

光ファイバー量子ビットデバイスを用いた量子シミュレータの基盤技術開発 (142101002)

Quantum-dot-based single photon sources attached on optical fibers for quantum simulator

研究代表者

笹倉弘理 北海道大学大学院工学研究院

Hiroataka Sasakura Department applied physics, Hokkaido University

研究分担者

熊野英和 北海道大学電子科学研究所(現職:新潟大学創生学部)

Hidekazu Kumano College of Creative Studies, Niigata University

研究期間 平成 26 年度～平成 28 年度

概要

量子 ICT への展開を念頭に、安定且つ耐久性に優れた半導体量子ドットと光ファイバーの結合デバイス実現に向けた基盤技術開発を実施した。両者の接続機構の検討や背景光の要因を精査することで、高純度且つ機械的に安定な単一光子状態の生成が可能であることを実証した。特に光子発生源として冷却が必要な半導体量子ドットを用いた構造において、4 日間にわたる連続運転で 5%以下の光子数揺らぎを確認できたことは、実用化の観点から特筆すべき成果と考えている。この結合機構を基に、核スピンメモリや幾つかの形態の量子ビットデバイスとしての可能性を探索すると共に、QD 内部で排他的に形成される励起子複合体の同定手法を確立した。更に生成光子のエネルギー不安定性に関し、光子取得効率を高める金属埋め込み共振器中 QD において、光パルスの照射により恒久的な安定化が可能であることを示した。

1. まえがき

非古典光供給システムは、光子の不可分性・情報の重ね合わせという量子力学の原理に基づく、安全且つ省電力な量子情報通信環境を提供する要素技術である。今後の本格的な運用に向けて、構造的な安定性に優れ、長寿命且つ明るく、更に低コストで製造できる非古典光源の開発が必要不可欠であり、様々な物質材料・構造等で探索研究が行われている。半導体量子ドット(QD)は空間的な 3 次元閉じ込め効果によって内部エネルギーが離散化しているため、本質的に複数光子(対)の生成が起らない。本プロジェクトでは単一モード光ファイバー(SMF)コアに QD を直接装着した QDinF(QD in Fiber)を用い、長時間安定性・扱いやすさの観点から非古典光源の開発を実施した。

2. 研究開発内容及び成果

QDinF を用いた量子ビットデバイスの開発に関連して dual-rail 型量子ビットとして動作可能であるか否かを検討した。1 次の自己相関信号のゼロ遅延時間での可干渉度を評価した。QDinF の対抗する二つの出力を用いて形成した光干渉計を用いて(図 1(a))、時間原点における可干渉度について検討した。図 1(d)は QDinF の一方の出力に可変の光学損失を導入し、光結合用のビームスプリッターへの入力光子数を調整することにより変化した可干渉度を実

測した結果である。QDinF の両出力間の光子数比 (R) が 1 で可干渉度は最大となっており、入力比が 1 からずれると徐々に可干渉度が低下している。一方で、強度比が 100 対 1 程度に落ちても、可干渉度は 1/3~1/4 まで低下している。これらの結果は理論的見積もりと一致している(図 1(d)中実線)。

光子の取得効率の向上及び単一光子状態純度の劣化抑制を狙い、従来型 QDinF に対して高 NA の SMF への変更と、光子源自体のナノピラーアレイ化を実施した。SMF の動作波長帯(960-1600 nm)に合わせるため、MBE 装置を用いて低速成長法により成膜した面内密度 $\sim 5 \times 10^9 / \text{cm}^2$ の InAs/GaAs QD を光子源として用いた。電子線リソグラフィにより 300 nm-直径、2.5 μm -間隔(B)のナノピラーアレイ状に加工した。B は SMF のモードフィールド径(MFD=2.6 μm)に合わせ、SMF の端面に接続する際に一本のナノピラーだけが選択的に光学結合するように設計した。歪み印加中の位置ずれによる光学結合効率の欠損及び揺動を抑制するため、ネガレジスト(水素化シルセスキオキサン、HSQ)のスピコートによるナノピラーアレイ形状の構造安定性の強化を選択した。図 2(b)はナノピラーアレイ化後にスピコートを施した試料表面の SEM 像である。この試料を SMF 端面に直接接続し改良型 QDinF

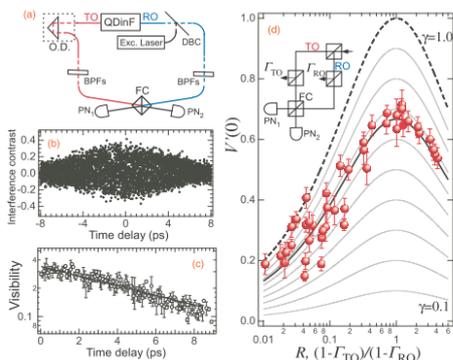


図 1: (a)QDinF の対抗する出力を用いて形成させた光干渉計の概略図。1 次の相関信号(b)と可干渉度の減衰の様子(c)。(d)可干渉度の光学損失依存性。[誌上発表リスト[3]]

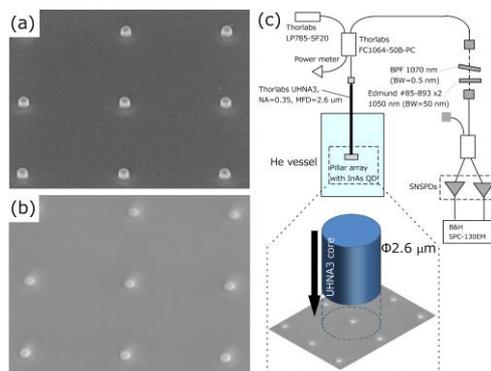


図 2: (a) ナノピラーアレイ構造、(b) スピコート後の SEM 像。(c) 計測システムの概略図。

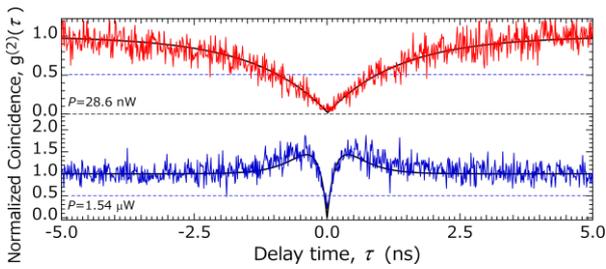


図 3: 改良型 QDinF による高純度単一光子生成の検証結果。

を開発した[図 2]。

ナノピラー接続型 QDinF を液体ヘリウム中に設置し、SNSPD と TAC(B&H: TCSPC-130EM)を用いて、2 次の自己相関測定を行い、単一光子状態の純度を評価した。離散ピークの選択にバンド幅 50 nm のフィルター (Edmund: #85-893) とバンド幅 0.5 nm (Optoquest: custom-made) の狭帯域フィルターを併用した。低励起条件(28.6 nW)下だけでなく出力光子数の飽和が認められる高い励起強度条件(1.54 uW)においても明瞭なアンチバンチング特性が得られた[図 3]。図 3 中の赤(青)線は SNSPD の暗計数(~40 cps)も含んだ実測データである。過渡的な励起複合体間の状態変化を考慮し、最小自乗法により実測データを回帰し、 $g^{(2)}(0)$ 及び励起レート γ の励起強度依存性を求めた結果を図 4 に示す。実測した励起強度の範囲では γ はほぼ線形に増加している。一般的に背景光の寄与が少なく純度の高い単一光子が得られる弱励起強度条件下だけでなく、強励起条件下においても、 $g^{(2)}(0)$ は 0.1 を明らかに下回っており、ナノピラーアレイ化による背景光の抑制が極めて有効であることを示している。

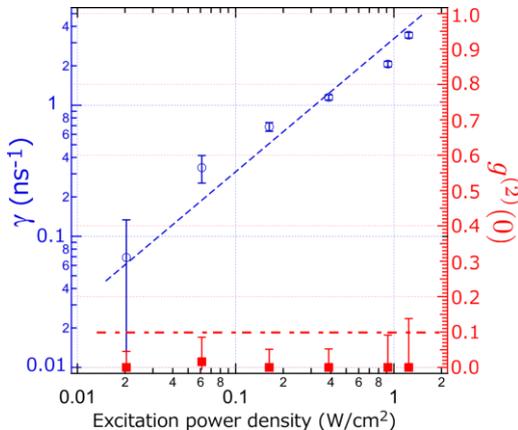


図 4: $g^{(2)}(0)$ と γ の励起強度依存性。純度の高い単一光子状態を取得できていることを示している。

単一光子源としての長時間安定性・扱いやすさは、当該研究開発課題に限らず、実用上の観点においても重要な指標である。改良型 QDinF は微細加工によりナノピラー状に加工しているため、機械的安定性の低下及び明滅現象の発生といったエネルギー不安定性の発現が懸念された。そこで長時間安定性を検証した。図 5 挿入図に QDinF を 4 日間にわたって連続動作させ、2 分間隔で光子数を測定した結果を示す。この検証中、光子源だけでなく、検出器など全光学系の調整を一切行っていないが、検出光子数の低下などは認められず、これは安定且つ扱いやすい単一光子発生システムであることを強く示唆するものである。また検出光子数の揺らぎは 5% 以下である。更に数十回の室温-液体ヘリウム温度間のヒートサイクル後の現在においても性能劣化が無いことを確認している。

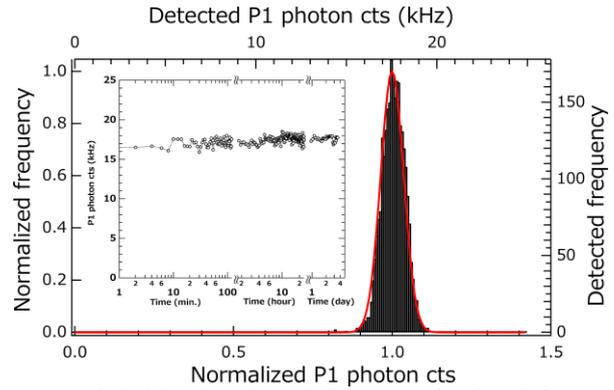


図 5: 改良型 QDinF の単一光子源としての連続動作安定性の検証。挿入図は、4 日間の連続動作させた際の検出光子数を 2 分間隔で取得した結果。

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

今回のプロジェクトの支援を受け、実施した安定且つ高純度な単一光子源・幾つかの形態の量子ビットデバイス・量子メモリに関する結果を踏まえ、今後は励起エネルギーの制御等の検討を通して、QD と環境系間のキャリア移動についてより詳細な議論を進め、スペクトル狭窄化による光電相互作用の増大に向けた研究、また独立量子ドット光源からの光子干渉の高効率化に関する研究を進める予定である。光子がもつ他の系にはない特色を最大限に引き出し、量子暗号や量子計算をはじめとする量子光デバイスの実現に向けた研究開発を、今後とも鋭意展開して行きたい。

4. むすび

冷却が必要な半導体量子ドットを用いて、扱いやすく既存の光ファイバーインフラと整合性の良い非古典光供給システムの構築に着手し、光子数揺らぎを 5% 以下に抑え、数日間にわたる連続運転が可能であることを確認できたことは、実用化の観点から特筆すべき成果と考えている。最後に本プロジェクトの実施に関し、お忙しい中適切な助言・コメント等をいただいた評価者の皆様に感謝いたします。

【誌上発表リスト】

- [1] X. Liu, H. Nakajima, S. Odashima, I. Suemune, and H. Kumano, "Optical control of spectral diffusion with single InAs quantum dots in a silver-embedded nanocone", *Opt. Exp.* Vol.25 pp8073-8084 (2017 年 3 月 29 日)
- [2] H. Kumano, T. Harada, I. Suemune, H. Nakajima, T. Kuroda, T. Mano, K. Sakoda, S. Odashima, and H. Sasakura, "Stable and efficient collection of single photons emitted from a semiconductor quantum dot into a single-mode optical fiber", *Appl. Phys. Express* Vol.9 pp032801-1/4 (2016 年 2 月 22 日)
- [3] Hirota Sasakura, Shunichi Muto, and Hidekazu Kumano, "Single photon interference between bidirectionally extracted originating from semiconductor quantum dots", *Appl. Phys. Express* Vol.8 pp112002-1/4 (2015 年 10 月 22 日)

【受賞リスト】

- [1] 笹倉 弘理、第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会 Poster Award、"Firorder single photon interference in unbalanced Mach-Zehender interferometer naturally formed by QDinF"、(2015 年 10 月 1 日)