

単一モード共鳴光散乱過程による高純度単一光子源の研究開発 (111507004)

High-purity single-photon sources based on single-mode resonant light-scattering processes

研究代表者

青木 隆朗 早稲田大学

Takao Aoki Waseda University

研究分担者

越野 和樹 東京医科歯科大学

Kazuki Koshino Tokyo Medical and Dental University

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

概要

超低損失テーパーファイバーとその応用デバイス、および超高 Q 値モノリシック微小共振器を開発した。また、これらに単一半導体量子ドットを結合させることで、単一光子を単一モード光ファイバーに直接、高効率に結合する理論を確立するとともに、その技術を開発した。特に、固体量子光学系における強い位相緩和を定量的に扱うため、環境自由度も量子力学的自由度として直に取り込んだ「拡張量子系」を厳密に解く手法を採用した。また、ナノ光ファイバー端における共鳴光散乱過程増強機構を発見し、共振器を使うことなく、光ファイバー等の光導波路のみで 1 次元原子系を実現する「導波路量子電気力学」への道を拓いた。

1. まえがき

量子力学的に純度の高い単一光子の生成技術は量子情報通信における最重要基盤技術であり、さまざまな手法を用いた単一光子源の開発が精力的に進められている。しかし、従来の単一光子源の多くは、光ファイバーへの取り出し効率が低いという問題を抱えている。本研究では、超低損失テーパーファイバーとその応用デバイス、および超高 Q 値モノリシック微小共振器を開発し、これらに単一半導体量子ドットを結合させることで、単一光子を単一モード光ファイバーに直接、高効率に結合する理論の確立とその技術を開発することを目的とする。

2. 研究開発内容及び成果

(1) 超低損失テーパーファイバーとその応用デバイス、および超高 Q 値モノリシック微小共振器の開発

市販の単一モード光ファイバーをフレームブラシ法を用いて加熱延伸加工することで、サブ波長径を持つテーパーファイバーを作製した。特に、テーパー部における高次モード結合を抑制することで、典型値として 99%以上、最大値で 99.7%の透過率を持つ超低損失テーパーファイバーを再現性良く、安定的に作製する技術を確立した。作製したテーパーファイバーのウェイスト部の走査型電子顕微鏡(SEM)像を図 1(a)に示す。

さらに、テーパーファイバーをウェイスト部で切断し、その先端を半球状に加熱溶融加工することで、単一モード光ファイバーに断熱的に接続されたナノ光ファイバーレンズを作製した。作製したナノ光ファイバーレンズの集光性能を評価するため、ナノ光ファイバーレンズを用いて走査プローブ顕微鏡を構築し、金ナノ粒子を顕微測定したところ、回折限界を超えた空間分解能 (FWHM=0.27 λ) を得た。実験結果を図 1(b)に示す。

また、シリコン基板上の酸化膜をフォトリソグラフィとエッチングで円盤状に微細加工し、さらに CO₂ レーザーにより溶融加工することで、トロイド型および球型のモノリシック微小光共振器を作製した。それぞれの SEM 像を図 2(a)および(b)に示す。

作製した微小光共振器の Q 値を測定し、トロイド型微

小共振器に対しては 1~5 $\times 10^8$ の Q 値が定常的に得られた。また、共振器のモード体積は寸法に依存するが、典型的には 200~300 μm^3 程度である。本研究開発で得られた値 $Q/V = 2.5 \times 10^6 \mu\text{m}^{-3}$ は各種の光共振器に関してこれまで報告されている値として最も高い。一方、球型微小共振器の Q 値は 1×10^8 であった。本研究で作製した球型微小共振器は半径がわずか 7 μm の極めて小さな共振器であり、基本モードのモード体積は 70 μm^3 である。得られた Q 値は、半径 10 μm 以下の極微小球の Q 値としては最も高い値である。

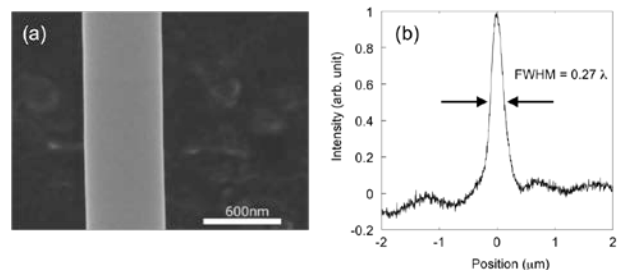


図 1 (a) サブ波長径テーパーファイバーの SEM 像。(b) ナノ光ファイバーレンズの空間分解能測定結果。

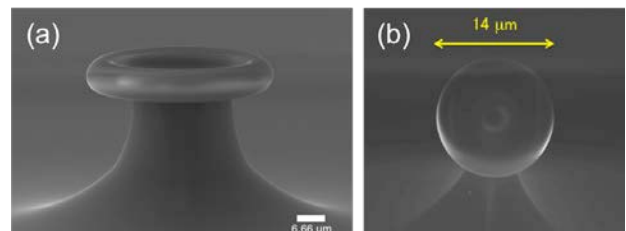


図 2 (a) トロイド共振器の SEM 像。(b) 球型共振器の SEM 像。

(2) 強緩和領域を対象とした「拡張量子系」に関する理論の確立

固体量子光学系における強い位相緩和を定量的に扱う理論手法の開発を目標として、環境自由度も量子力学的自

自由度として直に取り込んだ「拡張量子系」を厳密に解く手法を開発した。さらにこの手法を、量子ドット・トロイド型微小共振器・光学ファイバーからなる共振器 QED 系に適用し、量子ドットを横方向からレーザー励起する状況での光学応答について理論解析した。その結果、励起レーザーパルスを最適化することで、このデバイスが理想的な単一光子源として動作することを確認した。

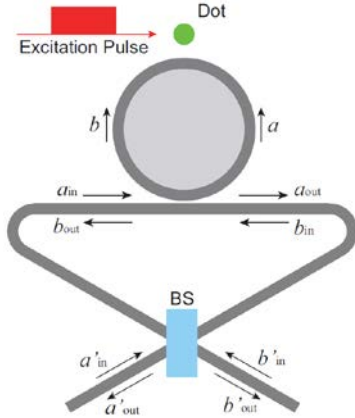


図3 トロイド共振器 QED 系の概念図。

考察する系は図3のように、励起パルスによりドライブされる半導体量子ドット・トロイド共振器・テーパファイバーから成っており、ファイバー端はビームスプリッターによりサニャック干渉計を構成している。この系のハミルトニアンは自然単位系において

$$\begin{aligned} \mathcal{H} &= \mathcal{H}_1 + \mathcal{H}_2 + \mathcal{H}_3 + \mathcal{H}_4, \\ \mathcal{H}_1 &= \omega_d \sigma^{\dagger} \sigma + \omega_c (a^{\dagger} a + b^{\dagger} b) + g[\sigma^{\dagger} (a + b) + (a^{\dagger} + b^{\dagger}) \sigma], \\ \mathcal{H}_2 &= i f(t) \sigma^{\dagger} - i f^{*}(t) \sigma, \\ \mathcal{H}_3 &= \int dk [k a_k^{\dagger} a_k + \sqrt{\kappa/2\pi} (a^{\dagger} a_k + a_k^{\dagger} a)] + \int dk [k b_k^{\dagger} b_k + \sqrt{\kappa/2\pi} (b^{\dagger} b_k + b_k^{\dagger} b)], \\ \mathcal{H}_4 &= \int dk [k c_k^{\dagger} c_k + \sqrt{\gamma/2\pi} (\sigma^{\dagger} c_k + c_k^{\dagger} \sigma)], \end{aligned}$$

で与えられる。ここで \mathcal{H}_1 は量子ドットと共振器モードとのコヒーレント結合、 \mathcal{H}_2 は励起パルスによる量子ドットのドライブ、 \mathcal{H}_3 は共振器モードからファイバーへの光子の漏れ、 \mathcal{H}_4 は量子ドットから環境への自然放出、をそれぞれ表す項である。実験的に実現可能なパラメータ (g, κ, γ) / $2\pi = (200, 1000, 5)$ MHz を用いて、この系の光学応答を計算し、単一光子源としての性能をパルスあたりの n 光子確率 P_n により評価した。

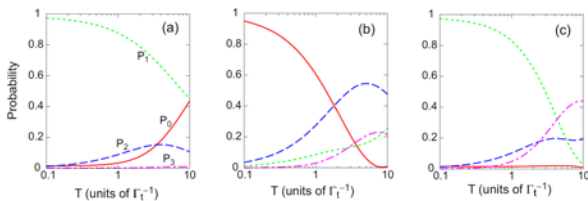


図4 パルス長 T の関数としての P_0 (赤), P_1 (赤), P_2 (赤), P_3 (赤). パルス面積は (a) $\Omega T = \pi$, (b) $\Omega T = 2\pi$, (c) $\Omega T = 3\pi$.

図4に P_0, P_1, P_2, P_3 のパルス長 T への依存性を示す。パルス面積は (a) $\Omega T = \pi$, (b) $\Omega T = 2\pi$, (c) $\Omega T = 3\pi$ にそれぞれ固定してある。(a) と (c) を比較すると、 π パルスと 3π パルスで定性的に同じふるまいをすることがわかる。単一光子生成の観点からは、パルス長は短ければ短いほど有利であり、 $T \ll \Gamma_t^{-1}$ の短パルスでは理想的な単一光子源 ($P_1 = 1$ でほかは零) となる。(b) の 2π パルスの場合には、長パルス領域で P_2

が優勢になる領域があり、二光子パルス生成へと応用可能である。

(3) ナノ光ファイバー端における共鳴光散乱過程増強機構の発見と導波路量子電気力学の開拓

前述のトロイド型微小共振器とテーパファイバーの結合系は、共振器 QED 系における自然放出の増強を利用しているが、共振器を使わずに単一モード光ファイバーに直接、単一光子を発生させる機構が見つければ、より安定で堅牢なデバイス構造が実現できる。そこで本研究では、共振器を使わずに単一モード光ファイバーに直接、単一光子を発生させる方法についても探索した。その結果、テーパファイバーを切断して作製したナノファイバー端を精密に加工することで、その先端に配置した量子ドットに対して発光過程や共鳴光散乱過程の増強が発現することを見いだした。概念図を図5に示す。

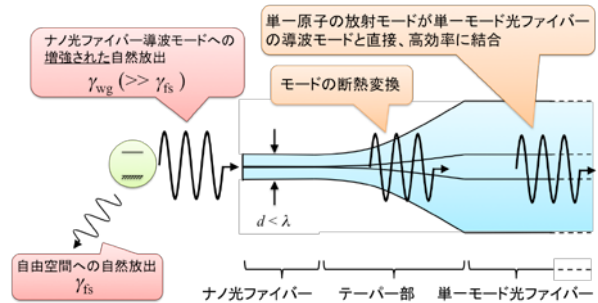


図5 ナノファイバー端における共鳴光散乱過程増強機構の概念図

具体的には、ナノファイバー単独で 37%、ミラーを併用することで 76%、シリコン細線導波路に断熱的に結合したファイバーで 87% の結合効率が得られることがわかった。これは共振器 QED 系に匹敵する極めて高い効率である。すなわち、共振器を使うことなく、光ファイバー・導波路のみで 1 次元原子系が実現できることになり、新しい「導波路量子電気力学」への道を拓いたといえる。

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

本研究成果に基づき、単一モード光ファイバーに高効率に結合した単一光子源の実現が期待される。また、本研究の直接の発展に留まらず、新たな微弱光検出技術の開発、量子光学やナノ領域の光物性物理学への展開、あるいは新規の高分解能・高集光効率顕微鏡の実現に繋がる。

4. むすび

以上の通り、単一モード光ファイバーに直接、高効率に単一光子を結合する手法とデバイス、および理論を開発した。

【誌上发表リスト】

- [1] S. Chonan, S. Kato, T. Aoki, "Efficient Single-Mode Photon-Coupling Device Utilizing a Nanofiber Tip", Scientific Reports Vol. 4, 4785 (2014年4月24日)
- [2] K. Koshino, T. Aoki, "Guided resonance fluorescence of a single emitter after pulsed excitation", Physical Review A Vol. 89, 023814 (2014年2月11日)
- [3] S. Kato, S. Chonan, T. Aoki, "High-numerical-aperture microlensed tip on an air-clad optical fiber", Optics Letters Vol. 39, 773-776 (2014年2月4日)

【申請特許リスト】

- [1] 青木隆朗、長南翔、「集光部」、日本、2013年3月4日、特願 2013-042098