

近年、電子1個のレベルで動作特性を制御できる素子の研究が理論的・実験的に世界的規模でなされている。単一電子制御素子は構造が簡単で高度の微細化に向き、微細化でますます素子性能の向上が期待できる動作原理に基づくため究極の電子素子の一つと考えられている。このため、21世紀の高度マルチメディア情報化社会を支える基本素子の一つの方向性として注目されている。

ここでは、素子の動作原理であるクーロン ブロックエイドを解説し、単一電子制御素子の基本構成要素の動作特性的理論的検討結果を述べる。確立された基礎理論は初めての自己無撞(どう)着な微視的理論であり、クーロン ブロックエイドによって期待される種々の現象を正確に記述し、単一電子制御素子の設計に指針を与えることが示される。

Recently, extensive studies have been made on single-electron tunneling (SET) devices. The controlled transfer of electrons one by one is based on the Coulomb blockade (CB) of tunneling, which manifests as the charging energy of a single electron becomes larger than any other characteristic energy involved. It is anticipated that the family of SET devices will be one of the most promising devices supporting the multimedia society in the 21st century, because of their simple structures and robust operating principle which are favorable for ultrasmall downsizing.

This paper reports a theoretical study on the operating principle of SET devices and the current-voltage characteristics of a fundamental structure for the SET devices. It is shown that the established theory specifies the basic aspects of SET devices expected by CB and provides a guiding principle for the design of such devices.

### 1 まえがき

シリコン MOS ランジスタおよびキャバシタは数々のブレイクスルーによって微細化を達成し、シリコン LSI の基本構成要素としてその高密度化を支えてきた。しかし、21世紀の高度マルチメディア情報化社会の実現にはさらなる高度の微細化が必要であり、素子原理自体もこのような微細化に対し破たんをきたさないものでなければならない。しかしながら、現時点では既存の動作原理に基づく素子の微細化がどこまで可能であるかは必ずしも明らかではない。このような状況の下、構造が簡単で作りやすくかつ高度の微細化で素子性能が向上するといった新たな動作原理に基づく素子の検討に関心がもたれている。そのような素子として現在注目されているものに単一電子制御素子がある。これは、その動作特性が文字どおり電子一個のレベルで制御される素子であり、上記課題を克服しうる動作原理に基づいている。

ここでは、素子の動作原理であるクーロン ブロックエイドを解説し、最近われわれが確立した理論に基づき、単一電子制御素子の動作原理と特性の解析結果について述べる。

### 2 クーロン ブロックエイド

#### 2.1 クーロン ブロックエイドとは

単一電子素子制御は、トンネル現象に対するクーロン ブロックエイドと呼ばれる効果を利用する。図1に二重トンネル接合を示す。各接合  $i (= 1, 2)$  は抵抗  $R_t^{(i)}$  と静電容量  $C_t^{(i)}$  をもつていて、それらに囲まれた部分(アイランド)に電子が1個トンネルすることは素電荷  $e$ だけアイランドを充電すること

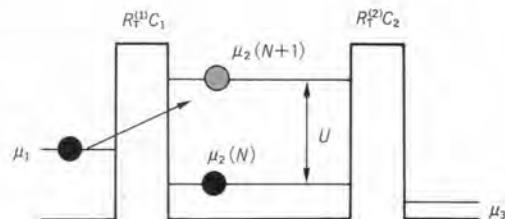


図1. 単一電子制御の原理(クーロン ブロックエイド) 二重トンネル構造。 $\mu_1$ ,  $\mu_3$  および  $\mu_2(N)$  は左右電極および電子が  $N$  個存在するときのアイランドの化学ポテンシャル。

Operating principle of SET devices (Coulomb blockade)

ととなり、電子は充電エネルギー  $U \equiv e^2/2 C_L$  ( $C_L \equiv C_1 + C_2$ ) だけ高いレベルに入らねばならない。もし、 $U$  が熱エネルギー やトンネルで生ずるエネルギーのほけよりも十分大きく、図 1 のように  $\mu_2(N) < \mu_1 < \mu_2(N+1)$  であれば、電子は一個たりともトンネルできないことになる。これが、クーロン ブロックエイドである<sup>(1),(2)</sup>。クーロン ブロックエイドは、電流電圧特性に  $U/e$  程度のトンネリングの禁止帯(クーロン ギャップ)をもたらす。 $U$  が大きいということは、静電容量が小さいこと、つまりはトンネル接合が小さいことを意味し、クーロン ブロックエイドは超微細なトンネル接合で初めて顕在化するのである。

表 1 に 3 種類の接合面積に対する単一電子制御素子の種々のデバイスパラメータの一例を示す<sup>(1)</sup>。ここでは Al と Al 酸化物で作った接合抵抗 600 kΩ のトンネル接合を想定し、温度限界は充電エネルギーの 1/100 を、集積度は外部制御回路を考慮した下限値を記してある。素子の動作温度とパフォーマンスは超微細化により向上することがわかる。

表 1. 単一電子制御素子に関する種々のパラメータ  
Typical parameters for SET devices

微細加工のレベル	接合面積 (nm <sup>2</sup> )	エネルギー スケール (J/ビット)	温度限界 (K)	時間スケール (ps)	集積度 (cm <sup>-2</sup> )
技術的現状	30 × 30	3 × 10 <sup>-22</sup>	0.3	30	3 × 10 <sup>8</sup>
ナノ微細加工	10 × 10	3 × 10 <sup>-21</sup>	3	3	3 × 10 <sup>9</sup>
巨大分子	3 × 3	3 × 10 <sup>-20</sup>	30	0.3	≈ 10 <sup>10</sup>

## 2.2 クーロン ブロックエイドの観測条件

クーロン ブロックエイドを安定して利用するには次の三つの条件が必要である。

- (1) 動作温度での熱エネルギーよりも  $U$  が大きい ( $k_B T \ll U$ )。
- (2) 量子ゆらぎのエネルギーよりも  $U$  が大きい ( $h/R_T^{(j)} \ll U$ )。
- (3) 電荷ゆらぎが素電荷  $e$  よりも小さい ( $\delta Q \ll e$ )。

ここで  $k_B$ ,  $T$ ,  $h$  はそれぞれボルツマン定数、絶対温度、プランク定数である。これらのうち(1)および(2)は、熱励起およびトンネリングによって生ずるエネルギーのほけにより電子の“もれ”が生じるために必要であり、前者は素子の動作温度の上限を、また後者はトンネル接合の抵抗に対する  $R_T^{(j)} \gg R_q \equiv h/e^2$  ( $\sim 25$  kΩ : 量子化抵抗) なる条件となっている。条件(3)は、いま電子 1 個の挙動をコントロールしようとするのであるからもっとも重要かつ注意を要する点である。

いま、インダクタンス  $L$  の外部回路につながれた単一トンネル接合 ( $C$ ,  $R$ ) を考えてみる。このとき発生する電荷ゆらぎの二乗平均は簡単な考察から次のように見積られる。

$$\langle \delta Q^2 \rangle = \frac{e^2 \hbar \omega_L}{2 E_c} \left( \frac{1}{\exp(\beta \hbar \omega_L) - 1} + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\omega_L = 1/\sqrt{LC}$ ,  $E_c = e^2/2C$ ,  $\beta = 1/k_B T$  である。式(1)は、外部回路が高インピーダンス ( $\hbar \omega_L / E_c \ll 1$ ) でなければ電荷のゆらぎは大きくクーロン ブロックエイドは見えなくなることを意味する。これは電磁場環境効果と呼ばれ、エネルギー散逸が存在する量子力学系で問題となる効果である。一電子のトンネルは  $E_c < \hbar \omega_L$  であればエネルギーの損失なく起こるが、 $E_c > \hbar \omega_L$  であればトンネル時に  $LC$  回路の共鳴振動を励起してエネルギー損失が生じトンネリングは抑止される。エネルギーの環境(外部回路)への散逸とトンネルに伴う電荷のゆらぎの抑止は同じことなのである。おおらかなサイズのトンネル接合ではトンネル電流といつても  $10^7$  個といった“たくさんの中の電子”を扱うため問題にならなかったことが、超微細なトンネル接合では大きな問題となるのである。

2.1 節での説明のように二重トンネル接合の場合には、アイランドでの電子の増減はトンネリングによってだけ生ずるから、(1)と(2)の条件が満たされれば変化はほぼ  $e$  の整数倍で起こり、クーロン ブロックエイドはつねに保証される。ただし、以下でみるように、外部インピーダンスの値によってクーロン ギャップが異なること、アイランド電荷の期待値が電磁場環境効果の程度に依存することなどから、(3)はあくまでも重要であり定量的動作解析には考慮することが不可欠となる。

以上みてきたように、単一電子制御素子の基本構成要素は超微細な二重トンネル接合である。トンネル接合は金属と絶縁体で構成してもよいし、半導体素子のチャネルを静電的にほぼピンチオフした部分でもよい。また、アイランドのそばに静電容量的に結合した電極を設ければ、アイランドの電荷を外から変化させることができあり、 $e$  の単位でトンネリングをオン／オフできるのでトランジスタ、メモリ、センサなどが期待できる<sup>(1),(2)</sup>。

## 3 単一電子制御素子動作の理論解析

### 3.1 単一電子制御素子の基本構造

図 2 に“外部回路をもった二重トンネル接合”を示す。こ

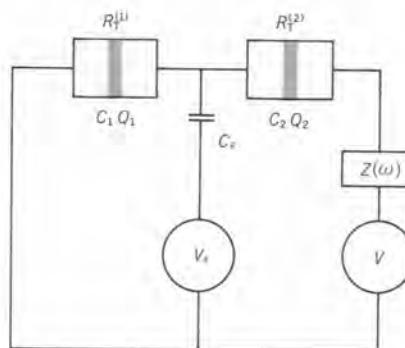


図 2. 定電圧バイアスされた単一電子制御素子の基本構造 容量結合したゲート構造をもつ超微細な二重トンネル接合。単一電子制御には外部インピーダンスの考慮が重要となる。

Voltage-biased fundamental unit for SET devices

の構造は、左右の電極をソースとドレイン、アイランドをチャネル、アイランドに容量的に結合した電極をゲートとみることができる、シリコン MOSFET (MOS 型電解効果トランジスタ)と同じ 3 端子素子といえる。検討にあたって重要なことは、上述の(1), (2), (3)の考慮に加え、(4)自己無撞着なアイランド電荷状態の量子力学的記述である。

クーロン ブロックエイドの提唱者であるLikharevらの理論<sup>(1)</sup>は、確率方程式に頼るものでさまざまな点で不正確であり、(3), (4)などはまったく考慮されていない。微視的な理論でも、(4)だけは確率方程式で扱うためアイランドへの余剰電荷の蓄積や欠乏を正しく表現できない<sup>(3)</sup>など素子特性解析上問題がある。われわれの理論は、上述のポイントをすべて満たした微視的自己無撞着理論であり、クーロン ブロックエイドに基づく諸現象を再現、予測することが可能である<sup>(4),(5)</sup>。

以下では理論の概要と主たる結果を説明する。

### 3.2 単一電子制御トンネル電流の理論式

接合  $i (=1, 2)$  を流れるトンネル電流  $I_i$  は、接合  $i$  を挟む電極の電子数の時間変化の期待値であり、アイランドの化学ボテンシャル  $\mu_2$  の関数で与えられる。求める電流  $I$  は電流連続の条件  $I_1 = I_2$  から求められる。この手続きは  $\mu_2$  を自己無撞着に決めることと同じである。

まず、ゲート構造を無視した場合について述べる。具体的な計算の詳細は省略するが、クーロン ブロックエイドが顕在化する  $R_q/R_t^{(i)} \ll 1$  の場合には以下のようない解釈的な結果が得られる。

$$I = \frac{1}{eR_\Sigma} \{ eV - \Phi_1(eV) - \Phi_2(eV) \} \quad (2)$$

ここで  $R_\Sigma = R_t^{(1)} + R_t^{(2)}$ ,

$$\begin{aligned} \Phi_i(eV) &= \frac{i\hbar}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dt \left( \frac{\pi}{\beta\hbar} \operatorname{cosech} \frac{\pi t}{\beta\hbar} \right)^2 \frac{1}{2} \{ \tilde{F}_\varphi(it, \kappa_i) - \right. \\ &\quad \left. \tilde{F}_\varphi(-it, \kappa_i) \} \times \left\langle \sin \left\{ \frac{t}{\hbar} \left( \kappa_i eV + (-1)^i 2U \frac{q}{e} \right) \right\} \right\rangle_c \end{aligned} \quad (3)$$

であり、 $q = Q_2 - Q_1$  はアイランド電荷、 $\kappa_i = 1 - C_i/C_\Sigma$ ,

$$\begin{aligned} \tilde{F}_\varphi(it, \kappa_i) &= \exp \left[ \kappa_i^2 \int_0^\infty \frac{d\omega}{\omega} \cdot \frac{\Re_e[Z_t(\omega)]}{R_q} \right. \\ &\quad \left. \times \left\{ \coth \frac{\beta\hbar\omega}{2} (\cos \omega t - 1) - i \sin \omega |t| \right\} - i \frac{U}{\hbar} t \right] \end{aligned} \quad (4)$$

である。 $Z_t(\omega) = 1/[i\omega C + Z^{-1}(\omega)]$  は系の全インピーダンス、 $C = C_1 C_2 / C_\Sigma$  は二重トンネル接合の全容量、 $\langle \dots \rangle_c$  はアイランド電荷状態での量子力学的期待値を意味する。電磁場環境効果が取り込まれていることは式(4)に  $Z_t(\omega)$  が含まれることから理解できるであろう。重要なことは、式(2)は電流連続の条件から自己無撞着に決まる  $\mu_2$  を用いて評価しなくてはならないことである。

静電容量  $C_g$  をもつゲート電極があり、電圧  $V_g$  がかけられて

いる場合にはゲート上の電荷もゆらぐので電磁場環境効果に関する若干の注意すべき効果が出現する。しかし、基本的な特性は上式において  $C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3 + C_g$ ,  $n_c \rightarrow n_c + C_g V_g/e$  とすることで議論できる<sup>(4)</sup>。

### 3.3 単一電子制御素子の電流電圧特性

はじめに  $I-V$  特性について述べる。この場合トンネル電流特性は二つのトンネル接合の  $RC$  時定数の大小関係で大きく異なる。(2)-(4)式によれば、動作温度での熱エネルギーが充電エネルギーに比べて十分小さい場合、高インピーダンスおよび低インピーダンスそれぞれの極限で  $I-V$  特性は次のようになることが導かれる。

(1) 対称二重トンネル接合:  $R_t^{(1)}C_1 = R_t^{(2)}C_2$

(a) 高インピーダンス極限

$$I = \frac{1}{R_\Sigma} \left( V - \frac{E_c}{e} \operatorname{sgn}(V) \right) \theta \left( |V| - \frac{E_c}{e} \right) \quad (5)$$

(b) 低インピーダンス極限

$$I = \frac{1}{R_\Sigma} \left( V - 2 \frac{U}{e} \operatorname{sgn}(V) \right) \theta \left( |V| - 2 \frac{U}{e} \right) \quad (6)$$

(2) 非対称二重トンネル接合:  $R_t^{(1)}C_1 \neq R_t^{(2)}C_2$

高インピーダンスおよび低インピーダンス極限でやはり式(5)および式(6)で表される  $I-V$  特性となるが、(2)-(4)式は次のような離散的な電圧値に対応した電流の階段構造が出現することを予言する。

$$\frac{eR_\Sigma}{R_t^{(2)}C_2 - R_t^{(1)}C_1} \times \begin{cases} n & n \leq \frac{1}{2} \\ n - \frac{1}{2} & n > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (7)$$

ここで  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  であり、その符号は  $R_t^{(2)}C_2 - R_t^{(1)}C_1$  の符号できる。式(5), (6)および(7)はクーロンギャップが高(低)インピーダンス極限で  $E_c/e$  (2  $U/e$ ) であること、非対称トンネル接合では階段的な  $I-V$  特性が生ずることを表している。後者は、単位時間に左右二つのトンネル接合からアイランドに出入りする電子数の違いから生ずる電子の蓄積または欠乏に起因し、单一電子制御であるがゆえに顕在化する現象であり、クーロン ステアケイズと呼ばれる。これらの結果は、現在実験的にも確認されている<sup>(1)</sup>。図 3 および図 4 に理論的に求められた低インピーダンス領域での  $I-V$  特性および対応するアイランド電荷の期待値を示す。クーロン ブロックエイドは充電エネルギーの 1/25 程度でも見えていくことに注意。

$I-V_g$  特性の結果を図 5 に示す。一電子の電荷  $e$  の変化に対して特性は周期的に変化する。この現象は、ゲート電圧によってアイランドの電位が上下に移動し、それに伴って電子が 1 個ずつトンネルしようとしているから生ずる。図 1 からも明らかのように電子 1 個の注入ごとにクーロン ブロックエイドの条件が繰り返されるため周期的変動が現れる。

## 4 あとがき

クーロン ブロッケイドを動作原理とする単一電子制御素子の基本構成要素の動作特性を任意の素子パラメータ、外部インピーダンスに対して詳述する理論を確立した。確立された基礎理論は初めての自己無撞着な微視的理論であり、クーロン ブロッケイドによって期待される種々の現象を正確に記述し、単一電子制御素子の設計の指針を与えることを示した。また、この理論によれば超伝導トンネル接合系での新奇なトンネル特性<sup>(6),(7)</sup>の解明や種々の散乱効果<sup>(4)</sup>の解析も可能である。

単一電子制御素子の試作は現在世界的に活発に進められており、常伝導電極の場合には“室温動作”をする素子の報告もある<sup>(8)</sup>。微細加工技術のさらなる進展、素子構成まで念頭に置いた創意くふうに満ちた素子づくりはますます重要となってきた。

また、われわれ理論的探索基礎研究の立場からは、実験可能な技術レベルに左右されずに取り組めるというその特長を生かし、新たな可能性の模索をよりいっそう推し進めていくことが必要である。

## 文 献

- (1) Single Charge Tunneling ed. by H.Gravert and M.Devoret, Plenum Press (1991)
- (2) 岩渕修一：電子協報告書，94-基-10, pp.60-93 (1994)
- (3) H.Gravert, et al: Single Electron Tunneling Rates in Multijunction Circuits, Z. Phys., B84, pp.143-155 (1991)
- (4) S.Iwabuchi, et al: Effect of Electronic States of Electrodes on Coulomb Blockade, Proc. 4th Int. Conf. on Foundation of Quantum Mechanics, JJAP Series 9, pp.126-129 (1992)
- (5) H.Higurashi, et al: Coulomb Blockade and Current-Voltage Characteristics of Ultrasmall Double Tunnel Junctions with External Circuits, Phys. Rev., B51, pp.2387-2398 (1995)
- (6) S.Iwabuchi and Y.Nagaoka : Coulomb Blockade and Odd-Even Asymmetry in Ultrasmall NSN Junctions with External Circuits, Proc. 22 nd Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (World Scientific), pp. 1955-1958 (1994)
- (7) S.Iwabuchi : Quantum Coherence and Decoherence, (Elsevier Science, 1995), to be published
- (8) Y.Takahashi, et al : Conductance Oscillations of a Si Single Electron Transistor at Room Temperature, IEDM'93 Technical Digest, p.541 (1993)

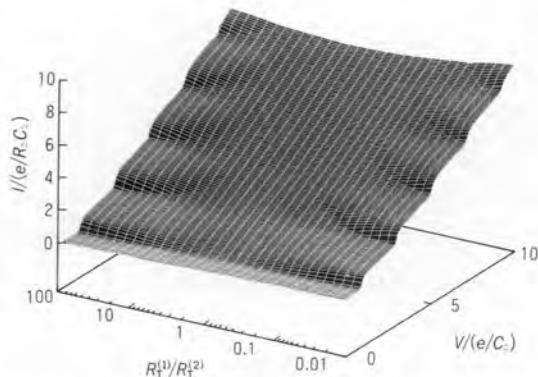


図3. SET 素子の電流-電圧特性 温度  $T = U/(25 k_B)$ ,  $C_1 = C_2$ , 低インピーダンス領域でのふるまい。 $R_1^{(1)}C_1 \neq R_1^{(2)}C_2$  の場合にクーロン階段が出現する。

I-V characteristics of SET devices

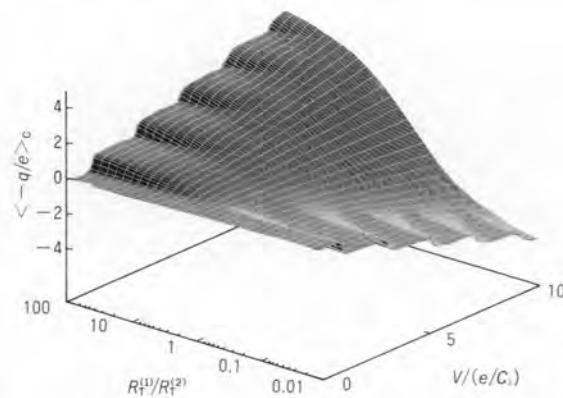


図4. 図3のI-V特性に対応するアイランド電荷の期待値 電流の階段的変化はバイアス電圧によりアイランドの電荷が一電子単位で蓄積(欠乏)することに対応している。

Average numbers of charges on island

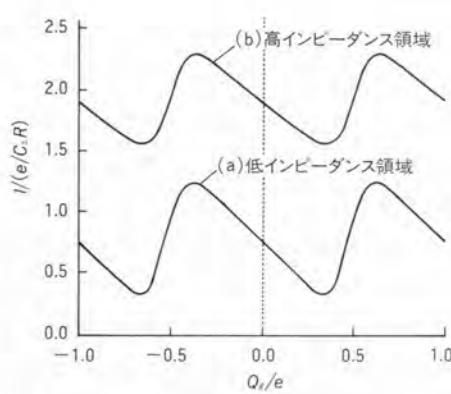


図5. SET 素子の電流-ゲート電圧特性 温度  $T = (E_c/500 k_B)$ ,  $Q_g = C_g V_{go}$  電流は  $e$  の周期で変化する。

I-V<sub>g</sub> characteristics of SET devices



岩渕 修一 Shûichi Iwabuchi, ph.D.

1985年入社。量子伝導現象解明と新素子原理探索の基礎研究に従事。現在、研究開発センター 基礎研究所主任研究員、理博。

Advanced Research Lab.