

量子情報通信のための単一光子・量子もつれ光子対光源

末宗 幾夫・熊野 英和・笹倉 弘理

Single-Photon and Quantum Entangled Photon-Pair Sources for Quantum Information Communications

Ikuo SUEMUNE, Hidekazu KUMANO and Hirotaka SASAKURA

Quantum information communication is expected to play a major role to realize highly secure information communication network in near future. Quantum key distribution is shifting to a practical operation stage very soon, but photon sources need further developments for more flexible and large-scale operations, such as on-demand single-photon sources and quantum entangled photon pair sources. In this article related recent research results on semiconductor photon sources are discussed.

Key words: entanglement, single photon, photon pair, quantum information, quantum dot

インターネットの普及により本格的なユビキタス社会の到来が予見される昨今、通信の安全性・信頼性に対する関心が高まっている。これまでも通信の安全を保障する暗号通信が使われており、情報を送信する暗号鍵を公開し、受信者がもっている秘密鍵で解読する公開鍵暗号方式が広く利用されている。その代表的方式が RSA 暗号¹⁾であり、桁数の大きな2つの素数の積を公開鍵とし、もとの素数への素因数分解に膨大な計算量が必要であることを安全性保障原理としている。しかし超並列計算機の進展もめざましく、解読できる桁数も年々増している。そのため量子力学的原理に基づく無条件安全性を提供できる量子暗号通信の研究が活発化している。これは量子力学的性質をもった粒子(光子)に鍵情報を乗せて送る量子鍵配送(QKD)であり、最小単位である光子の不可分性、量子情報(単位はキュービット)の量子重ね合わせ、盗聴という観測行為によって量子状態が変化するという量子力学に従う性質を安全性の根拠としている。このように、情報通信技術に量子力学の原理を取り入れた量子情報通信は、きわめて安全で利便性の高い情報通信ネットワークを最小限の電力で実現させると期待されている。

1. 量子情報通信と単一光子光源・量子もつれ光子対光源

量子情報を伝送するためには光子ひとつひとつを制御する光子光源の開発が重要である。以下に、光子光源と量子情報通信の基本的なコンセプト(プロトコル)について紹介する。

1.1 BB84 と単一光子光源

単一光子を用いた代表的な量子暗号プロトコルに、C. H. Bennett と G. Brassard によって提案された BB84 方式^{2,3)}がある。光子にキュービットを載せる物理的自由度として、水平・垂直の偏光(HとV)を直交基底として用いる。またこれとは別の斜め偏光の直交基底(DとA)を用意し、送信者“アリス”は図1(a)に示すように2基底のどちらかでキュービットを送り、受信者“ボブ”もどちらかの基底で受け取る。通信後2人は別の古典通信路を用いて互いの基底を比較して基底の一致した光パルスのみでビット列を作り、暗号鍵として保存する。経路で盗聴があると観測による状態変化が起きるので互いのビット列に違いが生じ、基本的には盗聴を検出することができる。

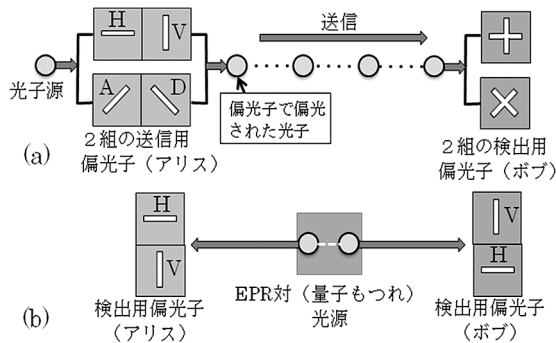


図1 (a) 単一光子光源とBB84量子暗号プロトコル。(b) 量子もつれ光子対光源とE91量子暗号プロトコル。

1.2 E91と量子もつれ光子対光源

量子もつれ(量子エンタングルメント)は、2つの光子の状態がそれぞれの量子状態の直積として表せないときにのみ存在し、その具体例は3.2.1項で紹介する。量子もつれの特徴は、2個の光子の一方の状態が測定されると他方の状態が確定することであり、測定以前には両者の状態は確定しない。A. Ekertは、光子対の量子もつれを使うE91方式⁴⁾とよばれる量子暗号プロトコルを提案した。図1(b)に示すように、量子もつれ光子対(EPR対ともよばれる)光源から出た光子の偏光は互いに直交関係にあるので、基本的にはアリスとボブは光パルス暗号鍵として保存することができる。しかしE91では「ベル測定」による「ベルの不等式」の確認が必要であり、現在では、この確認が不要でBB84を量子もつれのプロトコルに発展させたBBM92⁵⁾が主流となっている。

1.3 量子情報通信の現状

これまで日米欧、シンガポール、オーストラリアなどでさまざまなプロジェクトが進められ、数多くの量子暗号通信実験が行われ、実運用一歩手前まできているといわれる⁶⁾。最近では、2010年10月に都心と小金井市を結ぶ光ファイバー網に量子情報通信装置を組み込んだ「東京QKDネットワーク」が国内外の企業が参加して実施された⁷⁾。今後の展開で求められる光子光源の特性としては、パルスごとに確実に光子を発生するオンデマンド単一光子光源・量子もつれ光子対光源、高速性、単一光子純度の向上などである。

2. 単一光子光源

単一光子光源は、光子数が1に定まった光パルスを生成する量子光源であり、1章で述べたように、盗聴に対してセキュアな量子情報通信環境を提供するための基幹デバイスとなっている。本章では半導体による単一光子光源の現状について紹介する。

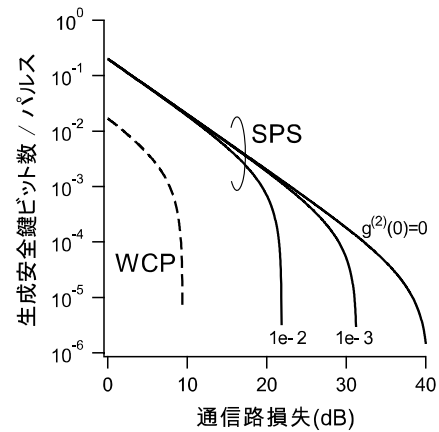


図2 WCP: 減衰コヒーレント光源(破線: 平均光子数0.1)とSPS: 単一光子光源(実線: 平均光子数1)における通信路損失とパルスあたりに含まれる安全鍵ビットの関係。SPSの場合の $g^{(2)}(0)$ 依存性も示す。検出器量子効率0.6, 誤り率0.05で計算。

2.1 現在使用されている光子光源とその課題

2.1.1 減衰半導体レーザー光源

現在の量子暗号システムでは、「近似的な」単一光子光源としてパルスごとの平均光子数を0.1程度にまで弱めた減衰半導体レーザーがおもに用いられている。レーザー光(コヒーレント光)は、光子数がポアソン統計に従うことが知られており、平均光子数が1では二光子生成確率は50%と高いが、0.1では約5.2%まで低下する。量子暗号では、1パルスが複数の光子を含むと盗聴される可能性が生じるため、パルスごとの平均光子数を落とすことによってそのリスクを回避する。一方、平均光子数を落とすと鍵生成率が低下し、大規模システムを考えるうえで障害となる。

2.1.2 単一光子発生純度と量子情報通信におけるビットエラーレート

量子暗号では複数光子の生成頻度によって安全に通信可能な通信路損失の上限値が決まるため、光源からいかに高純度の単一光子を生成できるかが鍵となる。単一光子発生純度は、Hanbury-Brown-Twiss干渉計において測定される二次相関関数の零遅延における値 $g^{(2)}(0)$ により評価することができる。これは複数光子の生成確率と対応し、減衰半導体レーザーの場合にはポアソン分布を反映して常に $g^{(2)}(0)=1$ となる。一方、理想的な単一光子光源では $g^{(2)}(0)=0$ となる。図2に減衰半導体レーザーと $g^{(2)}(0)$ を特性パラメータとした単一光子光源の場合について、通信路損失(dB)とパルスあたり生成安全鍵(エラー訂正とプライバシー増幅を行って最終的に利用可能な鍵)ビット数の関係を示す⁸⁾。この図から、減衰半導体レーザーを単一光子純度のよい単一光子光源に置き換えることにより、

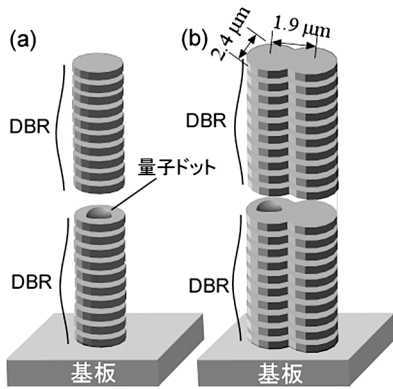


図3 (a) DBR微小共振器ピラー構造. (b) 2つのピラー構造を結合させた量子もつれ光子対光源の模式図.

伝送可能な通信路損失 (光ファイバーの損失が 0.2 dB/km の場合, 20 dB は 100 km 伝送に相当) が飛躍的に向上することがわかる.

2.2 固体光子光源に関するこれまでの研究

単一光子の発生を実験的に最初に示したのは 1977 年に Kimble らが行った Na 原子を用いた実験⁹⁾であり, $g^{(2)}(0)$ の低下を観測して光子アンチバンチングを示した. 1987 年には Diedrich らがイオントラップによる実験¹⁰⁾でサブポアソン光によるアンチバンチングを示した. 以降これまでに, 単一原子・分子, ダイヤモンド中の色中心, 金ナノクラスター, 半導体量子ドット等を用いた単一光子発生が報告されている¹¹⁾. 単一光子光源への応用上, 高い光子生成レート, 構造安定性, 発光ダイオードなど既存半導体デバイスとの親和性, 豊富な半導体微細加工技術の蓄積を考慮すれば, 半導体量子ドットが最も有望であろう. 特に実用化のうえで重要な成果として, 電流注入動作¹²⁾, 通信波長帯での単一光子発生¹³⁾, またダイヤモンド色中心による室温での単一光子生成¹⁴⁾等が挙げられる. また鍵配送レートの上限を与える単一光子発生の繰り返しについては, 最近電流注入動作による 1 GHz 動作¹⁵⁾が報告されている.

2.3 光子取り出し効率の向上

半導体単一光子光源として通常用いられる III-V 族半導体量子ドットは, 非常に高い発光効率をもつ系であるが, 屈折率が大きい生成光子のごく一部 (GaAs の屈折率 3.5 を用いると約 2%) しか外部に取り出せず, 光子取り出し効率 (ここでは半導体光源外に置かれた最初の集光レンズに結合する確率と定義する) の向上が重要な課題となる. 以下, この課題に対するいくつかの提案を紹介する. 分布ブラッグ反射鏡 (DBR) を用いた微小共振器はこれまでさかんに研究されてきたが, これを図 3 (a) に示すピラー構造として半導体/空気界面の屈折率差により横方向

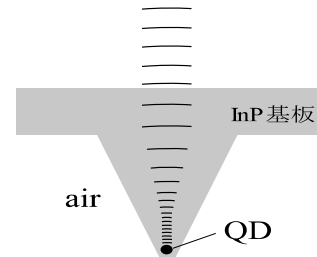


図4 ホーン構造.



図5 金属埋め込み構造.

に光を閉じ込め, 選択的に上部へ光子を取り出せば光取り出し効率は 40% 程度に向上する¹⁶⁾. さらに, この構造を先細としたナノアンテナ構造が提案され, 72% の高い効率が報告されている¹⁷⁾. 一方, 光通信波長帯では, 図 4 に示すパラボラアンテナに類似したホーン構造により, 量子ドットから発生した光子を基板側に全反射して取り出す構造が提案され, 11% の効率が報告されている¹⁸⁾. われわれは構造が安定で広帯域動作が可能な図 5 に示す金属埋め込み量子ドット構造を提案し¹⁹⁾, 最近 16% の光子取り出し効率を確認した²⁰⁾. 一方, ホーン構造量子ドット単一光子光源を用いて 1.5 μm 帯での量子暗号通信実験が最近実施され, 50 km の鍵配送に成功している²¹⁾.

2.4 単一光子発生純度の向上

図 2 での議論によれば, 安全鍵生成レートは単一光子発生純度に鋭敏な依存性をもつため, 単一光子発生源の性能を評価するうえで $g^{(2)}(0)$ は重要な指標となる. これまでにフォトニック結晶やピラー構造等各種の単一光子光源において $g^{(2)}(0)$ 値が報告されているが, 通常非共鳴励起よりも雑音光子が発生しにくい準共鳴励起の測定では, 典型値として 0.02~0.03 が報告されている. しかし, 励起強度を上げると増大してしまう. これに対しわれわれは, 図 6 に示すように, 発光強度が飽和する (パルスごとにほぼ光子が発生する) 比較的強い励起条件下でも 0.01 を下回る高い純度の単一光子発生を実現した²²⁾. これは, 金属埋め込み量子ドット構造により背景光子発生の起源となる半導体領域の体積が抑えられた (この例では $\sim 0.049 \mu\text{m}^3$) 効果と考えられ, さらに検討を続けている.

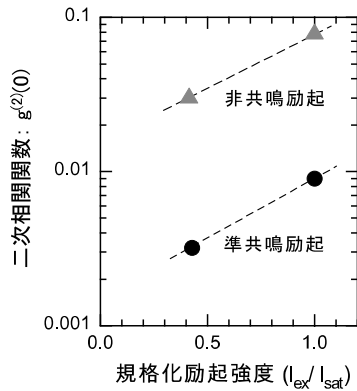


図6 $g^{(2)}(0)$ で評価される生成単一光子純度に対する準共鳴励起の効果.

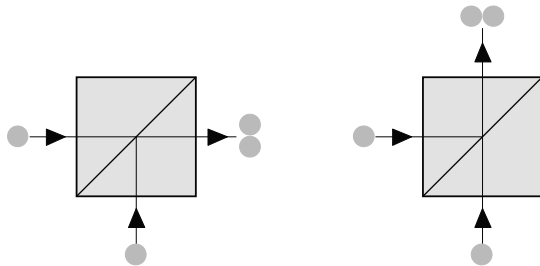


図7 識別できない2つの光子は、ビームスプリッターにおける二光子干渉によって二光子が同一方向へ出力される。

2.5 単一光子光源間の二光子干渉

二光子干渉は、識別できない2つの光子が図7に示すようにビームスプリッターへ2方向から同時に入射する場合に、ボゾン性を反映した干渉が生じ、二光子が同一方向へ出力される現象である。今後量子情報ネットワークへ展開していく際には、離れた光子光源へ量子情報を転送する必要があり、二光子干渉が光子を用いた量子情報処理の基礎となる。一方、量子ドットはそれぞれのサイズ揺らぎによって発光波長がばらつく課題がある。最近、この課題を克服する取り組みが活発化しており、電界シュタルク効果による波長同調^{23,24)}や半導体中不純物準位の発光²⁵⁾によって、離れた光子光源間で二光子干渉が観測されるようになりつつある。

3. 量子もつれ光子対光源

“量子もつれ状態”は、量子情報処理の根幹をなすだけでなく、1.2.2節で述べたE91に代表される量子暗号プロトコル、200 kmを越す長距離間の量子情報通信を可能とする量子中継技術にとっても必要不可欠である。物理的には、スピンや偏光などある特性を保持する条件の下で粒子対(群)が生成され、粒子間に相互作用が存在する場合、量子もつれは自然に生じるが、“純度の高いきれいな”量子もつれ光子対を生成することは現実には難しい。

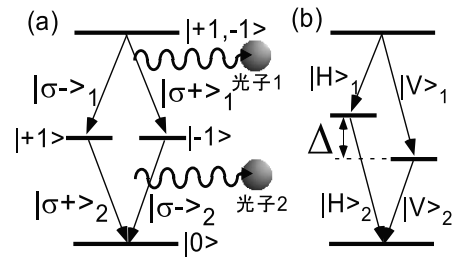


図8 (a) 量子ドットの励起状態がスピン縮退し、理想的なカスケード発光過程により量子もつれ光子対が生成される様子。(b) 励起状態にエネルギー Δ の分裂が生じ古典光子対が生成される様子。

3.1 現状での標準光源

量子もつれ光子対の生成には、1個の光子が物質と非線形相互作用することで2個の光子に分かれるパラメトリック下方変換(PDC)が最もよく利用されている²⁶⁾。このとき位相整合条件を満たしたポンプ光(入力)のエネルギーと運動量はシグナル光(出力1)とアイドラー光(出力2)に分配され、純度の高い量子もつれ光子対を比較的簡便に得ることができ、量子情報全般にかかわる原理検証に大きく貢献してきた。一方、PDCによる光子対発生はポアソン統計に従った確率的発生過程であるため、出力レートを上げるためにポンプ光強度を大きくすると2つ以上の光子対生成確率が增大してしまう。

3.2 半導体量子ドットを用いた研究

量子効果によって離散化された励起子状態からの光学遷移を利用すると、理想的なオンデマンド型量子光源が実現できる可能性があり、光子数揺らぎのない個数状態光子対発生源を実現する有力候補として研究が進められている。

3.2.1 励起子分子状態からのカスケード発光過程

1つの半導体量子ドット中では、すべての励起子複合体は排他的に存在し、熱緩和過程が無視できれば状態間遷移に対応するエネルギーの光子が放出される。半導体量子ドットを用いた量子もつれ光子対生成には、2つの励起子がクーロン相互作用により結合した励起子分子状態(擬スピン表記を用いて $|+1, -1\rangle$ 、以下同様)から励起子状態($|\pm 1\rangle$)を経由して真空状態($|0\rangle$)へ光学遷移するカスケード発光過程が用いられる。原理的には、励起子状態から発生する光子の偏光は光学選択則に従い直交する円偏光状態(右円偏光 $|\sigma^+\rangle$ と左円偏光 $|\sigma^-\rangle$)となる。図8(a)に示すように、この過程で得られる二光子状態は $|\varphi\rangle = (|\sigma^+\rangle_1 \otimes |\sigma^-\rangle_2 + |\sigma^-\rangle_1 \otimes |\sigma^+\rangle_2) / \sqrt{2}$ であり、どちらの経路を通ったか確定できないことから、偏光量子もつれ光子対とみなせる。

3.2.2 励起子状態のエネルギー分裂の課題

格子定数の異なる半導体ヘテロ界面に形成される量子

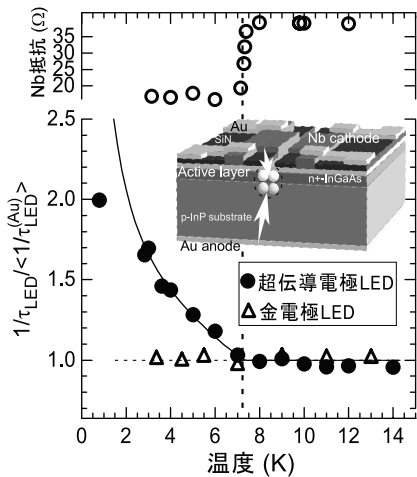


図9 超伝導電極を付加したLEDにおけるニオブ電極抵抗の温度依存性(上図)と、金電極LEDと比較した発光再結合レートの温度依存性。

ドットでは、形状異方性、残留歪みやエピタキシャル成長中に混入した不純物による電界効果等によって系の対称性が低下すると、励起子状態のスピンの縮退が解け、放出される光子は直線偏光状態となる(図8(b))。この励起子状態のエネルギー分裂が生じると、先に放出される光子“1”のエネルギーを観測することによってどちらの経路をとったか判別できてしまい、古典相関光子対へと変化してしまう。

3.2.3 縮退した励起子状態の実現方法

励起子状態のエネルギー分裂を抑制する方法として、アニール処理による残留歪みおよび形状異方性の緩和²⁷⁾、外部電界による内部電界補償²⁸⁾、外部磁場印加²⁹⁾等さまざまな取り組みがなされており、成果をあげている。これらは半導体量子ドット形成時に発生した系の非対称性を外部から補償する対処療法であるが、量子ドットを三回対称性をもつ(111)基板上に作製し、非対称性を抑制するといった抜本的な理論提案もなされている³⁰⁾。

3.2.4 量子ドットを用いた量子もつれ光子対の生成

光子取り出し効率の向上は将来の量子情報通信応用では必要不可欠であるが、量子もつれ光子対では効率が二乗で効くために特に重要である。2.3節で議論したように単一光子光源ではDBR微小共振器ピラー構造が有効であるが、カスケード発光過程により生成される光子対では、励起子分子発光と励起子発光のエネルギーが励起子分子形成に必要な結合エネルギー分だけ異なる。このため図3(b)に示すように2つのピラー構造を近接させて結合共振モードを形成し、そのエネルギーを励起子分子発光と励起子発光にそれぞれ共振させるとともに偏光依存性をなくすように調節し、忠実度(fidelity)73%の偏光量子もつれ光子対

発生、34%の光子外部取り出し効率が最近報告されている³¹⁾。

3.3 半導体から光子対を同時生成する研究

これまでの半導体量子ドットからの光子対発生は二光子が異なる時間に発生するカスケードプロセスであったが、以下の節では光子対を同時生成させる試みについて紹介する。

3.3.1 ハイパーパラメトリック散乱

比較的大きなバンドギャップエネルギーと大きな非線形光学効果を有するCuClにエネルギー $h\omega_i$ のレーザー光を入力し、二光子の吸収で励起子分子状態を生成する。生成された励起子分子は、三次の非線形過程で入力光子とほぼ同じエネルギーを有する光子対($h\omega_o, h\omega_o$)に分裂する。この方法はエネルギー分裂が生じやすい励起子状態を経由しないため、純度の高い偏光量子もつれ光子対を同時生成できる³²⁾。一方、パラメトリック下方変換と同様光子対の生成はポアソン統計に従う。

3.3.2 光子自然放出過程

半導体においては二光子吸収過程が知られているが、その逆過程である二光子発生が観測されている³³⁾。これはバンド間の二光子自然放出であり量子もつれ光子対を同時生成するが、通常の一光子放出に比べると5桁程度弱い点が難点である。

3.3.3 電子クーパー対を用いた方法

BCS理論によれば、超伝導状態での電子は電子-格子相互作用を介して電子対(クーパー対)を作ってボゾン化し、最低エネルギー状態に凝縮した状態となる。このクーパー対を起源とした発光を観測すれば、量子もつれ光子対を得ることができる³⁴⁾。超伝導体/半導体接合では「近接効果」によってクーパー対が半導体中にしみ出す。そこで超伝導電極をもつ通信波長帯発光ダイオード(LED)を作製し、超伝導臨界温度(T_c)以下で大幅な発光増強を観測し³⁵⁾、クーパー対による発光過程の理論解析³⁶⁾と観測結果のよい一致を確認した³⁷⁾。さらに、図9に示すように T_c 以下の温度低下に対する発光再結合レートの増強を観測した³⁸⁾。図9の最低温度における測定結果から、全体の66%が電子クーパー対による発光と見積もることができ、LED内部では量子もつれ光子対の同時生成が相当程度起きていることを示唆する結果であり、現在量子もつれの直接的な検証を進めている。

量子情報通信に必要なとされる単一光子・量子もつれ光子対を発生する半導体光源を中心として、最近の研究動向を中心に紹介した。半導体光源は微細構造ゆえの作製上、計

測上の困難があり、長い間研究の進展が遅かったが、この数年でいくつかのブレークスルーがなされており、今後の進展が期待される。

文 献

- 1) R. L. Rivest, A. Shamir and L. Adelman: *A Method for Obtaining Digital Signature and Public-Key Cryptosystems*, MIT Laboratory for Computer Science, Technical Memo LCS/TM82 (1977).
- 2) C. H. Bennett and G. Brassard: "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing," *Proc. IEEE Int. Conf. on Computers Systems and Signal Processing* (1984) pp. 175-179.
- 3) H. Zbinden, H. Bechmann-Pasquinucci, N. Gisin *et al.*: "Quantum cryptography," *Appl. Phys. B*, **67** (1998) 743-748.
- 4) A. Ekert: "Quantum cryptography based on Bell's theorem," *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 661-663.
- 5) C. H. Bennett, G. Brassard and N. D. Mermin: "Quantum cryptography without Bell's theorem," *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992) 557-559.
- 6) "量子暗号最前線", *Optcom* (2010) 6月号.
- 7) 古田 彩: "量子暗号通信 実運用へ 東京ネットワーク始動", *日経サイエンス*, **1** (2011) 86-91.
- 8) N. Lütkenhaus: "Security against individual attacks for realistic quantum key distribution," *Phys. Rev. A*, **61** (2000) 052304.
- 9) H. J. Kimble, M. Dagenais and L. Mandel: "Photon antibunching in resonance fluorescence," *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977) 691-695.
- 10) F. Diedrich and H. Walther: "Nonclassical radiation of a single stored ion," *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987) 203-206.
- 11) 例えば, B. Lounis and M. Orrit: "Single-photon sources," *Rep. Prog. Phys.*, **68** (2005) 1129-1179.
- 12) Z. Yuan, B. E. Kardynal, R. M. Stevenson *et al.*: "Electrically driven single-photon source," *Science*, **295** (2002) 102-105.
- 13) K. Takemoto, M. Takatsu, S. Hirose *et al.*: "An optical horn structure for single-photon source using quantum dots at telecommunication wavelength," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **101** (2007) 081720.
- 14) E. Wu, J. R. Rabeau, G. Roger *et al.*: "Room temperature triggered single-photon source in the near infrared," *New J. Phys.*, **9** (2007) 434.
- 15) A. Lochmann, E. Stock, J. A. Töflinger *et al.*: "Electrically pumped, micro-cavity based single photon source driven at 1 GHz," *Electron. Lett.*, **45** (2009) 566-567.
- 16) E. Moreau, I. Robert, L. Manin *et al.*: "A single-mode solid-state source of single photons based on isolated quantum dots in a micropillar," *Physica E*, **13** (2002) 418-422.
- 17) J. Claudon, J. Bleuse, N. S. Malik *et al.*: "A highly efficient single-photon source based on a quantum dot in a photonic nanowire," *Nat. Photonics*, **4** (2010) 174-177.
- 18) K. Takemoto, M. Takatsu, S. Hirose *et al.*: "An optical horn structure for single-photon source using quantum dots at telecommunication wavelength," *J. Appl. Phys.*, **101** (2007) 081720.
- 19) H. Kumano, H. Nakajima, S. Ekuni *et al.*: "Quantum-dot-based photon emission and media conversion for quantum information applications," *Adv. Math. Phys.*, **2010** (2010) 1-13.
- 20) H. Iijima, M. Wada, H. Nakajima *et al.*: "High extraction efficiency of photons emitted from a single quantum dot in a pillar structure embedded in silver," *The 15th Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS15)*, Tu-P-118 (2011).
- 21) K. Takemoto, Y. Nambu, T. Miyazawa *et al.*: "Transmission experiment of quantum keys over 50 km using high-performance quantum-dot single-photon source at 1.5 μm wavelength," *Appl. Phys. Express*, **3** (2010) 092802.
- 22) H. Nakajima, S. Ekuni, H. Kumano *et al.*: "Strongly suppressed multi-photon generation from a single quantum dot in metal-embedded structure," *Phys. Stat. Solidi. C*, **8** (2011) 337-339.
- 23) R. B. Patel, A. J. Bennett, I. Farrer *et al.*: "Tunable indistinguishable photons from remote quantum dots," *Nat. Photonics*, **4** (2010) 632-635.
- 24) E. B. Flagg, A. Muller, S. V. Polyakov *et al.*: "Interference of single photons from two separate semiconductor quantum dots," *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010) 137401.
- 25) K. Sanaka, A. Pawlis, T. D. Ladd *et al.*: "Indistinguishable photons from independent semiconductor nanostructures," *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 053601.
- 26) A. G. White, D. F. V. James, P. H. Eberhard *et al.*: "Nonmaximally entangled states: Production, characterization, and utilization," *Phys. Rev. Lett.*, **83** (1999) 3103-3107.
- 27) D. J. P. Ellis, R. M. Stevenson, R. J. Young *et al.*: "Control of fine-structure splitting of individual InAs quantum dots by rapid thermal annealing," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 011907.
- 28) M. M. Vogel, S. M. Ulrich, R. Hafenbrak *et al.*: "Influence of lateral electric fields on multiexcitonic transitions and fine structure of single quantum dots," *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 051904.
- 29) M. Bayer, A. Kuther, A. Forchel *et al.*: "Influence of lateral electric fields on multiexcitonic transitions and fine structure of single quantum dots," *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 1748-1751.
- 30) R. Singh and G. Bester: "Nanowire quantum dots as an ideal source of entangled photon pairs," *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 063601.
- 31) A. Dousse, J. Suffczynski, A. Beveratos *et al.*: "Ultrabright source of entangled photon pairs," *Nature*, **466** (2010) 217-220.
- 32) K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu *et al.*: "Generation of ultraviolet entangled photons in a semiconductor," *Nature*, **431** (2004) 167-170.
- 33) A. Hayat, P. Ginzburg and M. Orenstein: "Observation of two-photon emission from semiconductors," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 238-241.
- 34) I. Suemune, T. Akazaki, K. Tanaka *et al.*: "Superconductor-based quantum-dot light-emitting diodes (SQ-LED): Role of Cooper-pairs to generate entangled photon pairs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 9264-9271.
- 35) Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki *et al.*: "Superconductor-based light emitting diode: Demonstration of role of Cooper pairs in radiative recombination processes," *Appl. Phys. Express*, **1** (2008) 011701.
- 36) Y. Asano, I. Suemune, H. Takayanagi *et al.*: "Luminescence of a Cooper pair," *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 187001.
- 37) I. Suemune, Y. Hayashi, S. Kuramitsu *et al.*: "A Cooper-pair light emitting diode: Temperature dependence of both quantum efficiency and radiative recombination lifetime," *Appl. Phys. Express*, **3** (2010) 054001.
- 38) H. Sasakura, S. Kuramitsu, Y. Hayashi *et al.*: "A Cooper pair light emitting diode," arXiv:0910.5161.

(2011年4月12日受理)