



世界最高性能の量子ドットもつれ光子源の開発

—遠距離量子通信の実用化に向けて大きく前進—

平成25年7月29日

独立行政法人 物質・材料研究機構

国立大学法人北海道大学

概要

独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝、以下 NIMS）先端フォトンクス材料ユニット（ユニット長：迫田 和彰）の黒田 隆主幹研究員、間野 高明主任研究員らは、北海道大学、仏ツルーズ大学との共同で、半導体量子ドットを独自手法で改良し、ドットの形を等方的にすることで、世界最高性能の量子もつれ光子源の開発に成功した。これまでの光源とは異なり、付加的な信号選別（ポストセレクション）を必要とせず、きわめて優れた量子もつれあいの特性を持つ。本研究成果により、従来不可能であった量子情報通信の遠距離化を可能とした。

本成果は米国の学術誌 *Physical Review B* 速報欄に7月19日にオンライン公開され、*Editor's Suggestion*（注目論文）に選ばれた。

研究の背景

量子情報通信¹⁾は、情報の秘匿性が完全に保証される次世代の光通信技術である。各国で実験室レベルの研究が進められているが、現在の研究段階では、光ファイバーの損失のため、数10キロメートルの通信距離が限界だった。今後、産業化に至るためには、光信号を中継し、通信距離を飛躍的に延ばす量子中継器²⁾の開発が必須である。そのための最重要な技術課題が、量子もつれ光子対³⁾（以下、もつれ光子対と呼ぶ）用の光源開発である。

これまでの小規模な実験では、もつれ光子対を発生するために非線形光学結晶を使ってきた。この場合、ランダムなタイミングで光子が発生する。そのため、通信システムに実装するには、特殊な同期回路（量子メモリ⁴⁾を開発せねばならず、製品化の妨げになっていた。一方、量子ドット⁵⁾を用いると、オンデマンドで光子対を発生でき⁶⁾、システム化への展開が極めて容易になる。

量子ドットを用いてもつれ光子対を発生するには、ドットの形状が（自然界の原子と同じく）等方的であらねばならない。しかし現実の量子ドットは、自己形成手法で作るために、楕円的な形になる。そのためこれまでは、量子ドットに強い電場や磁場を加えて、等方的な性質を回復してきた。しかし、素子が大がかりになり、さらに個々の（形の異なる）量子ドットに応じて外場を変えねばならず、汎用性がなかった。

成果の内容

本研究では、試料の成長方法を見直し、等方的な量子ドットを制御性よく実現して、外部制御の手間いらずに、世界最高値のもつれあいの観測に成功した。量子ドットの創製には、NIMS が独自に開発した液滴エピタキシー法⁷⁾を用いた。量子ドットの成長基板として、通常用いる[100]面のガリウム砒素ではなく、[111]A面のガリウム砒素を適用する。[111]A面の原子の配列は、正三角形のユニットから構成される。このため量子ドットの形状も正三角形に近くなり、等方的な性質を持つ

と期待した。

作製したガリウム砒素量子ドットから発する蛍光信号を解析すると、忠実度⁸⁾が86(±2)%のもつれ光子対になることを見出した。さらに、量子もつれの厳密な評価基準である、ベルの不等式の破れ⁹⁾を、雑音レベルの5倍以上の大きさに観測した。いずれも過去の報告値を凌駕する。これまでの光源では、ポストセレクションと呼ぶ信号選別を経て、量子もつれの特性を得ていた。我々の光源は、付加的な選別を用いることなく優れた特性を示している。このため、直接、量子通信システムへの実装が可能である。

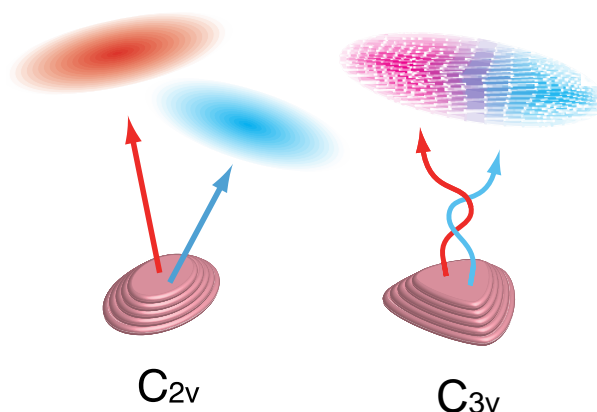


図 楕円形の量子ドットから発する光子は、もつれないが（左図）、三角形状の量子ドットから発する光子は量的にもつれあう（右図）

波及効果と今後の展開

今回の成果は、空想の技術と思われがちな量子通信技術を、小手先の工夫ではなく、ものづくりの技術で実現した画期的な成果である。今回開発したもつれ光子源は、波長が700 nm前後であり、輸送体などを対象とする自由空間の量子情報伝送に適している。一方、通信インフラに実装するには、石英ファイバーの最大透過帯である、波長1.55 μmが重要である。液滴エピタキシー法は、材料種を問わず量子ドットの作製が可能であり、今後、通信波帯域でのオンデマンドもつれ光子源の開発を進める予定である。

掲載論文

題名：等方的な量子ドットから発するもつれ光子対：ポストセレクション不要なベル不等式の破れ

Symmetric quantum dots as efficient sources of highly entangled photons: Violation of Bell's inequality without spectral and temporal filtering

著者：T. Kuroda, T. Mano, N. Ha, H. Nakajima, H. Kumano, B. Urbaszek, M. Jo, M. Abbarchi, Y. Sakuma, K. Sakoda, I. Suemune, X. Marie, T. Amand

発表誌：Physical Review B **88**, 041306 (R) (2013). (Editor's Suggestion)

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.88.041306>

<参考図>

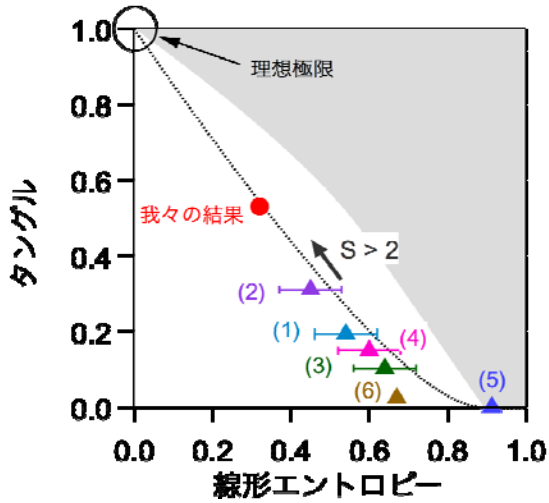


図1:

我々のもつれ光子源と、これまで報告された光子源との性能比較。我々の光源は、抜きん出た性能を示している。縦軸のタングルは、量子性の強さを示し(理想極限は 1)、横軸の線形エントロピーは、状態混合の強さを示す(理想極限はゼロ)。

- (1) 英 Toshiba ケンブリッジ(Nature 2005, NJP 2006)
- (2) 独ドレスデン大(NJP 2007)
- (3) 米メリーランド大(PRL 2009)
- (4) 仏 CNRS(Nature 2010)
- (5) スイス連邦工科大(Nature Photon 2010)
- (6) アイルランド・ティンダル国立研 (Nature Photon 2013)

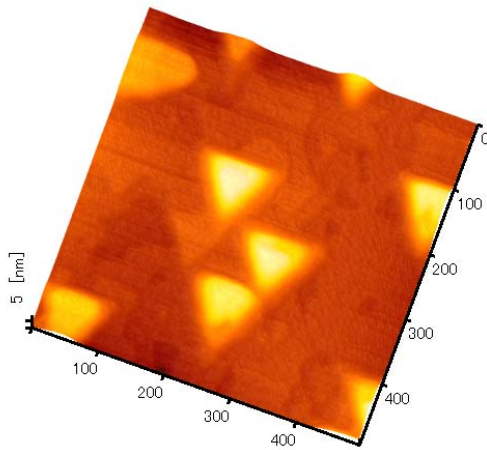


図2:

液滴エピタキシー法で作製した (111)A 基板上的ガリウム砒素量子ドット。試料表面の縦横 500 nm を、原子間力顕微鏡で走査した。(111)A 面の表面原子の配列を反映し、量子ドットの形は正三角形となる。なお、もつれ光子対の実験では、より小さな量子ドット(幅 15nm, 高さ 1.5nm)を用いた。

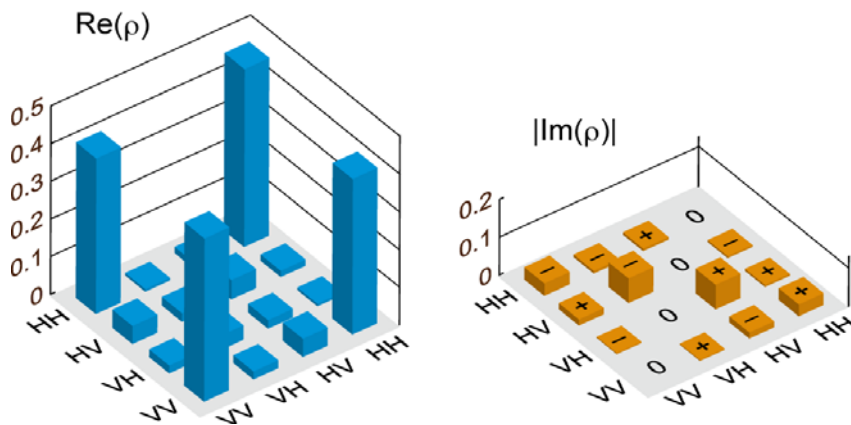


図3:

単一の量子ドットから発する2光子の偏光状態。左図(密度行列の実部)の4隅に値が集中し、強い量子もつれあいの特徴を示している。

用語解説

1) 量子情報通信

光の量子性を駆使した次世代の光通信技術。量子論に内在する不確定性原理により、情報の外部漏洩がなく、秘匿性が守られた情報の受け渡しが可能となる。

2) 量子中継器

量子通信では、情報を担った1個の光子が光ファイバー内を伝送する。光子の伝送距離は光ファイバーの損失で決まり、数10キロメートルが限界である。より長距離で情報を伝達するには、空間的に離れた箇所に、量子状態を回復する量子中継器が必要となる。

3) もつれ光子対

量的にもつれ合った2光子の状態。一方の光子を観測すると、その観測手法に応じて、他方の光子の状態が変化する。このような（量子論的な）遠隔作用により、量子中継器を用いた状態復元などが可能となる。

4) 同期回路と量子メモリ

時間的にずれた光子対に（量子中継など）所望の動作をするには、各々の光子のタイミングを合わせる同期回路が必要である。そのためには、量子状態を崩すことなく、光子を遅らせる量子メモリが要る。量子メモリの開発は困難を極め、今後のブレークスルーが待たれる。

5) 量子ドット

直径数10ナノメートルの半導体の微粒子。

6) 量子ドットによるもつれ光子発生

単一の量子ドットに1対の電子と正孔があると、1つの光子が発生する。同様に2対の電子と正孔が存在すると、2つの光子が、ほぼ同時に発生する。量子ドットの対称性が十分高いと、2つの光子の状態は区別できなくなり、量的にもつれた光子対となる。

7) 液滴エピタキシー法

物質・材料研究機構が1990年に開発した半導体量子ドットの作製手法。他の量子ドットの作製法と異なり、多様な材料種、多様な基板で量子ドットが実現できる。

8) 忠実度

もつれ光子源の性能指数のひとつ。観測した光子対が、理論上の最大にもつれた状態に、どの程度の忠実さで似ているかを示す。忠実度が100%に近いほど、高性能なもつれ光子源である。

9) ベルの不等式の破れ

もつれ光子対の一方を観測すると、その観測手法に応じて、他方の光子の状態が変化する。ベルの不等式は、このような遠隔作用の強さを判断する評価基準である。もつれていない光子対の間には遠隔作用が無く、ベルの不等式を満足する。一方もつれた光子対は、お互いの間に遠隔作用が生じ、ベルの不等式を破る。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

独立行政法人物質・材料研究機構

先端フォトニクス材料ユニット主幹研究員

黒田 隆 (くろだ たかし)

TEL: 029-860-4194

E-mail: kuroda.takashi@nims.go.jp

URL:http://www.nims.go.jp/laser_kuroda

国立大学法人 北海道大学

電子科学研究所 准教授

熊野 英和 (くまの ひでかず)

TEL: 011-706-9334

E-mail: kumano@es.hokudai.ac.jp

(報道担当)

独立行政法人物質・材料研究機構

企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026、FAX: 029-859-2017

国立大学法人 北海道大学

総務企画部 広報課

〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目

TEL: 011-706-2610、FAX: 011-706-4870