

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-146718

(P2006-146718A)

(43) 公開日 平成18年6月8日(2006.6.8)

(51) Int. Cl.		F I	テーマコード (参考)
<b>G06E</b> 3/00 (2006.01)		G06E 3/00	
<b>G06N</b> 1/00 (2006.01)		G06N 1/00	
<b>H01L</b> 43/00 (2006.01)		H01L 43/00	

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2004-337992 (P2004-337992)	(71) 出願人	504173471 国立大学法人 北海道大学 北海道札幌市北区北8条西5丁目8番地
(22) 出願日	平成16年11月22日 (2004.11.22)	(74) 代理人	100091096 弁理士 平木 祐輔
		(74) 代理人	100105463 弁理士 関谷 三男
		(74) 代理人	100102576 弁理士 渡辺 敬章
		(74) 代理人	100108394 弁理士 今村 健一
		(72) 発明者	武藤 俊一 北海道札幌市北区北13条西8丁目 国立 大学法人北海道大学 工学研究科内

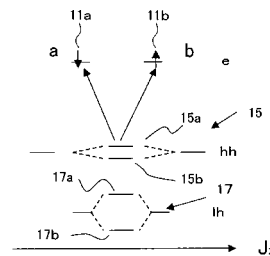
(54) 【発明の名称】 光子-スピン量子ビット変換方法及び変換装置

(57) 【要約】

【課題】 材料に依存せず、かつ、簡単な構成により光子-スピン量子ビット変換器を実現する。

【解決手段】 電子は  $E = 0$  であるため、下向きスピン  $a$  (11a) と、上向きスピン  $b$  (11b) とのエネルギーが揃う。軽い正孔 15 と重い正孔 17 とは、それぞれ分裂している (15a、15b、17a、17b)。光の量子ビット (この場合は右円偏光と左円偏光との重ね合わせ) を量子ドット 1 に照射することで、重い正孔 (hh) から励起された電子として、下向きスピンを有する電子 11a と上向きスピンを有する電子 11b とが生成される。図 2 に示すように、重い正孔 hh と軽い正孔 lh との縮退は解けている。従って、以下の式のように量子ビット変換が行われる。  $a | \text{右円偏光} \rangle + b | \text{左円偏光} \rangle = (a | \text{電子} \rangle + b | \text{電子} \rangle) \times | \text{重い正孔 (上側の分岐)} \rangle$

【選択図】 図 2



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

局在化した波動関数を有する量子部と、  
該量子部に対して円偏光を導入する円偏光光導入手段と、  
前記量子部に対して外部磁場を印加する外部磁場印加手段と  
を有する光子 - スピン量子ビット変換器。

## 【請求項 2】

量子ドットと、  
第 1 の方向から前記量子ドットに対して左右の円偏光を導入する円偏光導入手段と、  
前記量子ドットに対して前記量子ドット中の電子に作用する原子核からの実効磁場をキ  
ャンセルする程度の外部磁場を第 2 の方向から印加する外部磁場印加手段と  
を有する光子 - スピン量子ビット変換器。 10

## 【請求項 3】

前記左右の円偏光は、前記量子ドットにおける分裂した軽い正孔と、縮退した上向きス  
ピンを有する電子と下向きスピンを有する電子と、のエネルギー差に相当するエネルギー  
を有する円偏光であることを特徴とする請求項 2 に記載の光子 - スピン量子ビット変換器  
。

## 【請求項 4】

前記左右の円偏光は、前記量子ドットにおける分裂した重い正孔と、縮退した上向きス  
ピンを有する電子と下向きスピンを有する電子と、のエネルギー差に相当するエネルギー  
を有する円偏光であることを特徴とする請求項 2 に記載の光子 - スピン量子ビット変換器  
。 20

## 【請求項 5】

量子ドットにおける電子のスピン向きを、第 1 の方向から円偏光を前記量子ドットに  
対して導入することにより揃える第 1 ステップと、  
第 1 ステップによって生じた原子核がつくる磁場をキャンセルする外部磁場を前記第 2  
の方向から印加する第 2 ステップと、  
を有する光子 - スピン量子変換方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

30

## 【0001】

本発明は、光子 - スピン量子ビット変換技術に関し、特に、量子ドットにおけるゼー  
マンエネルギーのオーバーハウザー・シフトを用いた光量子ビットと電子スピン量子ビット  
との量子ビット変換技術に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

次世代の情報技術として量子情報処理の進展が急である。量子暗号通信についてはプラ  
グ・アンド・プレイのシステムがネット上で売りに出されており、また 1.55 ミクロン  
帯で 100 km を無中継で通信可能になった（非特許文献 1）。量子中継器が実現すれば  
量子暗号通信の通信距離を飛躍的に増大させることができる。より高度の情報処理として  
量子コンピューティング（非特許文献 2、3）への期待も高い。ショアのアルゴリズム（  
非特許文献 4）による因数分解と暗号解読、グローバーの検索アルゴリズム（非特許文  
献 5）によるデータベース検索などが可能になる。現在は、まだ他の目立った応用は報告さ  
れていないが、ハードウェアが実現すれば新しい応用も拓けて来るものと期待される。ハ  
ードウェアの提案は多数あり、既に NMR を用いた量子コンピューティングでは 7 量子ビ  
ットを用いた因数分解がデモンストレーションされている（非特許文献 6）。またジョセ  
フソン素子を用いて固体版でも Qubit 間の相互作用が報告されている（非特許文献 7）。

40

## 【0003】

また、非特許文献 8 においては、電子のスピンと光子のスピン量子ビット変換につい  
ての提案がなされている。量子ドットの電子スピンを用いた提案もあり、発明者らも、最  
 50

近、独自の手法を提案している。いずれの技術も今後への期待をもたせるものであり、これらの種々の技術に基づいて、今後は数多くの量子コンピュータが実現されていくものと期待されている。

【0004】

このような流れの中で、今後、種々の量子コンピューティングを光子Qubitで結んだ量子情報処理ネットワークへの応用に対して大きな期待がもてる。量子コンピュータをネットワーク化すれば、単に量子ビットが増大するだけでなく分散処理により個々の量子コンピュータの強みを活かすことができる。例えば、電子スピンや光を用いた量子コンピュータ(QC)は高速演算を得意とし、半導体核スピンQCはメモリの持続時間が長くてサーバー向けというように、量子の世界を現在のコンピュータネットワークに置き換えることも可能であろう。逆に、個々のQCが不完全であっても、ネットワーク化することにより実用的になる可能性がある。このためには、電子のスピンと光子の量子情報とをビットごとに変換する量子ビット変換技術が必須のものとなることは間違いない。

10

【0005】

また、非特許文献8では、g因子エンジニアリングを用いた量子井戸及び量子ドットにおける光学遷移の選択則に基づく電子スピンと光子との量子ビット変換が提案されている。

【0006】

【非特許文献1】小坂英男ら第8回量子情報技術研究会(QIT2003)資料pp.243-246(電子情報通信学会)。

20

【非特許文献2】R. P. Feynman, Opt. News 11, 11 (1985).

【非特許文献3】D. Deutsch, Proc. R. Soc. London A 400, 97 (1985).

【非特許文献4】P. W. Shor, in Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science, Los Alamitos, CA (IEEE Computer Society Press, New York, 1994), p. 124.

【非特許文献5】L. K. Grover: Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 325.

【非特許文献6】"Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance" Lieven M. K. Vandersypen\* et. al., Nature Vol. 414, pp.883-887 (2001).

【非特許文献7】Yu A. Pashkin et. al., "Quantum Oscillations in two coupled charge qubits", Nature Vo. 421, pp. 823-826 (2003).

30

【非特許文献8】Rutger Vrijena, Eli Yablonovitchb, Physica E 10 (2001) 569.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上記技術においては、特殊な半導体材料と構造とを選択する必要があるが、実際には、材料に依存せずに電子のg因子を実効的にゼロにすることができれば便利である。

【0008】

本発明は、材料に依存せず、かつ、簡単な構成により光子-スピン量子ビット変換器を実現することを目的とする。

40

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、"dynamic nuclear polarization"としても知られるZeemanエネルギーのOverhauser shiftを利用して光子-スピン量子ビット変換を行う。

【0010】

量子ドットで光の量子ビットを電子の量子ビットに変換するには、磁場を入れたとき電子のバンド(準位)はスピンの分裂(アップスピンとダウンスピンの準位が磁場によりZeeman分裂でずれる)を起こさないが、正孔のバンドはスピン分裂を起こすようにする必要がある。本発明は、電子は核磁場(核のスピンが揃ったときに電子のスピンが感じる磁場であり、超微細相互作用による)を感じるのに対して、正孔は感じないことを利用

50

する。

【0011】

すなわち、本発明の一観点によれば、局在化した波動関数を有する量子部と、該量子部に対して円偏光を導入する円偏光光導入手段と、前記量子部に対して外部磁場を印加する外部磁場印加手段とを有する光子 - スピン量子ビット変換器が提供される。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、光子 - スピン量子ビット変換において、 $g = 0$  にするための特殊な材料選択などを考慮せずに光子 - スピン量子ビット変換を行うことができるという利点がある。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本発明の実施の形態について説明する前に、本発明の基本原理について説明する。Qubit変換（光Qubit - スピンQubit）変換においては、光子Qubitは、 $a|右円偏光\rangle + b|左円偏光\rangle$  で表される。但し、光の量子情報は一般に操作が行いにくいいため、電子のスピン（励起子のスピン）に転写することで操作を容易にする。

【0014】

そのための基本原理は、電子が外部磁場と核磁場との両方を感じるのに対して、正孔は外部磁場のみを感じる点を利用することである。すなわち、外部磁場と核磁場とが互いにキャンセルするように外部磁場を調整することである。このように調整すると、電子は磁場を感じないが、正孔はゼロでない磁場を感じる。従って、電子のゼロ  $g$  因子化が実効的に実現できることになる。

20

【0015】

核スピンを含む電子 - 正孔対に対するハミルトニアンは、電子と正孔とのスピンの最低次元として、以下の式で表される。

【0016】

【数 1】

$$\mathbf{H} = \mathbf{s}_e \cdot \mu_B \bar{\mathbf{g}}_e \cdot \mathbf{B} + \mathbf{j}_h \cdot 2\bar{\boldsymbol{\kappa}} \mathbf{B} + \mathbf{H}_{\text{HF}} + (\text{スピンの依存しない項}) \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{g}}_e$  と  $\bar{\boldsymbol{\kappa}}$  とは、電子と正孔との Zeeman エネルギーの diagonal tensors であり、電子のスピンと核スピンとの間の hyperfine interaction  $\mathbf{H}_{\text{HF}}$  は、以下の式で表される。

$$\mathbf{H}_{\text{HF}} = \sum_n -\frac{\mu_1}{I} \mathbf{H}_e^{(n)} \cdot \mathbf{I}_{n\nu} \quad (2)$$

$n$  次の核スピン  $\mathbf{I}_n$  に対する有効磁場を用いると、

$$\mathbf{H}_e^{(n)} = -2\mu_B \left\{ \frac{1}{r_n^3} (l-s) + \frac{3r_n (\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}_n) r}{r_n^5} + \frac{8\pi}{3} \mathbf{s} \delta(r_n) \right\}, \quad (3)$$

となる。

ここで、 $\mathbf{r}_n = \mathbf{r} - \mathbf{R}_n$  は、 $n$  次の核から測定した電子又は正孔の位置ベクトルである。そして、 $l$  と  $s$  とは、角運動量と電子又は正孔のスピンに相当する。電子及び正孔（重い正孔と軽い正孔）は、電子では 0 であり正孔では 1 である一定の角運動量と、 $s$ 、 $j$  及び  $j_z$ （重い正孔では  $\pm 3/2$ 、軽い正孔では  $\pm 1/2$ ）とを有しており、 $j$ （電子では  $s$ ）の方向に実効的な磁場を投射することができる。

すなわち、

$$-\frac{\mu_1}{I} \mathbf{H}_e^{(n)} = a_j^{(n)} \mathbf{j} \quad (4)$$

また以下の式が成り立つ。

$$a_j^{(n)} = \frac{16\pi}{3I} \mu_B \mu_1 |\psi(\mathbf{R}_n)|^2 + \frac{2\mu_B \mu_1}{I} \left\langle \frac{1}{r_n^3} \right\rangle \frac{l(l+1)}{j(j+1)} \quad (5)$$

ここで、 $\left\langle \frac{1}{r_n^3} \right\rangle$  は、電子（正孔）の平均的な波動関数である。ここで、第 2 項は電子で

は 0 であり、第 1 項は正孔では 0 である。従って、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{H}_{\text{HF}} = \sum_n a_j^{(n)} \mathbf{j} \cdot \mathbf{I}_n \quad (6)$$

$$= \mathbf{s}_e \cdot \sum_n \frac{16\pi}{3I} \mu_B \mu_1 |\psi(\mathbf{R}_n)|^2 \mathbf{I}_n + \mathbf{j}_h \cdot \sum_n \frac{16}{15I} \mu_B \mu_1 \left\langle \frac{1}{r_n^3} \right\rangle \mathbf{I}_n \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{s}_e$  及び  $\mathbf{j}_h$  は、電子のスピン及び正孔のトータルの角運動量である。

従って、ハミルトニアンのスピンに依存する項は、以下の式で表される。

10

20

30

40

$$H = s_e \cdot \left\{ \mu_B \bar{g}_e \cdot \mathbf{B} + \sum_n \frac{16\pi}{3I} \mu_B \mu_1 |\psi(\mathbf{R}_n)|^2 \mathbf{I}_n \right\} + j_h \cdot \left\{ 2\bar{\kappa} \mathbf{B} + \sum_n \frac{16}{15I} \mu_B \mu_1 \left\langle \frac{1}{r_n^3} \right\rangle \mathbf{I}_n \right\} \quad (8)$$

(8)

電子の実効的な場は、以下の式で表される。

$$\sum_n \frac{16\pi}{3I} \mu_B \mu_1 |\psi(\mathbf{R}_n)|^2 \langle \mathbf{I}_n \rangle = \sum_i A_i \mathbf{I}^{ii}_{ave} \quad (9)$$

$$A_i = \frac{16\pi}{3I} \frac{\mu_B \mu_1}{v_0} \eta_i, \quad \eta_i = |u(\mathbf{R}_i)|^2 \quad (10)$$

$$\psi(\mathbf{R}) = \Psi(\mathbf{R})u(\mathbf{R}) \quad (11)$$

$$\mathbf{I}^{ii}_{ave} = \int d^3 \mathbf{R} \langle \mathbf{I}^{ii}(\mathbf{R}) \rangle |\Psi(\mathbf{R})|^2 / \int d^3 \mathbf{R} |\Psi(\mathbf{R})|^2 \quad (12)$$

ここで、 $\langle \mathbf{I}_n \rangle$  は、核スピンの量子力学的な平均であり、 $\Psi(\mathbf{R})$  及び  $u(\mathbf{R})$  は、包絡関数及びブロッホ振幅である。ここで、 $i$  は、体積  $v_0$  の単位胞の核を示し、1つのユニットセルの全ての核にわたっての合計を示す。

もし、 $v$  ( $v = x$  or  $z$ ) 方向だけに磁場を印加すると、 $\langle \mathbf{I}_n \rangle$  及び  $\mathbf{I}^{ii}_{ave}$  も  $v$ -方向である。

それゆえ、電子は実効的な磁場  $B_{eff, e}$ ,

$$\text{を感じる。従って、} g_{e,v} \mu_B B_{eff, e} = g_{e,v} \mu_B B_{ext} + \sum_i A_i \mathbf{I}^{ii}_{ave} \quad (13)$$

$$\text{一方、} B_{eff, h} \text{ は、} 2\kappa_v B_{eff, h} = 2\kappa_v B_{ext} + \sum_n \frac{16}{15I} \mu_B \mu_1 \left\langle \frac{1}{r_n^3} \right\rangle \langle \mathbf{I}_n \rangle \quad (14)$$

で示される。それゆえ、もし  $B_{ext}$  又は  $\mathbf{I}^{ii}_{ave}$  を以下のように調整すると、電子はゼロ磁場を感じる。

$$g_{e,v} \mu_B B_{ext} + \sum_i A_i \mathbf{I}^{ii}_{ave} = 0, \quad (15)$$

正孔の対する分裂は、式 14 内の式 15 を用い、 $2|j_z|$  によって乗算することで

$$4|j_z| \kappa_v B_{eff, h} = - \left( \frac{4|j_z| \kappa_v}{\mu_B g_{e,v}} \right) \cdot \sum_i A_i \mathbf{I}^{ii}_{ave} + \sum_n \frac{32|j_z|}{15I} \mu_B \mu_1 \left\langle \frac{1}{r_n^3} \right\rangle \langle \mathbf{I}_n \rangle - \left( \frac{4|j_z| \kappa_v}{\mu_B g_{e,v}} \right) \sum_i A_i \mathbf{I}^{ii}_{ave} \quad (16)$$

となる。ここで、重い正孔 ( $|j_z| = 3/2$ ) と軽い正孔 ( $|j_z| = 1/2$ ) である。

10

20

30

40

50

## 【0017】

上記、非特許文献8の提案に関して図3を参照しつつ説明する。図3は、電子と軽い正孔との遷移における光学選択則に基づく光子-スピン量子変換の様子を示す図である。電子のスピン状態は、ゼロg因子によって縮退している。図3に示す提案は、g因子エンジニアリングによりQubit変換を行う技術であり、ゼロg因子を実現するための固有の半導体材料又はそれらの組み合わせを選択することを特徴とする。すなわち、図3(a)に示すように、外部静磁場  $B_{ext}$  を、z方向(成長方向)に印加し、光(光子)をx方向(層方向)から導入する。図3(b)に示すように、縮退した電子スピンの状態101、103と、縮退していない(重い正孔hh)の状態105a、105b、縮退していない(軽い正孔lh)の状態107a、107bのバンド状態を実現することができる。従って、光子の量子ビットを電子スピンの量子ビットと軽い正孔(lh)の状態107aとのテンソル積に変換することができる。

## 【0018】

z方向と平行な直線偏光をもつ光子を与えると、lh107aが下向きスピンの電子101が励起され、y方向(紙面と垂直な方向)に平行な直線偏光をもつ光子を与えると上向きスピンの電子103が励起される。従って、図3(a)、(b)に示すように、非特許文献8の提案のQubit変換(光Qubit-スピンQubit)変換においては、光子Qubitは、

## 【0019】

## 【数2】

$$a | \text{右円偏光} \rangle + b | \text{左円偏光} \rangle$$

で表される。

## 【0020】

光の量子情報は一般に操作を行いにくいため、電子のスピン(励起子のスピン)に転写することで操作を容易にすることができる。スピンQubitは、

## 【0021】

## 【数3】

$$a | \downarrow \text{電子} \rangle + b | \uparrow \text{電子} \rangle$$

で表される。磁場を印加することで  $E = g\mu_B B$  のゼーマン分裂が生じる。ここで、g因子エンジニアリングを用いると、電子に関しては  $g = 0$  となり、電子の準位の分裂がなくなる。一方、正孔に関しては分裂が生じているため、

## 【0022】

## 【数4】

$$a | \downarrow \text{電子} \rangle + b | \uparrow \text{電子} \rangle \otimes | \text{軽い正孔} (-1/2) \rangle$$

が成り立つ。すなわち、以下の関係が成り立つ。

$$a | 0 \rangle + b | 1 \rangle \Leftrightarrow (a | \downarrow \rangle + b | \uparrow \rangle) \otimes | \text{hole} \rangle$$

ここで、 $| 0 \rangle$ 及び $| 1 \rangle$ は、光子の量子ビットの2つのbasisであり、 $| \downarrow \rangle$ 、 $| \uparrow \rangle$ は、電子スピンの量子ビットのアップとダウンとの状態である。

## 【0023】

また、パラボリックな量子井戸のg因子の電子制御に関する1つの解として、非特許文献8の提案において、パラボリックな量子井戸を用いてg因子の電子制御に関する技術が開示されている。ゼロg因子は、実際に量子井戸に対する適切な電圧印加により実現されている。

10

20

30

40

50

## 【0024】

次に、非特許文献8の提案の別の実施形態による光子 - スピン量子ビット変換について図面を参照しつつ説明を行う。

## 【0025】

図4に示すように、本実施の形態による光子 - スピン量子ビット変換は、上記の図3に示す構成と異なり、電子のスピンが核磁場に起因して縮退している。すなわち、図4(a)に示すように、外部静磁場  $B_{ext}$  をx方向(層方向)に印加し、光(光子)をz方向(成長方向)から導入している。このようにすると、図4(b)に示すように、縮退した電子スピンの状態201、203と、縮退していない(重い正孔hh)の状態205a、205b、縮退していない(軽い正孔lh)の状態207a、207bのバンド状態を実現することができる。従って、光子の量子ビットを電子スピンの量子ビットとスピンの分離した正孔(lh)の状態のうちの一つ(軽い正孔)とのテンソル積に変換することができる。

10

## 【0026】

次に、本発明の実施の形態による光子 - スピン量子ビット変換について図面を参照しつつ説明を行う。ここで、図1及び図2は、本実施の形態による光子 - スピン量子ビット変換技術の原理を示す図であり、図1は、半球状の量子ドット1が設けられている図であり、図2は、電子と重い正孔(hh)との遷移の光学選択則を用いた光子とスピンの量子ビット変換の様子を示す図であり、量子ドット1のエネルギー状態をz方向の量子状態  $J_z$  を横軸にとって示す図である。図1に示すように、

20

1) 右又は左の円偏光  $\gamma$  を量子ドット1に照射する。これにより、電子のスピン核が揃う。すなわち、核が磁化されるため、上向きスピンa(11a)と下向きスピンb(11b)とが揃う。

2) 上記1)の操作に応じて、量子ドット1を構成する原子核からの実効磁場  $B_N$  が発生する。

3) 上記2)の実効磁場  $B_N$  をキャンセルする対向磁場である外部磁場  $B_{ext}$  を量子ドット1に対して印加する。

4) 電子スピンを光子に変換して、例えば発光の形で出力する。

## 【0027】

上記構成において、電子が感じる磁場は、電子と原子核との超微細相互作用により  $B_N + B_{ext} = 0$  となるが、正孔の感じる磁場は、正孔と原子核との相互作用が弱いため、 $B_{ext}$  のみであるため0とはならない。本実施の形態のように、量子ドット1を用いると、波動関数が局在化するため、電子 - 核相互作用が生じやすく核を揃えやすい。図2に示すように、電子は  $E = 0$  であるため、下向きスピンa(11a)と、上向きスピンb(11b)とのエネルギーが揃う。軽い正孔15と重い正孔17とは、それぞれ分裂している(15a、15b、17am、17b)。光の量子ビット(この場合は右円偏光と左円偏光との重ね合わせ)を量子ドット1に照射することで、重い正孔(hh)から励起された電子として、下向きスピンを有する電子11aと上向きスピンを有する電子11bとが生成される。図2に示すように、重い正孔hhと軽い正孔lhとの縮退は解けている。従って、以下の式のように量子ビット変換が行われる。

30

40

## 【0028】

## 【数5】

$$a | \text{右円偏光} \rangle + b | \text{左円偏光} \rangle = (a | \downarrow \text{電子} \rangle + b | \uparrow \text{電子} \rangle) \times | \text{重い正孔 (上側の分岐)} \rangle$$

## 【0029】

本実施の形態においては、光子 - スピン量子ビット変換において、 $g = 0$  にするための特殊な材料選択などが不要であるという利点がある。尚、本発明は図3、図4の既知の構成においても、 $g$  因子工学を用いずに核による実効磁場  $B_N$  を用いて外部磁場を相殺するこ

50



とにより使用が可能である。また励起子が関与して上記の演算に影響を与える可能性がある。そこで、この影響を低減する方法として、電子と正孔とを空間分離して生成する方法が考えられる。また、この場合には、光と量子ドットとの相互作用が弱くなるため、量子ドットを光共振器に入れるなどにより相互作用を補強することが現実的である。

【実施例】

【0030】

発明者は、Stranski-Krastanow mode のMBEで成長したInAlAs QDにおいて、Overhauser shift

【数6】

$$\sum_i A_i I_{ave}^i$$

10

を観測した。実験的に観測されたOverhauser energyは19 meV である。この値は、励起子の偏光、より一般的には光学配向によって制御可能である。さらに、x方向における重い正孔のg因子は励起子のg因子とほぼ等しいことがわかっている。より詳細には、

【0031】

【数7】

$$|g_{hh,x}| \cong |g_{e,x}| \cong 0.43. \text{ ここで、} \mu_B g_{hh,x} = 4 |j_z| \kappa_x = 6 \kappa_x$$

である。

20

【0032】

式(15)は、電子のOverhauser fieldを外部磁場  $B_{ext} = 0.74$  でキャンセルできること、従って、その際の正孔のエネルギー分裂がOverhauser shiftと同等(約19  $\mu eV$ )であることを示している。この値は大きくはないが、真正の励起子エネルギー幅は4  $\mu eV$  であると報告されており、2つの正孔のレベルを区別できることを示す。ここで、 $g_{hh,x}$  は、ゼロではない点が特徴となる。この点で量子ドットの場合と量子井戸の場合(重い正孔のg因子が0である)とは異なっている。量子井戸の場合には、面内における重い正孔のg因子がゼロである。

【0033】

以上に説明したように、本実施の形態による量子ビット変換によれば、光子-スピン量子ビット変換において、 $g = 0$  にするための特殊な材料選択などを考慮せずに光子-スピン量子ビット変換を行うことができるという利点がある。

30

【産業上の利用可能性】

【0034】

本発明は、量子ビット変換を利用した量子中継器、光-核スピン変換の中継器などの中核技術として利用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0035】

【図1】図1は、本発明の実施の形態による光子-スピン量子ビット変換技術の原理を示す図であり、図1は、半球状の量子ドットが、設けられている構成を示す図である。

40

【図2】図1の構成において、電子と重い正孔(hh)との遷移の光学選択則を用いた光子とスピンの量子ビット変換の様子を示す図であり、量子ドット1のエネルギー状態をz方向の量子状態 $J_z$ を横軸にとって示す図である。

【図3】電子と軽い正孔との遷移における光学選択則に基づく光子-スピン量子変換の様子を示す既発表の構成を示す図である。図3(a)は、外部静磁場を、z方向(成長方向)に印加し、光(光子)をx方向(層方向)から導入する例を示す図であり、図3(b)は、縮退した電子スピンの状態と、縮退していない(重い正孔hh)の状態と、縮退していない(軽い正孔lh)の状態のバンド状態を示す図である。

【図4】既発表の別の構成による光子-スピン量子ビット変換技術の例を示す図であり、

図4(a)は、外部静磁場  $B_{ext}$  をx方向(層方向)に印加し、光(光子)をz方向(

50

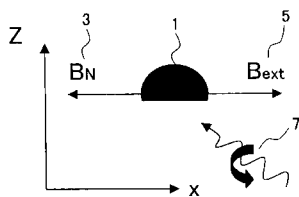
成長方向) から導入した構成を示す図である。図 4 ( b ) は、図 4 ( a ) に示す図において、縮退した電子スピンの状態と、縮退していない ( 重い正孔  $hh$  ) の状態、縮退していない ( 軽い正孔  $lh$  ) の状態のバンド状態を示す図である。

【符号の説明】

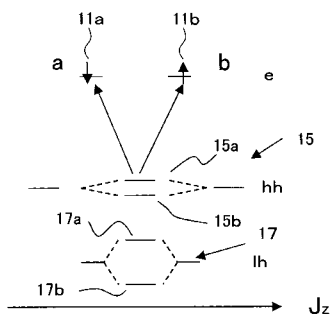
【 0 0 3 6 】

1 ... 量子ドット、3 ...  $B_N$ 、5 ...  $B_{ext}$ 、7 ... 円偏光、11 a、11 b ... 下向き及び上向きスピンをそれぞれ有する電子、15 ... 重い電子、17 ... 軽い電子。

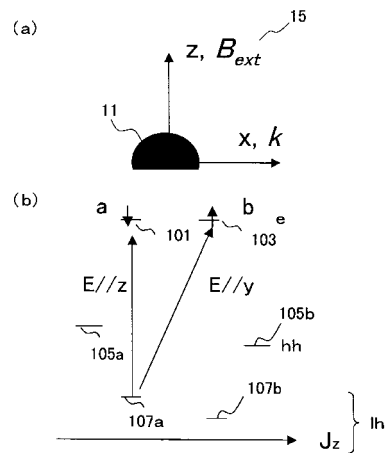
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】

