

量子情報通信用高効率光ファイバー直接結合半導体量子ドット単一光子源の研究開発 (111601001)

Research and development of fiber-coupled semiconductor single-photon sources with high-efficiency for quantum information and communication

研究代表者

熊野 英和 北海道大学・電子科学研究所

Hidekazu KUMANO Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

研究分担者

末宗 幾夫†

Ikuo SUEMUNE†

†北海道大学・電子科学研究所

†Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

概要

量子情報通信用の、光ファイバー結合高効率単一光子源の実現を目指して研究を進め、まず 950nm 帯半導体量子ドットで単一光子発生を確認し、ドット密度を低減することにより、通信波長帯の 1300nm でも単一光子源動作を達成した。量子ドットを Ag 埋め込みコーン構造とすることで、パルス励起毎に量子ドットから発生した単一光子の収集効率~25%を実現した。量子ドットを単一モードファイバーに結合した単一光子源を実現するとともに、FDTD シミュレーションにより光子収集効率~95%、ファイバー結合効率~16%が可能であることを示した。さらに、外場やフィルタリング等後処理を必要としない、量子ドットからの量子もつれ光子対生成に世界で初めて成功し、量子もつれに基づく次世代量子情報通信へと展開する礎を築いた。

1. まえがき

安心・安全な情報通信ネットワークの重要性が増す現在、これを実現する方法として、量子力学的に安全が保障された量子情報通信に対する期待が高まっている。すでに量子暗号通信の実証実験が進められているが、今後実運用に進めるために、「オンデマンド単一光子源」の必要性が論じられ、世界的に研究が進められている。本研究開発では、我々がこれまで研究を進めてきた金属埋め込み半導体量子ドット構造を基本として、これを光ファイバーに直接結合させ、オンデマンド動作に近づけた高効率単一光子源の実現を目指した。

2. 研究開発内容及び成果

2-1. Ag 埋め込みコーン構造による高効率単一光子源の開発

半導体から発生した光子は空気との界面で全反射して取り出しにくく、これを改善する構造として図1のナノコーン構造を提案した。これまでに、発生した光子の~25%を集光レンズで取り出すことに成功(APL, 102, 131114, 2013)。シミュレーションでは空気側に光子を取出す効率を~95%まで高められることを示した(Nanotechnology, 24, 455205, 2013)。

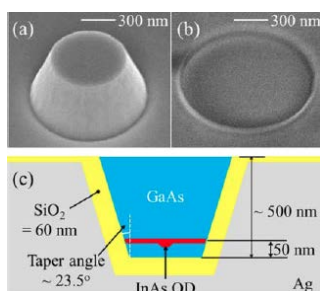


図1. (a)量子ドットを含んだ GaAs を頂点が平坦なナノコーン構造に加工。(b) (a)の表面に SiO₂ 膜、続いて Ag 膜を形成した後、基板を除去((a)とは上下反転)。(c) (b)の断面模式図。

2-2. 高い単一光子発生純度を持つ単一光子源の開発

単一光子源が一度に複数の光子を発生するとエラー確率が增大するため、量子鍵配送できる通信距離が制限される。そのため単一光子純度の高い光源を開発する必要がある。その目安が2次光子相関関数の零遅延時間での値 $g^{(2)}(0)$ であり、我々の開発した新たな理論でこの値を正確に見積もり(APL, 101, 161107, 2012)、量子ドット準位より 1 LO フォノンだけ高いエネルギーを準共鳴することにより、一桁近く低減できることを示した(APEX, 6, 062801, 2013)。

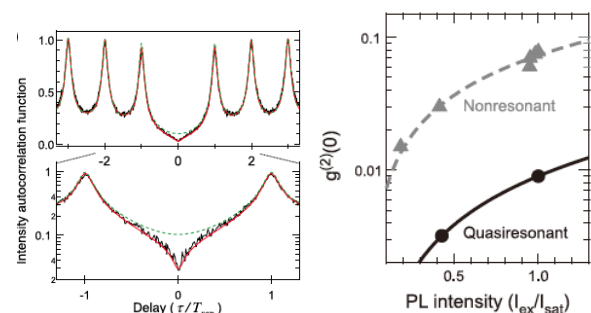


図2. 量子ドットをパルス励起した際に測定した2次光子相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ 。従来の理論(破線)では我々の測定結果が説明できず、新たに開発した理論(実線)で遅延時間ゼロの $g^{(2)}(0)$ を見積もる。その低さが単一光子発生純度を表し、準共鳴(Quasiresonant)励起で一桁近く下げることができる。

2-3. 光ファイバー通信波長帯単一光子源の開発

これまで光ファイバー通信波長帯で発光する InP 基板上の InAs 量子ドットでは、ドット密度が高くなりやすく単一光子発生を実現するのが困難であった。我々は NICT と共同でドット密度の低減に成功し、波長 1.3 μm 帯で動作する単一光子源を実現した(APL, 103, 061114, 2013)。

2-4. 単一モードファイバー結合単一光子源の開発

簡便に半導体量子ドットをファイバー結合させる方法として、2本のファイバー端面の間に量子ドットを含む半導体片を挟み込む方法で、ファイバー結合単一光子源を実現した(APEX 6, 065203, 2013)。この方法の利点は、特性が非常に安定であることであり、実用的である。量子ドットナノコーンをファイバー端面に直接結合した場合のシミュレーションでは、結合効率~16%が得られている(Nanotechnology,24, 455205, 2013)。現在さらに、発光源



図3. 2本のファイバー端面の間に量子ドットをはさみ、両方のファイバーから単一光子を発生できることを示した。

とファイバー間に高いNAを持つレンズを挿入し、さらに高い効率結合を実現すべく研究を進めている。

2-5. 量子もつれ光子対源の開発

次世代の量子情報通信、とりわけ通信距離を拡大するには、量子ノード間リンクに必須の技術であるエンタングルメントスワッピングや量子テレポーテーションが必要である。そのため、量子ドットを用いたオンデマンド量子もつれ光子対源が望まれる。しかし、ドットの非対称性等により量子状態の縮退が解け、後処理等をしないと量子もつれ状態が生成できない状態であった。我々は NIMS と共同研究で(111)GaAs 基板上に等方性のよい量子ドットを形成し、事後選別することなく、ベルの不等式を破る量子もつれ光子対を生成することに、世界で初めて成功した(Phys.Rev.B 88, 041306(R), 2013)。

2-6. 発生した光子の不可識別性の実証

量子ノード間で量子もつれを中継する場合に重要となる指標として、生成した単一光子がいかなる自由度においても互いに区別できないこと、すなわち不可識別性がある。我々は2-1で述べたAg埋め込みナノコーン中の量子ドットから発生した光子について、マッハツェンダー干渉計におけるボゾン干渉(別々に入射した光子が片方の光路に光子対として出力される)を検討した。その結果、0.89と高いVisibilityを示すことを確認し、高い不可識別性を備えていることを実証した(JAP 116, 043103, 2014)。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

今後、量子情報通信ネットワークは安心・安全な通信を維持していく上で不可欠な技術になっていくと考えられている。そのためにはクロック信号に合わせて単一光子、量子もつれ光子を発生するオンデマンド光源が必須である。本研究課題で得られた成果はその基盤を確かなものにし、関連分野に広く波及効果をもたらすものである。今回の成果を発展させていけば、現在単一光子検出器として普及し始めている、ファイバー結合した超伝導単一光子検出器(SSPD)のように、ファイバー結合単一光子源として普及させることも夢ではない。

4. むすび

量子情報通信は、現在使われている高速大容量光ファイバー通信を置き換えるものではなく、量子鍵配送に代表されるように、その安全性を保障するために必要な暗号鍵を安全に送り届ける並列ネットワークであり、今後現在使われているRSAなどのプロトコルを置き換える時代がやっ

てくると予想される。共同研究いただいた各位に深く謝意を表す。

【誌上发表リスト】

- [1]X. Liu, T. Asano, S. Odashima, H. Nakajima, H. Kumano, and I. Suemune, “Bright single-photon source based on an InAs quantum dot in a silver-embedded nanocone structure”, Appl. Phys. Lett. Vol.102 No.13 pp.131114-1-3 (2013年4月5日)
- [2]H. Sasakura, X. Liu, S. Odashima, H. Kumano, S. Muto, and I. Suemune, “Fiber-based bidirectional solid-state single-photon emitter based on semiconductor quantum dot”, Appl. Phys. Express Vol.6 pp.065203-1-3 (2013年6月7日)
- [3]I. Suemune, H. Nakajima, X. Liu, S. Odashima, T. Asano, H. Iijima, J.-H. Huh, Y. Idutsu, H. Sasakura, and H.Kumano, “Bright single-photon source based on an InAs quantum dot in a silver-embedded nanocone structure”, Nanotechnology Vol.24 pp.455205-1-9 (2013年8月16日)

【申請特許リスト】

- [1]末宗幾夫、赤崎達志、「量子もつれ光子対発生素子および方法」、申請国：日本、申請平成24年4月11日
- [2]末宗幾夫、笹倉弘理、熊野英和、赤崎達志、「量子もつれ光子対発生素子および量子もつれ光子対発生方法」、申請国：日本、申請平成25年5月10日
- [3]末宗幾夫、入江 宏、「量子もつれ光子対発生素子および量子もつれ光子対発生方法」、申請国：日本、申請平成26年5月9日

【登録特許リスト】

- [1]末宗幾夫、赤崎達志、田中和典、「半導体発光素子」、申請国：日本、申請平成19年1月10日、登録平成23年7月22日、登録番号：特許第4787083号
- [2]末宗幾夫、田中和典、「半導体発光素子」、申請国：日本、申請平成20年7月17日、登録平成24年2月24日、登録番号：特許第4931141号
- [3]末宗幾夫、田中和典、井筒康洋、「半導体発光素子」、申請国：日本、申請平成21年1月28日、登録平成24年12月14日、登録番号：特許第5152520号

【受賞リスト】

- [1]中島秀朗他、発表奨励賞、“単一 InAs 量子ドット中における状態間遷移に関する考察”、平成24年1月6日
- [2]中島秀朗他、講演奨励賞、“(111)A 面上量子ドットからのもつれ光子対生成”、受賞平成25年9月16日

【報道掲載リスト】

- [1]“物材研など最高性能の量子もつれ光子源開発”、化学工業日報、発表平成25年7月30日
- [2]“物材機構など、等方的量子ドットで最高性能の量子もつれ光子源を開発”、日刊工業新聞 Business Line、発表平成25年7月30日
- [3]“世界最高性能の量子ドットもつれ光子源の開発～遠距離量子通信の実用化に向けて大きく前進～”、NanotechJapan、発表平成25年8月19日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://nanophoto.es.hokudai.ac.jp>