

平成 23 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」

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）。

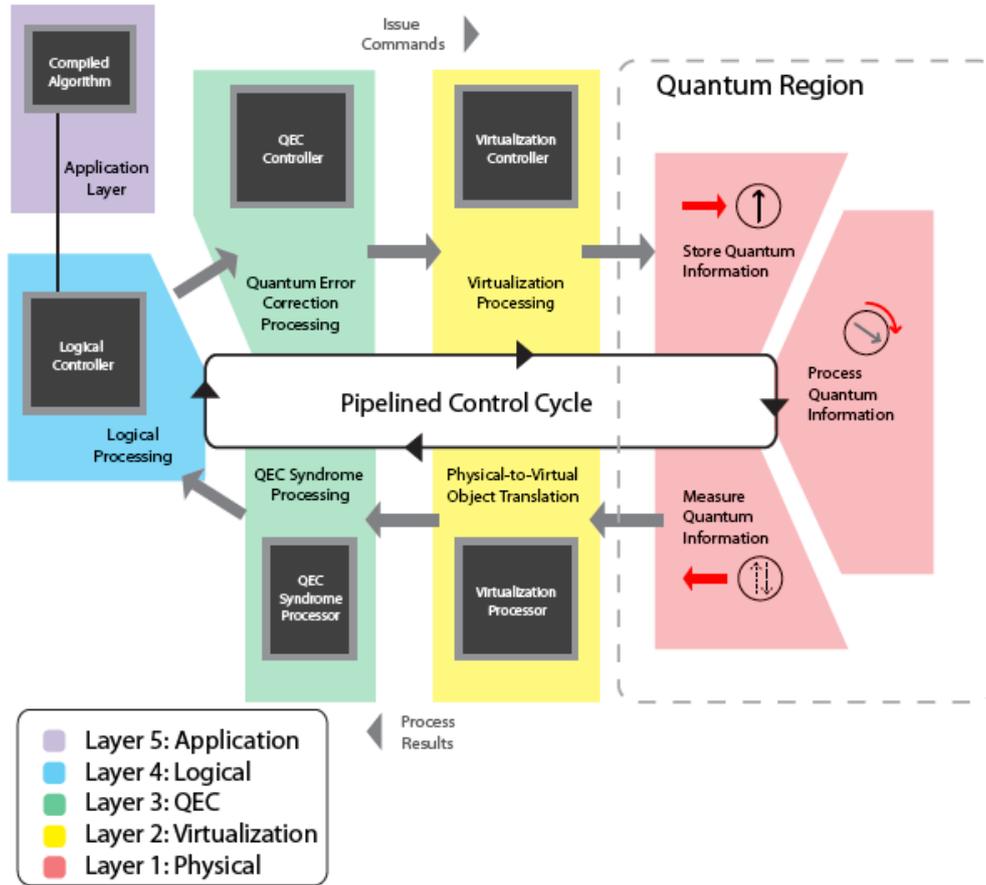


図1 量子中継システムの階層構成

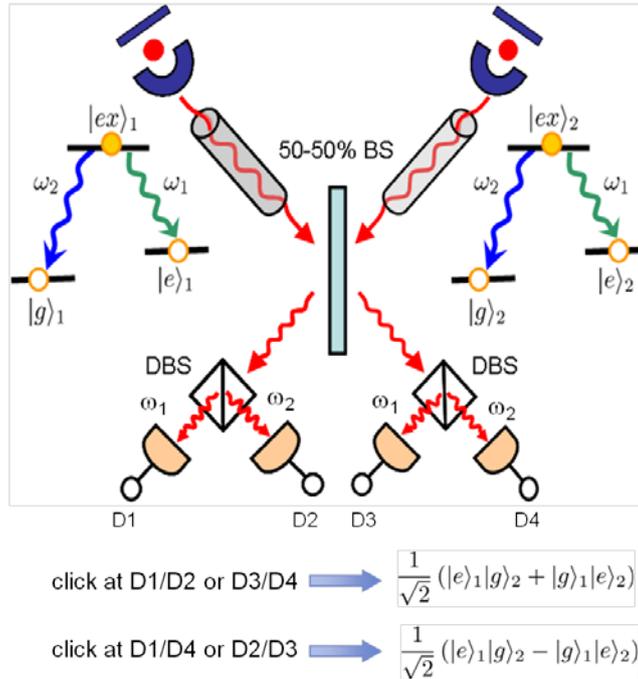


図2 識別できない単一光子の同時計測によるエンタングル状態の配信
 これまでの5年間の量子メモリー素子の開発は、図3(a)に示すGaAs基板上の

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。

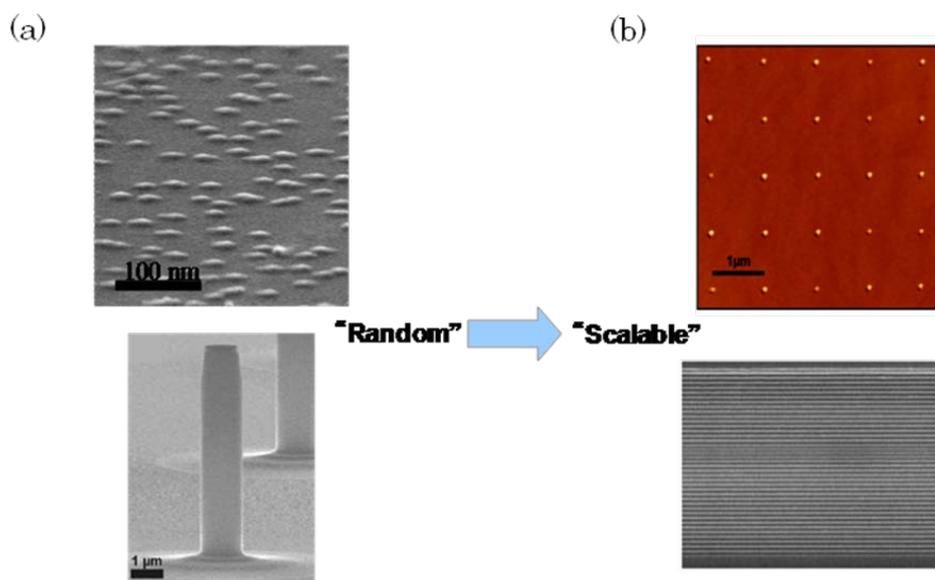


図3(a) (b) ポストマイクロキャビティー中の自己形成量子ドットとプレーナマイクロキャビティー中の2次元正方格子状のゲート制御型量子ドットアレイ

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。

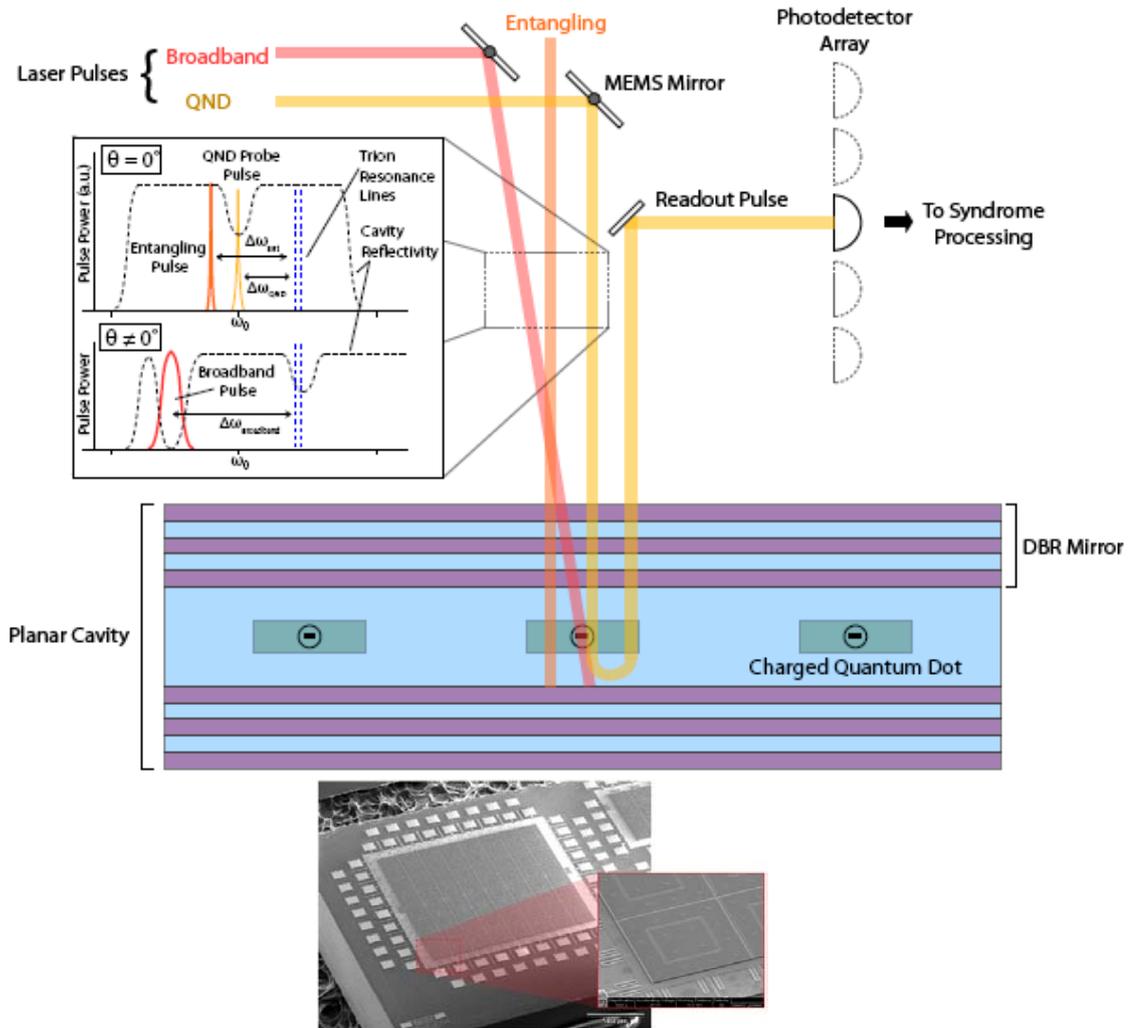


図 4 量子中継素子の構成。

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。

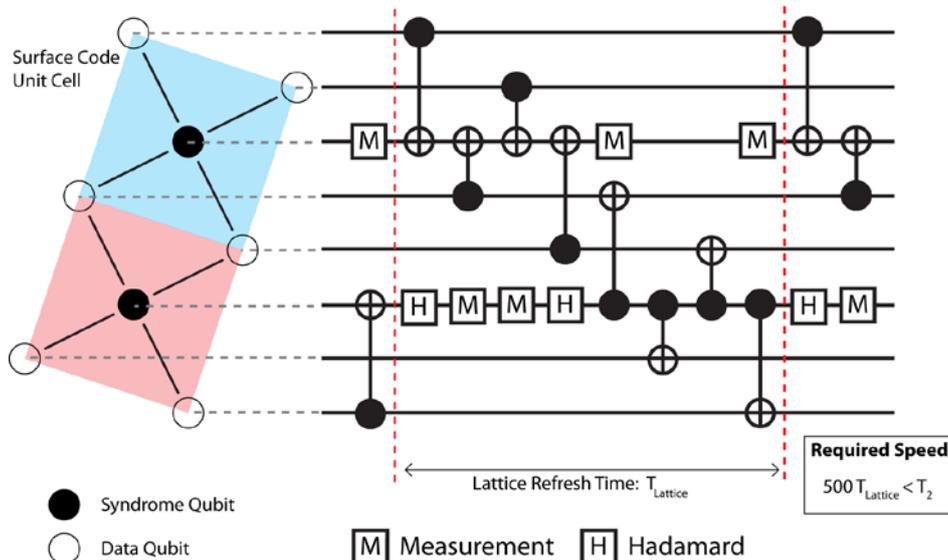


図5 2次元トポロジカル表面コードと格子リフレッシュ回路

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コ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、フィデリティーが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ー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、フィデリティーが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) 委託先企業

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）

平成23年度	55（契約金額）
平成24年度	52（ 〃 ）
平成25年度	49（ 〃 ）
平成26年度	46（ 〃 ）
平成27年度	43（ 〃 ）

(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	3	3
	その他研究発表	3	3
	プレスリリース	0	0
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

具体的な成果

(1) 原子核スピンの結合を抑圧できる正孔スピン量子ビットの開発

InAs 量子ドット中の電子スピン量子ビットは、結晶構成原子である In と As の原子核スピンと強いハイパーファイン結合を有するため、電子スピンを光パルスで制御する際、核スピンの光ポンピング効果による様々な非線形効果を誘発し、安定なゲート操作が実現しにくいという欠点があった。この問題を克服するためには、ブロッホ関数が p 波であることにより原子核スピンとのハイパーファイン結合が小さい正孔スピンを電子スピンの代わりに使うことが有効であると考えられる。

図 1 に InAs 量子ドット正孔スピンのエネルギーレベル (図 1a)、光パルス制御実験系 (図 1b)、観測されたコヒーレントラビ振動波形 (図 1c)、ラムゼー干渉縞 (図 1d, e) を示す。ピコ秒光パルスを用いて、電子スピンと同様の量子ビット操作が正孔スピンに対して出来ることが明らかになった。

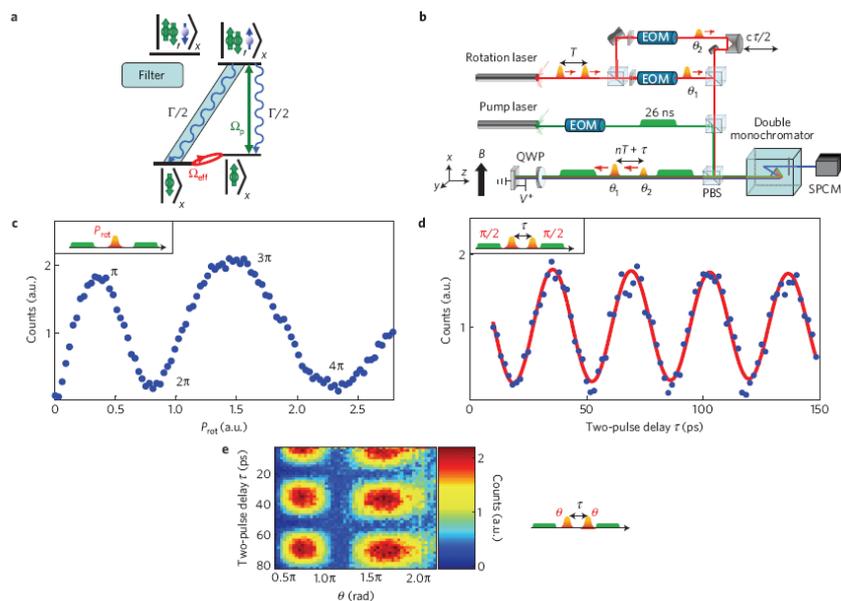


図 1

図 2 は、原子核スピンとの結合が電子スピンに比べて正孔スピンでは抑圧されていることを確認した結果を示している。図 2a と b は、2 つの $\pi/2$ パルスで構成されたラムゼー干渉計の干渉波形を電子スピンと正孔スピンに対して観測した結果を比較している。電子スピンでは、遅延時間 τ を上げていった時と下げていった時で、異なった波形が観測されるのに対し、正孔スピンではそのような異常な振舞いは見られない。図 2c と d は、共鳴吸収線を電子スピンと正孔スピンに対して観測した結果を比較している。電子スピンでは波形を上げていった時と下げていった時で異なった波形（ヒステリシス）が観測されるのに対し、正孔スピンではそのような異常な振舞いは見られない。これは、電子スピンを用いた系では、原子核スピンとの光ポンピング効果による非線形フィードバックループが存在するのに対し、正孔スピンを用いた系ではそのようなフィードバックループが存在しないためである。

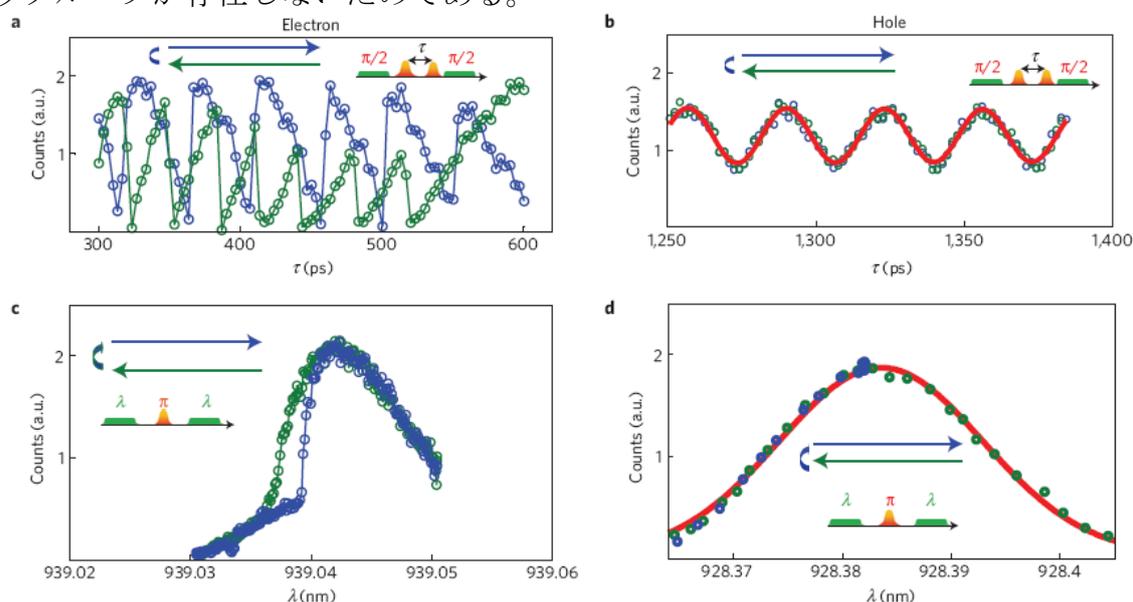


図 2

図 3 には、正孔スピン量子ビットのデコヒーレンス特性が示されている。ラムゼー干渉縞のビジビリティはガウス関数で減少していくことが分かる。(図 3a と b)。観測された T_2^* 時間は 2.3 nsec であった。この T_2^* 時間は量子ドットにかかる電場のゆらぎがスピン-軌道角運動量結合を介して、ラーモア周波数を変調することに由来することが確認された (図 3c と d)。スピンエコー法を用いて、この電場ゆらぎの影響を取り除くと、 T_2 時間は、1.1 μ sec に改善された (図 3e と f)。

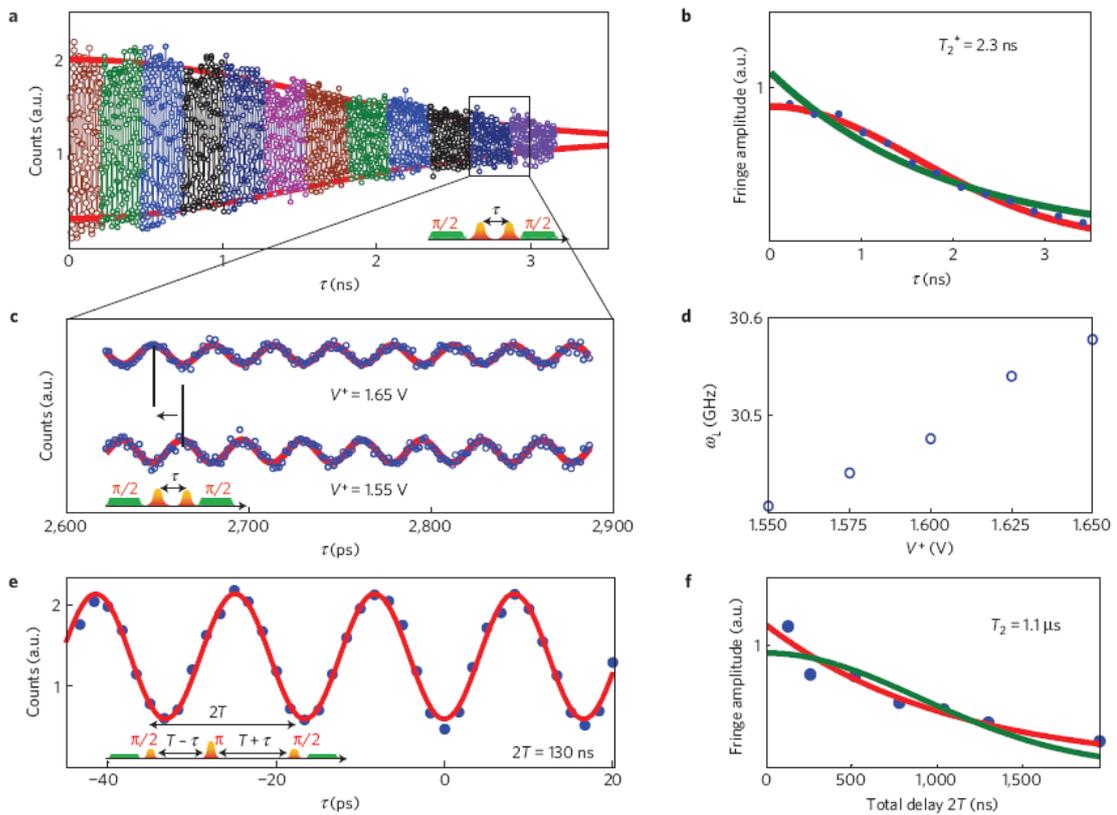


図 3

(2) 2 ビットゲート時間の短縮化

2つの隣接する量子ドット間に2ビットゲートを実装するスキームとして従来は外部からコヒーレンス光を注入し、共振器内に生成される光電場の時間応答が2つの局在スピンの状態に依存して異なった振舞いを示すことを利用した制御位相ゲートを提案していた (Phys. Rev. B 84, 235307, 2011)。しかしこの手法では、2ビットゲートにかかる時間は10~100nsec というオーダーであった。しかしトポロジカル表面コードを使って誤り耐性量子中継器を実現するためには、スピン量子ビットのデコヒーレンス時間 ($T_2 \sim 3 \mu\text{sec}$) 内に、10,000 回程度の2ビットゲートを実施しなければならないことが分かっている。従って、ゲート時間を300psec以下に減少することが必要とされる。

図4に励起子ポラリトンを介した制御位相ゲートの実装法の原理を示す。図4(a)に示すように、プレーナマイクロキャビティ内には、単一の量子井戸が埋め込まれており、DC電場でトラップされた局在電子が存在する。この系に存在する励起子ポラリトンのエネルギーE対運動量kの分散曲線を図4(b)に示す。k=0における下方ポラリトンの共鳴エネルギーは、2つの電子スピンの3通りの状態 $|\uparrow\uparrow\rangle$ 、 $|\uparrow\downarrow\rangle$ 又は $|\downarrow\uparrow\rangle$ 、 $|\downarrow\downarrow\rangle$ による異なる。これは、局在スピンと励起子ポラリトンの交換相互作用によるものである。

この時、3つの共鳴エネルギーよりも低いエネルギーを持った外部コヒーレンス光をプレーナマイクロキャビティに注入すると、図5に示すように、キャビティ内部の電場の複振幅 α は3通りのスピン状態に対して異なった軌跡を

描く。 $\text{Im}(\alpha)\text{-Re}(\alpha)$ 位相空間の中で、3つの軌跡で囲まれた面積が $2\pi \times N$ 、 $2\pi \times M$ 、 $2\pi \times L + \pi$ (N, M, L は正の整数) となる時、制御位相ゲートが実現される。図6に規格化外部コヒーレント光振幅 Ω と光パルス幅 τ に対して計算された制御位相ゲートのフィデリティ F を示す。 $\Omega = 159.88 \text{ meV}$ 、 $\tau = 201.88 \text{ psec}$ の時、 $F = 99.99\%$ が実現されることが分かる。

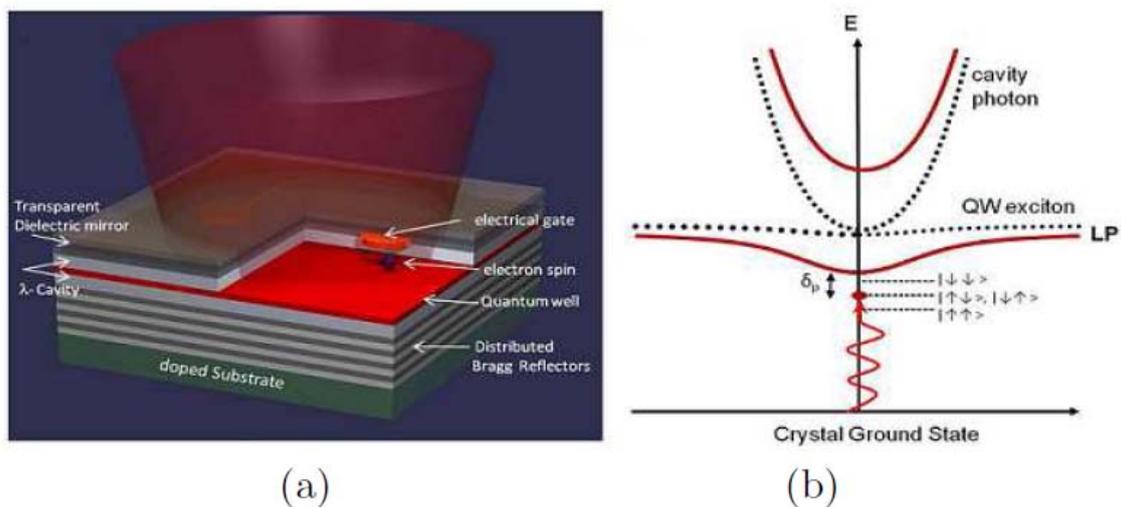


図 4

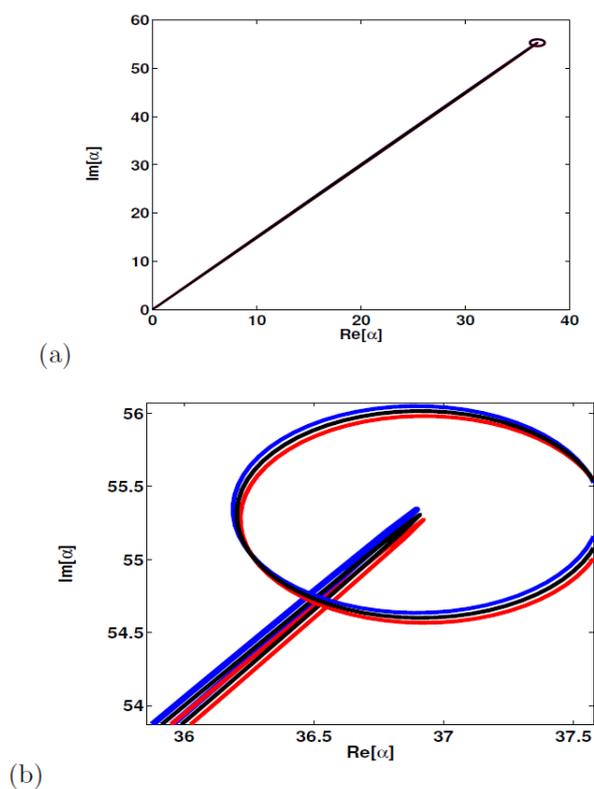


図 5

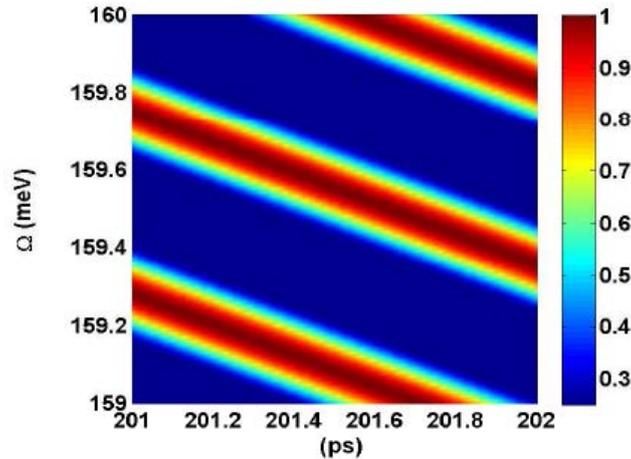


図 6

(3) $1.5 \mu\text{m}$ 単一光子検出用 2 ステップアップコンバーター

量子中継技術では、長距離光ファイバーを伝搬する単一光子は $1.5 \mu\text{m}$ 、これを検出するアバランシェフォトダイオード (APD) は室温動作、低ダークカウント、高効率検出を実現しうる Si-APD が使われると予想される。しかし Si-APD の最大量子効率 $0.55 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 帯にあるため、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯の単一光子を $0.55 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 帯に周波数変換する必要がある。

図 7 にこれを実現する PPLN 導波路 2 ステップアップコンバーターの原理を示す。図 7(a) に示すように $1.55 \mu\text{m}$ の単一光子は、 $1.88 \mu\text{m}$ のポンプ光との和周波発生により、一旦 $0.83 \mu\text{m}$ に変換され、さらに $1.88 \mu\text{m}$ のポンプ光との和周波発生により、 $0.57 \mu\text{m}$ へ変換される。図 7(b) に示すように、2 つの異なる周期構造を持つ PPLN 導波路により、このような 2 ステップアップコンバージョンが実現される。

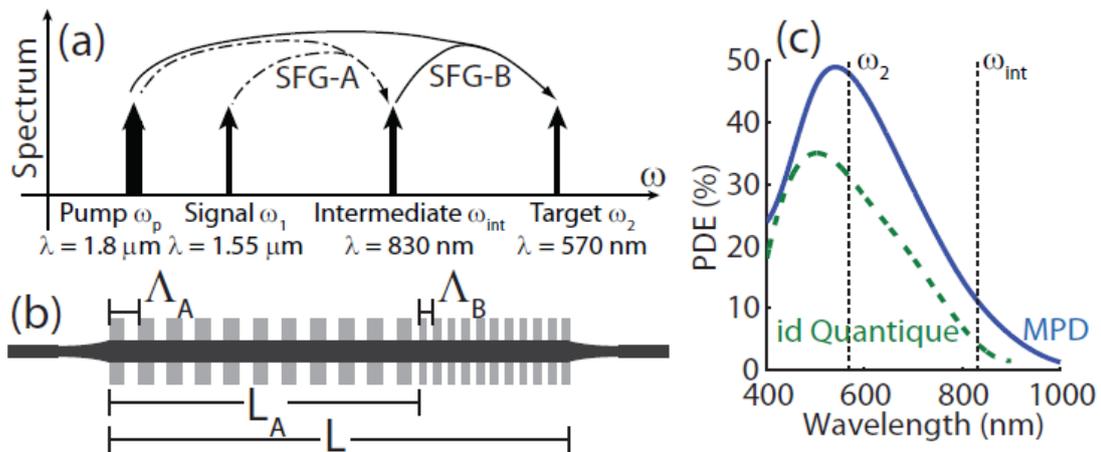
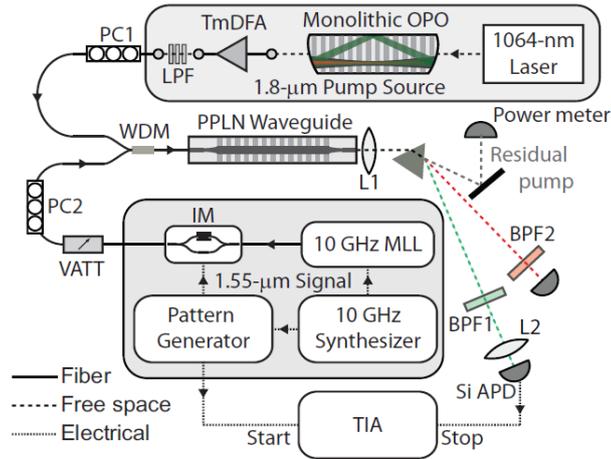
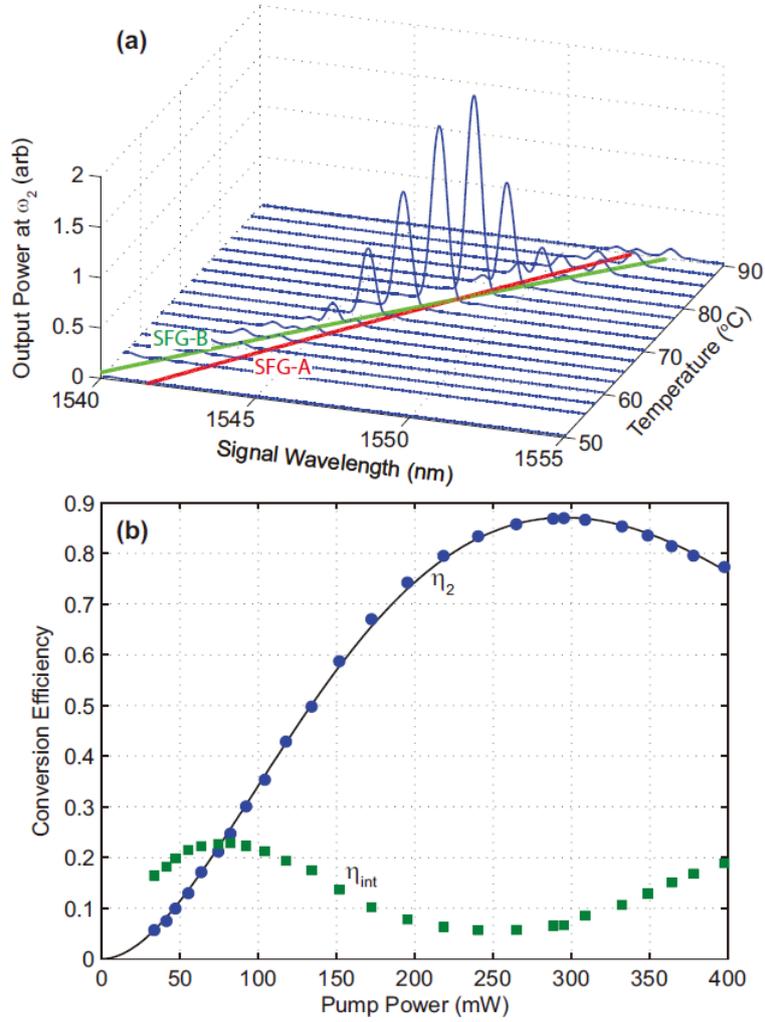


図 7

図 8 には実験系が示されている。図 9 には、和周波数発生のための位相整合を温度チューニングで取れること、周波数変換効率が最大 88% になることを示した実験結果が示されている。更に、図 10 には最終的に Si-APD で $0.57 \mu\text{m}$ の単一光子を検出した時のタイミングジッターが 67psec に抑えられることを示している。



8



9

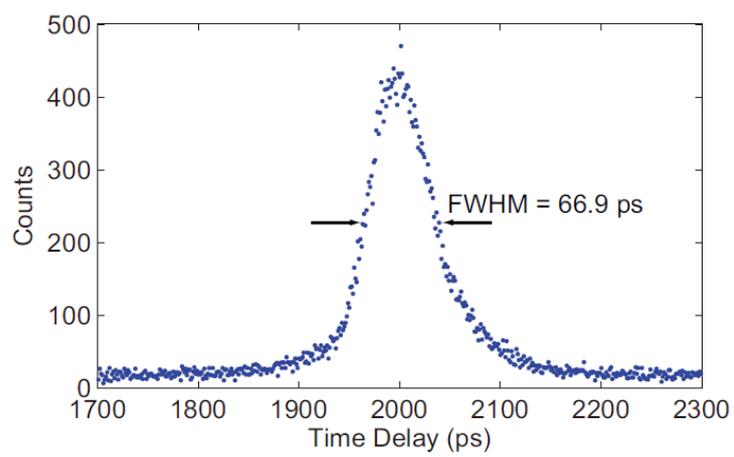


図 10

(7) 研究開発イメージ図
添付