

# 量子ドットを使った単一光生成電子の制御とスピン検出

大岩 顕・樽茶 清悟

## Control of Single Photo-Electron and Its Spin Detection Using Quantum Dots

Akira OIWA and Seigo TARUCHA

Quantum state transfer between a single photon and a single quantum in the solid state is needed to realize an essential constituent of quantum memory and quantum interface for the global quantum information network. The electron spin in quantum dots is a suitable candidate for such a purpose because of its long coherence time and matching to the communication wavelength. Therefore, the first step toward the quantum state transfer is the control of single electrons generated by single photons using quantum dots. In this paper, we show the trapping and resetting of the single photo-electrons in a single quantum dot in a controlled manner. We also demonstrate the detection of the photo-electron spin. These achievements will significantly contribute to the development of the photon-spin quantum interface.

**Key words:** quantum dot, quantum state transfer, photon-spin quantum interface, single photo-electron spin detection

光子は量子光学分野においてベル不等式の破れや量子テレポーテーションなどの量子力学的効果の実証<sup>1,2)</sup>や、長距離通信の媒体として量子暗号媒体への応用<sup>3)</sup>の研究に用いられてきた。一方で、固体中の量子二準位系を使って、1量子ビット操作や2量子ビットゲートなど小規模量子計算の研究が活発に行われてきた。量子通信・計算の研究が本格化しつつある中で、今後、量子通信の長距離化や量子ネットワークによる分散処理型量子計算を構築するには、光子と別の物理系の間で量子状態を受け渡す量子インターフェースが不可欠である。

固体で量子ビットを担う物理系として、半導体量子ドット中の電子スピンは、単一電子スピンの検出<sup>4)</sup>や単一電子スピン制御<sup>5-9)</sup>、あるいは2量子ビット操作<sup>10,11)</sup>が実現され、かつ光励起に対する動作波長が通信波長領域と整合するなど、量子インターフェースに必要な特長を兼ね備えている。このことから、量子ドットを使った光子と電子スピン間の正確な量子状態転写は、量子インターフェースの実現にきわめて重要と考えられる。

まず半導体中でのスピンと光の結合に立ち返ると、例えば GaAs などの閃亜鉛鉱型半導体において、価電子帯から伝導帯への円偏光励起では、角運動量保存のためスピン偏極した電子と正孔が生成されることはよく知られており<sup>12)</sup>、半導体スピン物性の研究に多大な恩恵をもたらしてきた<sup>13)</sup>。Vrijen らはこれを応用し、半導体量子井戸を用いて、光子の偏光状態から電子スピン状態への量子状態転写を実現する方法を提案した<sup>14)</sup>。通常の GaAs のバルク半導体では、円偏光を基底とする重ね合わせ光で励起すると電子と正孔にもつれが生じ、電子スピン状態への転写はできない。しかし、量子閉じ込め効果と量子井戸面内の磁場を使えば、量子井戸面直方向の光励起に対してひとつの正孔状態から上/下向き両方の電子スピン状態への遷移(V字型遷移)が起こるので、結果として電子スピンの重ね合わせ状態のみへの転写が可能になる<sup>14)</sup>。実際に、Kosaka らにより多数の光子と電子スピン間での量子状態転写が実証されている<sup>15)</sup>。しかし、この手法を量子情報処理へ展開するためには、まず単一光子と単一電子スピンの間で正確な

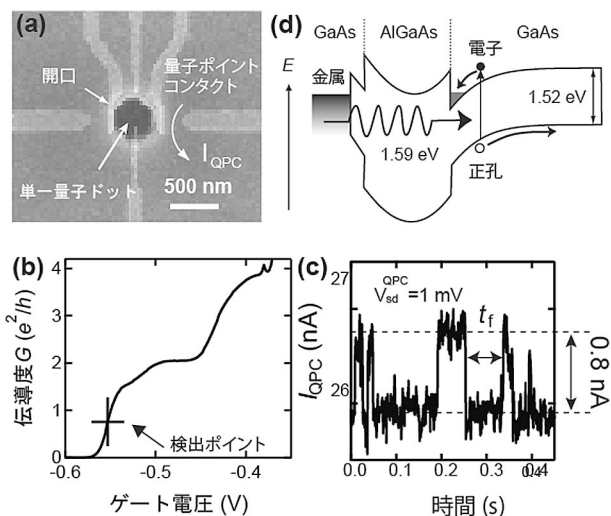


図1 (a) 単一量子ドットと量子ポイントコンタクトの電子顕微鏡写真. (b) 量子ポイントコンタクトの量子化伝導度と, (c) 検出ポイントで測定した実時間電荷検出信号.  $t_f$ は電子がドットを占有している時間を表す. (d) GaAs/AlGaAs ヘテロ構造における光照射と電子-正孔励起の模式図.

転写を実現し、さらに転写した単一量子の情報の演算・蓄積・検出などの操作が可能でなくてはならない。これまで量子ドットを使った単一光子検出は、自己形成量子ドット<sup>16)</sup>やゲート電極で二次元電子中に形成されるドット<sup>17-20)</sup>などを用いて行われているが、いずれも単一光子検出が中心で、光生成電子の制御やそのスピン検出の報告はない。

本論文では、単一電子スピンのコヒーレント操作と検出が実現されている量子ドットにおいて、単一光子が生成する単一電子の捕捉とその後のリセット操作を実現し、その光生成電子のスピンを判定した実験<sup>21)</sup>を紹介する。

## 1. 試料と量子ポイントコンタクトによる電荷検出

試料は、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板の上に、電子線描画装置を用いて加工された微小ゲート電極で構成されている。ここに適当な負電圧をかけることにより、ヘテロ界面の二次元電子ガスが面内に狭窄されて単一量子ドットができる(図1(a))。この量子ドットでは、ゲート電圧の調整により、ドットの電子状態やドットに接続した電極とのトンネル結合などを精度良く制御することができる。量子ドット周辺は基板表面の絶縁体を挟んで金属遮光マスク(4×4 μm<sup>2</sup>)で覆われている。金属マスクの量子ドット直上部分には微小開口(400 nm 径)が設けられており、光子は開口を通過してドットへ飛来するようになっている。

量子ドットの両側には、高感度電荷計として量子ポイントコンタクトが設置されている。この対向する2つのゲ-

ート電極に負電圧を印加して、電極間の二次元電子領域の幅をフェルミ波長程度に狭窄すると、横方向の閉じ込め効果により一次元量子サブバンドが生じ、短い量子細線が形成される。これが量子ポイントコンタクトである。この伝導度は $2e^2/h$ を単位にして量子化される(図1(b))。特に電流が流れなくなる直前の伝導度の傾斜が最大になるゲート電圧に調整すると、量子ポイントコンタクト電流 $I_{QPC}$ は外部の電場環境に敏感になり、近接する量子ドットの平均電荷や、電子の出入りを実時間の電流変化として計測することができる<sup>22)</sup>。図1(c)はその測定例である。電流ステップの高さ0.8 nAはこの後の実験で、単一電子の出入りの指標として用いる。また単一電子スピンの実時間検出を実現できるのは、現在のところ量子ポイントコンタクト、あるいは量子ドットを電荷計として用いる方法が最も確立している<sup>4)</sup>。本研究でも、単一光子が生成する単一電子とそのスピン判定に、この高感度電荷計を用いた。

図1(d)は、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造のエネルギーバンド図である。GaAsとAlGaAsの界面に二次元電子系が形成される。光源として、光エネルギーが1.59 eVのピコ秒パルス半導体レーザーダイオードを用いたので、照射された光子は二次元電子の直下にあるGaAsバッファ層でほとんど吸収され、電子-正孔対が生成される。このGaAs層には内部電場が存在するため、その電子と正孔は空間的に分離され、光生成電子のみがドットに捕捉される。この実験では光強度はドットあたり平均1光子/パルス以下に調節した。

単一光子の応答は、オシロスコープを使って光照射と量子ポイントコンタクト電流の実時間測定を同期させて検出した。実験は超伝導マグネット付冷凍機で行い、1.5 Kに置かれた試料の直上までマルチモードファイバーで光を伝送した。このため励起光は無偏光である。また試料表面上でのビーム径は1 mm程度であった。

## 2. 単一量子ドットにおける単一光生成電子検出と制御

単一光子と単一電子スピン間の量子状態転写の第一段階として、単一量子ドットを使った単一光子から単一電子への変換について紹介する<sup>21)</sup>。

まず初期状態として、光照射前、量子ドットはクーロンブロッケードの状態に調整し、電極からの電子の熱的なトンネルを極力抑える。クーロンブロッケードとは、量子ドットへ電子を1つドットへ付け加えるとき、帯電エネルギー程度のエネルギーを外部から獲得する必要があるため、電子のトンネルが抑制される状況のことである。ドット中の電子数は20個程度と推測される。図2は微弱光照射

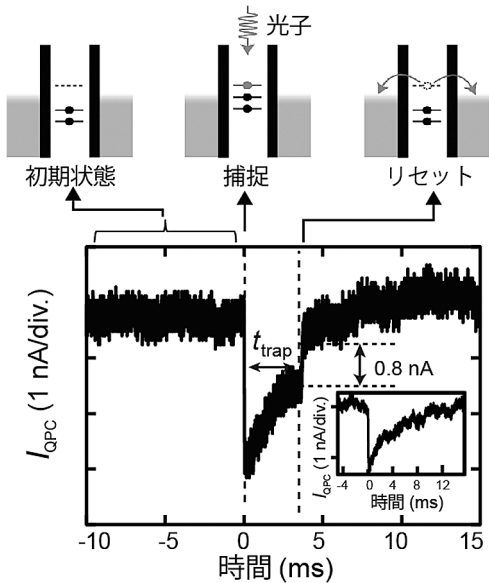


図2 量子ポイントコンタクト電流で実時間計測した単一光生成電子の捕捉とリセットの検出. 挿入図は単一光生成電子の捕捉が起こっていないときの電荷信号.

に対する量子ポイントコンタクト電流  $I_{QPC}$  の応答を示す.  $I_{QPC}$  は光照射時に大きく減少し, その後, 急峻な電流増加ステップを伴って次第にほぼ元の電流値へ戻る. 特に光照射後, 約 4 ms に現れる増加ステップは, その高さがちょうど図 1 (c) に示した単一電子の電荷信号 0.8 nA に一致していることから, 余剰単一電子, つまり単一光生成電子がドットから出たことを示唆している. したがって図 2 の信号は, 光照射により量子ドットへ光生成電子が 1 つ捕捉され, その後, 光生成電子が電極へ抜けてリセットされる一連の過程が検出できたことを示している. ところで, 本来は時刻ゼロでも単一光生成電子の捕捉により 0.8 nA 程度の電流減少が観測されるはずであるが, この実験では, 単一光生成電子が量子ドットに捕捉されたかどうかにかかわらず常に図 2 の挿入図のようなバックグラウンド信号が重畳するため, 時刻ゼロでの単一光生成電子捕捉の信号はバックグラウンドの大きな電流減少の中に隠されてしまう. このバックグラウンド信号は, 遮光マスクで覆われていない電極部分にも光が当たり, ゲート電極の実効的な電場が変化するためではないかと考えている. 図 2 の測定は照射光子数が 0.4 光子/パルスで行い, 単一光生成電子捕捉の信号を検出した確率は 5% 程度であった.

図 3 (a) は単一光生成電子捕捉信号の検出確率の照射光子数依存性を示す. 検出確率は照射光子数の増加とともにほぼ単調に増加するので, 図 2 (a) のような信号は確かに光生成された単一電子に起因することが確認できる. またこの依存性から検出効率として約 15% が得られる. これ

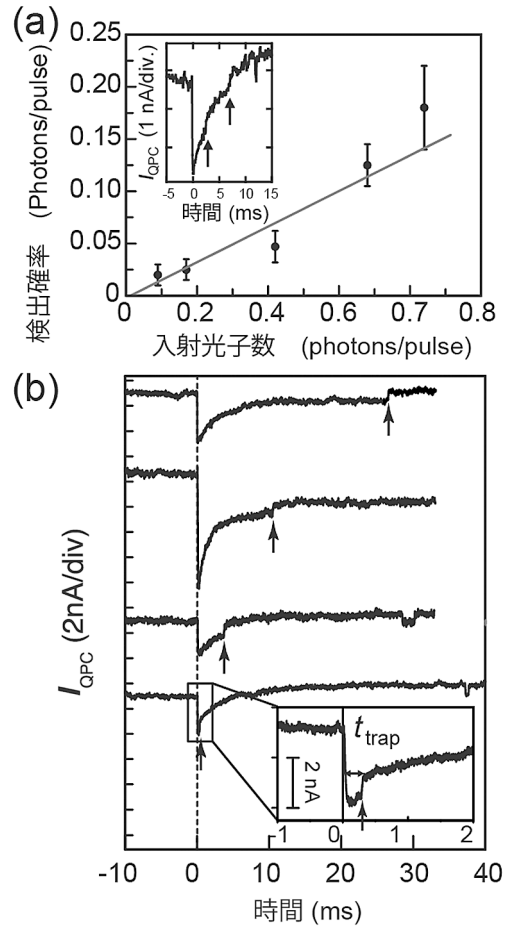


図 3 (a) 単一光生成電子検出確率の照射光子数依存性. 各点は 200~400 回光照射を行って得られた. 挿入図は二光子検出を示す電荷信号. (b) 電極へのトンネルレートを変えて行った単一光生成電子検出. グラフの上から下に向かって, 暗状態の平均的なトンネルレートが速くなる. 各トレースは見やすさのためシフトしてある.

は, GaAs バッファ層内の吸収長程度の領域で生成された電子が励起子を形成する前にヘテロ界面へドリフトし, ドットに捕捉されると考えると, おおむね妥当な値である.

次に, 電極とのトンネル結合をゲート電圧により制御した場合の単一光子検出について議論する. 図 3 (b) は量子ドットと外部電極との間のトンネルレートを変えたとき観測された典型的な単一光生成電子捕捉信号を示す. 暗状態で調整したトンネルレートにきちんと対応して, 単一光生成電子が捕捉され電極へ出てゆくまでの捕捉時間  $t_{trap}$  が 0.3 ~ 26 ms の間で変化している. これは, 単一光子から転写された単一電子を, 制御して外部へ取り出すことができることを意味している. さらに最も速い捕捉時間は, GaAs 系量子ドットで報告されている典型的なスピン緩和時間 (1 ms ~ 1 s) よりも十分速く<sup>23)</sup>, 緩和する前に単一光生成電子のスピンを検出できることを示している. スピン検出は次章で述べる.

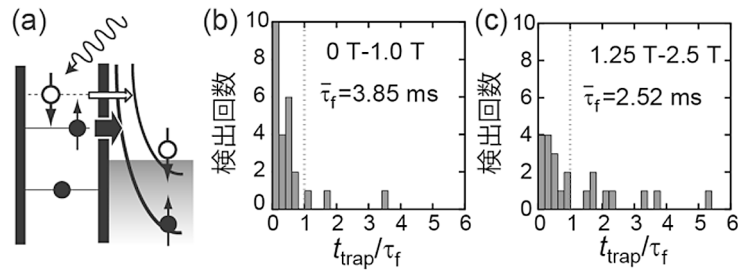


図4 垂直磁場下での単一光生成電子検出。(a)は端状態によるスピン依存トンネルの模式図。2つのヒストグラムは、スピン分裂端状態が形成されていない低磁場(b)と形成されている高磁場(c)で検出された捕捉時間の分布を示す。 $\tau_f$ はドットが占有されている平均時間。 $\bar{\tau}_f$ はプロットした磁場範囲での $\tau_f$ の平均値である。

図3(a)の挿入図は、2つの矢印の位置に単一電荷のステップが観測され、二光子検出を示唆しており、この量子ドット素子が光子数識別にも応用できる可能性を示している。

### 3. 単一量子ドットにおける光生成電子スピンの検出

では、実際に単一光子が生成した単一光生成電子のスピンを検出することは可能だろうか。単一電子スピンの計測には、量子ポイントコンタクトによる電荷検出にスピン選択性を付加する必要があるが、ここでは二次元電子系の端状態を用いた<sup>24)</sup>。これは二次元面に垂直な磁場下での電子のサイクロトロン運動により試料の端に沿って周回する電流を運ぶ状態で、十分強い磁場下ではスピンの異なる状態が空間的に分離した端状態を形成する。このように二次元電子電極にスピン分離端状態ができると、図4(a)に示すように、ドットから上向きスピンと下向きスピンの端状態までの距離に差ができるため、下向き電子スピンのほうが上向き電子スピンよりもトンネルレートが遅くなると期待される。そこで実際に磁場下での単一光子検出を行った。照射光は無偏光であるため、上向き・下向き電子スピンは同確率で生成される。図4(b)と(c)は、それぞれ端状態が形成されていない低磁場と形成されている高磁場で得られた捕捉時間 $t_{\text{trap}}$ のヒストグラムである。各磁場での検出回数が少ないため、高磁場と低磁場のデータをまとめてプロットした。 $\tau_f$ は暗状態で電子が熱的トンネルによってドットを占有する時間 $t_f$ (図1(c))の平均値で、 $\bar{\tau}_f$ は $\tau_f$ の磁場平均値であり、この実験では典型的なスピン緩和時間<sup>23)</sup>よりも十分短くなるよう調節した。低磁場では $\bar{\tau}_f$ を時定数とするほぼ単一の指数関数分布となり、ほとんどの光生成電子が $\bar{\tau}_f$ 程度で電極へトンネルすることを意味している。一方、高磁場側では $\bar{\tau}_f$ の指数関数分布から外れて有意に長い捕捉時間が観測され、予想通りトンネルが遅い下向き電子スピンの存在して、そのスピンの緩和する前

に検出できたことを示唆している。したがってこの手法と素子を使って、単一光生成電子のスピンの検出が可能であることが確かめられた。

本論文では、量子ドットを使い、単一光子が生成する単一電子を捕捉し、電極とのトンネル結合を制御して、電子スピン緩和時間よりも速くその単一電子を取り出すことと、スピン分裂端状態を使い、単一光生成電子のスピンの判別が可能であることなどを初めて示した実験を解説した。これは光子-電子スピン量子状態転写に向け、量子ドットを使って、転写された単一電荷や単一スピンの情報のより高度な操作や検出を実現するための基盤技術となる成果である。さらにわれわれは本実験の手法を二重量子ドットに拡張し、最近、共鳴ドット間遷移を使った非破壊単一光生成電子検出やパウルスピンのブロッケードによる角運動量転写を実現しつつある。さらに理論提案<sup>14)</sup>に従い、 $g$ 因子が制御された量子井戸中の二重量子ドットでも単一光子検出に成功しており、光子-電子スピン間の量子状態転写へ着実に進展している。今後、量子状態転写の実現に向け、スピン量子ビットの高周波操作技術を応用し、転写された単一光生成電子スピンの回転操作や量子状態転写を確認するためのトモグラフィ測定の開発など、より高度な操作と制御が課題となるであろう。また低い光子検出効率は量子インターフェースとしても、あるいは高度な実験を行う上でも問題となるため、何らかの共振器構造を組み合わせることが必要である。

また、この研究が量子情報への応用だけでなく、量子光学と固体中の量子制御を組み合わせた新しい実験のパラダイムにつながることを期待する。

共同研究者の Giles Allison 博士、木山治樹氏、藤田高史氏、浅山徹也氏、Alessandro Pioda 博士、十時詠吾氏に感謝する。また本研究は科学研究費補助金基盤研究 S (No. 19104007) と A (No. 21244046)、FIRST 最先端研究

開発支援プログラム量子情報処理プロジェクト, 新学術領域量子サイバネティクス, QuEST (HR0011-09-1-0007), IARPA の補助を受けて行われた.

## 文 献

- 1) A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger: "Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers," *Phys. Rev. Lett.*, **49** (1982) 1804-1807.
- 2) D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter and A. Zeilinger: "Experimental quantum teleportation," *Nature*, **390** (1997) 575-579.
- 3) C. H. Bennett and G. Brassard: "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing," *Proc. of IEEE international Conference on Computers, Systems, and Signal Processing* (IEEE, New York) pp. 175-179.
- 4) J. M. Elzerman, R. Hanson, L. H. Willems van Beveren, B. Witkamp, L. M. K. Vandersypen and L. P. Kouwenhoven: "Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot," *Nature*, **430** (2004) 431-435.
- 5) J. R. Petta, A. C. Johnson, J. M. Taylor, E. A. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. M. Marcus, M. P. Hanson and A. C. Gossard: "Coherent manipulation of coupled electron spins in semiconductor quantum dots," *Science*, **309** (2005) 2180-2184.
- 6) F. H. L. Koppens, C. Buizert, K. J. Tielrooij, I. T. Vink, K. C. Nowack, T. Meunier, L. P. Kouwenhoven and L. M. K. Vandersypen: "Driven coherent oscillations of a single electron spin in a quantum dot," *Nature*, **442** (2006) 766-771.
- 7) K. C. Nowack, F. H. L. Koppens, Yu. V. Nazarov and L. M. K. Vandersypen: "Coherent control of a single electron spin with electric fields," *Science*, **318** (2007) 1430-1433.
- 8) M. Pioro-Ladrière, T. Obata, Y. Tokura, Y.-S. Shin, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama and S. Tarucha: "Electrically driven single-electron spin resonance in a slanting Zeeman field," *Nat. Physics*, **4** (2008) 776-779.
- 9) T. Obata, M. Pioro-Ladrière, Y. Tokura, Y.-S. Shin, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama and S. Tarucha: "Coherent manipulation of individual electron spin in a double quantum dot integrated with a micromagnet," *Phys. Rev. B*, **81** (2010) 085317.
- 10) R. Brunner, Y.-S. Shin, T. Obata, M. Pioro-Ladrière, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama, Y. Tokura and S. Tarucha: "Two-qubit gate of combined single-spin rotation and interdot spin exchange in a double quantum dot," *Phys. Rev. Lett.*, **107** (2011) 146801.
- 11) H. Bluhm, S. Foletti, I. Neder, M. Rudner, D. Mahalu, V. Umansky and A. Yacoby, "Dephasing time of GaAs electron-spin qubits coupled to a nuclear bath exceeding 200  $\mu$ s," *Nat. Phys.*, **7** (2010) 109-113.
- 12) F. Meier and B. P. Zakharchenya: *Optical Orientation* (North-Holland, 1984).
- 13) D. D. Awschalom and N. Samarth: "Optical manipulation of spin coherence in semiconductors," *Semiconductor spintronics and quantum computation*, eds. D. D. Awschalom, D. Loss and N. Samarth (Springer 202) pp. 147-193.
- 14) R. Vrijen and E. Yablonovitch: "A spin-coherent semiconductor photo-detector for quantum communication," *Physica E*, **10** (2001) 569-575.
- 15) H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Arai and K. Edamatsu: "Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor," *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 096602.
- 16) A. J. Shields, M. P. O'Sullivan, I. Farrer, D. A. Ritchie, R. A. Hogg, M. L. Leadbeater, C. E. Norman and M. Pepper: "Detection of single photons using a field-effect transistor gated by a layer of quantum dots," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 3673-3675.
- 17) S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and H. Hirai: "A single-photon detector in the far-infrared range," *Nature*, **403** (2000) 405-407.
- 18) H. Kosaka, D. S. Rao, H. D. Robinson, P. Bandaru, T. Sakamoto and E. Yablonovich: "Single photoelectron trapping, storage, and detection in a field effect transistor," *Phys. Rev. B*, **67** (2003) 045104.
- 19) D. S. Rao, T. Szkopek, H. D. Robinson, E. Yablonovich and H.-W. Jiang: "Single photoelectron trapping, storage, and detection in a one-electron quantum dot," *J. Appl. Phys.*, **98** (2005) 114507.
- 20) M. Kuwahara, T. Kutsuwa, K. Ono and H. Kosaka: "Single charge detection of an electron created by a photon in a g-factor engineered quantum dot," *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010) 163107.
- 21) A. Pioda, E. Totoki, H. Kiyama, T. Fujita, G. Allison, T. Asayama, A. Oiwa and S. Tarucha: "Single-shot detection of electrons generated by individual photons in a tunable lateral quantum dot," *Phys. Rev. Lett.*, **106** (2011) 146804.
- 22) M. Field, C. G. Smith, M. Pepper, D. A. Ritchie, J. E. F. Frost, G. A. C. Jones and D. G. Hasko: "Measurements of Coulomb blockade with a noninvasive voltage probe," *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 1311-1314.
- 23) S. Amasha, K. MacLean, Iuliana P. Radu, D. M. Zumbühl, M. A. Kastner, M. P. Hanson and A. C. Gossard: "Electrical control of spin relaxation in a quantum dot," *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 046803.
- 24) M. Ciorga, A. S. Sachrajda, P. Hawrylak, C. Gould, P. Zawadzki, S. Jullian, Y. Feng and Z. Wasilewski: "Addition spectrum of a lateral dot from Coulomb and spin-blockade spectroscopy," *Phys. Rev. B*, **61** (2000) R16315.

(2012年5月14日受理)