

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」  
平成 17 年度採択研究代表者

末宗 幾夫

北海道大学電子科学研究所 教授

## 超伝導フォトニクスの創成とその応用

### 1. 研究実施の概要

現在量子情報処理ネットワークに関する研究が活潑に進められており、固体量子ビットの一つの有力候補が超伝導量子ビットである。しかしこれまで超伝導と情報伝送媒体としてのフォトニクスをつなぐ境界領域の科学的、技術的な基盤はほとんど構築されていない。本研究の目標は、電子クーパ対の大きなコヒーレント体積による振動子強度の増強と、半導体量子ドットの離散準位によるパウリの排他律を使った、On demand で一度に単一の量子もつれ合い光子対を発生するダイオード光源の実現と、この超伝導とフォトニクスをつなぐ基盤技術の開発により、超伝導とフォトニクスの境界領域にまたがる新しい学問分野・技術分野の開拓を進めることである。

今年度北大グループでは、InGaAs 系超伝導発光ダイオードによって、超伝導臨界温度の 8.3K 以下の温度で温度の低下に伴う急激な発光増強を観測した。これは InGaAs 発光層にしみこむ電子クーパ対による発光遷移確率の増大、すなわち、クーパ対による超放射効果を確認した最初の実験である。現在さらにその検証を確実にするために発光寿命の検討を進めている。また単一量子ドットに磁界を印加することなく、 $\sim 85\%$  と高い円偏光度を持つ単一光子発光が可能であることを示した。これは光子の偏光から電子スピンへ、またその逆へ、量子状態を高い効率で変換するプロセスを実現する基礎となる。浜松ホトニクスグループでは、すでに電子クーパ対、正孔クーパ対の注入を示すジョセフソン接合特性が観測できている InGaAs 系を用いて、その発光線幅の尖鋭化に成功し、超伝導発光ダイオードの性能向上の検討を進めた。NTT グループでは、光-超伝導変換の基礎となるジョセフソン接合への光照射効果を検討し、半導体/超伝導界面への影響と、2次元電子ガス層への影響を分離してそのメカニズムを議論することに成功した。またより高い超伝導遷移温度を持つ  $\text{MgB}_2$  の GaAs 基板上への形成と超伝導臨界温度 30K の確認、そのパターンニングによる超伝導発光ダイオードへの応用に関する検討を進めた。東京理科大学グループでは、Nb 超伝導電極と GaAsNSe/GaAs 超格子構造界面において、マイクロ波照射による微

分抵抗の振動的な振る舞いを見だし、そのメカニズム解明を進めつつある。全般的にほぼ計画通りに進んでおり、今後超伝導 LED の動作のさらなる確認ともつれあい光子対発生の実現に向けて研究を進めていく。

## 2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

### (研究目的)

現在量子情報処理ネットワークに関する研究が活潑に進められており、固体量子ビットの一つの有力候補が超伝導量子ビットである。しかしこれまで超伝導と情報伝送媒体としてのフォトンクスをつなぐ境界領域の科学的、技術的な基盤はほとんど構築されていない。本研究の目標は、電子クーパ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他律を使った、**On demand** で一度に単一の量子もつれ合い光子対を発生するダイオード光源の実現である。大きなコヒーレント体積を持った電子クーパー対の量子ドットへの近接効果により、発光寿命の短縮ならびに発光量子効率の大幅な増大と、パルス電流励起による量子ドット価電子帯単離散準位に分布する 2 つの正孔との再結合により、パルスあたり 1 対の量子もつれ合い光子対を有効に発生することができる。特に、スピンシーングレット状態であるクーパー対は、通常の量子ドットにおいて大問題となっている励起子分子・励起子の時系列発光で生じる交換相互作用とこれによる励起子状態のエネルギー分裂の影響を受けず、量子もつれ合い光子対生成が可能である[論文 3]。この超伝導とフォトンクスをつなぐ基盤技術を開発することにより、量子情報処理の基幹デバイスとしての応用、超伝導とフォト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。

### (研究実施の方法と結果)

#### A. 北海道大学グループ

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[論文 1] が最適である。今年度、GaAsSb/GaAs 系ヘテロ構造を用い、正孔を量子閉じ込めしながら、電子の分布を制御して **Type-I** と **Type-II** を切り替えることに成功した。

開放型 InAs 量子ドットは超伝導電極と直接接合させることができること、光ファイバー通信の 1.55 $\mu\text{m}$  波長帯での発光が比較的容易に得られる特徴を持つが、表面再結合のためにその発光効率が低い課題がある。今年度、ドット形成前の半導体表面を原子レベルで平坦化することにより、開放型 InAs 量子ドットの発光が顕著に増大することを見いだした。

さらに、この InAs 量子ドットに Nb 電極を形成することにより、超伝導臨界温度以下と思われる（まだ温度の絶対値に関しては確定していない）低温領域で、温度の低下に伴う発光増強を観測した（2008年5月、量子ドット国際会議で口頭発表予定）。

浜松ホトニクスで試作した InGaAs 系超伝導発光ダイオードの光学評価を行った。発光ダイオードの表面に Nb 超伝導電極をつけ、その一部に幅 100nm 程度の開口を設け、この部分から InGaAs 発光層からのエレクトロルミネッセンスを観測した。その結果、図 1、図 2 に示すように超伝導臨界温度の 8.3K 以下で温度の低下に伴う急激な発光増強を観測した[論文 2, 7]。これはニオブ電極が臨界温度以下で超伝導状態になり、そこから InGaAs 発光層にしみこむ電子クーパ対が発光遷移確率を増大する、いわゆる「クーパ対の超放射効果」を初めて確認したことになる。

現在北大グループで単一光子発生を確認している InAlAs 系を用いて、光子 Qubit を扱うために必要な円偏光励起、円偏光発光等を検討し、量子ドット内に励起された電子スピン状態の検討を進めた。今年度、正の荷電励起子より光学フォノンエネルギーだけ高いエネルギー位置を準共鳴励起することにより、円偏光率が 85% と去年の 65% よりもさらに高い円偏光率を持つ発光の観測に成功した[論文 4, 6]。これは、入射光子の円偏光を電子スピン状態へ変換し、そのスピン状態を高い確率で同じ円偏光の光子へ変換できることを示しており、現在その詳細を検討している。

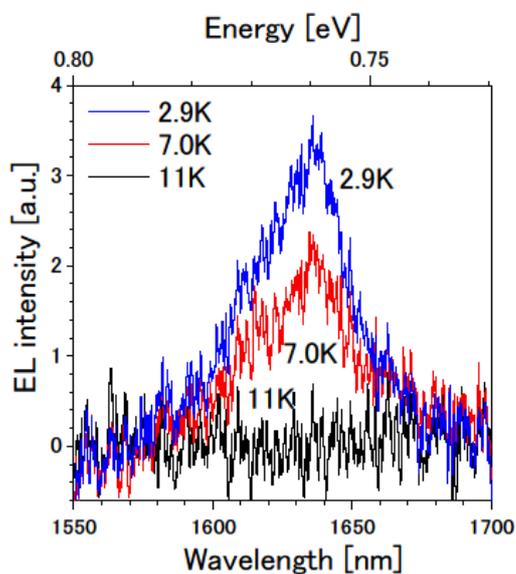


図 1. Nb 電極/n-InGaAs バリア/n-InGaAs 量子井戸/p-InP 基板/Au 電極を持つ発光ダイオードの表面 Nb 電極に幅約 100nm の細長い開口を形成。この開口部分から、InGaAs 量子井戸の発光を観測した。6K~8.7K のわずかの温度変化で、発光スペクトルの強度が大きく変化する。

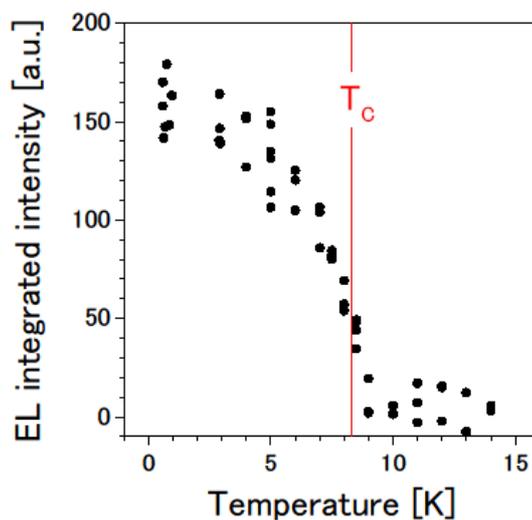


図 2. 図 1 で測定したエレクトロルミネッセンス積分強度を温度に対してプロットした図。Nb 電極が超伝導体に転移する臨界温度 8.3K より低い温度で、発光強度の急激な増加が観測された。

## B. 浜松ホトニクス株式会社グループ

クーパー対の注入に適した超伝導 LED 構造を InP/InGaAs p-n 接合にて検討を進めた。H18 年度に作製した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 組成の違い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の幅が広がる問題があった。そこで、H19 年度においては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従来のダブルヘテロ構造よりもスペクトル幅の狭い発光特性を示すデバイスを作成することに取り組んだ。シングルヘテロのデバイス構造を図3に示した。p-InP 基板上に3層構造の p-n 接合が形成されている。コンタクト層の n-InGaAs 上に蒸着された 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 1.55 $\mu\text{m}$  帯域にあり、10 $\mu\text{A}$  の低電流においても発光を確認することができる。発光スペクトルの半値全幅は注入電流 100 $\mu\text{A}$  時で 57nm とダブルヘテロ構造で確認された 86nm と比較すると 2/3 程度狭くなっている。

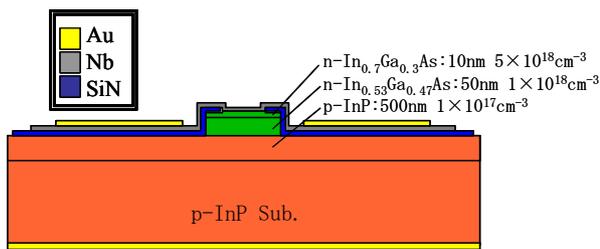


図 3 : InP/InGaAs p-n 接合デバイス構造

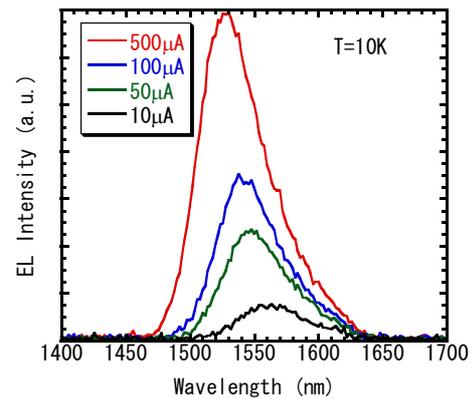


図 4 : 発光特性

## C. 日本電信電話株式会社グループ

超伝導体/半導体(S/Sm)接合と光との相互作用についての知見を得るため、S/Sm 接合への光照射効果について検討を行った。昨年度、半導体として In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As チャンネル層中に形成された二次元電子ガス(2DEG)を用いた S/Sm/S 接合を作製し、波長 1.3 $\mu\text{m}$  の半導体レーザーを照射することにより、Josephson 電流が増大することを報告した。今年度は、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ることにより、光照射による超伝導特性改善の原因を明らかにした。

図5に、本接合の模式図を示す。ソース・ドレイン電極の Nb は、In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As チャンネル層中に形成された二次元電子ガス (2DEG) 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6に、1.8KでのS/Sm/S接合のゼロバイアス微分抵抗  $R_{N0}$  および 2DEG のシート抵抗  $R_{2DEG}$  の光照射 (レーザー強度  $P \sim 25 \mu\text{W}$ ) 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 [論文5]。この結果から、光照射による  $R_{N0}$ の改善は S/Sm 界面バリアの低減に起因することが分かる。この界面バリアの低減は、S/Sm 界面近傍に存在するトラップ準位から電子が光励起されたためと考えられる。このことは、多重 Andreev 反射によるサブハーモニックギャップ構造のフィッティングにより見積もった界面バリアの大きさ  $Z$ の低下とも一致している。

また、素子の動作温度の上昇を目指し、高い  $T_c$ を有する  $MgB_2$ を超伝導電極に用いることを可能にするため、昨年度導入した電子ビーム共蒸着法を用いた  $MgB_2$ 超伝導薄膜形成装置を用いて、半導体基板上への良質な  $MgB_2$ 超伝導薄膜の形成方法の確立を行った。成長温度  $250^\circ\text{C}$ において、GaAs 基板上に約  $30\text{K}$ の超伝導臨界温度を持つ  $MgB_2$ 膜の形成に成功した。来年度は、サブミクロンサイズの  $MgB_2$ 超伝導接合の実現を目指す。

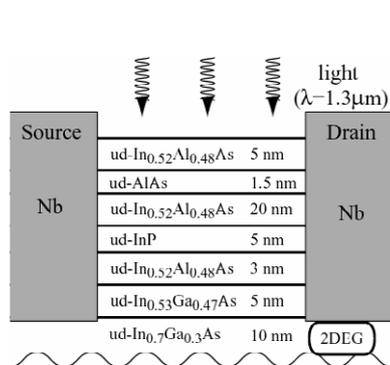


図5 S/Sm/S 接合構造 (模式図、Nb 電極間隔  $L=0.9\mu\text{m}$  (設計値))

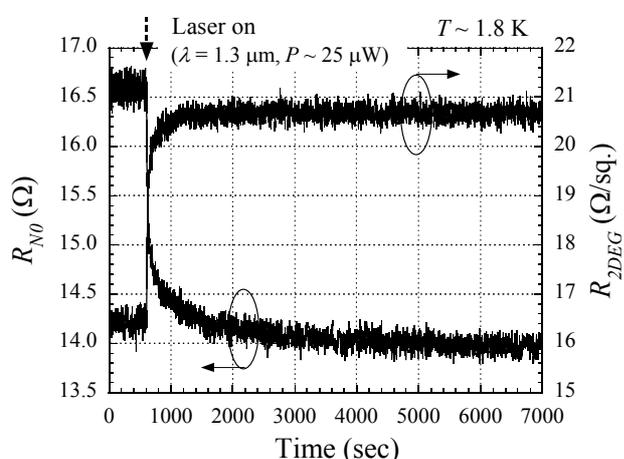


図6 光照射による抵抗の変化

#### D. 東京理科大学グループ

Nb 超伝導電極と  $n^+\text{-GaAsNSe}/n^+\text{-InGaAs}$  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電気特性を再び測定した。超格子層は、 $2\text{ nm}$ の  $\text{GaAsNSe}/\text{GaAs}$  層 $\times 2$ と  $1\text{ nm}$ の  $\text{GaAsNSe}/\text{GaAs}$  層 $\times 3$ から成る (図7)。Nb 電極と  $n\text{-GaAs}$  基板の間にこのような超格子を挿入した理由は、Nb 電極中のクーパ対の半導体への浸入確率を上げるためである。 $0.3\text{K}$ における今回の測定でも、微分抵抗—バイアス電圧特性は図8 (a)に示すように、原点近傍で小さな窪み構造を示すのみで、アンドレーエフ反射確率は小さいことがわかった。

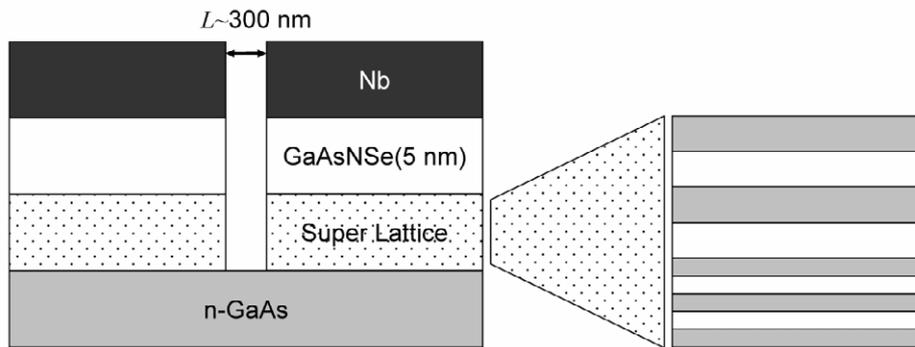


図7. 接合の模式的断面構造

しかし、温度 0.3 K において 1.715 GHz のマイクロ波を照射しながら微分抵抗を測定すると、図 8 (b) のように 3 mV 以下の電圧領域で微分抵抗の振動が観測された。このような振動的な振る舞いは  $1.715 \pm 0.010$  GHz という極めて狭い波長域のマイクロ波照射時のみ見られており、3 mV という電圧が Nb の超伝導ギャップに一致していることとも考え合わせて、我々はこの振動が接合界面におけるアンドレーエフ反射確率の変調に関連していると考えている。同じような振動現象は、1GHz 近傍でも観測された[論文 10]。

超格子構造における光学フォノンのエネルギーは~1.6 GHz と見積もられ、照射したマイクロ波によって、この光学フォノンを励起したと考えられる。このエネルギーは測定結果の 1.75GHz とオーダーで一致する。しかし、励起された光学フォノンが、なぜアンドレーエフ反射を変調するのか、我々の発見したこの新現象がどのような物理的意味を持つのか、そのメカニズム解明と共に今後の大きな課題である。今後は同構造の別の素子で再現性を確認するとともに、より定量的な測定を行っていき、そのメカニズム解明を行う必要がある。

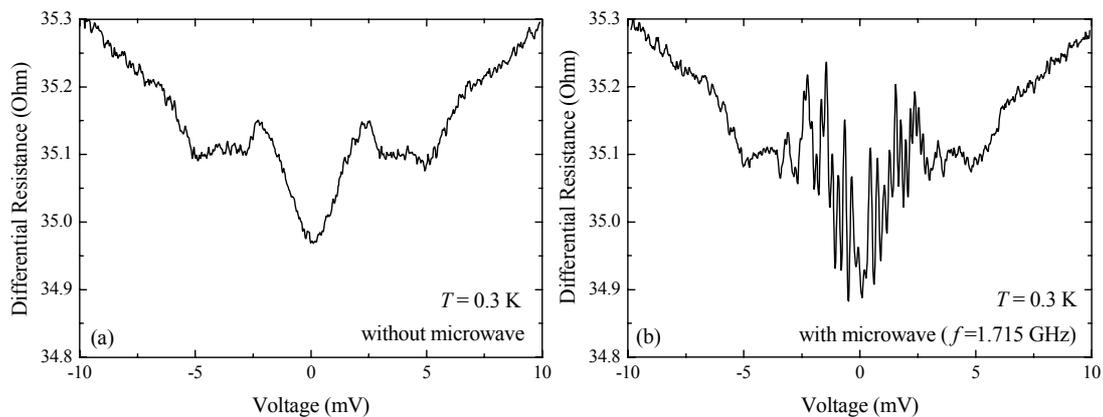


図8. (a) 素子の微分抵抗—バイアス電圧特性。

(b) 1.715 GHz のマイクロ波を照射したときの同特性。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「北海道大学」グループ

①研究分担グループ長:末宗 幾夫(北海道大学、教授)

②研究項目

1. 1.55 $\mu\text{m}$  光ファイバー通信波長帯での, GaSb 量子ドットを中心とした type-II 量子ドットの製作
2. 開放型 InAs 量子ドットの発光効率改善と超伝導電極の形成
3. InAlAs 系量子ドットを用いた光子相関測定評価
4.  $n^+$ -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
5. Nb/InGaAs 超伝導発光ダイオードの評価

#### (2)「浜松ホトニクス株式会社」グループ

①研究分担グループ長:田中 和典(浜松ホトニクス株式会社中央研究所、部員)

②研究項目

1. InP/InGaAs p-n 接合を用いた超伝導 LED の検討

#### (3)「日本電信電話株式会社」グループ

①研究分担グループ長:赤崎 達志(日本電信電話株式会社物性科学基礎研究所、グループリーダー)

②研究項目

1. 半導体上への Nb 超伝導電極の形成
2.  $n^+$ -GaAsNSe オーミックコンタクト層を用いた超伝導電極と半導体へのオーミックコンタクトの検討
3. Nb 超伝導電極を用いた, 電子クーパー対注入の検討
4. 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、 $\text{MgB}_2$  超伝導薄膜形成方法の確立
6. 超伝導体・半導体接合への光照射効果

#### (4)「東京理科大学」グループ

①研究分担グループ長:高柳 英明(東京理科大学、教授)

②研究項目

1. Nb 超伝導電極と  $n^+$ -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. MgB<sub>2</sub> 超伝導薄膜の特性評価と MgB<sub>2</sub>-半導体接合の特性解明。
4. 超伝導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。
5. 超伝導量子ビットとフォトニクス系との結合の基礎検討。

#### 4. 研究成果の発表等

##### (1) 論文発表(原著論文)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Tatsushi Akazaki, Masumi Yamaguchi, Kouhei Tsumura, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, “Negative photoconductivity in In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As heterostructures”, Physica E 40, p.1292 (2008).
- [6] 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 (in press)
- [7] Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, H. Kumano, and I. Suemune: “Luminescence Observed from A Junction Field-Effect Transistor with Nb/n-InGaAs/Nb Junction” phys. stat. sol. (in press)
- [8] Y.L. Zhong, H. Nakano, T. Akazaki, K. Kanzaki, Y. Kobayashib and H. Takayanagi, “Superconducting proximity correction to conductance and magnetoconductance fluctuations in random network carbon nanotubes, Physica E 40, pp.169–174 (2007).

- [9] Y.L. Zhong, H. Nakano, T. Akazaki, K. Kanzaki, Y. Kobayashi and H. Takayanagi, “Superconducting proximity effect and reentrant behaviors in random network carbon nanotubes” to be published in Physica C.
- [10] R Inoue, H Takayanagi, M Jo, T Akazaki, K Tanaka and I Suemune, “Differential resistance oscillations with microwave irradiation in a superconductor-semiconductor junction”, to be published in J. of Physics: Conf. Series.

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数: 1 件 (CREST 研究期間累積件数: 2 件)