HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Single photon and entangled photon-pair generation from semiconductor quantum dots [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	中島, 秀朗
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11296号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55466
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Hideaki_Nakajima_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（情報科学）　氏名　中島　秀朗

学 位 論 文 題 名

Single photon and entangled photon-pair generation from semiconductor quantum dots
（半導体量子ドットを用いた単一光子・量子もつれ光子対生成に関する研究）

情報技術は我々の生活を支える社会インフラとして機能している一方で、ネットワークキャパシティの限界やセキュリティインシデントといった課題が浮かび上がっているのも事実である。現行の粒子集団の制御に基づく情報技術に対し、単一量子に現れるような量子力学的な性質を直接用いることで、超高速・超並列計算や強固な安全性の確保といった次世代情報技術への道が拓かれる。中でも不確定性原理や量子複製不可能定理に基づく秘匿性が保証された量子鍵配送 (QKD) は近年研究開発の進捗が著しく、フィールドでの試験運用が行われるに到っている。現在 QKD では、量子光源として非線形光学結晶によるパラメトリック下方変換 (PDC) を用い、この過程で対生成する光子対を量子もつれ光子対として、あるいはその一方を単一光子として利用している。これまで BB84 をはじめとする各種 QKD プロトコルの実証、デコイ状態の導入による盗聴検知、量子テレポーテーション、ベル不等式の破れ、量子もつれスワッピング、光子/キュビット増幅、Device-independent QKD 等々、原理検証実験のみならず応用に向けた多くの優れた成果が得られてきた。しかしながら PDC は本質的に光子生成過程がポアソン統計に従うことから、光子ロスのない理想的な場合であっても光源そのものの性質により光パルス中の光子数を制御することが原理的に不可能であり、この点でシステム効率化や簡便性に大きな障害をもたらす。クロックパルスに同期し、オンデマンドに動作する高性能な単一光子/量子もつれ光子対生成は今後の QKD 技術発展に不可欠な要素技術となっており、これら量子光源の研究開発は極めて重要な意義を持つ。

半導体量子ドットはその内部で原子様に離散化したエネルギー準位を形成し、そのうち光学遷移が許容される二準位間では、パウリの排他律により一度に単一の光子を放出する。また励起子分子 (XX)-励起子 (X)-基底状態の三準位カスケード遷移を用いると、偏光もつれあい状態にある一対の光子対が生成される。これらの光子 (対) 発生は原理的にパルス駆動可能で、そのタイミングは励起光で容易に制御できる。また波長制御や電流駆動、集積化といったデバイス実装に適した利点を併せ持つのに加え、微細加工技術の著しい進展により微小反射鏡や導波構造が高い精度で作製可能となり、光子生成効率の大幅な改善に至っている。半導体量子ドット系が量子情報インフラを支えるオンドマンド量子光源として高い有用性を持つことは、BB84 での安全鍵生成や不可識別性、量子テレポーテーションといった検証実験が次々と報告されていることからも明らかである。しかしながら、現状ではその潜在性が十分に発揮された単一光子・量子もつれ光子対生成が実現されているとは言い難い。余剰キャリアによって形成された荷電励起子状態を有する量子ドット内部では常に中性-荷電間で数ナノ秒オーダーの明滅を繰り返しており、孤立した単一の二準位系として動作しない。これまで励起光の制御により孤立二準位系の形成が可能とされているものの、その制御機構については明らかになっていない。また量子光源としての最も基本的指標である単一光子生成の純度 (多光子発生確率の低さ) も、十分とは言えない。一方、量子もつれ状態の生成については (100) 成長基板面の原子配列に起因した半導体量子ドットの形状異方性のため、中間準位である X

準位の微細構造分裂 (FSS) が 2 通りの XX-X カスケード緩和過程に関する which-path 情報を付与し、結果量子もつれ状態は崩壊してしまう。これまで磁場・電場印加等の単一量子ドットに着目した様々な対称性の回復が試みられてきたが応用上の拡張性に乏しく、かつベル不等式を破る強固な量子もつれ光子対生成は困難であった。また結晶学的に対称性の高い (111) 面基板上に形成した量子ドットによる異方性抑制効果が期待されているが、歪緩和を利用した Stranski-Krastanov モードでは歪誘起の異方性のため高対称化は困難であり、これまで決定的な打開策はなかった。従ってこれら課題の解決および将来的な量子情報デバイスを念頭に、理想状態に近い単一光子および量子もつれ光子対を生成可能な半導体量子ドット量子光源の実現が必須とされる。

本論文では、半導体量子ドット内に形成される孤立二準位系を用いて、理想的な単一光子・量子もつれ光子対状態を生成する量子光源の実現および背景となる物理の解明を目的とした。量子ドット内で起こる数ナノ秒オーダーの明滅計測および励起光の制御による抑制機構について明らかにし、単一の二準位系の形成を実証した。形成された二準位は多光子生成に比べて極めて高い確率で単一光子を生成し、世界最高レベルの高純度単一光子発生に成功した。また生成光子の有効利用のため、量子ドットを含む半導体ピラー構造を金属微小鏡に埋め込む構造を導入し、取り出し効率の改善を図った。二光子状態の生成に関しては、高い対称性を持つ (111) 面上に、液滴エピタキシー法による無歪量子ドット形成を試みた。液滴エピタキシー法では基板表面に供給した金属液滴を反映した形状を持つため基板の原子配列の影響を受けにくく、成長方位の選択自由度が高いため (111) 面上でのドット形成が可能である。また歪を内包しないため歪誘起異方性を抑制できる。これにより等方性の高い量子ドットが形成され、FSS は強く抑制された。結果、which-path 情報はほぼ消失し、量子もつれ光子対生成およびベル不等式の破れを実現するに至った。

本論文における各章の構成は以下の通りである。

・第一章では、本研究の背景と目的および各章の構成について記述する。

・第二章では、理論的な背景と関連する物理について説明する。

・第三章では、試料作製、および光学評価における実験系の詳細について述べる。

・第四章では、単一量子ドット中性-荷電状態間で起こる明滅遷移に関する評価を行う。数ナノ秒オーダーの明滅現象を高精度で計測し、更に励起強度/励起波長といった励起光の制御に関する調査からその抑制の観測に成功した。またその制御機構についても考察する。

・第五章では、励起光制御によって形成された単一の孤立二準位系を用い、高純度単一光子発生について実証を行う。結果として生成光子は非常に強い単一性を示し、更には観測例のない奇異な特性を示した。これは高純度単一光子固有の性質であることを示し、単一の二準位系内のキャリアダイナミクスを考慮し、その評価法における再定義を行う。これにより高精度な評価が可能となり、結果として超高純度単一光子発生が確認された。

・第六章では、(111) 基板上液滴エピタキシー量子ドットを用いた量子もつれ光子対生成を実証する。(111) 基板上の量子ドット形成に成功し、FSS は大幅な抑制改善を見せた。それに伴い which-path 情報 は消去され、XX-X カスケード光子対は強い量子もつれ状態として生成されることを実証した。更に光子対は観測基底に依らない強い偏光相関を有し、外場印加や事後選別といった制御を必要とすることなくベル不等式の破れの観測に成功した。最後に光学的な制御による更なる忠実度の向上化が見られ、その物性的要因やメカニズムについて考察する。

・第七章では、本研究で得られた成果の総括を行う。