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_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (情報科学)　　氏名　中島　秀朗

審査担当者　主　査　准教授　熊野 英和
副　査　特任教授　末宗 幾夫
副　査　教　授　本久 順一
副　査　教　授　富田 章久

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）

情報通信技術は我々の日々の生活を支える社会の基盤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多様な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。中でも量子複製不可能定理や不確定性原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、量子力学特有の強い相関関係を持つ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。即ち、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。また量子光源としての最も基本的な性能指数である単一光子生成の純度 (多光子発生確率の低さ) や光子取り出し効率も、現状では十分とは言えない。一方、量子ドットベースの量子もつれ状態生成については更に困難を極めている。(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古典相関光子対に移行してしまう。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が見いだされていなかった。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。更に、ポテンシャル等方性の高い量子ドットを形成して二光子状態の生成を実現するため、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。その結果 which-path 情報は消失し、量子ドット系カスケード遷移過程を用いて世界で初めて外場印加および事後選別なしの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。

これを要するに、著者は、量子情報技術の基幹要素である量子ドットベースの固体量子光源の実現に向けた新たなブレークスルーを実現したものであり、次世代高秘匿性通信技術の進展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は, 北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。