

平成24年度研究開発成果概要書
量子もつれ中継技術の研究開発 (158 イ 0201)
課題イ2 遠隔ノード間での量子もつれ純粋化技術
副題 光パルス制御量子ドットスピンと単一光子に基づく方式

(1) 研究開発の目的

量子もつれ中継技術の目指すところは、量子もつれ状態を遠く離れた2地点に生成し、これを長期間保存し、必要(緊急)な時に、これを用いてセキュリティーの様々な高い通信プロトコルを実現することにある。不完全なデバイスと不完全な制御技術から、上記目標を実現する完全なシステムを作り上げるためには、図1に示すような誤り耐性量子中継器の階層構造アーキテクチャーの全ての技術を相互に矛盾なく接続できるように開発していくことが必要である。本研究に先立って行われた量子中継技術に関する5年間の研究を通して、現実的な量子中継システムの全体像を描くことができるようになった。その概略は、1. 量子メモリーは2次元正方格子に並べられた量子ドットスピンアレイであり、量子もつれ状態は、2つの量子ドットからの自然放出による識別できない単一光子の発生と同時検出で生成される。2. 量子ビット情報は、2次元トポロジカル表面コードにより保存される。3. 各中継器間の量子もつれ状態のスワッピング(長距離化)はシステム全体に生成された2次元トポロジカル表面コードへの射影測定による論理量子ビットの伝送自体により実現される。4. 双方の量子ドットからの単一光子(波長 $0.9\mu\text{m}$)は、PPLN導波路デバイスにより、波長 $1.5\mu\text{m}$ の単一光子へ波長変換され、光ファイバー伝送路へ送出される。5. 識別できない単一光子の同時検出により、光ファイバー伝送路の位相安定化が自動的に実現され、フィデリティーの高い量子もつれ状態が生成される、とまとめられる。

図1の最下層である物理層では、半導体(InGaAs)量子ドットスピンを量子ビットとし、光パルスのみで初期化、1ビット制御、2ビット制御、射影測定の全てを実現し、これをもって量子メモリーとする。第2層であるバーチャル層では、リフォーカシングやデカップリングといった手法を用いて、スピン量子ビットのデコヒーレンス時間を改善する。第3層である量子誤り訂正層では、2次元トポロジカル表面コードを用いてデコヒーレンスとゲート操作エラーを除去した論理量子ビットを実現する。第4層である論理層では、第3層で実現された論理量子ビットを2地点に配し、その間に量子もつれ状態を生成・純粋化する量子中継アルゴリズムを実装する。量子もつれ状態の生成は、2つの量子メモリーから識別できない単一光子を発生し、この2つの単一光子を衝突、同時検出することにより実現される(図2)。

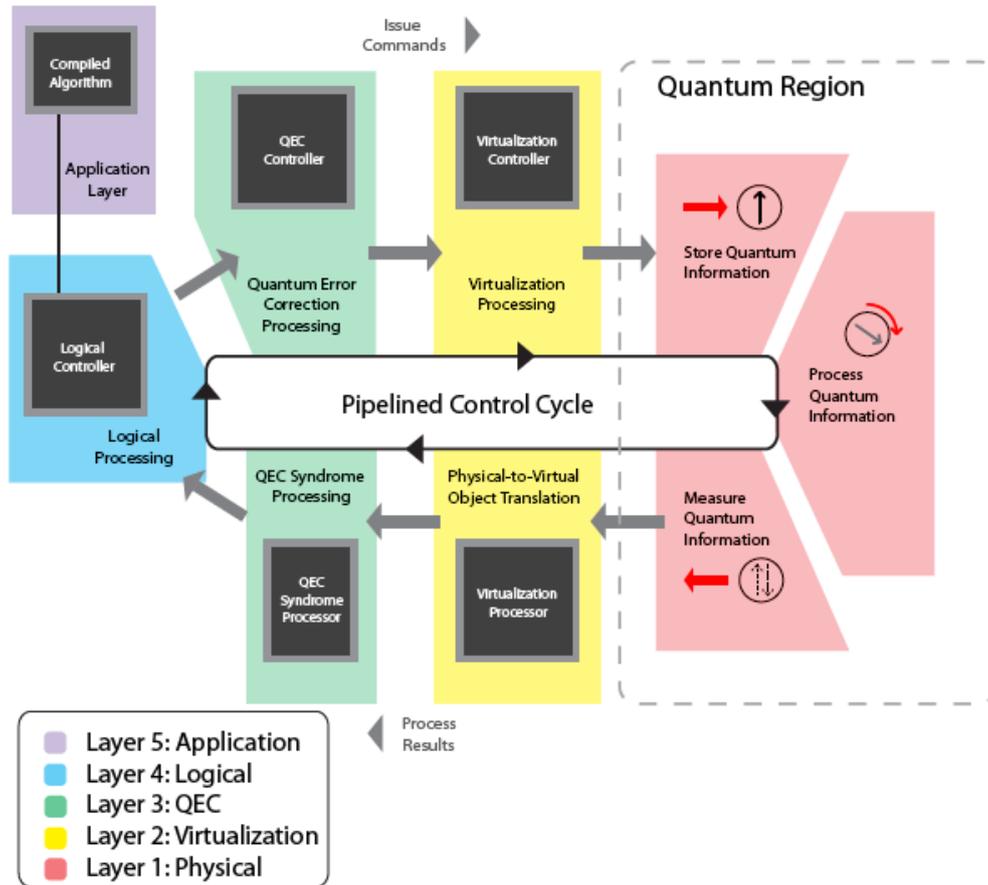


図1 量子中継システムの階層構成

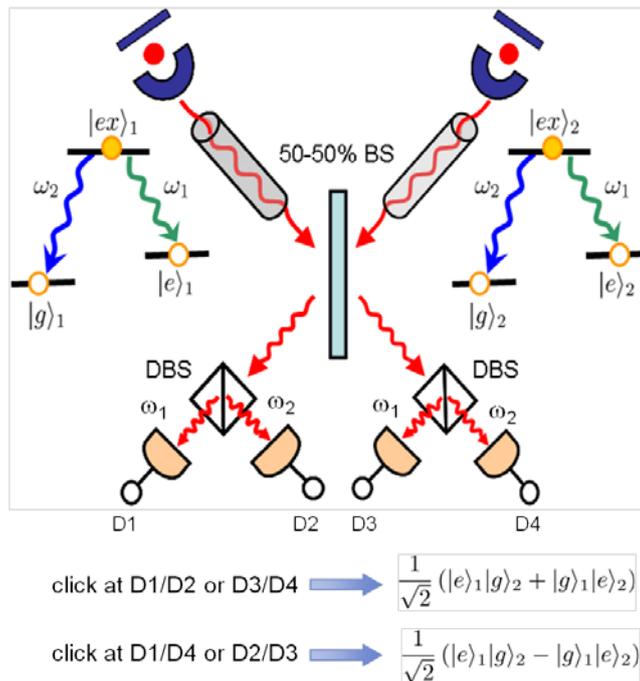


図2 識別できない単一光子の同時計測によるエンタングル状態の配信

これまでの5年間の量子メモリ素子の開発は、図3(a)に示すGaAs基板上のInGaAs自己形成量子ドットに電子を1つトラップし、これをプレーナマイクロキャビティー中に閉じ込めた後、電子ビームリソグラフィー技術を用いてポスト形状に加工することにより、単一量子ドットを切り出した素子を用いて行われてきた。この手法では、単一の量子メモリは作製できても、多数の量子メモリの同一チップへの集積化を実現することはできない。そこで、図3(b)に示すように、2次元正方格子状に量子ドットを規則的に配置し、これを2次元プレーナマイクロキャビティーに閉じ込めただけのシンプルな構造の素子に置き換える必要がある。この2次元正方格子状に規則的に並べられた量子ドットを実現する手段として、ゲート制御型量子ドットは有望な候補のひとつである。

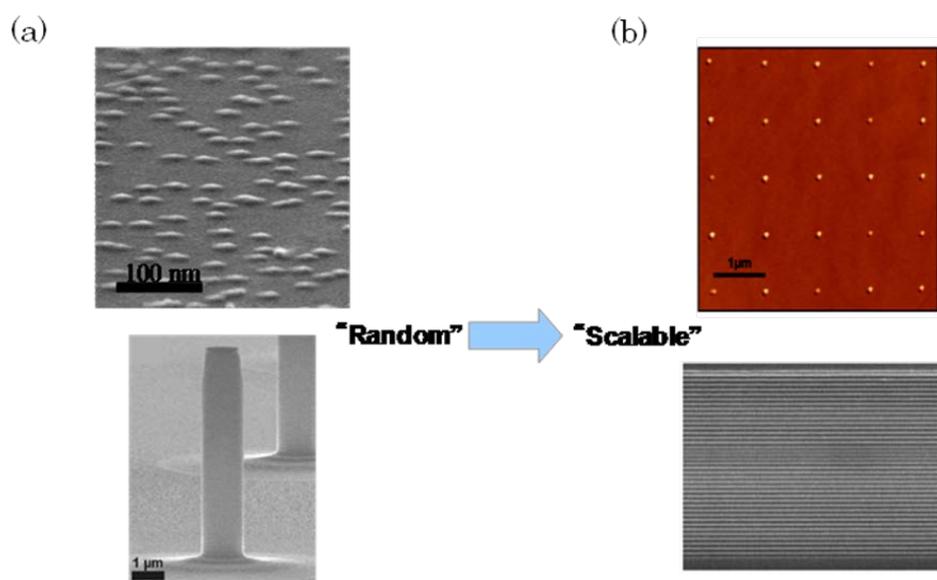


図3(a) (b) ポストマイクロキャビティー中の自己形成量子ドットとプレーナマイクロキャビティー中の2次元正方格子状のゲート制御型量子ドットアレイ

この量子メモリ素子を光パルスを用いて高速で操作する概念図が図4に示されている。各量子ドットには、単一電子もしくは単一正孔スピンのみがトラップされており、MBE成長方向と垂直な方向に直流磁場がかけられている（フォイト配置）。スピン量子ビットの振動周波数（ゼーマン分裂で決まるラーモア周波数）は、数十GHzのオーダーである。単一光子を発生する量子ドットを除いて、量子ドット励起子発光エネルギーはプレーナマイクロキャビティーの共鳴エネルギーよりも高エネルギー側に配置される。QNDパルスと呼ばれるパルス幅1nsec程度の光パルスは、プレーナマイクロキャビティーの共鳴エネルギーに同調しており、垂直に入射し、反射する。偏波干渉計を介して、スピン量子ビットの射影測定を実現する。Broadbandパルスと呼ばれるパルス幅1psec程度の光パルスは、プレーナマイクロキャビティーのストップバンドの外側（低エネルギー側）の最初のdipに共鳴したエネルギーを持ち、斜めの入射角度で入射する。非共鳴誘導ラマン散乱を介して、スピン量子ビットの1ビット制御を実現する。

量子ドット励起子発光からの離調は約 1THz である。Entangling パルスと呼ばれるパルス幅 100psec 程度の光パルスは、プレーナマイクロキャビティー光子と量子井戸励起子が作る下方ポラリトンに共鳴したエネルギーを持ち、垂直に入射する。状態ベクトルのユニタリ発展（幾何学的位相）を介して、隣り合う 2 つの量子ビット間に制御位相ゲートを実現する。これら 3 種類の光パルスの照射は、シリコン MEMS ミラーアレイを介して実現される。

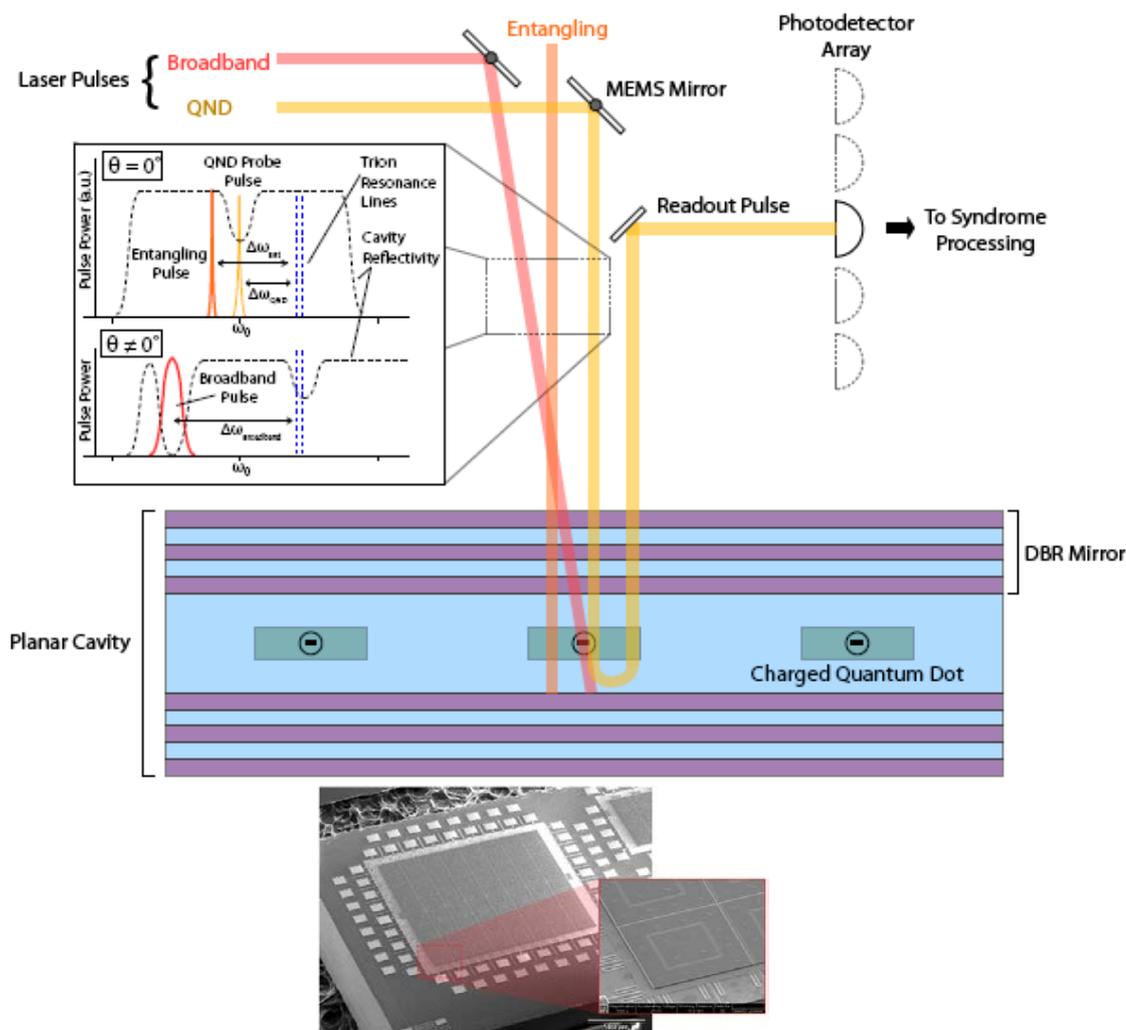


図 4 量子中継素子の構成

正方格子上に規則的に並べられたスピン量子ビットは、図 5 に示すように量子情報を格納するデータビットと誤りを検出するシンδροームビットに分けられる。データビット 6 個とシンδροームビット 2 個からなる各基本格子で、2 つの量子ビット間に制御 NOT ゲートを 8 回施して、量子誤り訂正が実現される。この量子誤り訂正方式は、2 次元トポロジカル表面コードと呼ばれ、ゲートエラーが 1.4% であっても誤り耐性を実現し、正しく動作する現時点で発見されている最も優れた量子誤り訂正コードである。格子リフレッシュは、 T_2 時間内に約 1000 回行われる。従って $T_2 = 3 \mu \text{ sec}$ とすると、制御 NOT ゲートは、約 300psec

で実現されなければならない。光パルスで制御された量子ドットスピンは、後述するようにこの条件をクリアできる。

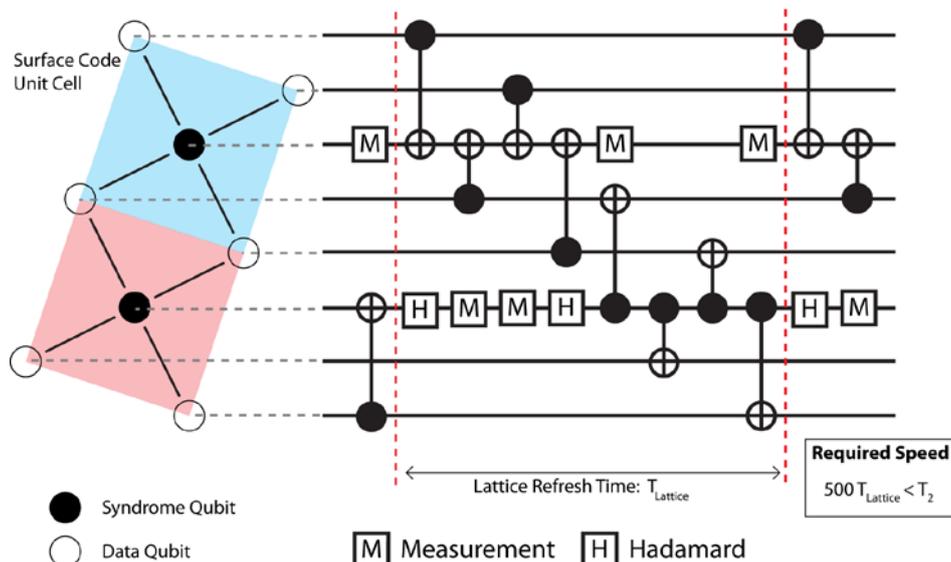


図5 2次元トポロジカル表面コードと格子リフレッシュ回路

2つの量子中継器の間での量子もつれ状態の配信は、図2に示す原理により実現される。2つの量子ドットにパルスポンプ光により励起子が注入される ($|ex\rangle_1|ex\rangle_2$)。この励起子状態は、 ω_1 の光子を放出してスピン励起状態へ緩和するか、 ω_2 の光子を放出してスピン基底状態へ緩和する。伝送路の中間点で、 ω_1 と ω_2 の光子を1つずつ同時計測できた場合には、どちらの量子ドットから ω_1 と ω_2 の光子が放出されたのか分からないので、2つの量子ドット中のスピン量子ビットは量子もつれ状態になる。この時、量子ドットから放出される波長 $0.9\mu\text{m}$ の単一光子は、光ファイバー伝送路へ送出される前に、PPLN導波路デバイスで波長 $1.5\mu\text{m}$ へ変換される。

以上のような誤り耐性機能を持った量子もつれ中継技術を念頭において、本研究では、次のようなハードウェア技術の課題に取り組む。

- (1) InGaAs 量子ドット中の電子スピンもしくは正孔スピンのデコヒーレンス時間内に行える1ビット制御の回数を 10^5 以上にする。このため、光パルス列によるリフォーカシング法やデカップリング法を用いてデコヒーレンス時間を $3\mu\text{sec}$ 以上にすると同時に、光パルスによる1ビットゲート時間を決定するスピンのゼーマン(ラーモア)周波数を 20GHz 以上として1ビット制御時間を 25psec 以下にする。
- (2) InGaAs 量子ドットから発生する波長 $0.9\mu\text{m}$ の単一光子を、周波数下方変換技術を用いて波長 $1.5\mu\text{m}$ へ高効率、低雑音で変換する。このため、2種類のPPLN導波路デバイスを新たに開発し、波長 $2\mu\text{m}$ のポンプ光源と波長 $1.5\mu\text{m}$ への単一光子波長変換器として、それぞれ使う。波長 $0.9\mu\text{m}$ から波長 $1.5\mu\text{m}$ への変換量子効率は25%以上、ラマン散乱雑音光子によるフィデリティ劣化は5%以下のレベルに抑える。
- (3) InGaAs 量子ドットから発生する単一光子を高効率で外部の単一モード光学

系へ取り出すために、量子ドットをプレーナマイクロキャビティの中へ埋め込む。ポスト形状やフォトニック結晶へ加工を施すことにより、量子効率は大幅に改善されるが、そのような3次元構造共振器は、2次元トポロジカル表面モードの実装を著しく困難にするので、プレーナマイクロキャビティ構造のみで、取り出し量子効率10%以上を実現する。

- (4) 上記3つの技術を組み合わせて1つの量子ドットスピン状態と波長 $1.5\mu\text{m}$ の単一光子偏波状態の間に量子もつれ状態を生成する。光ファイバー50km伝送後の量子もつれ状態の生成レートが1kHz、フィデリティが80%以上であることを実現する。
- (5) InGaAs 量子ドット中の電子スピンもしくは正孔スピンのシングルショット射影測定（量子非破壊測定）を光パルスを用いて高速・低雑音で実現する。このためにも、プレーナマイクロキャビティよりも複雑な共振器構造は取り入れない。スピンのデコヒーレンス時間内に1000回以上の射影測定ができるよう測定時間を3nsec以下で実現する。
- (6) 隣接する2つのスピン量子ビット間に、光パルスを用いて2ビットゲートを実装する方法を理論的に提案する。このためにも、プレーナマイクロキャビティよりも複雑な共振器構造は取り入れない。スピンのデコヒーレンス時間内に10,000回以上の2ビット演算ができるよう、ゲート時間を300psec以下で実現する手法を探索する。
- (7) 上記6つの技術を総合的に組み合わせて、2つの量子メモリーから波長 $1.5\mu\text{m}$ の単一光子を発生し、これを衝突させ、同時検出することにより、2つの量子メモリー間に高フィデリティの量子もつれ状態を生成する。光ファイバー長50kmの伝送後、量子もつれの生成レートが1Hz以上、フィデリティが80%以上であることを実現する。

(2) 研究開発期間

平成23年度から平成27年度（5年間）

(3) 委託先

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

(4) 研究開発予算（百万円単位切上げ）

平成23年度	55（契約金額）
平成24年度	51（ 〃 ）
平成25年度	48（ 〃 ）
平成26年度	45（ 〃 ）
平成27年度	42（ 〃 ）

(5) 研究開発課題と担当

課題イ-1 量子ドットスピンメモリーの光パルス制御技術

課題イ-2 単一光子の高効率・低雑音波長変換技術

- 課題イ-3 スピン-光子間量子もつれ状態の生成技術
- 課題イ-4 光パルスによる単一スピンの射影測定技術
- 課題イ-5 2つの量子メモリー間の量子もつれ状態生成技術
(大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構)

(6) これまで得られた研究開発成果

		(累計) 件	(当該年度) 件
特許出願	国内出願	0	0
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	10	6
	その他研究発表	18	13
	プレスリリース	1	1
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

具体的な成果

(1) スピン-光子量子もつれ生成の原理

図6に InAs 量子ドットを直流磁場 $B_0=3T$ のフォイト配置においた場合の電子スピンのゼーマンサブレベルとトライオン（正孔スピン）のゼーマンサブレベルのエネルギーレベルを示す。もし量子ドットがトライオンの最低エネルギー状態に初期化されていたとすると、自然放出過程により確率50%でV偏光と周波数 ω を持った光子を一つ放出して電子スピンの励起状態 $|\downarrow\rangle$ （ダウンスピン）に緩和するか、同じ確率50%でH偏光と周波数 $\omega+\delta_0$ を持った光子を一つ放出して電子スピンの基底状態 $|\uparrow\rangle$ （アップスピン）に緩和するかのどちらかが起こる。ここで δ_0 はゼーマン周波数である。どちらの遷移が起こるかは本来知ることができないから、終状態は、

$$i(|\uparrow\rangle|H\rangle+|\downarrow\rangle|V\rangle)=i(|\leftarrow\rangle|\sigma^+\rangle+|\rightarrow\rangle|\sigma^-\rangle) \quad (1)$$

なるスピン-光子量子もつれ状態になっているはずである。すなわち、 $|\uparrow\rangle|H\rangle$ 態と $|\downarrow\rangle|V\rangle$ 状態が共存すると共に、 $|\leftarrow\rangle|\sigma^+\rangle$ 状態と $|\rightarrow\rangle|\sigma^-\rangle$ 状態も共存する。ここで、 $|\leftarrow\rangle$ はスピンの向きが+x方向、 $|\rightarrow\rangle$ は-x方向、 $|\sigma^+\rangle$ は右回り円偏光、 $|\sigma^-\rangle$ は左回り円偏光である。

しかしながら、このスピン-光子量子もつれ生成の原理には一つだけ重大な欠陥がある。それは自然放出により発生する単一光子のパルス幅は500ps~1nsec程度であり、そのスペクトル拡がり $\delta_0 \approx 17.6\text{GHz}$ よりも小さいことである。この事実より、初期のトライオン状態がどちらの経路を δ_0 通って減衰したのかがわかってしまうため、終状態は、(1)式ではなく、

$$\frac{1}{2}(|\uparrow, H\rangle\langle\uparrow, H|+|\downarrow, V\rangle\langle\downarrow, V|) \quad (2)$$

なる古典相関しか持たない混合状態になってしまう。この経路情報を消去するため、自然放出過程で発生した単一光子を 8psec というゲート時間（スペクトル拡がりに換算して 100GHz）で検出することとした。そのための実験系を図 7(a) に示す。量子ドットから放出された波長 910nm の単一光子は、パルス幅 8psec、波長 $2.2\mu\text{m}$ のポンプ光と同期して PPLN 導波路ダウンコンバーターへ入射され、波長 $1.560\mu\text{m}$ の単一光子へ波長変換される。図 7(b) に示すように、この波長変換による経路情報の消去は雑音光子をほとんど発生せずに実現される。

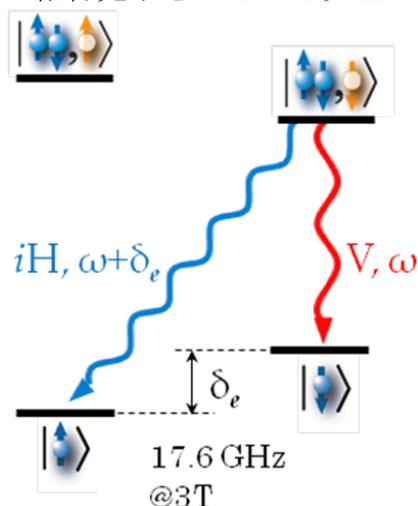


図 6 スピン-光子量子もつれ生成の原理

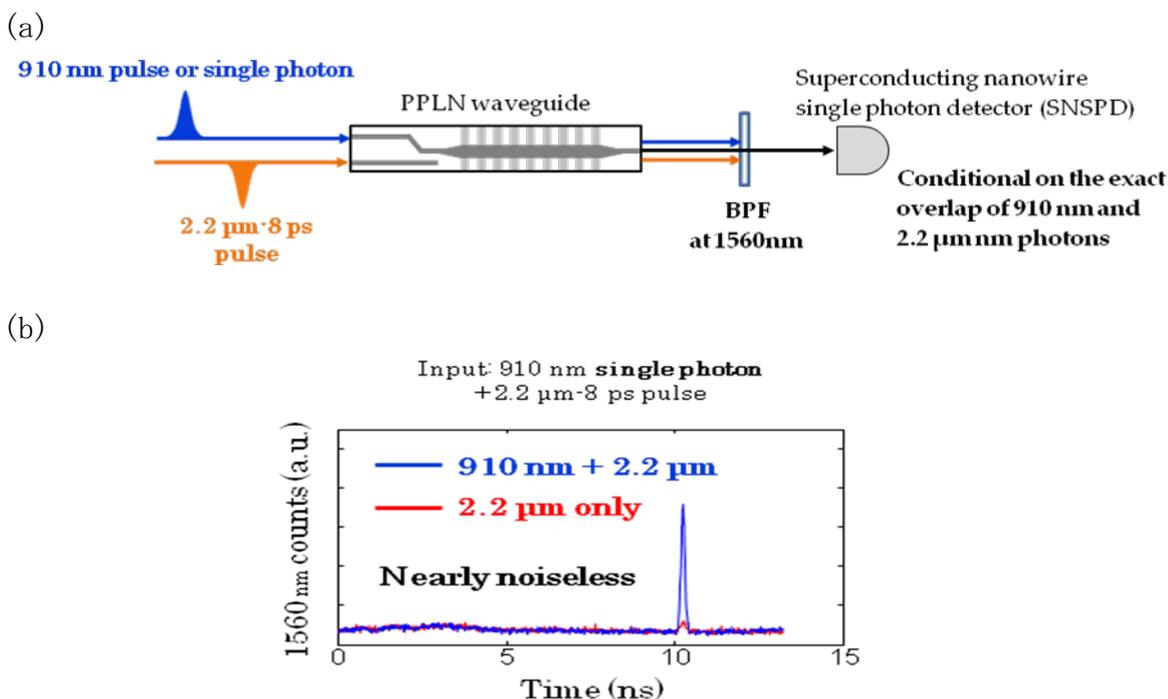


図 7 (a) 経路情報の消去のために使われる周波数下方変換実験系
 (b) 単一光子の周波数下方変換が雑音光子を伴わずに実現できることを示す結果

(2) 量子相関の測定

図 8 にスピン-光子間の量子相関を測定する系を示す。まず初期化 (initialization) は、電子スピン状態 $|\downarrow\rangle$ とトライオン状態 $|\uparrow\downarrow, \downarrow\rangle$ 間に共鳴した光パルス为数 nsec にわたって照射することにより実現される。この後、電子スピン状態は $|\uparrow\rangle$ に初期化されている。次に、パルス幅 3psec の非共鳴ラマン散乱パルス (π パルス) により電子スピン状態は $|\uparrow\rangle$ から $|\downarrow\rangle$ へ変換される。次に、再び状態 $|\downarrow\rangle$ - $|\uparrow\downarrow, \downarrow\rangle$ 間に共鳴した光パルスを 100psec にわたって照射することにより (π パルス)、トライオン状態 $|\uparrow\downarrow, \downarrow\rangle$ が励起される。自然放出による単一光子の放出は、この直後から 600psec にわたって行われる。終状態の電子スピンの向きが $|\uparrow\rangle$ か $|\downarrow\rangle$ であるかは、初期化に用いた光パルスと同じものを用いて実現される。 $|\uparrow\downarrow, \downarrow\rangle$ - $|\uparrow\rangle$ 間のエネルギー差に相当する H 偏光の光子が単一光子検出器 (SPCM) で検出されたならば、電子スピンは $|\downarrow\rangle$ 、されなければ $|\uparrow\rangle$ と判定される。自然放出で発生したパルス幅 600psec の光子は PPLN 導波路ダウンコンバーターで波長 $1.5\mu\text{m}$ 、パルス幅 8psec の光子へ変換され、超伝導細線単一光子検出器 (SNSPD) で検出される。

図 9 には量子相関の測定結果が示されている。単一光子の偏光が $|H\rangle$ 又は $|V\rangle$ であったときの電子スピンの向きが $|\uparrow\rangle$ 又は $|\downarrow\rangle$ のヒストグラムが示されている。 $|\uparrow, H\rangle$ と $|\downarrow, V\rangle$ の 2 状態が 50%ずつの確率で現れることが確認された。

測定ベースを電子スピンについては、 $|\leftarrow\rangle$ 又は $|\rightarrow\rangle$ 、光子については $|\sigma^+\rangle$ 又は $|\sigma^-\rangle$ に変更するためには、図 10 に示すように単一光子の波長を 910nm から $1.560\mu\text{m}$ へ変換するパルス幅 8psec、波長 $2.2\mu\text{m}$ のポンプ光パルスを PPLN 導波路に照射してから τ 時間後に非共鳴ラマン散乱光パルス ($\pi/2$ パルス) を電子スピンに照射する。 $\tau = nt_L$ (t_L は、電子スピンのラーモア周期) ならば、電子スピンは、 $|\leftarrow\rangle$ から $|\downarrow\rangle$ へ変換され、 $\tau = (n+1/2)t_L$ ならば $|\rightarrow\rangle$ から $|\downarrow\rangle$ へ変換される。図 11 には、この基底で測定された量子相関が示されている。単一光子の偏光が $|\sigma^+\rangle$ 又は $|\sigma^-\rangle$ であった時の電子スピンの向きが $|\rightarrow\rangle$ 又は $|\leftarrow\rangle$ のヒストグラムが示されている。 $|\leftarrow, \sigma^+\rangle$ と $|\rightarrow, \sigma^-\rangle$ の 2 状態が 50%ずつの確率で現れることが確認された。

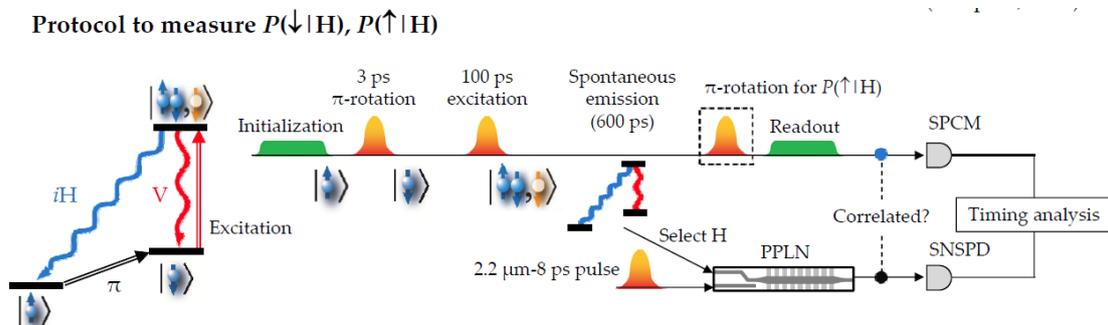


図 8 スピン-光子間の量子相関測定系

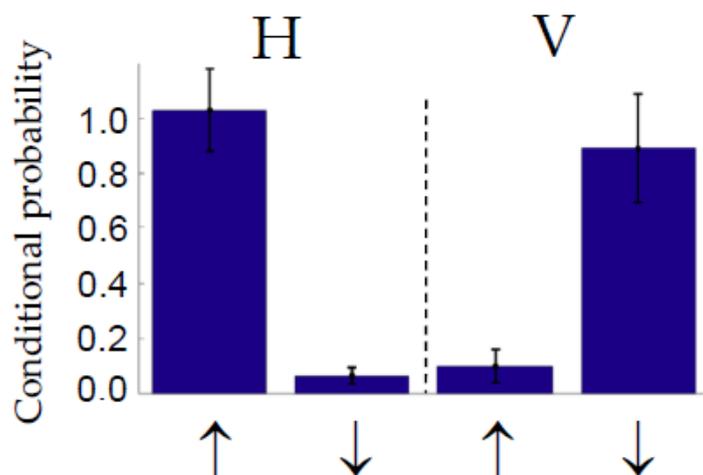


図9 光子の偏光 $|H\rangle$ 又は $|V\rangle$ と電子スピンの向き $|\uparrow\rangle$ 又は $|\downarrow\rangle$ の相関測定結果

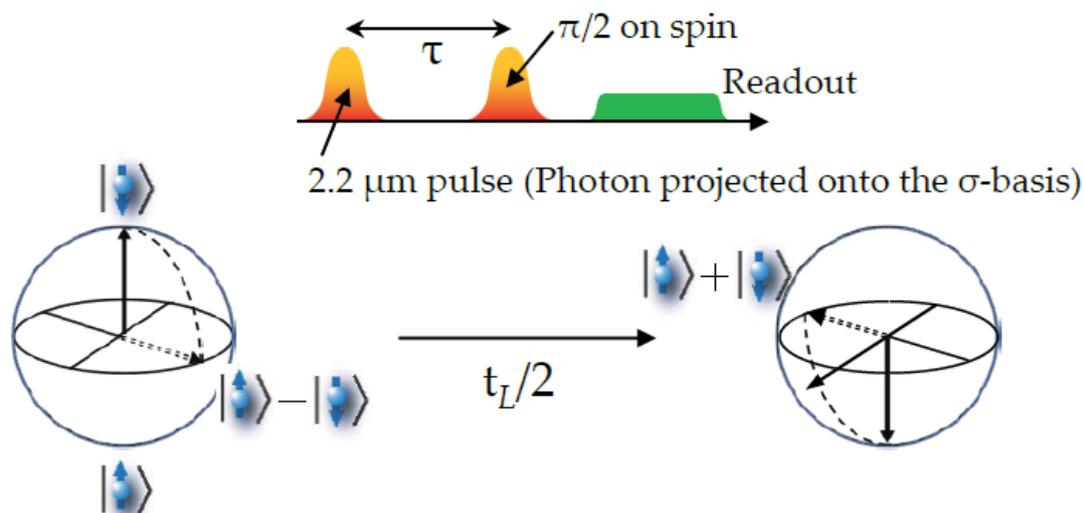


図10 測定基底を $|\sigma^+, \sigma^-\rangle$ 及び $|\leftarrow, \rightarrow\rangle$ に変換する $\pi/2$ 光パルス照射するタイミング

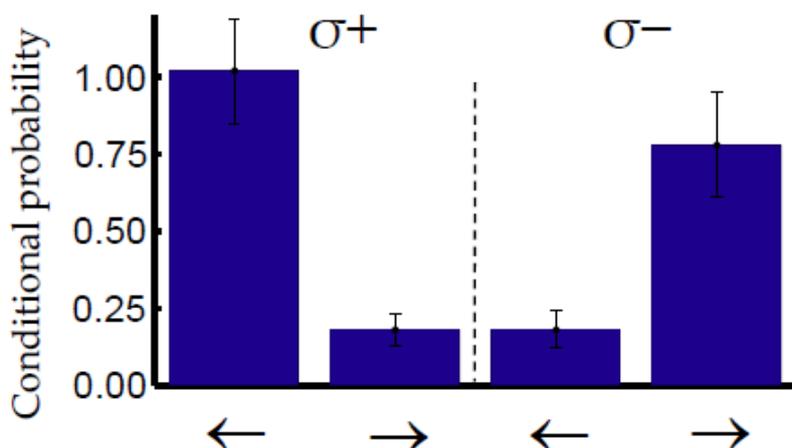


図11 光子の偏光 $|\sigma^+\rangle$ 又は $|\sigma^-\rangle$ と電子スピンの向き $|\leftarrow\rangle$ 又は $|\rightarrow\rangle$ の相関測定結果

(3) まとめ

今回得られたスピン-光子量子もつれ状態のフィデリティは $80 \pm 8.5\%$ であったが、経路情報の消去をより確実に行うことによりこれを 90% 以上に改善することができるかと予想している。量子中継への応用を考える際、高フィデリティ化は避けて通れないハードルであるので、これに挑戦する予定である。

生成されたスピン-光子量子もつれ状態を用いて、光子 qubit をスピン qubit へ量子テレポートする可能性が開かれた。飛んでくる光子 qubit を単一スピン qubit へトラップした例はこれまでになく、量子通信網の構成に重要なステップと考えている。まず波長 910nm の光子に対して、これを実現したい。

現在の量子ドットの発光波長は個体間のばらつきが大きく直接には接続できない。この問題は PPLN 導波路での周波数下方変換に使うポンプ光パルスの波長を適切に選ぶことにより解決されるはずである。波長の異なった 2 つの量子ドットから発生される単一光子間の量子干渉をこの方法により実現したい。

(7) 研究開発イメージ図

添付