

## 平成 26 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、必要な時に、これを用いてセキュリティの高い様々な量子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次元正方格子上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識別できない2つの単一光子の同時発生と同時検出によるポストセレクションで生成される。
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) 量子ドット電子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特性を改善する。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）。

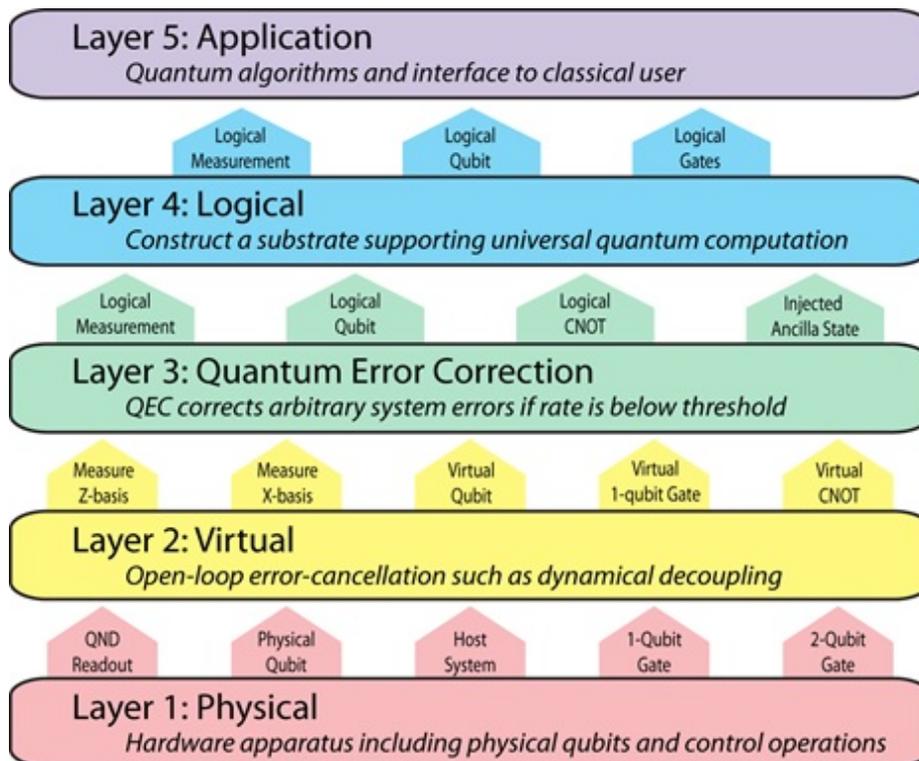


図 1 量子中継システムの階層構成

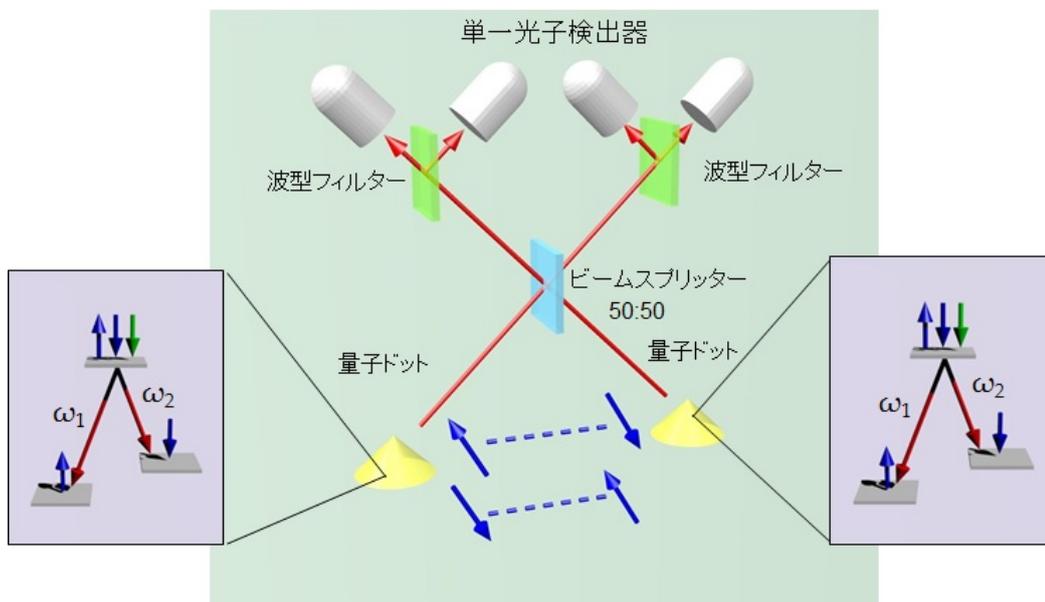


図 2 識別できない単一光子の同時計測によるエンタングル状態の配信

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、サイト制御量子ドット成長技術を用いて2次元正方格子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。

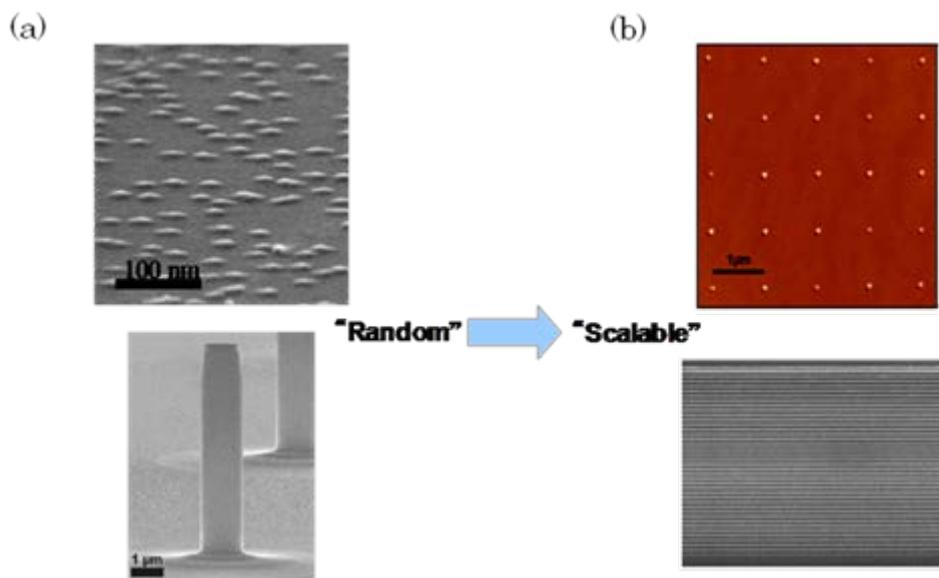


図 3 (a) (b) ポストマイクロキャビティー中の自己形成量子ドットとプレーナマイクロキャビティー中の2次元正方格子上のサイト制御成長型量子ドットアレイ

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、単一電子スピン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。

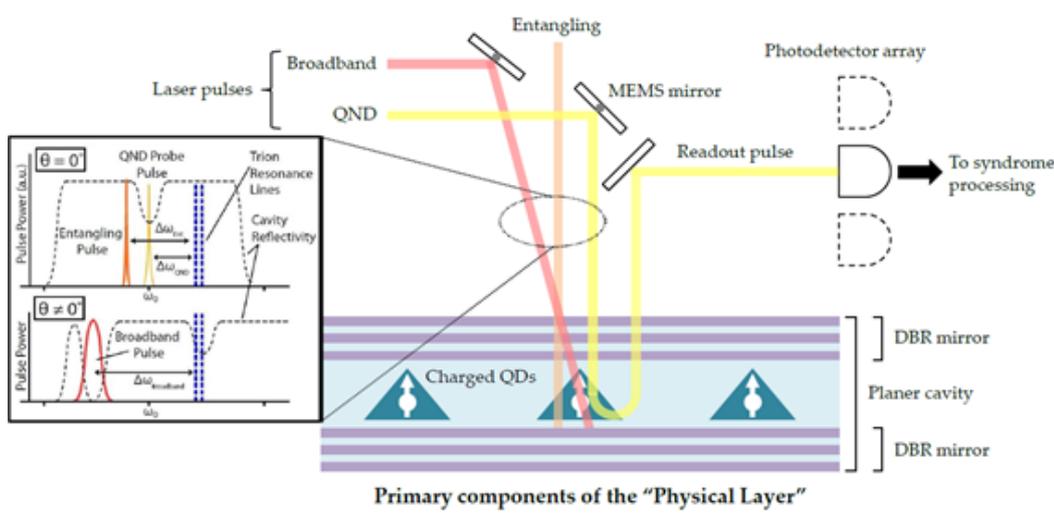


図 4 量子ドットスピンの光パルス制御の構成

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。

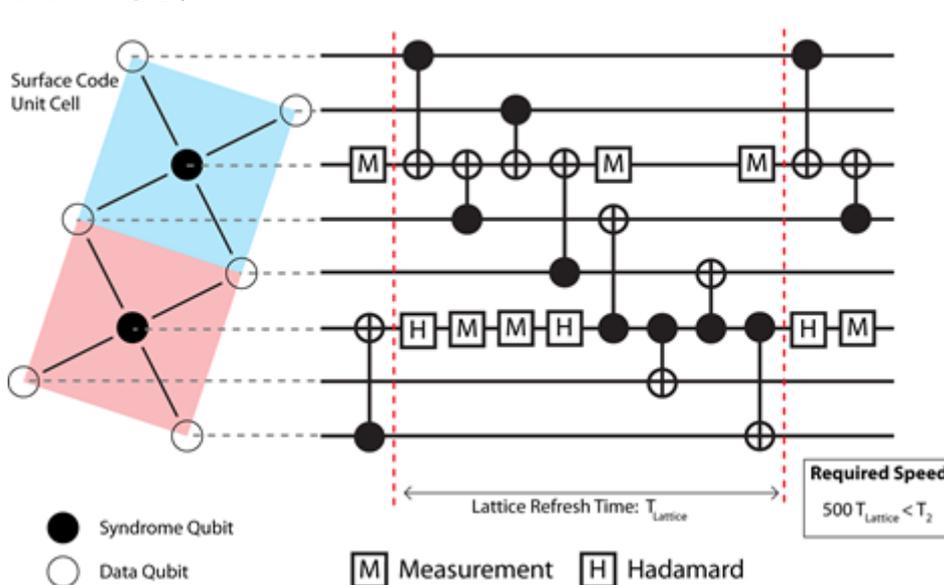


図 5 2次元トポジカル表面コードと格子リフレッシュ回路

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 ( $|e_x\rangle|e_x\rangle$ )。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105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ー劣化は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ーの中へ埋め込む。ポスト形状やフォトリソ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ー構造で、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ー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ー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要素技術を漏れなく確立する。

(2) 研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度 (5 年間)

(3) 実施機関

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構  
(実施責任者 特任准教授 宇都宮聖子)

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 243 百万円 (平成 26 年度 53 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) これまで得られた成果 (特許出願や論文発表等)

		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	17	5
	その他研究発表	47	20
	プレスリリース・報道	16	5
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

(1) タイムピンコードされた光子と中間点量子もつれ光源を用いた量子通信

平成 25 年度までに実現されたスピン-光子量子もつれ生成技術においては、単一光子の偏波状態が量子ドットスピンの状態と量子相関を持っていた。この手法の欠点の一つは、光子の偏波状態は、光ファイバー伝送中にじょう乱を受けて容易に量子コヒーレンスを失ってしまうことである。そこで、単一光子の偏波状態により雑音に耐性のあるタイムピン状態にマッピングすることが検討された。

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle \otimes |iH\rangle + |\downarrow\rangle \otimes |V\rangle)$$

← 水平偏光
← 垂直偏光

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle \otimes |il\rangle + |\downarrow\rangle \otimes |s\rangle)$$

↑ 長時間遅延パルス
↑ 短時間遅延パルス

(1)

また、平成 25 年度までに追求された量子中継システムでは、伝送路両端に置かれた量子メモリーからそれぞれ単一光子を発生し、これを中間点で検出（ベル測定）する中間点量子検出方式が検討されてきた。しかし、この場合、中間点からの“失敗”の情報は、長い時間をかけて両端の量子メモリーまで伝送されなければならない。この間、量子メモリーは何も出来ず、ひたすら待つことになる。実際、中間点から届く情報は、ほとんどの場合“失敗”を知らせる信号であり、量子メモリーが長時間量子ドットスピン状態を保存した努力は報われない。そこで、量子もつれ光子対光源を伝送路の中間点に置いて、量子もつれ光子対の一つずつを両端の量子メモリーに向かって伝送し、量子メモリーから発生された単一光子とのベル測定を両端で行う方式が検討された。この新方式では、ベル測定の結果は直ぐに量子メモリーに伝えられるので、アイドルタイムが半減される。

図 6 に、タイムビンコード化された光子と中間点量子もつれ光源を用いた量子中継システム（片側のみ表示）を示す。

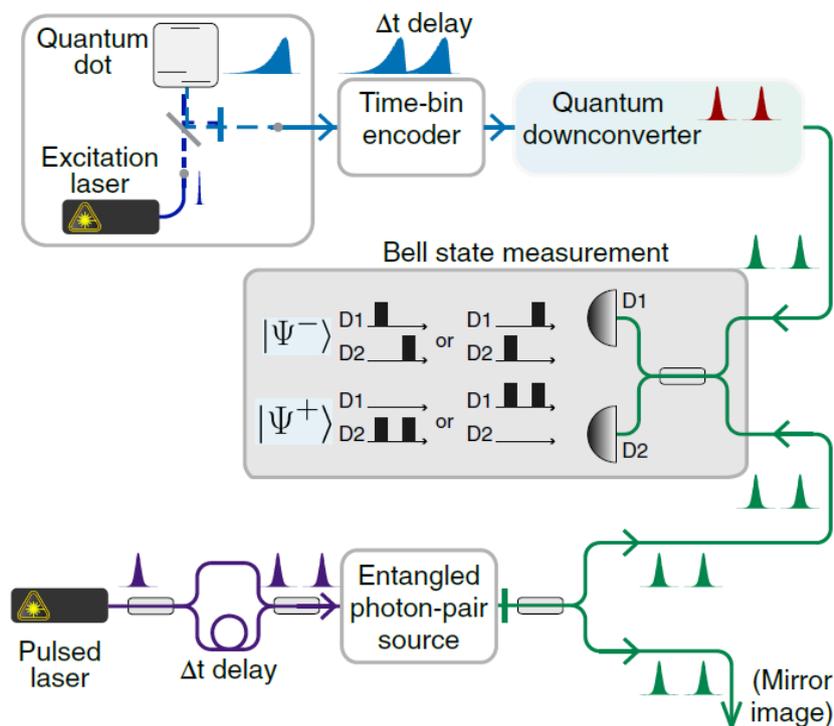


図 6 光子のタイムビンコード化と中間点量子もつれ光源を用いた量子中継システム

(2) 量子ドットスピンの制御と単一光子発生実験

図 7(a)に、量子ドットの成長方向に直流磁場をかけた場合（Voigt 配置）の、エネルギーレベルと光学遷移の選択則を示す。(b)には、この選択則を確認する実験結果を示

す。(a)で点線で囲ったラムダ型3準位構造をスピン-光子量子もつれ生成に用いる。(c)には、この実験に用いられる光パルス列が示されている。3つのパルスは、それぞれ光ポンピングによるスピンの初期化、光パルスによる $|\downarrow\rangle$ 状態の選択励起、光 $\pi$ パルスによる $|\uparrow\downarrow, \downarrow\rangle$ 状態の生成を実現する。(d)には、光ポンピングに伴う発光、スピン制御用パルスの漏れ光、目標である単一光子パルスがそれぞれ観測されている。

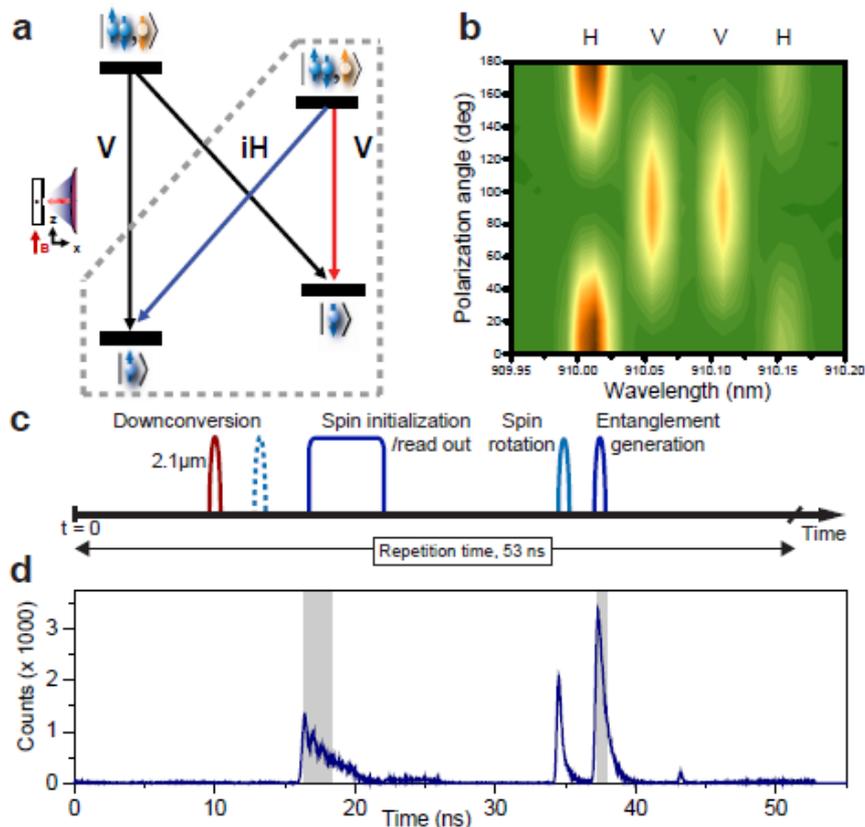


図 7 量子ドットからの発光選択則と単一光子発生過程

### (3) 量子ドットスピン-タイムビン単一光子間の相関実験

図 8(a)に、スピン-（タイムビン）光子相関の測定系を示す。量子ドットから発生された単一光子（910nm）は、偏光ビームスプリッタ（PBS）でマイケルソン干渉計の2径路に分離され、 $|V\rangle$ 偏光は短い径路を、 $|H\rangle$ 偏光は長い経路を通過して合波される。この時、マイケルソン干渉計内の $\frac{1}{4}$ 波長板（QWP）により偏光を $90^\circ$ 回転し、PBSの特性を実効的にスイッチする。マイケルソン干渉計の外の $\frac{1}{2}$ 波長板（HWP）+PBSは $45^\circ$ の直線偏光のみを通過させ、これにより偏光情報は量子消去される。同じくタイムビン・ポンプ光パルス（2100nm）とタイムビン・信号光パルス（910nm）はPPLN導波路内でパラメトリック相互作用し、波長1500nmのタイムビン単一光子に変換される。(b)では、上側のパネルで910nmの光子検出ヒストグラムと1500nmの光子検出ヒストグラムを比較している。下側のパネルで、この結果に対応した光パルス制御のスケジュールが示されている。(c)には、量子ドットスピンの $|\uparrow\rangle$ 状態と単一光子の $|\downarrow\rangle$ 状態、量子ドット

トスピンの $|\downarrow\rangle$ 状態と単一光子の $|s\rangle$ 状態が強い相関を持つことが示されている。(d) (e) (f)では、量子ドットスピンの $|\downarrow\rangle$ 状態の時、単一光子の偏光状態は $|V\rangle$ もしくは、 $|s\rangle$ にあり、 $|H\rangle$ もしくは、 $|l\rangle$ にはないことを証明する条件付光子検出確率が示されている。

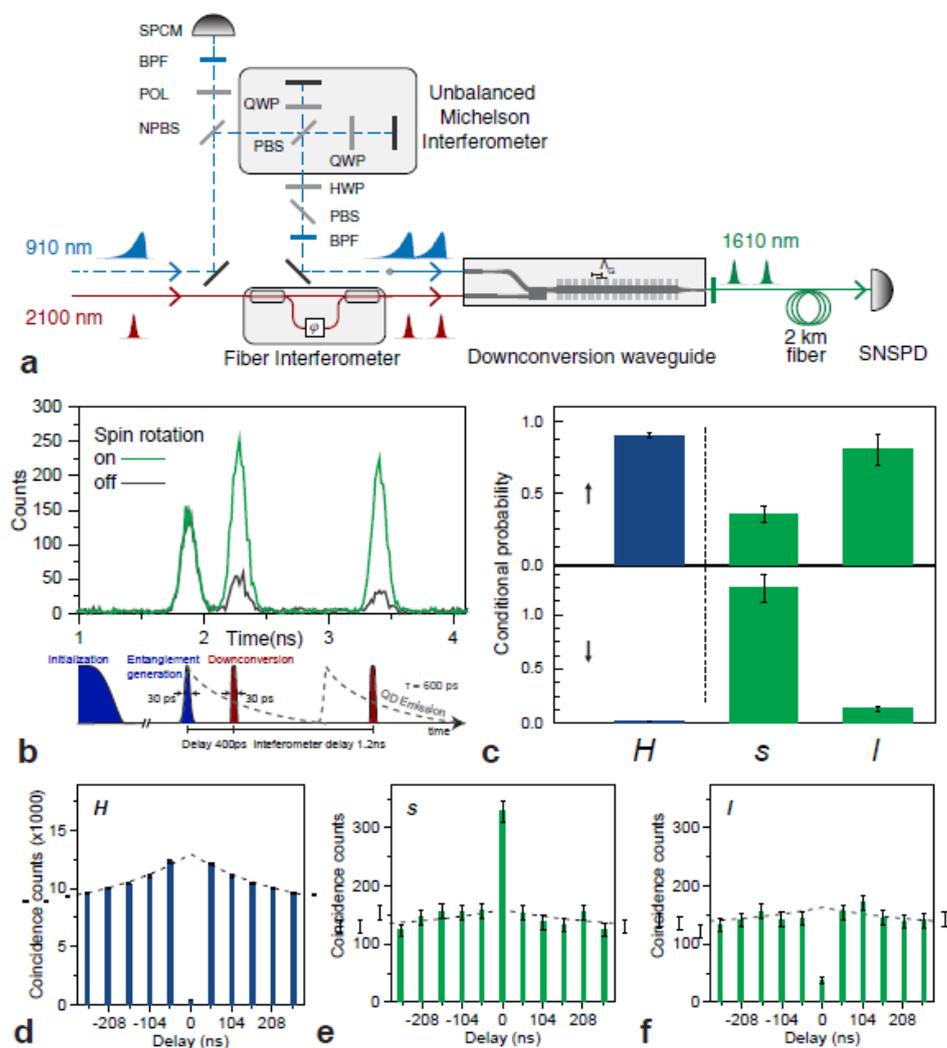


図 8 量子ドットスピン-タイムビン光子間の相関測定系

#### (4) 2光子干渉実験

中間点量子もつれ光源を通常の半導体レーザーで置き換えた実験系を図9(a) (b)に示す。量子ドットからの単一光子(波長 911nm)と半導体レーザーからの単一光子(波長 900nm)は、それぞれ波長 2097nm と 2040nm のポンプ光パルスにより、同一波長(1610nm)のタイムビン単一光子へ変換される(図9(d))。この2つのタイムビン単一光子が識別できない単一光子になっていることは、(c)および(e)の Hong-Ou-Mandel dip から確認される。

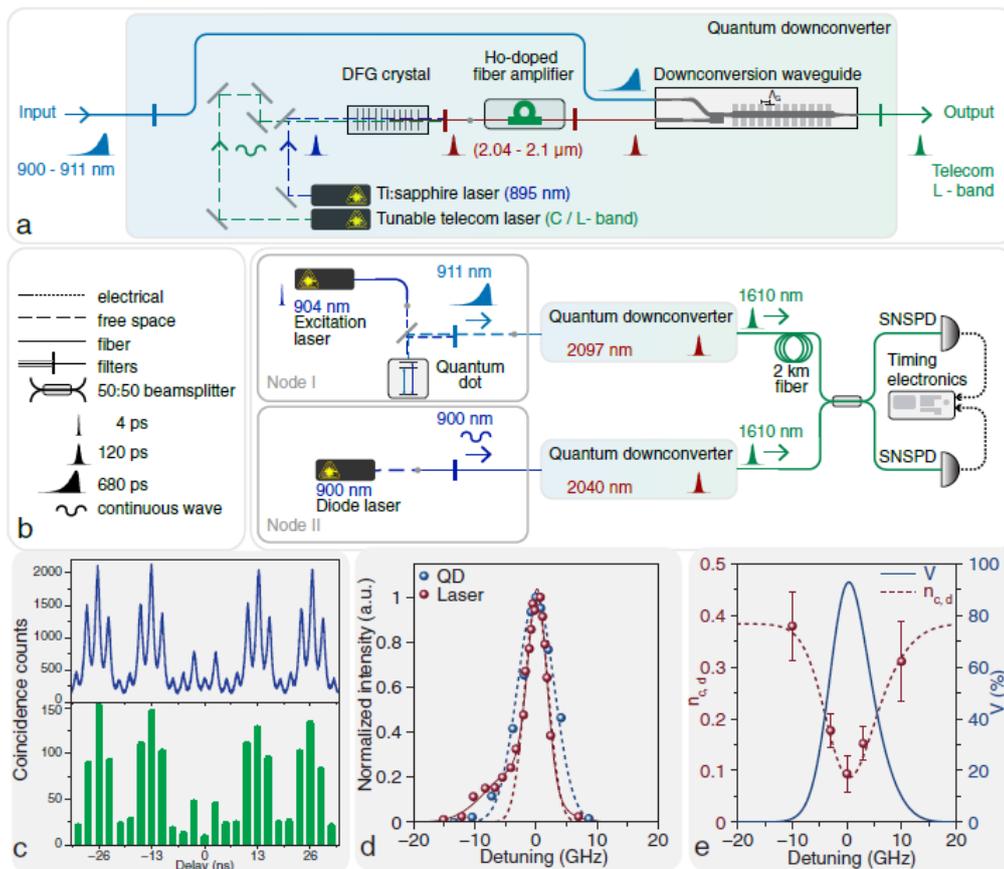


図 9 異なる光源からの2つの単一光子の量子干渉実験

#### (4) 今後の方針

これまでの研究開発の結果、課題イ-1、イ-2、イ-3、イ-5 に要求される要素技術は全て揃ったことになる。最終年度である平成27年度は、残された唯一の要素技術（課題イ-4）を中心に取り組むことになる。これを実現するため、励起子ポラリトン共鳴を用いた手法を理論的に検討すると共に、量子ドットと量子井戸を同じプレーナマイクロキャビティに埋め込んだ新たなデバイス作製技術に取り組んできた。最終年度は、この技術を中心に研究開発を行うこととする。