16日 読売新聞 「情報盗まれない光通信へ 北大グループ LED で実証」
- 2008年1月16日 日経産業新聞 「LED 超伝導で光20倍強く 北大など量子暗号通信に応用」
- 2008年4月10日 日経産業新聞 2008年度技術トレンド調査で、北大、浜松ホトニクス、NTT 等の「超伝導による LED の発光増強」が重要成果の一つにリストアップされる。
- 2008年4月21日 日刊工業新聞「研究開発最前線」の特集記事で、「超電導・光工学を融合」として取り上げられる。
- 2010年7月 8日 日経産業新聞 「情報暗号化する新素子 北大など 超伝導・LED 応用」

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

該当無し

②社会還元的な展開活動

- ・ 2008年に得られた「超伝導による LED の発光増強」が日経産業新聞 2008 年度技術トレンド調査で、重要成果の一つとしてリストアップされた。
- ・ 本研究成果をインターネット(URL; <http://nanophoto.es.hokudai.ac.jp/>)で公開し、一般に情報提供している。

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2006.2.27-3.2	International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics	NTT 厚木研究開発センター	約 200 名	NTT チーム、高柳、赤崎主催。メゾスコピック超伝導とスピントロニクスに関する国際会議(共催)
2006.12.12-13	Workshop on Photons and Spins: Their Generation, Manipulation, and Detection	北海道大学 創成科学研究棟	約 70 名	CREST チーム主催の国際ワークショップ
2009.7.28-29	International Workshop on Photons and Spins in Nanostructures	北海道札幌市 北海道大学 創成科学研究棟大会議室	90 名	ナノ構造における光子、スピンに関する最新の研究成果について、海外の著名な研究者7名を含む17件の招待講演からなるワークショップを主催した。

§ 7 結び

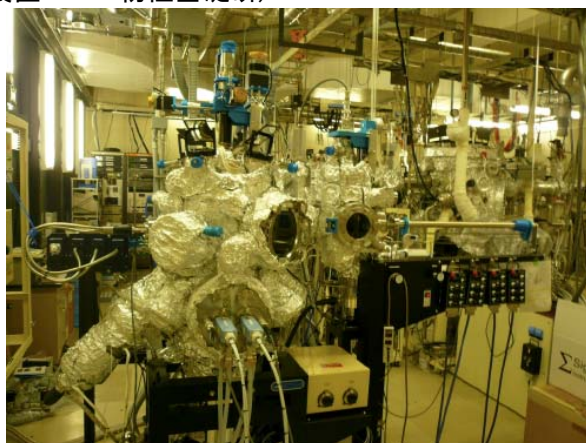
このプロジェクトではそれぞれ得意分野の異なる研究グループがチームを組むことにより、それぞれのチームだけではなし得ないすばらしい成果を挙げることができた。NTT グループの超伝導技術とこれまでの研究実績、浜松ホトニクスグループの高度で実用的な光デバイス技術、東京理科大グループと物材機構グループによる超伝導/半導体界面における超伝導近接効果の評価技術とこれまでの研究実績、これと北大グループにおける微細加工技術と量子ドットを中心とした微小領域光学評価技術と光子相関測定に関するこれまでの研究実績、いずれが欠けても超伝導とフォトニクスとにまたがる境界領域での成果をあげることができなかった。クーパー対を形成するという電子間の強い相関を持たせることによって、半導体における発光過程がかくも大きく変化するとは、予想はしていても実際に観測した際には大きな驚きであった。これは新しい発光原理の開拓であり、今後、量子もつれ光子対の同時発生方法だけにとどまらず、物理における新現象として広く基礎物理の広がりを期待する。

研究チームはそれぞれ札幌、東京、筑波、浜松と離れた場所で活動しているため、これを補うチームミーティングを頻繁に行って、共同研究の実績を上げていった。またそれぞれのグループで博士研究員、大学院生等が研究遂行に携わり、研究成果を糧に企業の研究所へ奉職、大学研究職への奉職など若手研究者の育成にも寄与した。

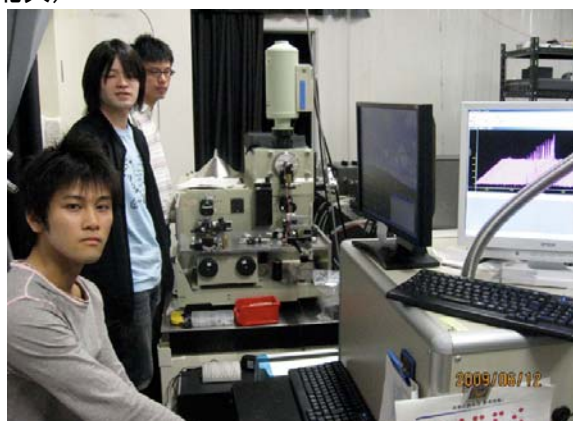
このようなチームを組んで共同研究を進めることができる戦略的創造研究推進事業は、すばらしいシステムであり、今後さらに充実させていくべきだと思う。

主な研究設備等の写真

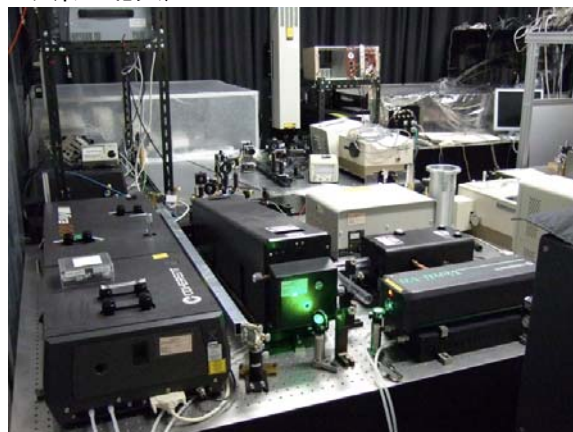
(MgB_2 超伝導薄膜形成装置 : NTT 物性基礎研)



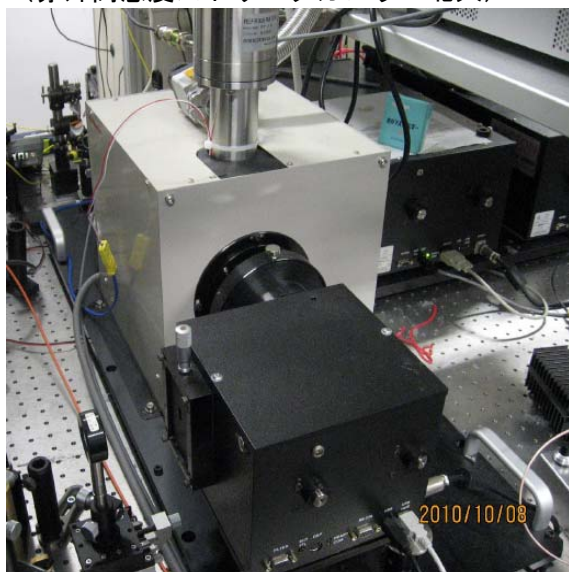
(トリプル分光器 : 北大)



(チタンサファイアレーザ系 : 北大)



(赤外高感度ストリークカメラ：北大)



(300mK 電子冷凍機：北大)



研究メンバーの集合写真

(北大グループ)



(浜松ホトニクスグループ)



(NTT 物性基礎研グループ)



柴田 浩行

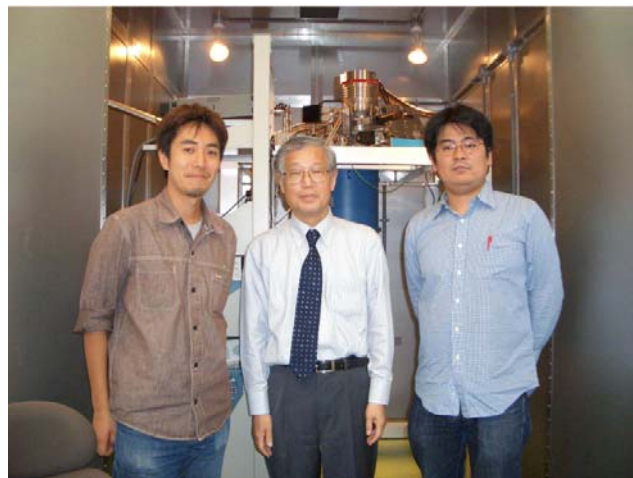


羽柴 秀臣
(2008.3. 31まで)



赤崎 達志

(東京理科大・物質材料研究機構グループ)



(チームミーティング)

2006 年 6 月



2007 年 1 月



2007 年 1 月



2007 年 8 月



2008 年 2 月



2008 年 8 月



(デルフト工科大学との国際共同研究)

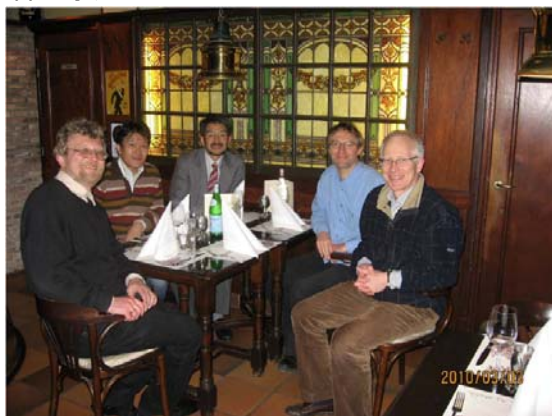
2009 年 3 月 Nika Akopian 氏との北大での共同研究



2009 年 9 月 Val Zwiller 氏との北大での共同研究



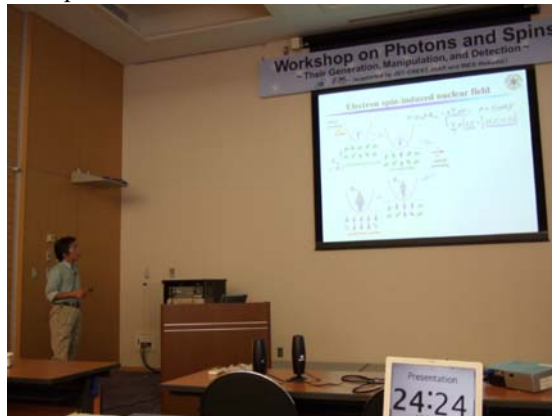
2010 年 3 月 (デルフト工科大学)



(国際ワークショップ)

2006 年 12 月

(Workshop on Photons and Spins – Their Generation, Manipulation, and Detection –)



2009 年 7 月 (International Workshop on Photons and Spins in Nanostructures)



