

二国間交流事業 共同研究報告書

平成 24 年 4 月 2 日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

共同研究代表者所属・部局 北海道大学・電子科学研究所

職・氏名 (ふりがな) 教授・末宗 幾夫 すえむね いくお

1. 事業名 相手国 (アメリカ合衆国) との共同研究 振興会対応機関 (NSF)

2. 研究課題名 金属微小光共振器埋め込み光ファイバー波長帯量子ドットによるもつれあい光子対発生

3. 全採用期間

平成 22 年 4 月 1 日 ~ 平成 24 年 3 月 31 日 (2 年 ヶ月)

4. 経費総額

(1) 本事業により執行した研究経費総額 5,000,000 円

初年度経費 2,500,000 円、 2 年度経費 2,500,000 円、 3 年度経費 円

(2) 本事業経費以外の国内における研究経費総額 500,000 円

5. 研究組織

(1) 日本側参加者（代表者は除く）

氏名 <small>(ふりがな)</small>	所属・職名	研究協力テーマ
くまの ひでかず 熊野 英和	北海道大学・電子科学研究所・准教授	光子対のもつれ合い評価と解析
ささくら ひろたか 笹倉 弘理	北海道大学・電子科学研究所・助教	光子相関測定による発生光子(対)評価
ホー ジェフン 許 載勳	北海道大学・電子科学研究所・博士研究員	半導体ピラー構造の作製
おだしま さとる 小田島 聡	北海道大学・電子科学研究所・博士研究員	金属埋め込み構造の作製
ナヒド アクター ジャハン Nahid Akhter Jahan	北海道大学・情報科学研究科・博士課程学生	量子ドット発光特性の評価
クラウス ヘルマンシュタッダー Claus Hermannstaedter	北海道大学・電子科学研究所・外国人客員研究員	長波長量子ドットの光学評価

(2) 相手国側研究代表者

所属・職名・氏名 ニューメキシコ大学・准教授・Balakrishnan Ganesh

(3) 相手国参加者（代表者は除く）

氏名	所属・職名（国名）	研究協力テーマ
Thomas Rotter	ニューメキシコ大学・准教授	1550nm 帯半導体量子ドットの作製
Pankaj Ahirwar	ニューメキシコ大学・博士課程学生	1300nm 帯半導体量子ドットの作製

6. 研究実績概要（全期間を通じた研究の目的・研究計画の実施状況・成果等の概要を簡潔に記載してください。）

研究の目的

現在量子情報通信実験に用いられている光源は、通常の光通信に用いるレーザ光を減衰させたものであり、レーザ光のコヒーレンスの良さ故に、(位相)・(光子数)の不確定性から光子数が揺らぐポアソン光となっている。今後量子情報通信を実用的なシステムにするためには、高速のクロックに従って単一光子を確実に発生するオンデマンド単一光子源を光ファイバー通信波長帯で実現する必要がある。当該共同研究では、波長1.55ミクロン帯量子ドットを金属微小共振器に埋め込むことにより、これらの実現を目指す。

研究計画の実施状況

1. ニューメキシコ大学 G が、InP 基板上に作製した波長 1.55 ミクロン帯 InAs 量子ドットを、2009 年秋に導入した、GEN-X という世界初の完全自動分子線エピタキシー(MBE)装置により、MBE 成長した。特にこれまで以上に再現性、特性のよい量子ドットの作製が可能となった。
2. ニューメキシコ大学 G は成長と構造評価に専念し、成長した量子ドットは北大に輸送し、その詳細な光学特性評価は北大 G が担当した。評価結果はニューメキシコ大学 G に送り、成長方法に反映させた。
3. 光学特性評価に基づいて北大 G がピラー構造に微細加工し、これを Nb 等の金属に埋め込んで金属微小光共振器を作製した。これによって、単一量子ドットの光学特性と発光起源の同定、光子取り出し効率の評価を行った。特に長波長量子ドットからの単一光子検出は技術的に難しく、研究の後半では最近注目を集めてきている超伝導単一光子検出器を得意とするオランダ・デルフト工科大学のグループとも共同研究を進め、ニューメキシコ大学 G の作製した長波長量子ドットの検討を進めた。

成果

1. ニューメキシコ大学 G、T. Rotter と P. Ahirwar が、InP 基板上に InAs 量子ドットを、MBE 成長し、G. Balakrishnan と P. Ahirwar が量子ドットの AFM 観察により、量子ドットサイズ制御、発光波長制御を行った。現在までに光ファイバー通信波長の 1300nm 帯で発光する量子ドットが作製できた。
2. この成長した量子ドットサンプルを北大に輸送し、北大 G 許 載勳が単一量子ドット分光のために内部に小数の量子ドットを含んだ半導体ピラー構造に微細加工した。昨年の理論シミュレーションによって真っ直ぐの柱状構造よりもナノコーン(円錐型)の方が発生した光子を外部に取り出す効率が高いことがわかったので、その製作を進めた【図 1 (a)】。

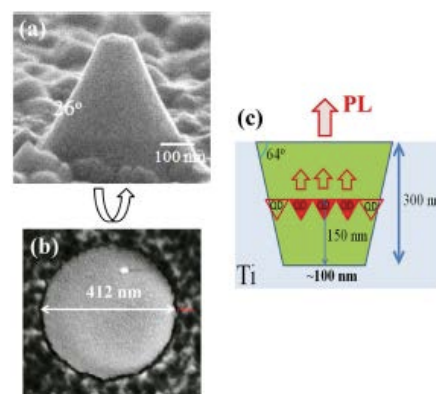


図1 金属に埋め込んだナノコーン構造。

3. 北大 G 小田島 聡が金属で半導体ピラー構造を埋め込み、金属微小光共振器構造を作製した【図 1 (b)】。
4. 北大 G の熊野英和が、作製した半導体ピラー構造における単一量子ドット分光により、1300nm 帯で

発光する単一量子ドットのスペクトル測定に成功した【図2】。

- InAs ドットの平均成長膜厚を 6 ML に増した半導体試料を同様のナノコーン構造に作製したサンプルにより、波長 1500 nm に近い単一ドット発光が図 3 のように観測された。

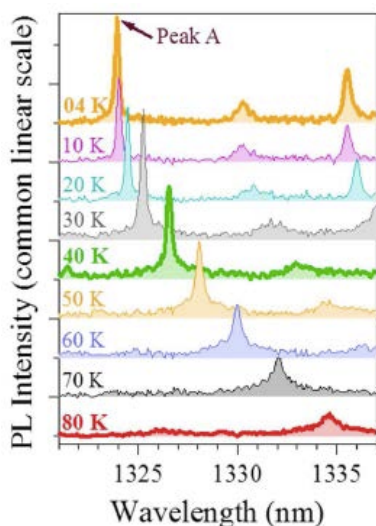


図2 高い分解能で測定した単一の量子ドットの発光スペクトル(1300nm 帯光ファイバー通信波長で発光)

- 励起パルスごとに確実に単一光子 (対)

を発生させるオンデマンド動作を実現するには、量子ドットから発生した光子を高い確率で光ファイバー伝送系に結合させる必要があり、高い「光子取り出し効率」を実現する必要がある。本研究で、当初量子ドットをチタン金属に埋め込み、金属/半導体界面での全反射によって光子取り出し効率を 8.3% まで増大することができた。その後、より高い反射率を持つ銀に埋め込むことにより、効率をさらに 17% まで増大させることに成功した。こうした特性は、光子を取り出すレンズの開口数 (NA) が 0.4 の場合に得られており、さらに開口数の大きなレンズによって、よりオンデマンド動作に近づける試みを行っている。

- 光子対の量子もつれに関して、特に半導体光子源では、量子ドット以外からの古典的相関しか持たない背景光子が発生しやすい。その影響を評価するために、背景光子を熱輻射による光子発生で置き換え、量子もつれ光子対に対する影響を調べた。その結果を図 4 にまとめた。熱輻射の寄与の増大に伴って量子もつれの程度(Tangle)が低下していくことが明瞭に示されている。この結果は、量子もつれ光子対と熱輻射による光子の重畳である Werner 状態と考えることができ、両者の比と Tangle の低下との関係を明確化することができ、今後の固体量子もつれ光子対源の開発、評価に対する指針を明確化することができた。

- 以上から、波長 1.55 μm の光ファイバー通信波長帯において、量子ドットから単一光子 (対) を発生させ、これを高い効率 (15%以上) でファイバーに結合させる見通しを得、さらにその量子もつれ状態の特性向上を進める指針を明確にすることができた。

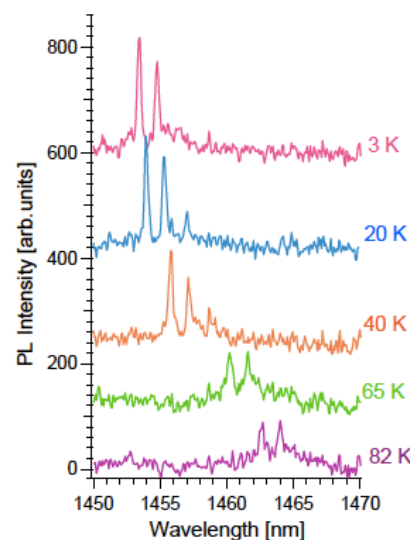


図3. InP 上に成長した 6ML InAs 単一量子ドットからの 1500nm 帯発光スペクトルとその温度依存性。

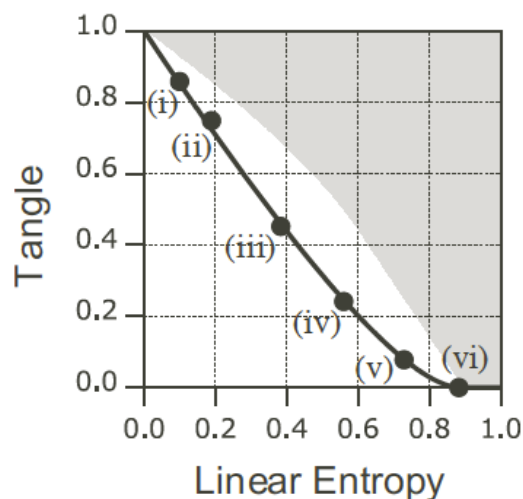


図4. 量子もつれ光子対と熱輻射による光子の混合状態(Entropy)と量子もつれの度合い(Tangle)の測定結果。