

量子ドット遠赤外検出器

小宮山 進

A Quantum-Dot Detector in the Far-Infrared Range

Susumu KOMIYAMA

A photon detector in the far-infrared region is described. The detector comprises parallel double quantum dots (QDs) formed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure crystal by biased metal gates. The two QDs are coupled electrostatically, while one of the QDs is operated as a charge-sensitive single electron transistor (SET). When a photon is absorbed by the other QD through plasma resonance (about 0.5 THz), one electron escapes to an outside reservoir leaving a hole in the second QD. This ionization of the second QD, in turn, affects the electrochemical potential of the first QD, thereby causing a detectable change in the SET conductance through the first QD.

Key words: far-infrared, single-photon detection, quantum dot

1. トランジスター (SET)

微小な導体粒（半導体量子ドット）に弱いトンネル結合を介して電流を流すとき、電子は1つひとつ順番に量子ドットを通過しなければならず、その際の伝導度は量子ドット中の電子状態および静電ポテンシャルにきわめて大きく左右される。そのような系または現象を単電子トランジスター (SET) または単電子トンネリングといい、半導体量子ドット中の電子準位の探索およびそれらの制御を通した量子ビット素子研究の土台をなす一方、基礎的分野への応用として、微小領域の静電ポテンシャルに対する超高感度検出計が開発されている¹⁾。本稿では、SET を用いた長波長の電磁波光子検出器を紹介する。強磁場中のSETを用いた遠赤外光領域の光子検出器はすでに開拓されており²⁾、本誌にも解説記事がある³⁾。ここでは、ゼロ磁場中で動作する二重量子ドットによる光子検出について記す^{4,5)}。

赤外領域では、超伝導ギャップを介して複数の準粒子を励起する超伝導ホットエレクトロン検出器によって、波長数 μm 程度までの光子検出がすでに可能となっているが⁶⁾、 $10 \mu\text{m}$ 以上の波長領域での光子検出は機構上難しいと思われる。ここで紹介するのは、その限界よりずっと長波長の $500 \mu\text{m}$ 程度の領域での光子検出である。原理を変

えることなく $10\sim\text{数百 } \mu\text{m}$ の検出素子を設計することが可能と考えられ、将来的には、中・遠赤外からサブミリ波の広い領域をカバーする実用的な検出器群が提供される可能性がある。

SET とは、図 1(a) に示すように、リード線（ソース電極 S とドレイン電極 D）に弱くトンネル接合したサブミクロンサイズの導体粒と、近傍に置かれたゲート電極からなる。ソース・ドレイン電極間に小さな電圧差 V_{SD} を与えたとき、導体粒の電気化学ポテンシャル、

$$\mu(N) = E_N + e\varphi_N(V_G) \quad (1)$$

がリード線のフェルミエネルギー E_F に等しいときのみ、トンネル電流 I_{SD} が流れる（伝導度共鳴の状態）。ただし、式 (1)において、 E_N は導体粒中の N 番目の一電子状態固有状態エネルギーであり、 φ_N は導体粒の静電ポテンシャルつまり伝導体の底である。導体粒中の電子数が 1 つ変化することにより、 φ_N は不連続的に帶電エネルギー e^2/C 分だけ変化する： $e(\varphi_{N+1} - \varphi_N) = e^2/C$ 。ただし、C は導体粒が外界に対してもつ静電容量である。また、電子数を固定してゲートバイアス電圧 V_G を変化させると、静電ポテンシャルは $e\Delta\varphi_N = -e(C_G/C)\Delta V_G$ のように連続的に変化する。ただし、 C_G は導体粒がゲート電極に対してもつ静

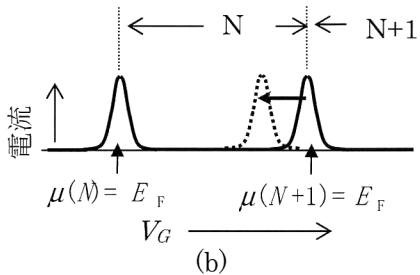
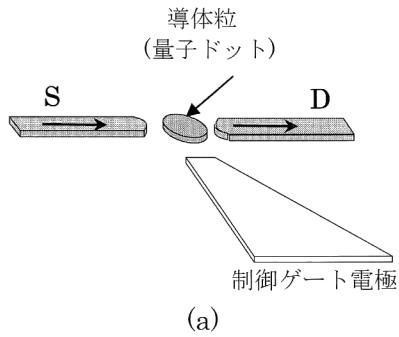
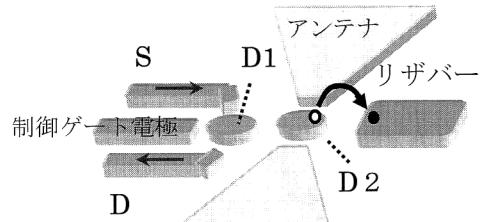


図1 (a) 単電子トランジスター (SET), (b) SET のトンネル電流.

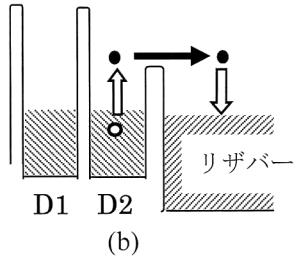
電容量である。したがって、 V_G を変化させると、 φ_N および $\mu(N)$ が連続的に変化して、図1(b) のように伝導度共鳴が成立する条件、 $\mu(N)=E_F$ 、 $\mu(N+1)=E_F$ が繰り返し現れ、トンネル電流が鋭いピーク列（クーロン振動）となって現れる（共鳴ピーク幅は温度で決まる）。異なる共鳴ピーク間のゲート電圧領域では、導体粒中の電子数が N 、 $N+1$ のように固定されているために、電流は流れない。このようなSET動作が実際に起こるために、熱エネルギー $-k_B T$ が帶電エネルギー e^2/C より十分小さいこと（以下に記す素子では $T \ll 0.4\text{ K}$ 程度の低温）が必要である。

2. 光子検出

SETの際立った特徴は、電荷に対する飛びぬけた敏感さであり、感度として、1秒の平均時間で $3 \times 10^{-4}\text{ e}$ 程度の電荷が検出できる（電荷検出感度= $3 \times 10^{-4}\text{ e}/\text{Hz}^{1/2}$ ）ことが報告されている。図2(a) に概念図を示すように、遠赤外光子検出器はSETの電荷敏感性を利用する^{4,5)}。左側のソース電極(S)とドレイン電極(D)が量子ドット1(D1)に弱くトンネル結合し、制御ゲート電極とともにSETを形成する。D1に隣接して右側に第2の量子ドット2(D2)が配置され、そのD2は、前後のボータイアンテナにより上方から入射する遠赤外光を吸収する。吸収は、D2のプラズマ共鳴（光子エネルギー約2meV）により起こる⁷⁾。図2(b) のように、励起されたD2のプラズマ振動により、D2中の電子のひとつがポテンシャル障壁を越えて右側のリザーバーに脱出する。このことにより D2 が $+e$ にイオン化



(a)



(b)

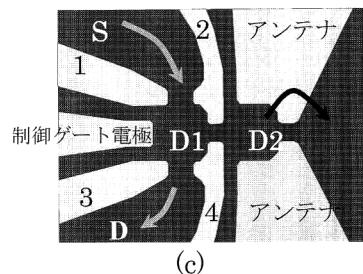


図2 遠赤外光子検出器.

し、その正電荷が静電容量結合を通して D1 の静電ポテンシャル φ_N 、さらに電気化学ポテンシャル $\mu(N)$ を変化させて、SET の電流を変化させる。いったん D2 から脱出した電子は、リザーバー中ですばやくエネルギーを失ってフェルミ準位に緩和するので、再び D2 にただちに戻ることはなく、イオン化状態が長時間保持される。（実際には、おそらくポテンシャル障壁近傍の不純物準位などによって再結合過程が起こり、イオン化状態は有限の寿命をもつ。実験で観測した最長の寿命は 10 秒程度である。）図2(c) はこの素子の上面図であり、GaAs/AlGaAs の单一ヘテロ構造結晶の上に制御ゲート電極、金属ゲート電極 1~4、およびアンテナとなる金属薄膜（白色）を蒸着して作製する。結晶表面から深さ $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 程度に高移動度の二次元電子系（厚さ約 10 nm）が広がっており、上記の金属部分を負電圧にバイアスし、金属薄膜下の二次元電子系を追い払うことによって、量子ドット 1 と 2 (D1 と D2)、ソース電極(S)、ドレイン電極(D)、および写真右側の“リザーバー”を形成する。D1 とソース・ドレイン電極間のトンネル結合強度は、ゲート電極 1, 2 および 3 で求められる ($h\nu$ は光子エネルギー)。図3 にこの検出器による実測例を示す。検出器の量子効率は、きわめて荒っぽく見積もって $\eta=0.1\%$ 程度

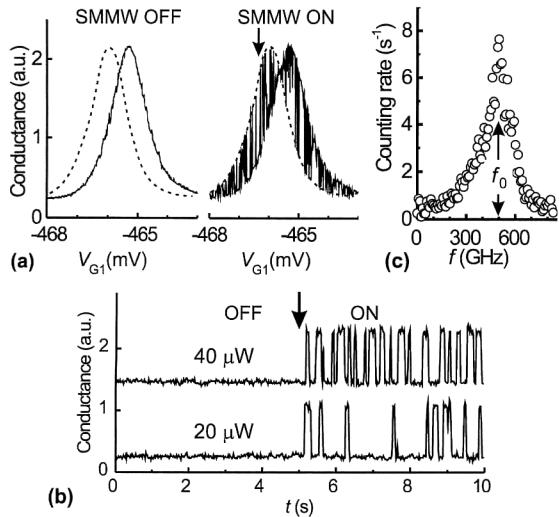


図3 (a) 遠赤外光照射なし(左)およびあり(右)でのトンネル電流。(b) 光子吸収によるテレグラフ信号。サブミリメートル波光源として、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造中二次元電子系からのサイクロトロン発光を用いている。図中の $40 \mu\text{W}$ および $20 \mu\text{W}$ は、それぞれ発光素子に流す電流値を表す。(c) 励起スペクトル。サイクロトロン発光素子の磁場を掃引して得た結果。

であり、 W の実測値は $W = 0.01/\text{s}$ 程度である。これらの値から $\text{NEP} = 10^{-21} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$ が得られ、遠赤外・サブミリ波領域の従来型検出器（各種ボロメーターおよび半導体中不純物準位励起を用いた光伝導型検出器）に比べて、 10^3 程度以上の感度を有する。検出器の動作速度は励起寿命 τ で決まるが、励起寿命 τ をポテンシャル障壁の調節によって短くすること自体は簡単である。実際の動作速度は、SET に接続する測定系の帯域幅増大による雑音の増加によって決まり、常温の前置増幅器を用いた場合は 3 マイクロ秒程度が限度である。低温の増幅器を用いれば、10 ナノ秒程度

まで可能と考えられる。

SET による検出器は共鳴型で、狭帯域であり、現在は約 0.5 THz (波長 0.6 mm 近傍) に限られている。量子ドットサイズや素子作製に用いる二次元電子系の濃度を変化させることによって、帯域を 2 倍程度拡大することが可能だろう。さらに、量子ドットを量子井戸から形成し、量子井戸の二次元サブバンド間遷移を用いれば、波長 100~10 μm 程度の範囲の光子検出器を設計することが可能になるだろう。

文 献

- 1) M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf: "Amplifying quantum signals with the single-electron transistor," *Nature*, **406** (2000) 1039-1046.
- 2) 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.
- 3) 小宮山進: “遠赤外領域における単一フォトン検出器”, *光学*, **29** (2000) 740-744.
- 4) O. Astafiev, S. Komiyama and T. Kutsuwa: "Double quantum dots as a high sensitive submillimeter-wave detector," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 1199-1201.
- 5) O. Astafiev, S. Komiyama, T. Kutsuwa and V. Antonov: "Single-photon detector in the microwave range," *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 4250-4252.
- 6) A. Lipatov, O. Okunev, K. Smirnov, G. Chulkova, A. Korneev, P. Kouminov, G. Gol'tsman, J. Zhang, W. Slysz, A. Verevkin and R. Sobolewski: "An ultrafast NbN hot-electron single-photon detector for electronic applications," *Supercond. Sci. Technol.*, **15** (2002) 1689-1692.
- 7) O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and S. Komiyama: "Far-infrared spectroscopy of single quantum dots in high magnetic fields," *Phys. Rev. B*, **65** (2002) 85315 (1-4).

(2004 年 6 月 28 日受理)