

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2005～2009

課題番号：17GS1204

研究課題名（和文）

超高効率量子もつれ光源および検出器の創成と量子もつれ回復プロトコルの研究

研究課題名（英文）

Development of superefficient entangled-photon sources, detectors and entanglement recovery protocol

研究代表者

枝松 圭一 (EDAMATSU KEIICHI)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：10193997

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子もつれ光子の発生、検出、制御とそれを用いた新たな量子情報通信技術の創成を目指し、(1) 擬似位相整合非線形光学素子を用いた、通信波長帯における超高効率量子もつれ光源および光子検出器、(2) バルクおよび微小共振器構造半導体を用いた量子もつれ光子対の効率的な発生および制御方法、(3) 長距離伝送に伴う量子もつれの低下を補うための、量子もつれ回復プロトコル、に関する研究開発を行った。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the development of (1) superefficient entangled photon sources and photon detectors utilizing quasi-phase matched nonlinear optical devices, (2) efficient methods for entangled photon generation in bulk semiconductors and microcavities, and (3) novel entanglement recovery protocols.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	80,100,000	24,030,000	104,130,000
2006 年度	87,300,000	26,190,000	113,490,000
2007 年度	86,800,000	26,040,000	112,840,000
2008 年度	88,000,000	26,400,000	114,400,000
2009 年度	39,900,000	11,970,000	51,870,000
総計	382,100,000	114,630,000	496,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学／原子・分子・量子エレクトロニクス，物性 I

キーワード：量子光学，量子情報，光物性

## 1. 研究開始当初の背景

近年、量子力学の原理を直接応用した量子情報処理や量子情報通信技術の発展が著しい。これらの技術の中核となるのが「量子もつれ(entanglement)」と呼ばれる、量子力学的多粒子系がもつ非局所的性質である。特に、非線形光学効果（パラメトリック変換等）を用いた光子の対生成過程は、2光子間の良質な量子もつれ状態を作り出すことができ、量子情報通信関連の原理検証実験に頻繁に用

いられている。しかしながら、量子情報通信技術の実用化とさらなる発展のためには、(1) 通信波長帯での量子もつれ光子の生成・光子検出技術の確立、(2) 半導体を用いた量子もつれ光子対生成技術の開発、(3) 長距離伝送に伴う量子情報の品質低下を補い得る、ロバストな量子情報通信プロトコルの開発、が必要不可欠であり、その早急かつ戦略的な

研究開発が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、量子もつれ光子の発生、検出、制御とそれを用いた新たな量子情報通信技術の創成を目指し、

- (1) 通信波長帯における超高効率量子もつれ光源および光子検出器の実現、
- (2) 半導体を用いた量子もつれ光子対の効率的な発生および制御方法の開発、
- (3) 長距離伝送に伴う量子通信の品質低下を補うための、量子もつれ回復プロトコルの開発・実証、

の3点を柱とした研究開発を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 通信波長帯における超高効率量子もつれ光源および光子検出器の開発

独自の設計による励起光源および擬似位相整合非線形光学素子を作製し、パラメトリック下方変換による高効率な量子もつれ光子対発生、和周波発生による高速かつ高い効率をもった光子検出法を研究する。

### (2) バルクおよび微小共振器構造半導体を用いた量子もつれ光子対の効率的な発生および制御方法の開発

我々はこれまでに、半導体を用いた量子もつれ光子の発生に世界で初めて成功している。本研究ではそれをさらに高度化して、純度および発生効率の高い量子もつれ光子発生素子の実現を目指し、材料開発、光学測定、物性理論の各グループが密接に協力して研究を進める。

### (3) 長距離伝送に伴う量子もつれの低下を補うための、量子もつれ回復プロトコルの開発・実証

長距離伝送では量子的情報の劣化が避けられないため、それを補う量子情報回復プロトコルが種々提案されている。本研究で開発する超高効率な量子もつれ光源および検出器を用いた、効率的な量子もつれ回復プロト

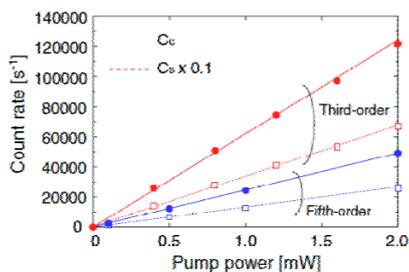


図 1. 開発した擬似位相整合素子の光子対生成効率.  $C_c$ : 2光子同時計数率,  $C_s$ : 1光子計数率.

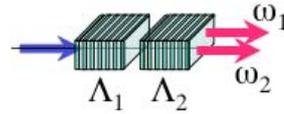


図 2. 2周期擬似位相整合素子の概念図.

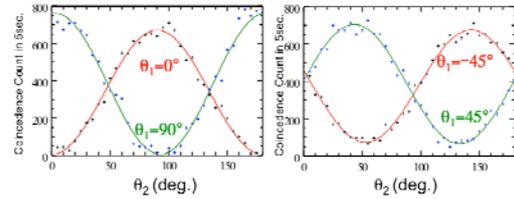


図 3. 2周期擬似位相整合素子から発生した光子対の偏光相関.

コルの提案とその実験的検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 通信波長帯における超高効率量子もつれ光源および光子検出器の開発

#### ① 高効率擬似位相整合パラメトリック下方変換素子の開発

励起光源となる柔軟性の高いレーザパルス光源を開発するとともに、量子もつれ光子発生用の Type-2 擬似位相整合周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)素子を作製した。この素子のパラメトリック下方変換効率は、従来報告されている中でも最高水準の効率を達成した (図 1)。

次に、2種の分極反転周期をもつ擬似位相整合素子を直列に結合した系 (2周期擬似位相整合素子, 図 2) を用いた新たな量子もつれ光源を開発した。この光源は、発生する光子対の周波数 (波長) が非縮退となり、目的によって偏光あるいは周波数のいずれかにに関して量子もつれを保持させることができる。偏光相関測定 (図 3) および量子干渉測定を用いて上記の性質を確認した。

#### ② 高効率アップコンバージョン検出器の開発

通信波長帯の光子を可視光帯の光子に高効率でアップコンバージョン(UC)検出するための光源および擬似位相整合素子を開発した。内部変換効率が 96%, 可視光検出器までを含めた全体の検出効率として 19%を得た。また、この UC 検出器の暗計数が、従来のラマン過程によるものではなく、UC 用擬似位相整合素子内での光子対生成に起因することを示した。さらに、アップコンバージョンを行った光子対が 2光子としての非古典的量子干渉を示すことも実証した。

#### ③ 拡張位相整合による周波数制御量子もつれ状態の生成

パラメトリック下方変換における従来の

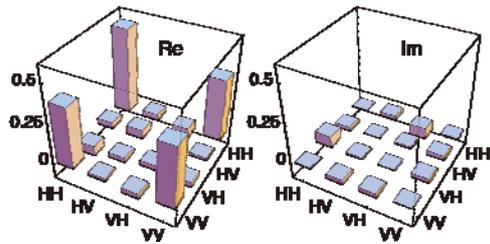


図4. CuCl 結晶を用いた励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱によって発生した光子対の2光子偏光状態の密度行列.

位相整合に加え、その分散も利用することで、通信波長帯において互いに周波数相関をもたない光子対を発生する新たな技術を開発した. この技術は、通信波長帯における効率的な多光子間量子もつれの生成に応用可能である.

(2) バルクおよび微小共振器構造半導体を用いた量子もつれ光子対の効率的な発生および制御方法の開発

① バルク半導体を用いた高純度量子もつれ光子対発生

CuCl バルク結晶を用いた励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱(RHPS)による量子もつれ光子対生成技術に、高繰り返しレーザーの使用などの改良を加え、目的の光子対以外の光子の寄与を大幅に小さくして、高純度の量子もつれをもつ光子対を発生することに成功した. また、トモグラフィ測定によって、発生した光子対の2光子偏光状態の密度行列を求め、生成した光子対が Bell の不等式を破る高純度の量子もつれ状態になっていることを確認した(図4). この成果により、量子情報通信に直接応用可能な量子もつれ光子を発生する半導体デバイスへの道を拓いた.

② 半導体薄膜および微小共振器の作製と光学評価

量子もつれ光子対生成の起源となるRHPSを観測するために、銅ハライド(CuCl, CuI), ZnO, GaN, PbI<sub>2</sub>などの励起子分子束縛エネルギーが大きいワイドギャップ半導体を対象に、高品位薄膜結晶試料の作製と励起子光学応答に関する研究を行った. 主要な成果を以下に述べる.

(a) CuCl は、バルク結晶を対象に、研究代表者の枝松らが RHPS による量子もつれ光子対生成を初めて検証した物質である. デバイス応用の観点では、薄膜構造で実現することが望ましい. しかしながら、CuCl は、潮解性を有する物質で不安定であり、単なる薄膜構造では劣化するという問題点がある. そこで、CuCl 薄膜を c 面 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上に超高真空蒸着法により作製した後、表面保護層と

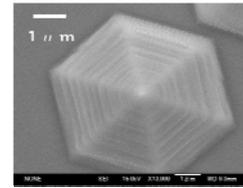


図5. 自己組織化成長した ZnO マイクロピラミッドの SEM 写真.

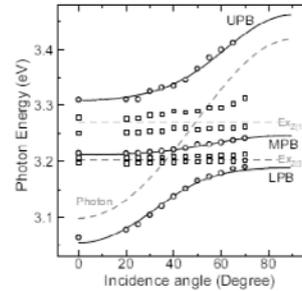


図6. CuCl 微小共振器の共振器ポラリトン分散の実験結果と解析結果(実線).

して SiO<sub>2</sub> を rf マグネトロンスパッタリング法で製膜するというのを考案した. SiO<sub>2</sub> (500 nm)/ CuCl (3.5 μm) 薄膜構造において、SiO<sub>2</sub> のパッシベーションによっても CuCl が全く劣化しないことを X 線構造解析と光学測定から確認し、RHPS スペクトルを明確に観測した. これによって、SiO<sub>2</sub>/CuCl 薄膜構造が、量子もつれ光子対生成の薄膜デバイスとなることが期待される.

(b) rf マグネトロンスパッタリング法による高品位 ZnO 結晶薄膜の作製に取り組み、酸素雰囲気での基板温度の高温化(650°C程度)と成長速度の最適化、及び、低温バッファ層の導入により、従来のスパッタ法では困難とされていた高品位 ZnO 結晶薄膜の作製に成功した. さらに、RHPS の観測を目的として、励起子分子 2 光子共鳴励起を行うために数 mm オーダーの厚膜を作製した際に、ZnO マイクロピラミッド構造が自己組織化成長し(図5)、そのマイクロピラミッド構造が微小共振器として作用する可能性を見出した.

さらに、より高品位な ZnO 薄膜を作製するために、レーザーアブレーション装置を導入し、最適成長条件を確立した.

次に、分布ブラッグ反射鏡(DBR)型微小共振器の作製とその光学評価を中心に研究を展開した. 微小共振器の活性層の物質としては、励起子安定性の観点から、CuCl と ZnO を採用した. 研究に着手した当時、これらの物質の微小共振器は、世界的にも作製に成功していなかった. 微小共振器を作製する背景には、微小共振器を利用することで、高効率量子もつれ光子対生成が期待されるという

理論グループによる提案がある。主要な成果を以下に述べる。

(c)  $\text{PbBr}_2/\text{PbF}_2$  多層膜を DBR とした  $\text{CuCl}$  微小共振器の作製に成功した。作製においては、多元超高真空蒸着法による一貫成長を行った。角度分解反射スペクトルの精密測定から、キャビティポラリトン分散を実験的に決定し、現象論的  $3 \times 3$  ハミルトニアンを用いて解析した (図 6)。光子、 $Z_3$  励起子、 $Z_{12}$  励起子の 3 つの結合モード (キャビティポラリトン) が明確に観測できていることが明らかである。さらに、真空ラビ分裂は、励起子振動子強度の大きさを反映して従来の  $\text{GaAs}$  系と比べて桁違いに大きく、 $Z_3$  励起子で  $97 \text{ meV}$ 、 $Z_{12}$  励起子で  $162 \text{ meV}$  となった。このような巨大ラビ分裂の実現は、半導体物質において初めての成果である。

(d) 上において微小共振器の作製に成功したことを述べたが、デバイス応用の観点では、DBR である  $\text{PbBr}_2/\text{PbF}_2$  多層膜が経時劣化するという問題点が明らかとなった。それを解決するために、DBR に酸化物で安定な  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  多層膜を採用した。 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  多層膜は、rf マグネトロンスパッタリング法を用いて作製した。結果として、極めて高品位な  $\text{CuCl}$  微小共振器の作製に成功し、かつ、デバイス応用で問題となる経時劣化が生じないことを確認した。

(e) 理論グループから提案された微小共振器を用いた高効率量子もつれ光子対生成のモデルに基づいて、 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  DBR 型  $\text{CuCl}$  微小共振器の系統的な試料作製とデータ解析を行った。このモデルにおいて、ラビ分裂エネルギーが重要なパラメータであり、その精密制御を課題とした。 $\text{CuCl}$  活性層厚を系統的に変化させて、ラビ分裂エネルギーの精密制御を実証し、高効率量子もつれ光子対生成が期待できる微小共振器の作製に成功した。

(f) 広い応用が期待できる  $\text{ZnO}$  を活性層とした  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  DBR 型  $\text{ZnO}$  微小共振器の作製に成功した (レーザーアブレーション法と rf マグネトロンスパッタ法の複合方式)。さらに、キャビティポラリトンの解析を行い、これまで明確でなかった特徴的なポラリトンモードを明らかにした。

### ③ 半導体を用いた高効率量子もつれ光子対発生理論

(a)  $\text{CuCl}$  薄膜からの RHPS によるもつれ光子対について、効率 (散乱光強度/入射光強度) に関しては膜厚数  $100 \text{ nm}$  において最適条件が存在することが分かった。また、生成効率と SN 比の試料構造依存性を理論的に調べた。特に、膜厚が数十~数百  $\text{nm}$  のクロスオーバー領域の薄膜では、閉じ込められた励起子ポラリトンの性質を用いて、生成光子の放出角、波数、偏光などが高い自由度で

制御できることを示した。さらに、励起子超放射現象により、非常に高品質な量子もつれ光子対が得られること、半導体多層膜共振器により、その品質を保ったまま生成効率を高めることが可能であることを明らかにした。

(b) Biexcitonic Cavity QED の特徴は励起子分子の束縛エネルギーと Rabi 分裂が同等になり励起子分子と共振器光子の相互作用が強くなる際に現れる。この条件において、励起子分子と共振器モードの光子を含む状態がほぼ同等に重ね合わせられている 2 粒子励起状態を共鳴励起すれば極めて高い効率でもつれ光子対が生成できることが明らかになった。またドットの場合には励起子分子は必ずしも本質的でなく、右回り、左回りの円偏光と相互作用する励起子準位による V 型準位系から生じる結合準位構造を利用することにより生成効率の顕著な増大効果が得られることも分かった。またこの場合には、励起光の偏光と周波数の選択により 4 つの Bell 状態の全てが同じ共振器系から生成可能であることを明らかにした。

(c) III-V 系半導体など束縛が浅い場合には散乱 2 励起子状態の寄与が重要になる。このような場合を解析するために束縛状態と散乱状態が一つの完全系の中で共存するモデルを用い、共振器中薄膜からのもつれ光子対生成を研究した。その結果、散乱-束縛状態間のインタープレイにより、共振器効果により著しい生成効率増強が得られる条件が、離調や出射角、Rabi 分裂等に敏感に依存するようになり、高効率デバイスを得るための構造デザインが重要であることが明らかになった。

(d) 平板共振器における共振器 QED パラメータの決定について、平板型共振器の場合には入射ビーム形状を自由に選択できるため、パラメーター ( $g, \kappa, \gamma$ ) は入射ビームの断面形状の関数となる事を明らかにした。また、パラメーター ( $g, \kappa, \gamma$ ) を入射ビームの断面形状の関数として与える公式を導出し、さらに散逸に相当する  $\gamma$  を零にするビーム形状の存在を指摘した。

(e) 本グループの過去の仕事 (PRL 93 (2004) 173601) において、半古典理論の結果から二光子間の非線形光学効果を“抽出”する方法を開発していたが、この方法の適用範囲は同一光子間非線形効果 (self-Kerr 効果) の評価に限られていた。そこで本研究で新たに、偏光の異なる 2 光子間に現れる非線形効果 (cross-Kerr 効果) に適用可能な公式を開発し、更に、self-Kerr 効果と cross-Kerr 効果の中間状況も扱えるような一般化に成功した。

(f) 二光子間の非線形光学効果は、共振器中に原子が 1 つ存在する場合に、光子の波動関数を制御することで最大の非線形が得られることが分かったが、その一方で原子の数

が増える系が非調和性を失うことで非線形性が損なわれることも明らかになった。そこで、第一励起状態への遷移が禁制、第一と第二励起状態間が許容で非調和性の大きな3準位系が導入された系を考えた。共振器のQ値、非調和パラメータ、及び第一励起状態への遷移の結合定数が最適な場合、超放射状態が寄与し、Nが多量であっても最大非線形が獲得できることが明らかになった。このような条件を満たす系は実在の希土類原子などで実現できることも分かった。

(g) 半古典論を利用した光学過程の全量子力学的な解析手法を、相関を持つ場合を含めた任意の光子パルス対し適用できるように拡張した。これは特に、相関を持った連続多モードの多光子パルスに対する非線形光学過程の効果的な解析を可能とする。また、相関を持った2つの光子パルスの上方変換過程を、光子場の連続多モード性を考慮し、全量子力学的な理論解析を行った。2つの入射光子パルス間が相関・反相関・無相関の場合、パルスの強度分布が同じであっても、異なる出力が得られることを明らかにした。

(h) 理論グループでは共振器中で励起子分子を誘導吸収過程で励起し、共振器がない場合と比べて4、5桁の信号増強が得られることを理論的に明らかにしていたが、さらに上記過程の逆過程を利用して実験検証が格段に容易にできることを提案した。また、そのスキームに対応する試料の作製法、特に重要なパラメータである Rabi 分裂の制御の方法を提案し、実験的に得られた Rabi 分裂の値の変化を精度良く説明することに成功した。

### (3) 長距離伝送に伴う量子もつれの低下を補うための、量子もつれ回復プロトコルの開発・実証

量子もつれ回復には、2組(4光子)以上の量子もつれ光子対が必要である。従来は、量子もつれ光子対の生成効率が低く、6光子の量子もつれを用いた研究を行うためには、非常に長い時間のデータ蓄積が必要とされ、多光子量子もつれの研究を行う上での大きな問題となっていた。本研究では、モードロック Yb レーザーを励起光源に用い、Type-2 位相整合 BBO 結晶によるパラメトリック下方変換を利用した高効率の量子もつれ光源を新たに開発した。この光源を用い、4光子 GHZ 状態の生成とトモグラフィ測定を行い、本光源が多光子量子もつれの生成と評価に特に有効であることを実証した。目下、4光子束縛量子もつれ状態の生成およびその回復プロトコル(さらに2光子を加え、計6光子を用いる)の実証を目指した実験を継続中であり、2010年中の成果達成を見込んでい

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 100 件)

- [1] A. Syouji, S. Nagano, R. Shimizu, K. Suizu, and K. Edamatsu, Efficient up-conversion detection of 1550nm photons using bulk periodically-poled LiNbO<sub>3</sub>, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 040213/1-3 (2010), 査読有
- [2] K. Miyazaki, D. Kim, T. Kawase, T. Kameda, and M. Nakayama, Effects of distributed Bragg reflectors on temporal stability of CuCl microcavities, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 042802/1-4 (2010), 査読有
- [3] S. Nagano, A. Syouji, R. Shimizu, K. Suizu, H. Ito, and K. Edamatsu, Generation of cross-polarized photon pairs via type-II third-order quasi-phase matched parametric down-conversion, *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 050205/1-3 (2009), 査読有
- [4] H. Ajiki, H. Ishihara, and K. Edamatsu, Cavity-assisted generation of entangled photons from a V-type three-level system, *New J. Phys.* **11**, 033033/1-9 (2009), 査読有
- [5] H. Oka, G. Oohata, and H. Ishihara, Efficient generation of energy-tunable entangled photons in a semiconductor microcavity, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 111113/1-3 (2009), 査読有
- [6] A. Ishikawa, and H. Ishihara, Design of Many-Atom Cavity QED Systems for Strong Two-Photon Nonlinearity, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 203602/1-4 (2008), 査読有
- [7] H. Oka and H. Ishihara, Highly efficient generation of entangled photons by controlling cavity bipolariton states, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 170505/1-4 (2008), 査読有
- [8] G. Oohata, T. Nishioka, D. Kim, H. Ishihara, and M. Nakayama, Giant Rabi splitting in a bulk CuCl microcavity, *Phys. Rev. B* **78**, pp.233304/1-4 (2008), 査読有
- [9] M. Nakayama, S. Komura, T. Kawase, and D. Kim, Observation of exciton polaritons in a ZnO microcavity with HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> distributed Bragg reflectors, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, pp. 093705-1--093705-4 (2008), 査読有
- [10] S. Nagano, R. Shimizu, Y. Sugiura, K. Suizu, K. Edamatsu, and H. Ito: 800-nm band cross-polarized photon pair source using type-II parametric down-conversion in periodically poled lithium niobate, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, L1064-L1067 (2007), 査読有
- [11] K. Edamatsu, Entangled photons: generation, observation, and characterization (invited review paper), *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 7175- 7187 (2007), 査読有
- [12] G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu,

Photon polarization entanglement induced by biexciton: experimental evidence for violation of Bell's inequality, Phys. Rev. Lett. **98**, 140503/1-4 (2007), 査読有

- [13] K. Koshino, Novel Method for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons: Use of a Classical Input, Phys. Rev. Lett. **98**, 223902/1-4 (2007), 査読有
- [14] M. Nakayama, T. Nishioka, S. Wakaiki, G. Oohata, K. Mizoguchi, D. Kim, and K. Edamatsu, Observation of biexciton-resonant hyper-parametric scattering in SiO<sub>2</sub>/CuCl layered structures, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L234-L236 (2007), 査読有
- [15] D. Kim, S. Wakaiki, S. Komura, M. Nakayama, Y. Mori, and K. Suzuki, Self-assembled formation of ZnO hexagonal micropyramids with high luminescence efficiency, Appl. Phys. Lett. **90**, 101918/1-3 (2007), 査読有

[学会発表] (計 334 件)

[図書] (計 2 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 8 件)

- [1] 名称: 非縮退偏光量子もつれ光子対生成装置及び非縮退偏光量子もつれ光子対生成方法  
発明者: 枝松圭一, 清水亮介, 長能重博  
権利者: 科学技術振興機構  
種類: 特許  
番号: 特願 2008-014938  
出願年月日: 2008 年 1 月 25 日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 4 件)

- [1] 名称: Photon pair generating device  
発明者: Hiroshi Ajiki, Hajime Ishihara  
権利者: 大阪府立大学, 科学技術振興機構  
種類: 特許  
番号: US 7,649,679  
取得年月日: Jan. 19. 2010  
国内外の別: 外国
- [2] 名称: Quantum entanglement photon pair producing device and quantum entanglement photon pair producing method  
発明者: Keiishi Edamatsu, Ryosuke Shimizu  
権利者: 科学技術振興機構  
種類: 特許  
番号: US 7,570,419  
取得年月日: Aug. 4. 2009  
国内外の別: 外国

[その他]

ホームページ等

<http://www.quantum.riec.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

枝松 圭一 (EDAMATSU KEIICHI)  
東北大学・電気通信研究所・教授  
研究者番号: 10193997

### (2) 研究分担者

石原 一 (ISHIHARA HAJIME)  
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60273611

中山 正昭 (NAKAYAMA MASAOKI)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30172480

### (3) 連携研究者

小坂 英男 (KOSAKA HIDEO)  
東北大学・電気通信研究所・准教授  
研究者番号: 20361199

三森 康義 (MITSUMORI YASUYOSHI)  
東北大学・電気通信研究所・助教  
研究者番号: 70375153

水津 光司 (SUIZU KOJI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 20342800

安食 博志 (AJIKI HIROSHI)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60283735

越野 和樹 (KOSHINO KAZUKI)  
東京医科歯科大学・教養部・准教授  
研究者番号: 90332311

溝口 幸司 (MIZOGUCHI KOJI)  
大阪府立大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 10202342

金 大貴 (KIM TEGI)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 00295685

石坂 智 (ISHIZAKA SATOSHI)  
日本電気株式会社・ナノエレクトロニクス  
研究所・主任研究員  
研究者番号: 10443631

横山 弘之 (YOKOYAMA HIROYUKI)  
東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授  
研究者番号: 60344727

大島 悟郎 (OOHATA GORO)  
大阪府立大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 10464653