

## 平成25年度研究開発成果概要書

課題名 : 量子もつれ中継技術の研究開発  
採択番号 : 158 イ 02  
個別課題名 : 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高い様々な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システムの階層構造アーキテクチャーを支える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次元正方格子状に並べられた量子ドットスピニアレイであり、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2つの単一光子の同時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イッチング(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導波路を用いた波長変換デバイスにより、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)。

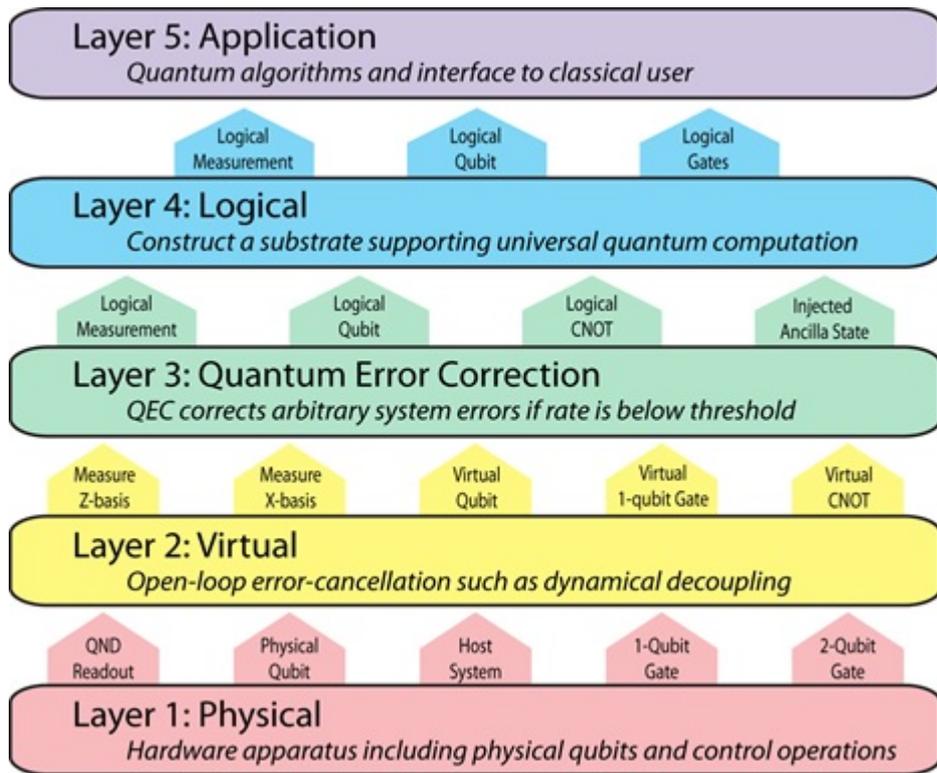


図1 量子中継システムの階層構成

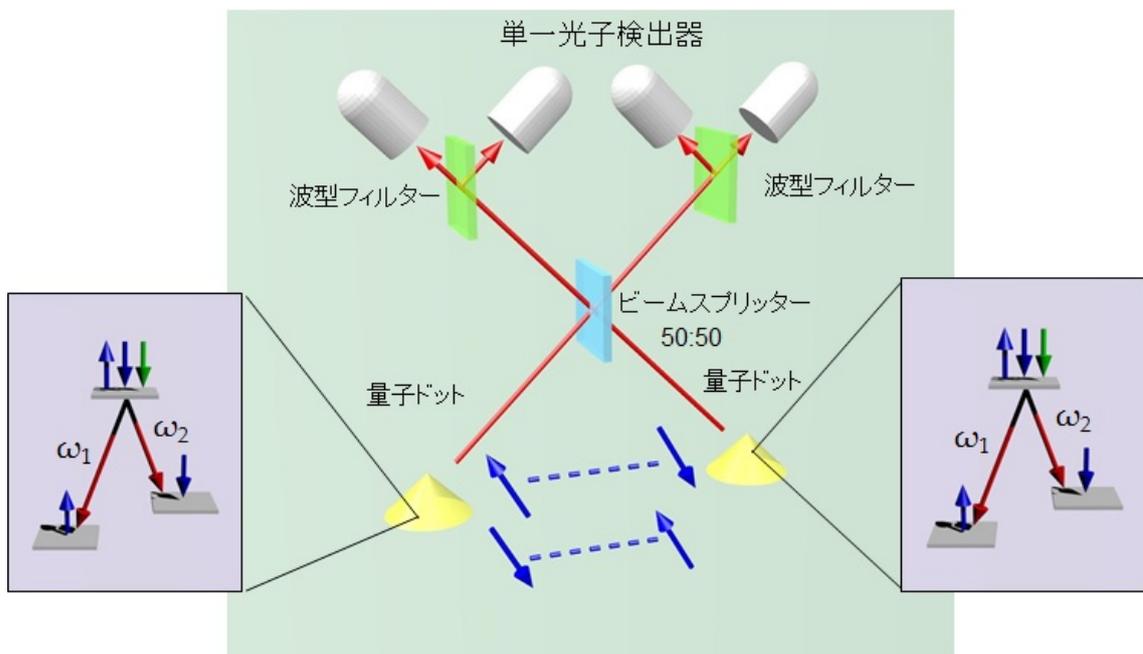


図2 識別できない単一光子の同時計測によるエンタングル状態の配信

これまでの5年間の量子メモリー素子の開発は、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、単一の量子メモリーは作製できても、多数の量子メモリー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次元正方格子上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次元正方格子上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、サイト制御成長型量子ドットは有望な候補のひとつである。

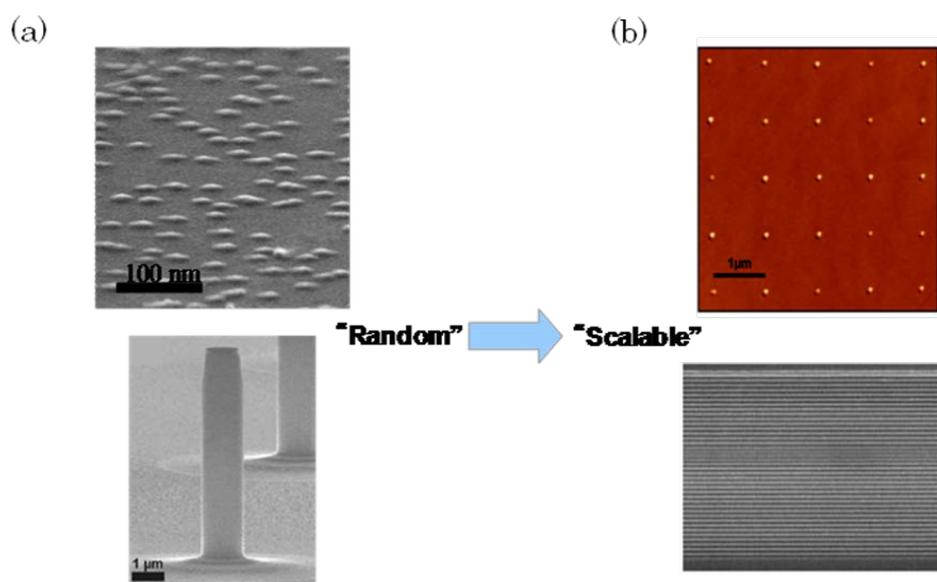


図3(a) (b) ポストマイクロキャビティー中の自己形成量子ドットとプレーナマイクロキャビティー中の2次元正方格子上のサイト制御成長型量子ドットアレイ

この量子メモリー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電子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。

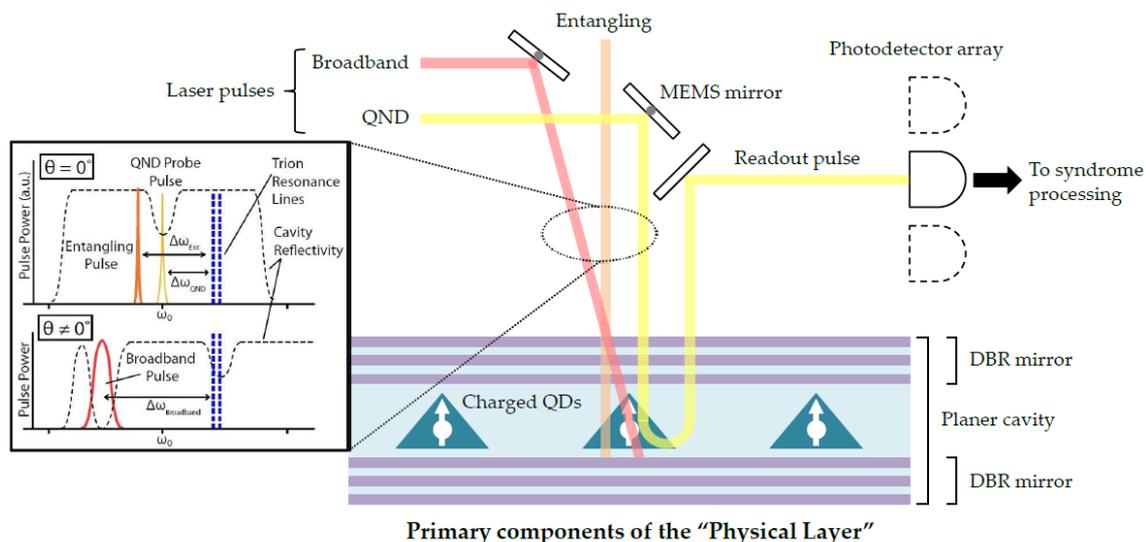


図 4 量子中継素子の構成

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ドロームビットに分けられる。データビット 6 個とシンドロームビット 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、ゲートエラーが約 1% であっても誤り耐性を実現し、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。格子リフレッシュサイクルは、 $T_2$  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。

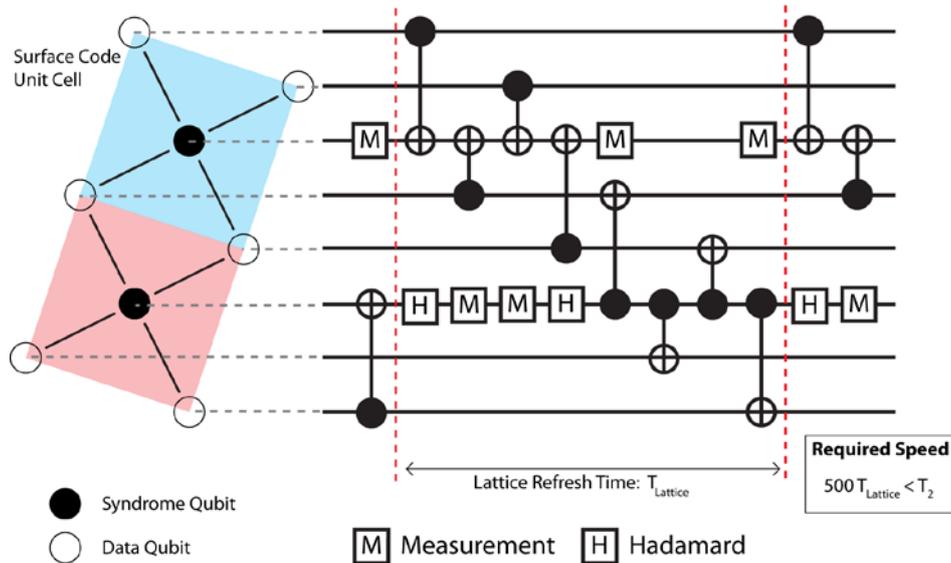


図5 2次元トポロジカル表面コードと格子リフレッシュ回路

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、 $\omega_2$ の光子を放出してスピン励起状態へ緩和するか、 $\omega_1$ 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、 $\omega_1$ と $\omega_2$ 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 $\omega_1$ と $\omega_2$ 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 $20\text{GHz}$ 以上として1ビット制御時間を $25\text{psec}$ 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コードの実装を著しく困難にするので、横方向光閉じ込め機能を有するプレーナマイクロキャビティ構造で、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（契約額）

総額243百万円（平成25年度49百万円）

※百万円未満切り上げ

(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	1	1
外部発表	研究論文	12	2
	その他研究発表	28	10
	プレスリリース	1	0
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な成果実施内容と成果

(1) スピン-光子量子もつれ生成の原理

図6に、単一量子ドット電子スピンと単一光子の間に、量子もつれ状態を生成する原理と実験系を示す。量子ドットには電子が1つトラップされ、結晶成長方向と垂直な方向に直流磁場  $B_{\text{ext}}=3\text{T}$  を印加する (Voigt 配置)。電子スピンは  $17.6\text{GHz}$  のゼーマン分裂をおこし、これが2つの基底状態をつくる。量子ドットに、更に電子-ホール対1つをトラップすると、電子2個とホール1個からなるトライオン (荷電励起子) 状態となり、ホールスピンのゼーマン分裂により2つの励起状態を形成する。この系をトライオン状態のうちエネルギーの低い方にだけ初期化できたとすると、系は垂直偏光  $|V\rangle$  で周波数  $\omega$  の光子を一つ放出して電子スピン  $|\downarrow\rangle$  の状態へ緩和するか、水平偏光  $|H\rangle$  で周波数  $\omega + \delta_e$  の光子を一つ放出して電子スピン  $|\uparrow\rangle$  の状態へ緩和するか、のいずれかの経路を取る ( $\delta_e$  は電子スピンのゼーマン分裂)。2つの経路は同じ確率で起こるから、どちらの経路を取ったかの情報が得られない場合の終状態は、

$$|\uparrow\rangle_e |H\rangle_p + |\downarrow\rangle_e |V\rangle_p$$

なるスピン-光子量子もつれ状態となっているはずである。この状態は、また  $x$  軸・ $-x$  軸へ向くスピンと右回り・左回り円偏光状態を使って、

$$|\leftarrow\rangle_e |\sigma^+\rangle_p + |\rightarrow\rangle_e |\sigma^-\rangle_p$$

とも記述される。従って、以下に示すような相関を示すはずである。

	↑	↓		←	→
<b>H</b>	1	0	σ <sup>+</sup>	1	0
<b>V</b>	0	1	σ <sup>-</sup>	0	1

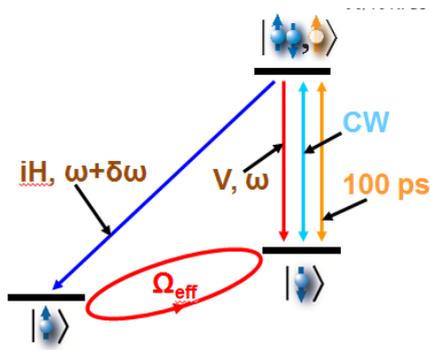


図6. トライオン状態から電子スピンのゼーマンサブレベルへの自然放出によるスピン-光子量子もつれ状態の生成原理。

しかしながら、図6の系で実際に生成されるスピン-光子量子もつれ状態は光子の周波数にも相関を有する状態、

$$|\uparrow\rangle_e |H, \omega + \delta_e\rangle_p + |\downarrow\rangle_e |V, \omega\rangle_p$$

であるため、偏光か周波数のいずれか一方の情報を消去しなければ量子相関は観測できない。我々は、周波数の情報を消去して、スピン-偏光量子もつれを観測する実験を行った。<sup>26)</sup>

## (2) 実験系

実験系を図7に示す。自然放出された光子が持つ、17.6GHzの周波数差を消するためには、光子の検出時間を $(17.6\text{GHz})^{-1} \sim 50\text{psec}$ よりも十分短く設定すればよい。我々はこれを実現するため量子ドットから放出された910nmの単一光子をパルス幅8psec、波長2000nmのポンプ光パルスを用いて、波長1560nm、パルス幅~8psecの単一光子へ波長変換した。この周波数下方変換には、ホームメードのPPLN導波路デバイスが使われた。このデバイスの時間分解能は~8psec(帯域~100GHz)であり、光子の周波数情報を消すには十分である。

K. De Greve et al. Nature 491, 421 (2012)  
 (cf. W. B. Gao et al. Nature 491, 426 (2012))

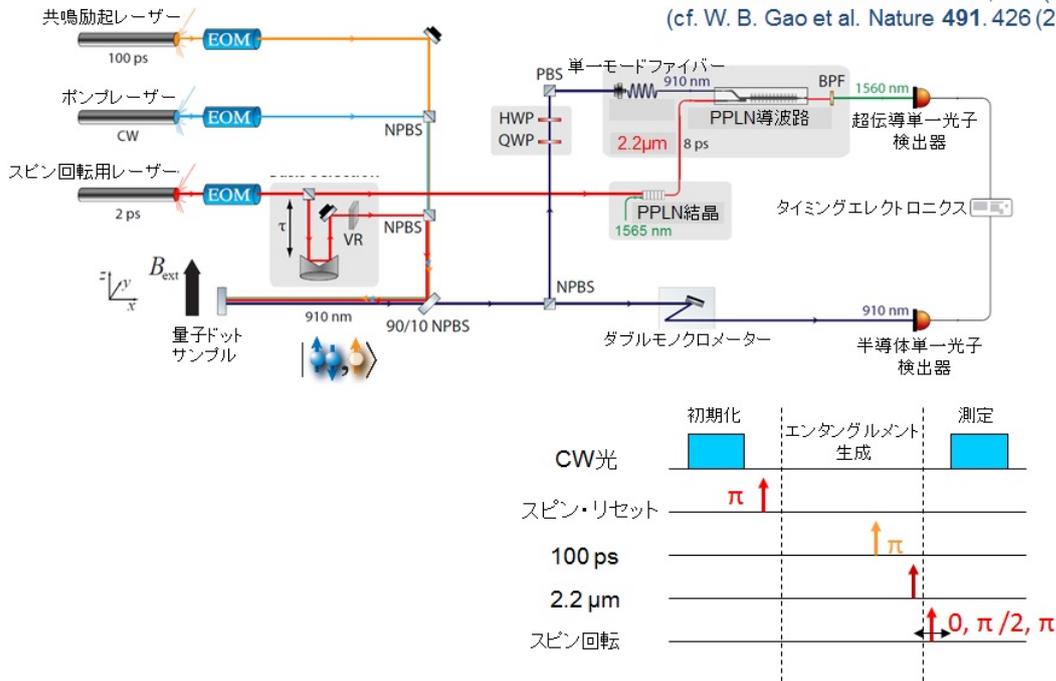


図7 光子ースピン量子もつれ状態の生成実験系

光子ースピン量子もつれ状態の生成実験系（図7）において、まず、電子スピン励起状態 $|\downarrow\rangle$ とトライオン状態に共鳴した光（パルス幅 10nsec）を照射し、光ポンピングの原理で電子スピンを基底状態 $|\uparrow\rangle$ に初期化する。次に、パルス幅 3psec の非共鳴パルス（ $\pi$ パルス）を用いて、電子スピンを基底状態から励起状態へ遷移させる。次に、パルス幅 100psec の共鳴パルス（ $\pi$ パルス）を用いて、トライオンの最低エネルギー状態へ励起する。その後、約 600psec の時間をかけて自然放出が起こり、単一スピナー単一光子量子もつれ状態が生成される。電子スピンの読み出しには光ポンピングの手法が再び用いられる。すなわち、電子スピンの励起状態 $|\downarrow\rangle$ を読み出すためには、共鳴光を照射して放出される $\omega + \delta_0$ の単一光子を検出する。一方、電子スピンの基底状態 $|\uparrow\rangle$ を読み出すためには、一度、非共鳴 $\pi$ パルス光を照射して $|\downarrow\rangle$ に変換した後、共鳴光を照射して $\omega + \delta_0$ の単一光子を検出する。光子の読み出しは偏光子を通過させたのち、上述した PPLN 導波路ダウンコンバーターで波長 1560nm、パルス幅 8psec の単一光子に変換したのち、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を用いて検出される。

### (3) 実験結果

自然放出で発生した単一光子がH偏光とV偏光の時の電子スピンの状態の測定結果を図8に示す。 $|H\rangle|\uparrow\rangle$ と $|V\rangle|\downarrow\rangle$ が優勢であることが確認された。

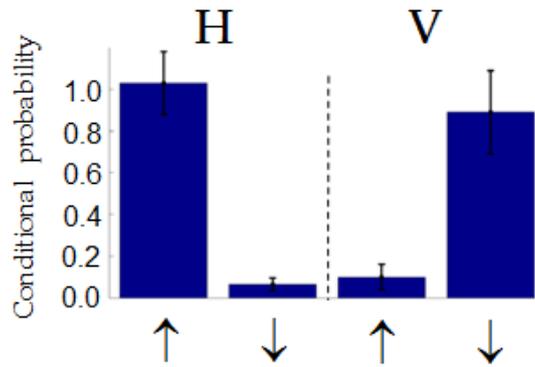


図 8. 単一光子の偏光を H-V 基底で、スピンの向きを  $\uparrow$ - $\downarrow$  基底で測定した場合のヒストグラム。

電子スピンを x 軸・-x 軸基底で読み出す手法を図 9 に示す。910nm の単一光子を 1560nm の単一光子に変換した時点から測って、遅延時間  $\tau = nt_L$  または  $nt_L + \frac{1}{2}t_L$  のタイミングで非共鳴  $\frac{\pi}{2}$  パルスをかけると、電子スピン状態  $|\rightarrow\rangle$  は、 $|\downarrow\rangle$  または  $|\uparrow\rangle$  にそれぞれ変換される。その後は、通常の光ポンピングの手法で電子スピン状態  $|\downarrow\rangle$  または  $|\uparrow\rangle$  が測定される。そのようにして、測定された結果を図 10 に示す。 $|\sigma^+\rangle|\leftarrow\rangle$  と  $|\sigma^-\rangle|\rightarrow\rangle$  が優勢であることが確認された。これら 2 つの結果から、スピン-光子量子もつれ状態が生成されていることが確認された。

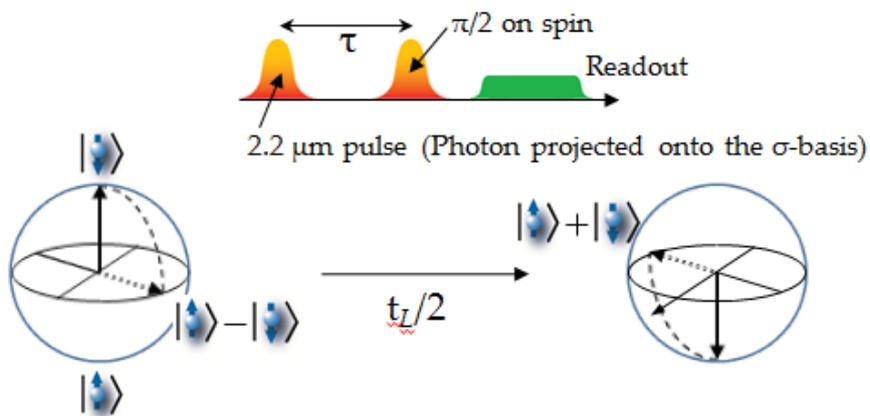


図 9. 電子スピンの x 軸・-x 軸基底での測定法。

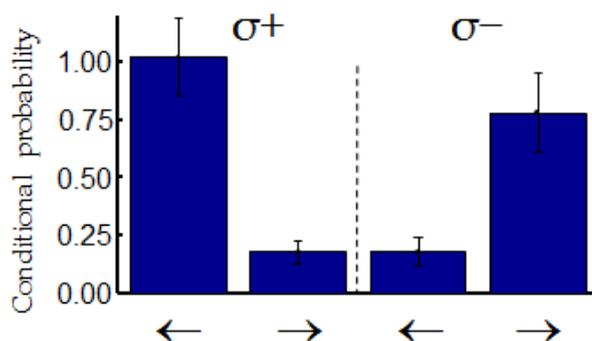


図 10. 単一光子の偏光を  $\sigma^+$  /  $\sigma^-$  基底で、スピンの向きを  $\leftarrow$  /  $\rightarrow$  基底で測定した場合のヒストグラム。

図 11 には、スピン-光子量子もつれ状態を 10 万回生成した場合のフィデリティーのヒストグラムが示されている<sup>36)</sup>。平均フィデリティーは  $92.1 \pm 3.2\%$  であり、99.9%以上の確度でフィデリティーは 71% (純粋化が可能なしきい値) 以上であることが確認された。その他のエンタングルメント純度を評価するパラメータを測定し、今夏連す  $90.8 \pm 5.1\%$ 、タングル  $82.6 \pm 8.6\%$ 、生成エンタングルメント  $87.0 \pm 6.9\%$ 、残留エントロピー  $0.107 \pm 0.06$  という数値を得た。表 1 にこれまで報告されている様々な系で生成されたスピン-光子量子もつれ状態のフィデリティーを比較した。我々の結果は、固体系で最も高いフィデリティーを実現したものとなっている。

	Physical System	Wavelength	Entanglement Fidelity	Institution (PI)
	Trapped ion ( $^{111}\text{Cd}^+$ )	214.5 nm	$\geq 87\%$ [1]	U. Maryland (Monroe)
原子系での最高値 ⇒	Trapped ion ( $^{40}\text{Ca}^+$ )	854 nm	<b><math>97.4 \pm 0.2\%</math> [2]</b>	U. Innsbruck (Blatt)
	Neutral atom ( $^{87}\text{Rb}$ )	780 nm	$> 86.0(4)\%$ [4]	MPI Garching (Rempe)
	NV centre	637 nm	$\geq 70 \pm 7\%$ [3]	Harvard U. (Lukin)
	Quantum dot (InGaAs)	967 nm	$\geq 68 \pm 5\%$ [5]	ETH Zuerich (Imamoglu)
固体系での最高値 ⇒	Quantum dot (InAs)	910 nm, converted to 1560 nm	$\geq 80 \pm 8.5\%$ [6] <b><math>92.1 \pm 3.2\%</math> [8]</b>	Stanford U. / NII (Yamamoto)
	Quantum dot (InAs)	$\sim 900$ nm	$\geq 59 \pm 4\%$ [7]	U. Michigan (Steel)

[1] B. Blinov, et al. Nature **428**, pp. 153 – 157 (2004). doi:10.1038/nature02377  
 [2] A. Stute, et al. Nature **485**, pp. 482 – 485 (2012). doi:10.1038/nature11120  
 [3] E. Togan, et al. Nature **466**, pp. 730 – 734 (2010). doi:10.1038/nature09256  
 [4] T. Wilk, et al. Science **317**, pp. 488 – 490 (2007). doi:10.1126/science.1143835  
 [5] W. Gao, et al. Nature **491**, pp. 426 – 430 (2012). doi:10.1038/nature11573  
 [6] K. De Greve, et al. Nature **491**, pp. 421 – 425 (2012). doi:10.1038/nature11577  
 [7] J. Schaibley, et al. Phys. Rev. Lett. **110**, 167401 (2013) doi:10.1103/PhysRevLett.110.167401  
 [8] K. De Greve, et al. Nature Communications **4**, 2228 (2012)

表 1. 様々な系で実現されたスピン-光子量子もつれ状態のフィデリティー

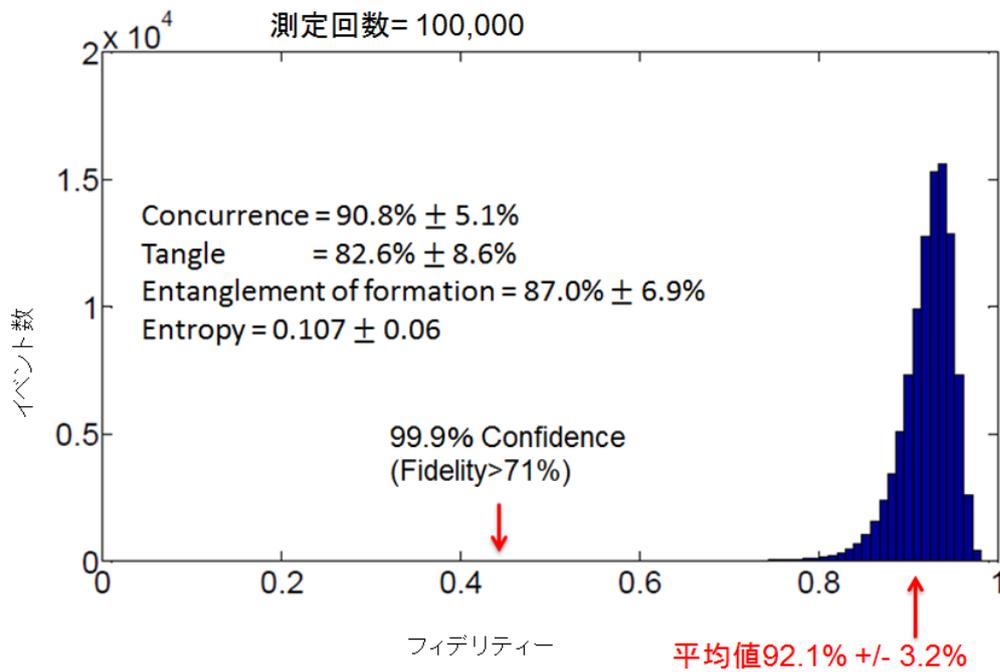


図 11. スピン-光子量子もつれ状態のフィデリティのヒストグラム

#### (4)まとめ

2つの量子メモリーの間量子エンタングル状態を配信、純粋化、保存する量子中継器を実現するための第1歩として、量子ドット中のスピン量子ビットと量子ドットから放出される光子量子ビットの間の量子もつれ状態の生成実験を行った。表1には、様々な系で実現されたスピン-光子量子もつれ状態のフィデリティがまとめられている。我々の実験は現時点で71%以上のフィデリティを実現している唯一の固体量子ビット系である。