

# 世界最高忠実度の量子もつれ光子対発生 —遠距離量子暗号用の光源開発

SATテクノロジー・ショーケース2015

## ■ はじめに

量子暗号通信は、情報の秘匿性が守られる次世代の光通信手法である。各国で研究開発が進められ、我が国でも2010年から首都圏での実証試験が始まった。一方、産業化を阻む問題として、情報の伝送距離が、石英ファイバー透過長の数10kmに制限されていることがある。

従来の光通信では、ファイバー伝搬時の信号減衰を、増幅で補ってきた。しかし量子暗号通信では、単一の光子が情報を担っている。そのため、光子を増幅しようとしても、揺らぎに阻まれて、元の信号は再現できない。数10kmを超える遠距離の情報伝送には、量子中継と呼ぶ特殊な中継プロトコルが必要となる。量子中継の実現に必須の開発要素が、非局所的な量子もつれ光子対(もつれ対)の発生である。

これまでラボレベルでは、もつれ対の発生に、非線形光学の手法を用いてきた。しかしこの場合、もつれ対は確率的にしか発生せず、実用的な量子中継には役立たない。確定的にもつれ対を発生するには、真空中に孤立した原子など、単一の量子系を扱わねばならない。天然原子の代わりに、人口原子である半導体量子ドットを用いると、大掛かりな装置の要らない、汎用もつれ光源が期待できる。しかし、この場合、孤立原子と似た、高い対称性の量子ドットを使わねばならない。一般に、自己形成で作る量子ドットは、個々の量子ドットに依存してランダムな形となる。そのため、もつれ対の発生には至らなかった。我々は、独自手法の量子ドット作製手法(液滴エピタキシー法)を高度化し、形状対称性の向上に成功、世界最高値のもつれ対発生の観測に到達した [1,2]。

## ■ 高対称量子ドットの実現

我々は、液滴エピタキシー法と呼ぶ、独自の量子ドット成長手法の高度化に取り組んでいる。この手法は、幅広いヘテロ材料に対応できることが特徴である。また様々な成長基板を選ぶことができる [3]。

今回、異方性のないGaAs量子ドットの実現にあたり、既存手法では用いることが出来なかった、GaAs(111)A面を成長基板に用いた。従来、用いてきたGaAs(100)面は、面内の2方向 [011], [01-1] で表面原子の配列が異なる。そのため量子ドットの形が異方的になり、光学応答に異方性が残った。一方で、{111}面の原子配置は3回対称性を持つ。そのため量子ドット形状が対称的になり、光学異方性が消失すると期待した。

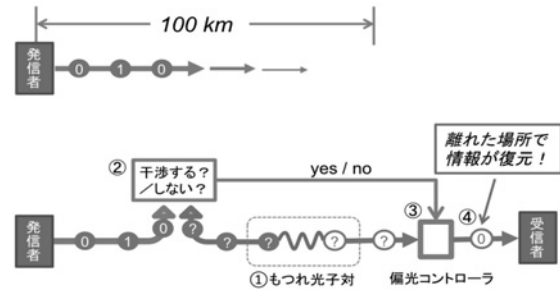


図1: 量子中継の原理。量子暗号通信では単一の光子が情報を担う。非局所性を持つ、量子もつれ光子対を用いると、遠隔地での情報復元が可能となる。

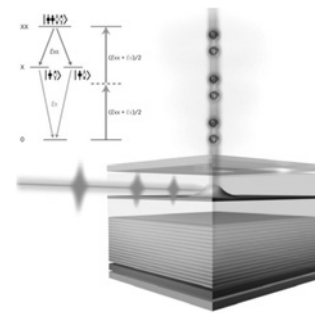


図2: 半導体量子ドットを用いた、量子もつれ光子対の発生。試料にレーザーを照射し、単一の量子ドットからの蛍光を捕捉する。量子ドットに2対の電子正孔対を注入するとき、非局所的な相関を持つ2光子が同時発生する。

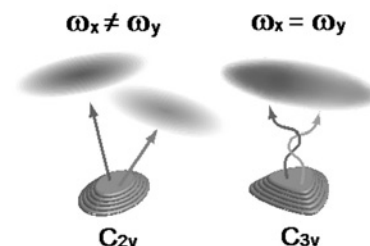


図3: 従来の従来の異方的量子ドットは、もつれを出さないが、三角形の量子ドットはもつれを発生。

代表発表者 **黒田 隆 (くろだ たかし)**  
**間野 高明 (まの たかあき)**  
所 属 **(独)物質・材料研究機構**  
**先端フォトニクス材料ユニット**  
問合せ先 **〒305-0044 つくば市並木1丁目**  
**TEL: 029-860-4194 FAX: 029-860-4679**  
**kuroda.takashi@nims.go.jp**

■キーワード: (1) 半導体量子ドット  
(2) 液滴エピタキシー成長法  
(3) 対称性の向上  
(4) 光子対の発生  
(5) 量子もつれあい  
(6) 遠距離量子暗号通信

実際(111)A 面上で量子ドットを自己形成すると、正三角形の面内形状となる。光学的な異方性が完全に消えた量子ドットの実現に成功した [4,5]。

### ■ 量子もつれ光子対の観測

高対称GaAs量子ドットを液体ヘリウムで10Kまで冷却し、単一の量子ドットから発する蛍光光子を観測した。高効率で光子を取り出すために、顕微鏡対物レンズで集光した。パルスレーザーを試料に照射し、量子ドットに2対の電子・正孔が注入される条件に設定すると、そこから2個の光子がカスケード的に発生する。量子ドット内の2電子は、スピンの反平行の組み合わせで安定となる。そのため、発生する2光子は、その偏光状態が互いに反対となり、量子もつれを示すことになる。

観測したもつれ対の(理想極限への)忠実度は  $86(\pm 2)\%$  に至り、同種の光子源における世界最高値を記録した。

### ■ 今後の展開

光通信インフラへの実装を目指すには、光子波長が光ファイバーの透過波長帯に合致することが要求される。上述の GaAs 量子ドットは 700 nm 前後に発光波長を持つ。我々は、構成材料を InAs に替え、基板を InP(111)A にすることで、波長 1.55  $\mu\text{m}$  の高対称量子ドットの作製にも成功した [6,7]。

今後は、より高温でも駆動できるデバイスを開発し、汎用性の高い、誰でも使える、量子もつれ光源の開発を目指す。日本の半導体ものづくりの強みを活かして、量子暗号通信の実現に漕ぎ着けたい。

### ■ 参考文献

1. 物質・材料研究機構(プレスリリース) 世界最高性能の量子ドットもつれ光子源の開発, 2013年7月29日.
2. T. Kuroda, *et al.*, *Phys. Rev. B* **88**, 041306(R) (2013).
3. 小口信行, 格子整合系GaAs/AlGaAs量子ドットの液滴エピタキシーによる作製と光学評価, *応用物理* **74** (3), 343 (2005); 間野高明, 液滴エピタキシーによるGaAs ナノ構造の自己形成, *応用物理*, **79** (5), 444 (2010).
4. T. Mano, *et al.*, *Appl. Phys. Express* **3**, 065203 (2010).
5. G. Sallen, *et al.*, *Nature Commun.* **5**, 3268 (2014).
6. N. Ha, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 143106 (2014).
7. X. Liu, *et al.*, *Phys. Rev. B* **90**, 081301(R) (2014).

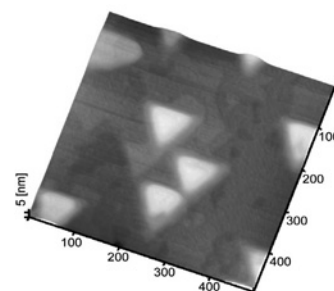


図4: AlGaAs(111)A 面上の GaAs 量子ドット。成長基板が持つ3回対称性を反映し、量子ドット形状も正三角形となる。

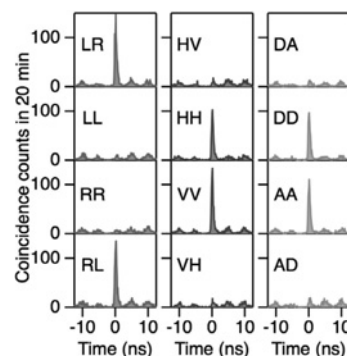


図5: (111)A 面 GaAs 量子ドットの偏光相関。

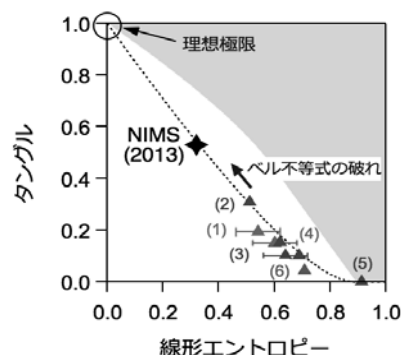


図6: 我々の量子ドット光子源と、過去の報告との比較。量子中継の要求仕様を初めて満足した。