

高次ブロッホ球上の電子スピント

佐藤 壮太^A、松元 俊基^B、中野 裕一郎^A、揖場 聡^C、宮本 克彦^A、尾松 孝茂^A、森田 健^A
千葉大学院融合理工学府^A、千葉大学工学部^B、産総研新原理コンピューティング研究センター^C

Electron spin vortex represented in a higher-order Bloch sphere

Sota Sato^A, Toshiki Matsumoto^B, Yuuichiro Nakano^A, Satoshi Iba^C
Katsuhiko Miyamoto^A, Takashige Omatsu^A and Ken Morita^A

^A Graduate School of Science and Engineering, Chiba University

^B Department of Electrical and Electronic Engineering, Chiba University

^C Research Center for Emerging Computing Technologies, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Mutual quantum state conversion between photon and electron qubits based on spin angular momentum in a quantum two-level system will potentially act as an important role in future quantum information processing technology. We propose a new-class electron spin state, here referred as an electron spin vortex represented in a higher-order Bloch sphere, imprinted by a photon state mapped on a higher-order Poincaré sphere. The electron spin vortex with the spin orientation associated with the azimuth angle in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells is obtained by the irradiation of higher-order photons, and it is quantitatively visualized by estimating the expected value of the spin state in the proposed higher-order Bloch sphere.

1 序論

量子二準位系を持つ光子と電子スピンはスピン角運動量を持ち、量子情報処理技術における量子ビットとしての応用が検討されている。なかでも通信に強い光子量子ビット[1]と演算に強い電子スピン量子ビット[2]の量子状態変換(転写)は、将来の量子中継技術の中核を担う基盤技術となる。

光子の偏光状態(右円、左円偏光の重ね合わせ状態)から半導体中の電子スピンの向き(アップ、ダウンスピンの重ね合わせ状態)として状態転写ができることは既に実証されている[3]。これは光子の偏光状態を表すポアンカレ球と電子スピンの状態を

表すブロッホ球との間には1対1の対応関係があり、スピン角運動量を介して状態変換できることを意味する(図1)。

上記の光子-電子スピン量子状態変換は、低次のガウス光子と電子スピンに関する状態変換である。ガウス光子は、偏光に由来するスピン角運動量を持つが、光渦[4]や軸対称偏光ビームなどのらせん状の位相分布を持つ高次光子[5]は、スピン角運動量に加えて位相に由来する軌道角運動量を持つ。軌道角運動量はスピン角運動量と異なり $[-\infty, \infty]$ の整数値をとるため無限に状態が存在する。したがって、高次光子はガウス光子に比べて多くの情報を有する。また高次光子はガウス光子と同様に量子二準位系

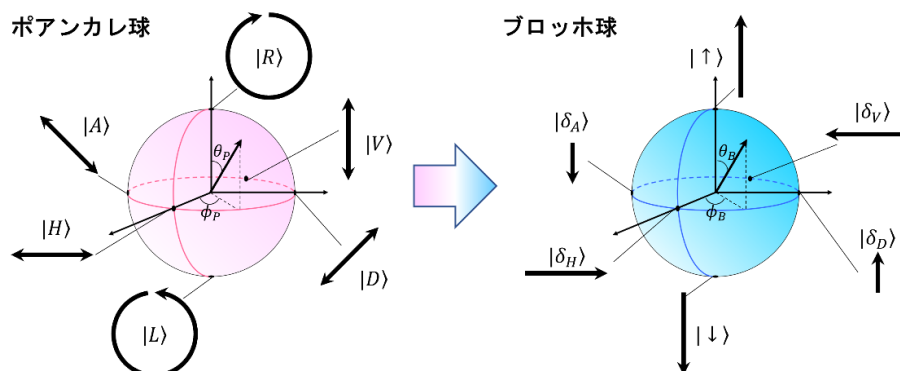


図1: ポアンカレ球とブロッホ球の対応関係。ポアンカレ球面上のすべての点はブロッホ球上の点と1対1で対応している。 (θ_P, ϕ_P) 、 (θ_B, ϕ_B) はそれぞれ極座標系における偏角を表す。

を持つため、その状態はポアンカレ球を拡張した高次ポアンカレ球によって表現できる[6-8]。軌道角運動量を持つため、その偏光状態は光子の進行方向を z 軸とした円筒座標系の方位角に依存する。方位角に偏光が異なる高次光子を電子スピン系に状態転写できれば、軌道角運動量とスピン角運動量を兼ね備えた情報量が多い新しいスピン量子状態が形成できる。

本論文では、半導体に高次ポアンカレ球上の偏光を持つ高次光子を照射することで生成される「電子スピン渦」を提案する。生成される電子スピン渦の状態は、ブロッホ球を拡張した「高次ブロッホ球」で表現でき、高次ポアンカレ球と 1 対 1 の関係がある。さらに高次ブロッホ球上の状態の期待値を計算することで、電子スピン渦の状態を可視化できることを示す。電子スピン渦の大きな特徴は方位角に依存したスピンの向きを持つことであり、これは高次光子が方位角に依存し異なる偏光状態を持つことと対応する。

また電子スピン渦を原理実証する前段階の実験として、高次光子を GaAs/AlGaAs 多重量子井戸に照射し、スピン励起を観測した。今回の実験では V 型 3 準位系[3]を持つ構造を用いているわけではないため重ね合わせ状態の完全転写を観測できない。つまりスピンの面直成分は転写できるが、面内成分はできない。したがって今回の実験では、スピンの面直成分のみを観測し、それが方位角に依存していることを確認した。

2 理論

ポアンカレ球上の光子状態とブロッホ球上のスピン状態はどちらも、次のように表現できる。

$$|\psi^\xi\rangle = \cos\frac{\theta_\xi}{2}|N^\xi\rangle + e^{i\phi_\xi}\sin\frac{\theta_\xi}{2}|S^\xi\rangle \quad (1)$$

ここで、 $\xi = P, B$ でポアンカレ球 (P) とブロッホ球 (B) を表し、 $\{|N^\xi\rangle, |S^\xi\rangle\} = \{|R\rangle, |L\rangle\}$, $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$ は正規直交基底をなす右円, 左円偏光, アップ, ダウンスピン状態を示す。ただし、 $|R\rangle = (1 \ i)^t$, $|L\rangle = (1 \ -i)^t$ および、 $|\uparrow\rangle = (1 \ 0)^t$, $|\downarrow\rangle = (0 \ 1)^t$ である。式(1)のように表現した際の、ポアンカレ球上での座標はストークスパラメータとして以下のように表現できる。

$$S_0 = |\langle N^P|\psi^P\rangle|^2 + |\langle S^P|\psi^P\rangle|^2 = 1 \quad (2)$$

$$S_1 = 2\text{Re}(\langle N^P|\psi^P\rangle^*\langle S^P|\psi^P\rangle) = \sin\theta_P \cos\phi_P \quad (3)$$

$$S_2 = 2\text{Im}(\langle N^P|\psi^P\rangle^*\langle S^P|\psi^P\rangle) = \sin\theta_P \sin\phi_P \quad (4)$$

$$S_3 = |\langle N^P|\psi^P\rangle|^2 - |\langle S^P|\psi^P\rangle|^2 = \cos\theta_P \quad (5)$$

またブロッホ球上での座標はそれぞれの期待値を計算することで求めることができるので次のようになる。

$$\langle S_I \rangle = \langle \psi^B | \sigma_I | \psi^B \rangle = 1 \quad (6)$$

$$\langle S_x \rangle = \langle \psi^B | \sigma_x | \psi^B \rangle = \sin\theta_B \cos\phi_B \quad (7)$$

$$\langle S_y \rangle = \langle \psi^B | \sigma_y | \psi^B \rangle = \sin\theta_B \sin\phi_B \quad (8)$$

$$\langle S_z \rangle = \langle \psi^B | \sigma_z | \psi^B \rangle = \cos\theta_B \quad (9)$$

ただし、 σ_i ($i = I, x, y, z$) はパウリのスピン行列である。このようにポアンカレ球とブロッホ球は類似の性質を持つことがわかる。

ポアンカレ球を拡張した高次ポアンカレ球 (HP) の状態は、一般に次のように表現できる [8]。

$$|\psi^{\xi'}\rangle = \cos\frac{\theta_{\xi'}}{2}|N_{\ell,m}^{\xi'}\rangle + e^{i\phi_{\xi'}}\sin\frac{\theta_{\xi'}}{2}|S_{\ell,m}^{\xi'}\rangle \quad (10)$$

このとき $\xi' = HP$ で高次ポアンカレ球を表現し、 ℓ, m は方位角位相因子 $\exp(i\ell\phi)$ 、

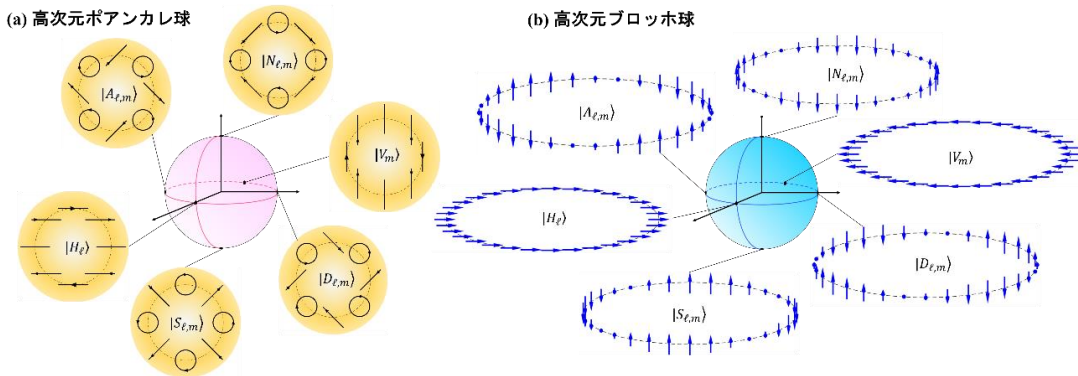


図 2 : $(\theta_\xi, \phi_\xi) = (\pi/2, 0)$ のときの高次ポアンカレ球と高次ブロッホ球。 $(\ell, m) = (-1, 1)$ のときの (a)光子の偏光状態、(b)スピンの分布を表している。

$\exp(im\phi)$ に関する軌道角運動量を指す。北極および南極の状態 $\{|N_{\ell,m}^{\xi'}\rangle, |S_{\ell,m}^{\xi'}\rangle\}$ を

$$|N_{\ell,m}^{\xi'}\rangle = \cos\frac{\theta_{\xi}}{2}|\chi_{\ell}^+\rangle + \sin\frac{\theta_{\xi}}{2}|\chi_{\ell}^-\rangle \quad (11)$$

$$|S_{\ell,m}^{\xi'}\rangle = e^{-i\phi_{\xi}}\left(\sin\frac{\theta_{\xi}}{2}|\chi_{\ell}^+\rangle - \cos\frac{\theta_{\xi}}{2}|\chi_{\ell}^-\rangle\right) \quad (12)$$

と置くことで、ポアンカレ球($\ell = 0, m = 0$)に対応させることができる。ただし、 $|\chi_{\ell}^+\rangle$

$$= \exp(i\ell\phi)\left(\cos\frac{\theta_{\xi}}{2}|R\rangle + e^{i\phi_{\xi}}\sin\frac{\theta_{\xi}}{2}|L\rangle\right) \quad (13)$$

$$|\chi_{\ell}^-\rangle = \exp(im\phi)\left(-\sin\frac{\theta_{\xi}}{2}|R\rangle + e^{i\phi_{\xi}}\cos\frac{\theta_{\xi}}{2}|L\rangle\right) \quad (14)$$

とし、 ϕ は円筒座標系での方位角を表す。(13), (14)式では、ポアンカレ球上で任意に選んだ直交する2状態に対して方位角位相因子 $\exp(i\ell\phi)$ 、 $\exp(im\phi)$ をかけている。このとき高次ポアンカレ球でもストークスパラメータを計算することができ、式(2)~(5)の関係がある。 $(\theta_p, \phi_p) = (\pi/2, 0)$ 、 $(\ell, m) = (-1, 1)$ のときの高次光子の偏光状態を図2(a)に示す。

式(1)でポアンカレ球の基底 $\{|R\rangle, |L\rangle\}$ と、ブロッホ球の基底 $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$ の対応関係から、高次ポアンカレ球の式(10)~(14)の基底 $\{|R\rangle, |L\rangle\}$ と $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$ に置き換えることで高次ブロッホ球($\xi = HB$)を表すことができる。そのスピン状態は式(6)~(9)までと同様に、期待値を計算することで求めることができる。一般的な場合の期待値を計算すると、計算結果が煩雑になるためここでは特定の状態についての例を挙げる。例えば、高次

ブロッホ球で $(\theta_B, \phi_B) = (\pi/2, 0)$ とした場合、期待値の x, y, z 成分はそれぞれ次のように計算できる。

$$\langle S_0 \rangle = \langle \psi^{HB} | \sigma_I | \psi^{HB} \rangle = 1 \quad (15)$$

$$\langle S_x \rangle = \langle \psi^{HB} | \sigma_x | \psi^{HB} \rangle = \sin\theta_{HB} \cos\phi_{HB} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \langle S_y \rangle &= \langle \psi^{HB} | \sigma_y | \psi^{HB} \rangle \\ &= \cos[(m-l)\phi] \sin\theta_{HB} \sin\phi_{HB} \\ &\quad - \sin[(m-l)\phi] \cos\theta_{HB} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \langle S_z \rangle &= \langle \psi^{HB} | \sigma_z | \psi^{HB} \rangle \\ &= \sin[(m-l)\phi] \sin\theta_{HB} \sin\phi_{HB} \\ &\quad + \cos[(m-l)\phi] \cos\theta_{HB} \end{aligned} \quad (18)$$

このように期待値を計算することで、方位角 ϕ に依存したスピンの向きを可視化した電子スピン渦の状態を求めることができる。図2(a)に対応する $(\theta_B, \phi_B) = (\pi/2, 0)$ の電子スピン渦のスピン状態を図2(b)に示す。図からわかるように方位角に依存してスピンの向きが変化し、方位角に依存した光子の偏光と対応していることがわかる。

3 実験方法

実験では図2(a)に示す高次光子をGaAs/AlGaAs多重量子井戸に照射し、方位角に依存したスピンの空間分布を時空間分解Kerr回転法によって観測した。光学測定系の概略図を図3(a)に示す。まずフェムト秒パルスレーザーから出た光を、スピンを励起するポンプ光と検出するプローブ光に分け、ポンプ光の光路には時間分解のためのディレイステージおよび空間分解のための制御ミラー置くことで時空間ダイナミクスを計測した。1/4波長板、q-plate、1/2波長

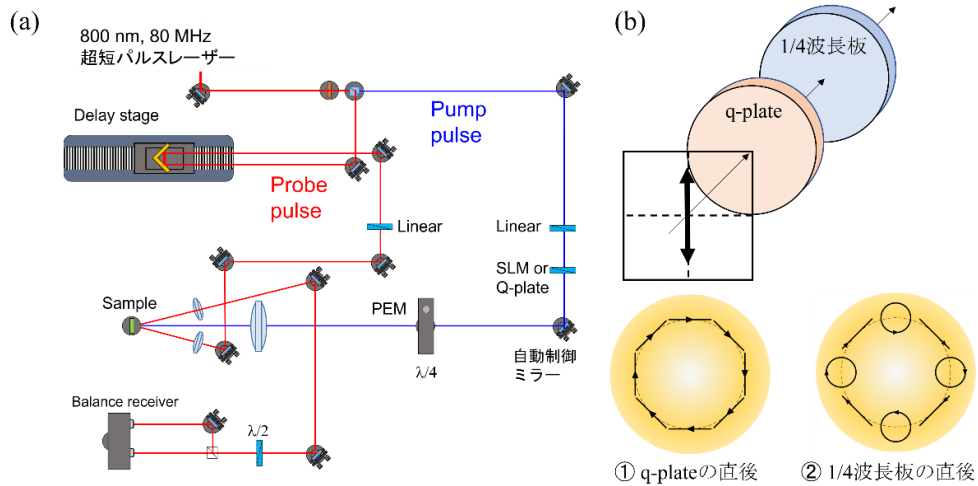


図3：時空間分解Kerr回転法によるスピン観測光学系。(a) 光学系の概略図 (b) Pump pulseの偏光状態

板を組み合わせることで、高次ポアンカレ球上の偏光状態を生成し、GaAs/AlGaAs 量子井戸に照射することでスピンの励起を行った。例えば、縦直線偏光を q-plate に導入し、その後 1/4 波長板を通すと図 3(b)に示す $(\ell, m) = (-1, 1)$ 、 $(\theta_p, \phi_p) = (\pi/2, 0)$ で選ぶ極を基にした(式(11)~(14)参照)、高次ポアンカレ球の $(\theta_{HP}, \phi_{HP}) = (0, 0)$ の状態を作ることができる。

4 実験結果

$(\ell, m) = (-1, 1)$ 、 $(\theta_p, \phi_p) = (0, 0)$ で選ぶ極を基にした高次ポアンカレ球の $(\theta_{HP}, \phi_{HP}) = (0, 0)$ 、 $(\pi, 0)$ の状態を用いて電子スピンを励起した場合を図 4(a)に示す。このときアップまたはダウンスピンが円環上に励起でき、 $(\theta_B, \phi_B) = (0, 0)$ の高次ブロッホ球上の $(\theta_{HB}, \phi_{HB}) = (0, 0)$ 、 $(\pi, 0)$ 状態を励起できることを確認した。

次に、 $(\ell, m) = (-1, 1)$ とした $(\theta_p, \phi_p) = (\pi/2, 0)$ の高次ポアンカレ球の $(\theta_{HP}, \phi_{HP}) = (\pi/2, \pi/2)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(\pi/2, 3\pi/2)$ 状態を用いて電子スピンを励起した場合を図 4(b)に示す。図 2(b)の計算通り、面直方向の成分であるアップスピンとダウンスピンが方位角に依存

して円環上に配置していることを確認した。

今回の実験では、高次光子を半導体に照射することで面直成分の空間スピン制御が可能であることを示した。

5 まとめ

今回高次ポアンカレ球の偏光状態を高次ブロッホ球に転写したときの電子スピンの分布について計算した。この高次ブロッホ球の存在は、今後別の拡張されたポアンカレ球が提案された場合、それに対応するブロッホ球が必ず存在することを示唆するものである。

さらに実験によって高次ポアンカレ球の偏光状態を用いて方位角に依存したスピン分布の観測を行い、計算によって求めたスピンの z 成分の分布と一致していることを確認した。したがって高次光子の偏光状態を用いて空間的にスピン分布の制御が可能である。

1 序論でも述べたように、本実験は高次光子から電子スピンへの完全な状態の転写を示したものでない。今後、V 型 3 準位系の半導体に光励起した電子スピンに磁場をかけ、電子スピン渦の Larmor 歳差運動を観測する。方位角に依存して歳差運動するスピンを観測し、高次光子からの完全転写を実証する。

6 参考文献

- [1] N. Gisin, *et al.*, Nat. Photonics **1**, 165(2007)
- [2] D. Loss, *et al.*, Phys. Rev. A **57**, 120(1998)
- [3] H. Kosaka, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 096602 (2008)
- [4] L. Allen, *et al.*, Phys. Rev. A **45**, 8081 (1992)
- [5] G. Millione, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 053601 (2011)
- [6] X. N. Yi, *et al.*, Phys. Rev. A **91**, 023801 (2015)
- [7] Z. C. Ren, *et al.*, Optics Express **23**, 026586(2015).
- [8] R. C. Devlin, *et al.*, Science **358**, 896-901(2017)

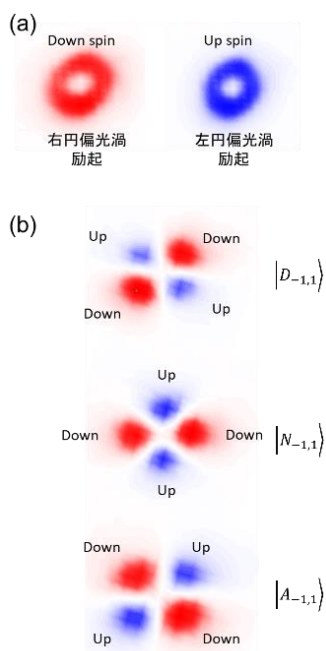


図 4 : (a) 円偏光光渦を使ったスピン励起、(b) 高次ポアンカレ球の状態を使ったスピン励起。方位角に依存してアップスピンとダウンスピンが交互に分布していることがわかる。