

半導体量子ドットを用いた単一光子対状態の生成と量子画像伝送技術の開発（継続-11）

Generation of single entangled photon pair state from a semiconductor quantum dot and development of quantum image transfer technology

枝松 圭一 東北大学電気通信研究所
Keiichi Edamatsu, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

三森 康義 (H16 年度～H17 年度) [†] 伊藤 正 (H13～H14 年度) ^{††}

Yasuyoshi Mitsumori[†], Tadashi Itoh^{††}

[†]東北大学電気通信研究所 ^{††}大阪大学大学院基礎工学研究科

[†]Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

^{††}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

研究期間 平成 13 年度～平成 17 年度

概要

研究目的

- (1) 半導体量子ドットにおける励起子分子共鳴を利用して、量子もつれ状態にある光子対の発生を制御し、単一の光子対を発生・検出する技術を開発する。
- (2) 量子もつれ状態にある光子間の量子相関効果を利用した新しい画像伝送法の基礎技術開発とその検証実験を行う。

研究結果

- (3) 半導体(CuCl)結晶における励起子分子共鳴を利用して、量子もつれ状態にある光子対の発生に世界で初めて成功した。
- (4) 光子対間の空間相関効果を利用した新しい量子もつれの生成方法を提案し、その検証実験に成功した。

Abstract

In this research program, we aimed : 1) to develop a semiconductor source that emits a single entangled photon pair, and 2) to develop a novel scheme for quantum image transfer utilizing quantum correlations between entangled photons. We have developed the first entangled photon source utilizing biexciton-resonant hyper parametric scattering in a semiconductor (CuCl) crystal. We also developed a novel method to generate polarization entangled photons utilizing spatial correlation of photon pairs.

1. まえがき

近年進展の著しい「量子情報通信」技術にとって、「量子もつれ」の発生と制御はもっとも重要な基本的技術の一つである。光の量子である光子は、量子の情報をやりとりするための媒体として最も有望視されており、「量子もつれ光子」の発生と制御技術の確立はさまざまな量子情報通信技術の実用化のために必要不可欠である。なかでも、半導体を用いて光子の量子状態を発生・制御する技術の開発は、電子と光子との間で量子情報を授受する手段としてたいへん重要である。本研究では、このような背景の下、半導体を用いた量子もつれ光子対の発生技術の開発と、量子もつれ光子間の量子相関を利用した新たな画像伝送法の開発を目的とした実験研究を行った。

2. 研究内容及び成果

2.1. 半導体結晶における励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱を利用した量子もつれ光子対の発生

今日、量子もつれ光子対の発生方法として最も頻繁に用いられる方法は、パラメトリック下方変換と呼ばれる非線形光学過程であり、量子情報処理や量子情報通信に関連した様々な原理検証実験に用いられてきた。しかし、将来の応用を考慮すると、電流励起が可能となる半導体を用いた量子もつれ光子対の開発が強く望まれる。我々は、半導体中の励起子分子状態と共鳴したハイパーパラメトリック散乱と呼ばれる 3 次の非線形光学過程に着目した。この状態は励起子分子の角運動量を反映して、

$$|\Psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|L\rangle_1|R\rangle_2 + |R\rangle_1|L\rangle_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_1|H\rangle_2 + |V\rangle_1|V\rangle_2) \quad (1)$$

で表される量子もつれ状態となることが予想される。こ

で、 $|L\rangle_i$, $|R\rangle_i$, $|H\rangle_i$, $|V\rangle_i$ は各々、放出された光子($i=1,2$)の左回り、右回りの円偏光および水平、垂直の直線偏光状態を表す。この量子もつれの発生メカニズムは、半導体中の電子励起状態における角運動量のもつれを光子に転写したものとみなすことができる。

これまで、このような半導体を用いて直接量子もつれ光子対を発生する試みは成功していなかったが、我々は、塩化第一銅(CuCl)結晶にパルスレーザを照射することによって励起子分子を 2 光子共鳴励起し、ハイパーパラメトリック散乱によって対生成される光子間の量子もつれを観測することに初めて成功した。図 1 は、得られた光子対の 2 光子検出計数をヒストグラムで表したものである。ここでは、例として左回り(L)及び右回り(R)の円偏光と、水平(H)及び垂直(V)の直線偏光とを用いて偏光相関を観測した結果を示す。例えば、LR または RL と記したヒストグラムにおいて、時間差が零($\tau=0$)の付近に強く表れる信号が、一つの励起子分子から発生する光子対の同時検出の結果である。これらのヒストグラムから明らかなように、円偏光で観測した時には互いに逆回りの円偏光(LR と RL)、直線偏光で観測したときには互いに平行な偏光(HH と VV)の組み合わせのときのみ同時検出信号が強く現れており、光子対の状態が式(1)から予想される偏光相関を明瞭に示していることがわかる。さらに、さまざまな偏光の組み合わせで偏光相関の測定を行い、量子トモグラフィと呼ばれる手法で 2 光子の偏光に関する密度行列を推定して、理想的状態(1)に対する忠実度を評価した結果、92%という高い値が得られた。古典的には量子もつれの忠実度は 50%を超えることはないので、この結果は本研究で発

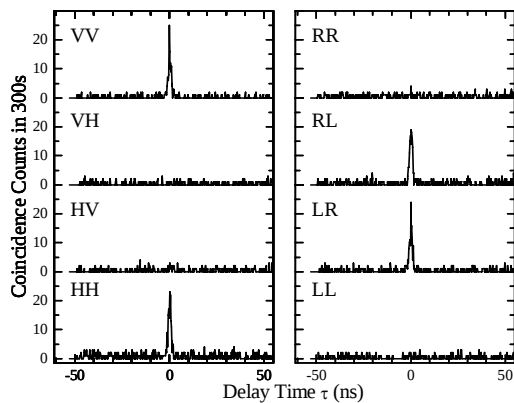


図1 光子対の偏光相関の測定例

生した光子対が古典限界を超えた高い量子もつれを有することを示している。このように本研究では、半導体中の励起子分子に共鳴したハイパーパラメトリック散乱によって高い量子もつれを有する光子対を生成できることを世界で初めて実証した（Nature 誌に掲載）。さらに、このようにして生成した量子もつれ光子対を用いて Bell の不等式の破れの検証実験を行った結果、古典的限界を大きく破る結果を得た。半導体から直接生成した量子もつれ光子対が Bell の不等式を破ることを明らかにしたのも本研究が世界初である（論文投稿中）。

本研究の当初の目的は、半導体単一量子ドットを用いて単一の量子もつれ光子を発生することにあった。しかしながらこの手法は、量子ドットの形状非対称性由来する励起子状態の分裂が量子もつれを解消してしまうことが明らかとなつて、世界的に見てもその方面の研究が当初の見込みより遅滞した。ごく最近になって、形状非対称性を抑制した量子ドットを用いた量子もつれ光子対の発生が初めて報告され、単一の量子もつれ光子対発生について今後の発展が見込まれることとなった。残念ながら本研究の期間内に単一量子もつれ光子対発生を実現することはかなわなかったが、本研究で培った技術を基に、より実用性の高い単一量子もつれ光子対発生の実現に向け、今後も研究を続けていく予定である。

2.2 量子もつれ光子による画像伝送技術の開発

パラメトリック下方変換によって生じた光子対は、光子対の発生する時間や空間について強い量子相関をもつ。本研究ではまず、このような強い空間相関をもった光子対が物体を回折・干渉する際の量子的効果を観測するための2光子回折・干渉実験を行った。その結果、量子もつれ光子対が古典的波動描像では説明できない回折・干渉現象を引き起こすことを示した（Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. A 等に掲載）。本研究ではさらに、これらの量子回折・干渉現象が光子間の空間相関を考慮したフーリエ光学解析によって定量的に説明することができることを明らかにした（論文投稿中）。

次に、この強い空間相関をもった光子対を用いて偏光の量子もつれを生成する新たな方式を考案し、実験で検証した。この方法に基づいて生成した光子対の量子もつれの程度を、前述した Bell の不等式を用いて評価した結果、発生した光子対が非局所相関を保持した量子もつれ状態にあることが検証された。ここで開発した方式は、空間的な量子もつれを偏光の量子もつれに変換する操作に相当し、異なる物理量間の量子もつれの変換という意味でも重要な技術である（特許出願中、論文投稿予定）。

このように、本研究では、光子対の間の量子的相関に着

目した量子画像転送技術の開発を目指し、空間相関に起因する量子的干渉・回折現象を実験、理論の両面から明らかにするとともに、空間相関効果を利用した新しい量子もつれの生成方法の提案・検証を行った。「量子もつれ光子間の量子相関の利用に関する新たな基礎技術の開発」およびそれを基礎とした「量子画像転送法の開発、検証」が目的であったが、前者に関してはある程度の成果が残せたと考えている。今後、本研究を通して明らかにしてきた光子間の空間相関（空間的量子もつれ）を積極的に利用することで、2光子をペアとして用いることでのみ画像情報の伝達が可能で、1光子のみでは情報を全く伝達し得ないような、新しい量子通信が可能になると考えられ、継続して研究を続けていきたい。

3. むすび

本研究では、半導体を利用した量子もつれ光源の開発と、これまであまり利用されていなかった、量子もつれ光子間における空間相関の新たな利用法に関する研究を行った。特に、半導体を用いた量子もつれ光源は、電流注入による量子もつれ光子源の開発に道をつけるもので、量子もつれを利用する量子情報通信、量子情報処理技術に対する波及効果は非常に大きい。

量子もつれは一般的な物理概念であり、光だけでなく様々な物理状態において存在し得る。しかし、量子もつれを簡単に作り出し、利用できるという点では現在のところ光に勝るものはない。光の量子相関あるいは量子もつれを利用した研究は量子情報処理、量子情報通信の分野で脚光を浴びているばかりでなく、光の回折・干渉やイメージングといった分野にも及んでいる。本研究で開発された半導体量子もつれ光源や空間相関に関する知見を基に、量子もつれ光子の新たな利用法が開拓される可能性も少なくないと思われ、今後の展開が大いに期待される。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Edamatsu, R. Shimizu, and T. Itoh, "Measurement of the photonic de Broglie wavelength of entangled photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion", Phys. Rev. Lett. 89, 213601/1-4 (2002)
- [2] R. Shimizu, K. Edamatsu and T. Itoh, "Quantum diffraction and interference of spatially correlated photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion", Phys. Rev. A 67, 041805(R)/1-4 (2003)
- [3] K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu, and T. Itoh, "Generation of ultraviolet-entangled photons in a semiconductor", Nature 431, 167-170 (2004)

【申請特許リスト】

- [1] 枝松圭一、清水亮介、量子もつれ光子対発生装置および量子もつれ光子対発生方法（特願 2006-058437）2006年3月3日出願

【登録特許リスト】

- [1] 枝松圭一、伊藤正、半導体を用いた量子もつれ光子の発生方法（日本：特許第 3649408 号）2005年2月25日登録、国際出願 PCT/JP2004/016249

【報道発表リスト】

- [1] 「「量子リソグラフィ」阪大、原理を検証」、日本経済新聞 2003年1月6日朝刊
- [2] 「情報運ぶ光子のペア 半導体から」、朝日新聞 2004年9月9日朝刊
- [3] 「半導体を用いて量子もつれ光子発生」、日経ナノビジネス 2004年11月号