The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	抵抗結合したゲートおよび環境インピーダンスを用いた単電子トランジスタに関する研究
Author(s)	若家, 冨士男
Citation	大阪大学, 2003, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1559
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

工2 8665

抵抗結合したゲートおよび環境インピーダンスを用いた単電子トランジスタに関する研究

2003年1月

若家 冨士男

大阪大学大学院基礎工学研究科

抵抗結合したゲートおよび環境インピーダンスを用いた単電子トランジスタに関する研究

2003年1月

若家 冨士男

大阪大学大学院基礎工学研究科

内容梗概

本論文は, 著者が大阪大学基礎工学部 (および大阪大学大学院基礎工学研究科) に在職中に行った研究の一部をまとめたものである。

単電子トンランジスタ (またはもう少し広義に単電子デバイス) は, その提案からすでに 約 20 年が経ち, 実験的な検証もされ, その多彩な物理を我々の前に現している。現在のその分野の主流をなす研究の方向としては,

1. 人工原子, 人工分子, 近藤効果 などの純粋に学術的な研究
2. 新しい回路アーキテクチャと併せて, 新しいパラダイムを目指したもの
3. 室温動作や集積化や既存の回路との役割分担など, 実用化を目指したもの
4. カーボンナノチューブなどの新素材の利用を目指したもの

などに分類できると思われる。しかし, 単電子トランジスタは, デバイス単体としての特性がすべて解明されたわけではない。単一電子トンネル現象やその起源であるクーロンブロッケード現象の物理に対する理解を深め, その応用の可能性を検討し, 新しい型の単電子トランジスタの研究を進めることは, 単電子エレクトロニクスの今後の発展のために非常に重要である。そのような観点から, 本論文では単電子トランジスタの新しい制御法についての研究成果をまとめた。単電子トランジスタを制御する方法としては, 現在主として使われている容量結合したゲートを用いる方法の他にも, 抵抗結合したゲートを用いるもの, および環境インピーダンス変調を利用するものがあることを述べ, 理論 (数値計算) と実験の両方から検討を加えた。以下に各章ごとの内容をまとめる。

第 1 章 序論

第 1 章では, 本研究を遂行するにあたっての歴史的な背景と現状についてまとめ, 本研究の意義を明確にした。さらに, 本論文全体のイントロダクションとして, 単一電子トンネル

現象の起原となっているクーロンブロッケードについて, 電気回路的な説明を加えた。

第 2 章 抵抗結合型単電子トランジスタ

第 2 章では, 抵抗結合型単電子トランジスタについての理論と実験をまとめた。抵抗結合型単電子トランジスタは, その提案以来実現されてこなかったが, ゲート抵抗としてトンネル抵抗を利用すれば, 当初提案されたデバイス特性に近い特性をもつ単一電子トランジスタが実現できることを示した。

第 3 章 環境インピーダンス制御型単電子トランジスタ

第 3 章では, 環境インピーダンス制御型単電子トランジスタについての理論と実験をまとめた。単一電子トンネル現象は, 環境インピーダンスと呼ばれる外部インピーダンスの影響を強く受けることは知られていたが, その現象を利用すれば, 単電子トランジスタの制御に使えることをここで提案し, 数値計算でその特性を示し, さらに実験によって実際にそのようなデバイスが実現可能であることを示した。

第 4 章 結論

第 4 章では, 本論文全体の研究成果を総括し, 本研究で得られた主要な結論についてまとめた。

目 次

第 1 章　序論 **1**

1.1　本研究の背景 1

1.2　クーロンブロッケード, 単電子トンネル, 単電子トランジタ 3

1.2.1　ひとつの微小トンネル接合におけるクーロンブロッケード 3

1.2.2　2 重の微小トンネル接合におけるクーロンブロッケード 6

1.3　本研究の目的と論文構成 10

1.4　記号, 変数, 定数 のまとめ 11

第 2 章　抵抗結合型単電子トランジスタ **13**

2.1　緒言 13

2.2　理論 15

2.3　実験 17

2.3.1　試料作製 18

2.3.2　低温での伝導特性評価 20

2.4　実験結果および検討 24

2.5　結言 37

第 3 章　環境インピーダンス制御型単電子トランジスタ **39**

3.1　緒言 39

3.2　理論および数値計算 40

3.2.1　単電子トンネルにおける inductive 環境インピーダンスの影響 40

3.2.2　一般の環境インピーダンスへの拡張 44

3.2.3　数値計算 45

3.3　実験結果および検討 54

3.4 3端子構造による環境インピーダンス変調効果の確認 57
3.4.1 数値計算 57
3.4.2 実験 59
3.4.3 非対称環境インピーダンスの効果 64
3.5 結言 69

第4章 結論 **71**

参考文献 **78**

謝辞 **79**

研究業績 **81**
発表論文 81
国際会議 88
国内会議・研究会等 95
その他 103

著者略歴 **105**

第1章　序論

1.1　本研究の背景

半導体メモリーや中央演算処理装置 (Central Processing Unit; CPU) などの半導体集積回路におけるテクノロジーの進歩には目を見張るものがある。1958 年に米国 TI 社の J. S. Kilby が有名な集積回路の特許をとったことが, この分野の始まりといえる。彼はその功績により 2000 年ノーベル物理学賞を受賞している。実際に集積回路が製品として販売されるようになったのは 1970 年代にになってからである。メモリーでは 64 Kbit DRAM, CPU では 4 bit (たとえば, インテル社の 4004) の時代で, 最小加工寸法は数ミクロンであった。その後, テクノロジーは飛躍的に進歩し, 今日では, メモリーの主力は 256 Mbit の DRAM となり, CPU では インテル社の Pentium 4 では 約 10 億個のトランジスタが集積化されている。また, 最小加工寸法は, そのような量産レベルでも, すでに 200 nm を切り, 100 nm に迫っている [朝日 01, 日経 02, 直野 96]。図 1.1 は日経新聞 [日経 03] に載っていたものであるが, 2003 年中には, 最小加工線幅が 90 nm の集積回路が量産されるようである。

このような素子サイズの微細化はどこまで続くのであろうか? それは, 実際には技術的な要因と経済的な要因の両方によって決まるのであろうが, 技術的には (研究室レベルでは), 現在では STM(走査型トンネル顕微鏡) などを使えば, 材料は限定されるが, 原子ひとつひとつを操作することまで可能になってきている [ES90, ELR91]。原子ひとつひとつを操作するのが微細加工技術にとっては究極の目的であろうが, そこまで小さくなくても, あと 10 年も経つと, 50 ナノメートル程度のサイズの素子が必要になると予想できる。

さて, 素子サイズがこのようにどんどん小さくなってくると, 従来の MOS トランジスタとキャパシタ をベースにした回路が動作しなくなることが予想される。例えば, キャパシタに蓄えられる電子の数 n は, $\sqrt{n}$ 程度のゆらぎを持つので, キャパシタを小さくしていくと, 電子の数の不確定さ ($\sqrt{n}/n = 1/\sqrt{n}$) が増大し, キャパシタの両端の電圧の不確定さに反映され, デバイスの誤動作を引き起こす。また, 不純物をドーピングした半導体での不純物間

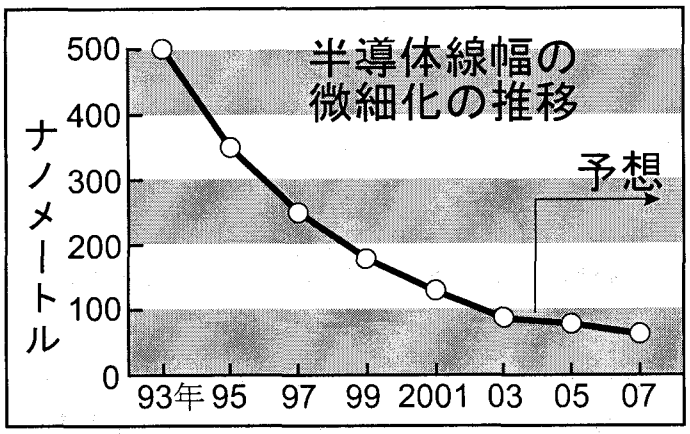


図 1.1: 半導体集積回路の最小加工線幅の遷移 [日経 03]。2003 年 1 月現在の最小加工線幅は 130 nm であるが, 2003 年中には 90 nm の製品が量産される予定になっている。

の平均距離は, 10^{18} cm^{-3} 程度の高ドープの場合でさえも, $(10^{18}\mathrm{cm}^{-3})^{-1/3} = 10$ nm 程度になり, 普通は数十から数百 nm であると考えるべきである。つまり, 数十 nm 程度の微小な半導体では, 不純物数のゆらぎ (不均一) が問題となり, 均質なデバイスを作製することが困難になる。従って, 素子サイズの微細化に伴って, 今までとは全く異なった新しい動作原理に基づいた素子の出現が期待されているのである。この章では, そのような新しい素子として近年注目を集めている単電子トランジスタについて簡単に紹介する。後述のように, 単電子トランジスタは, (1) 小さくすればするほど高温動作 (室温動作) に有利であり, (2) 半導体を使わなくても金属を使ってトランジスタを作製できる, という大きな特長を有している。

微小トンネル接合や微小金属アイランドにおいて, 1 電子のチャージングエネルギーが大きくなるために興味深い現象が起こるという先駆的な報告は, 1960 年代にみつけることができる [Kub62, GZ68, LJ69, たとえば]。しかし, 電子デバイスとしての単電子トランジスタの研究は 1980 年代の中頃の K. K. Likharev の提案から始まった [Lik87, Lik88]。以来, すでに約 20 年の時間が経過し, 教科書的な文献 [GD92, たとえば] も出版されている。当初は学術的な興味が先行していたように思えるが, 1993 年日立の矢野ら [YIH+93] が, 室温で動作する単電子メモリーを発表し, さらに, それを集積化したころから, 実用を睨んだ開発も活発

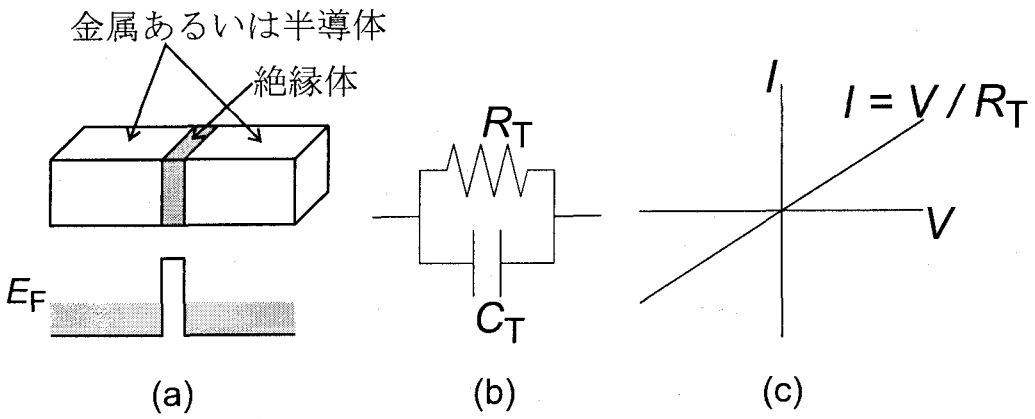


図 1.2: トンネル接合の (a) 模式図とエネルギーダイヤグラム, (b) 等価回路, (c) 電流電圧特性。

に行われるようになっている。最近では, カーボンナノチューブなどの新しい材料を使った単電子トランジスタも発表され [BCM+97, TDD+97, WKG03], 新しいナノ材料との組み合わせとしてもますます注目を集めている。

1.2 クーロンブロッケード, 単電子トンネル, 単電子トランジタ

この節では, 単一電子伝導の原因となるクーロンブロッケードについて, 簡単に紹介する。すでに, 様々な教科書や雑誌の記事に解説があるが, 私のように, 電気工学をバックグランドとする者としては必ずしも理解しやすいものとはいえないので, ここでは, 私なりの解釈で, 電気回路的な解説を試みたい。

1.2.1 ひとつの微小トンネル接合におけるクーロンブロッケード

図 1.2(a) にトンネル接合の模式図を示す。まずは, 微小でないトンネル接合について考える。トンネル接合とは, 非常に薄い絶縁体を金属かまたは半導体のような導電的な部分でサンドイッチにした構造をしている。もし, 絶縁体が厚いために電子がトンネルすることがで

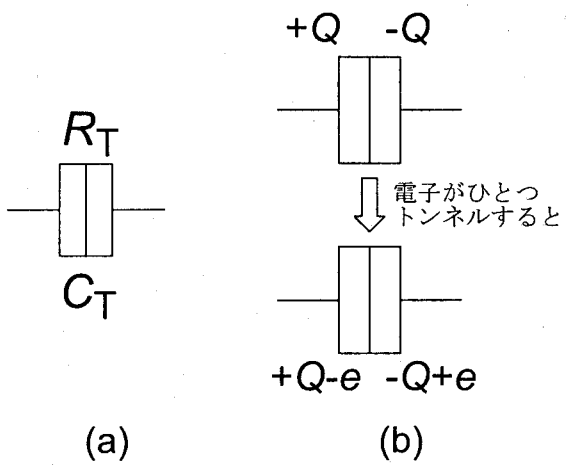


図 1.3: (a) 微小トンネル接合を表すための記号。(b) クーロンブロッケードを説明するための図。微小トンネル接合を電子一つがトンネルする前後の電荷の様子を表している。

きなければ, この構造は単なる平行平板コンデンサであり, そのキャパシタンスは $\varepsilon S/d$ (ε, S, d はそれぞれ誘電率, 電極の面積, 電極間距離) となるはずである。いま, 絶縁体が非常に薄いために, 量子力学的なトンネル効果により電極間を電子が移動できるような場合を考えると, この構造は電極間に電流のもれがあるコンデンサということになる。正確な議論では, トンネル接合の電流-電圧 (I–V) 特性は非線形となるが, バイアス電圧が小さい時にはほぼ線形とみなす事ができる。すなわち, トンネル接合の I–V 特性は 図 1.2(c) のようになるのである。この I–V 特性の傾きがトンネル抵抗 R_T である。

トンネルキャパシタンス C_T が大きいときには, トンネル接合の I–V 特性は上述のようになるのだが, 以下に述べるように, C_T が小さくなってくると, クーロンブロッケードのために I–V 特性が変化する。つまり, 微小トンネル接合はもはや図 1.2(b) の等価回路では正確には表現できないのである。微小トンネル接合を表現するために, 図 1.3(a) のような記号がよく使われる。

さて, 微小トンネル接合に電圧をかけて, 電荷 Q がたまっているとする。この時の様子を表したのが, 図 1.3(b) の上側である。この時, 接合にかかっている電圧は $V = Q/C_T$ であ

り, 接合の静電エネルギーは $E_1 = Q^2/(2C_\mathrm{T})$ である。この状態から電子 (電子の電荷を $-e$ とする) がひとつ電極間をトンネルしたとすると, 電極の電荷は図 1.3(b) の下側の図のような状態になる。この時の接合の静電エネルギーは $E_2 = (Q-e)^2/(2C_\mathrm{T})$ である。したがって, トンネルの前後でのエネルギーの変化は

$$\Delta E \equiv E_2 - E_1 = \frac{e}{C_\mathrm{T}}(\frac{e}{2} - Q) = \frac{e^2}{2C_\mathrm{T}} - eV \tag{1.1}$$

となる。最後の式の変形で $Q = C_\mathrm{T}V$ の関係を使った。ここで現れた $e^2/(2C_\mathrm{T})$ をチャージングエネルギーと呼び, また, ここで導いた ΔE が $\Delta E > 0$ の時にはそのトンネルが禁止されるというのがクーロンブロッケードである。すなわち, 式 (1.1) より $V < e/(2C_\mathrm{T})$ では, トンネルが禁止されるのである。

以上が, よくあるクーロンブロッケードの解説である。この解説をそのまま信用すると図 1.4(a) のような回路の I–V 特性は 図 1.5 のようになるはずである。しかし実際には, 上述の説明には不正確な部分が含まれており, 図 1.4(a) の I–V 特性は 図 1.5 のようにはならないのである。上の解説で抜け落ちていたのが環境インピーダンスの効果である。では, 上の解説でどの部分が不正確だったのだろうか? ひとつには, 図 1.3(b) のトンネル前後の電荷の様子の部分である。図 1.4(a) のように定電圧でバイアスされていると, 電子がトンネルしても, 電源から電荷が供給されるので, 電極の電荷は Q から $Q-e$ にはならないのである。またもうひとつは, 電極電荷 Q は平均値の回りに揺らぎを持っており, その揺らぎの大きさが e よりも大きくなると式 (1.1) を導いた時の議論は意味が無くなるのである。以上の理由で, 図 1.4(a) の回路では, 微小トンネル接合であるにもかかわらず, クーロンブロッケードが効かなくなり, その I–V 特性は, 微小でないトンネル接合の時と同じになり, やはり図 1.2(c) のようになるのである。

それでは, クーロンブロッケードを実際に観測するにはどうすればいいのであろうか? 図 1.4(b) のように, 抵抗 R_env を入れて, 高インピーダンス環境にすればよい。直感的には, この R_env のために, 電源からの電荷の補充が遅くなり, トンネル前後の電極電荷の議論が 図 1.3(b) のようになり, I–V 特性が図 1.5 のようになるのである。もう一度繰り返すと, (単一の) 微小トンネル接合では, 高環境インピーダンスでないと, クーロンブロッケードは起きないのである。

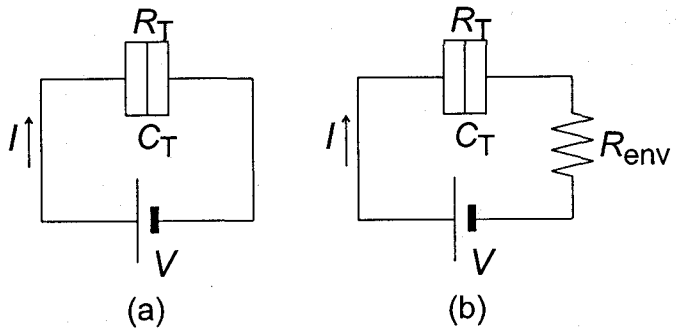


図 1.4: (a) 微小トンネル接合に電圧源をつないだ回路。(b) 高環境インピーダンス下で微小トンネル接合を電圧源につないだ回路。

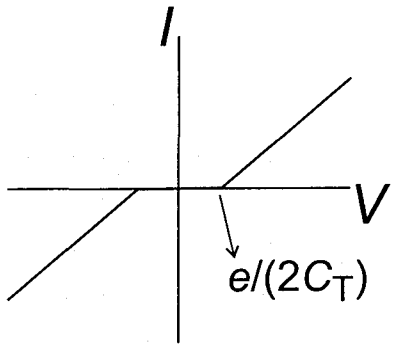


図 1.5: 微小トンネル接合の 電流-電圧特性

1.2.2 2 重の微小トンネル接合におけるクーロンブロッケード

図 1.6 に示すような, 直列のキャパシタを考える。ただし, ここでは, キャパシタを構成している絶縁体が非常に薄いため, 量子力学的なトンネル現象によって電子が電極間を移動できるような, いわゆるトンネルキャパシタを考える。図 1.6(a) で破線で囲った部分は電気的には浮いている部分でアイランドと呼ぶ部分である。アイランドの電荷がニュートラルのと

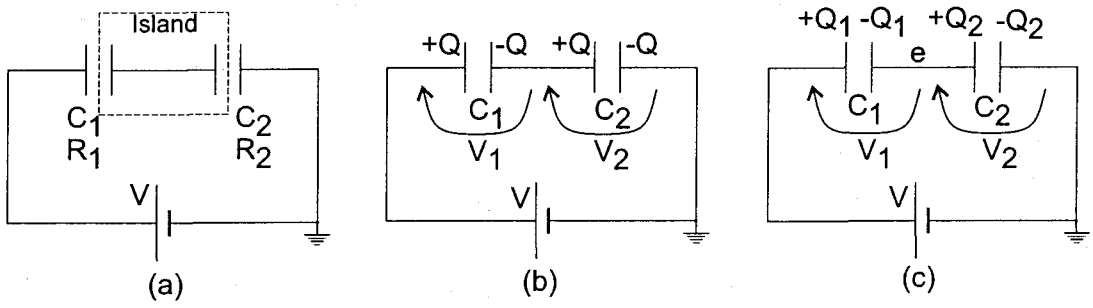


図 1.6: クーロンブロッケードを説明するための回路図

きは, コンデンサの電極の電荷を Q とおくと 図 1.6(b) のような状況になる。回路理論によるとこの状態で系が貯えているエネルギーは

$$E_1 = \frac{Q^2}{2C_1} + \frac{Q^2}{2C_2} \tag{1.2}$$

である。$Q = C_1V_1 = C_2V_2$ と $V_1 + V_2 = V$ の関係を使うと

$$E_1 = \frac{1}{2}CV^2 \tag{1.3}$$

となる。ただし, C はコンデンサの直列合成キャパシタンスで $C \equiv C_1C_2/(C_1 + C_2)$ である。また, この状態でのアイランドの電位は

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \tag{1.4}$$

である。つぎに, 1 つの電子がコンデンサを通してトンネルしたことによりアイランドに e の電荷が溜まっている状況 (図 1.6(c)) を考える。この状況で系が貯えているエネルギーは

$$E_2 = \frac{Q_1^2}{2C_1} + \frac{Q_2^2}{2C_2} \tag{1.5}$$

である。$Q_1 = C_1V_1$, $Q_2 = C_2V_2$, $e = -Q_1 + Q_2$ および $V_1 + V_2 = V$ の関係を使うと

$$E_2 = \frac{1}{2}CV^2 + \frac{e^2}{2C_\Sigma} \tag{1.6}$$

と整理できる。ここで, C_Σ はコンデンサの並列合成キャパシタンスで $C_\Sigma \equiv C_1 + C_2$ である。また, この状態でのアイランドの電位は

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V + \frac{e}{C_\Sigma} \tag{1.7}$$

である。式 (1.3), 式 (1.4), 式 (1.6) および 式 (1.7) より 1 つの電子がトンネルすることによりアイランドの電位が e/C_Σ だけ変化し, 系のエネルギーは $E_2 - E_1 = e^2/(2C_\Sigma) \equiv U$ だけ増加したことがわかる。このエネルギー U をチャージングエネルギーと呼ぶ。e/C_Σ 以上の電圧を印加してチャージングエネルギーに相当する仕事を電池が系にしてやらないと, 電子はトンネルすることができないわけである。このように, 本来はトンネルによってリークしているはずのキャパシタで, 電子のトンネルが抑制される (従って電流は流れない) のが, 2 重トンネル接合におけるクーロンブロッケードである。クーロンブロッケードの状態を オンにしたりオフにしたりしながら, 電子をひとつひとつトンネルさせるのが単一電子トンネリングである。

表 1.1 に示したように, キャパシタンスの値が pF 程度の通常の場合を考えると U は 10^{-26} J (10^{-1} μeV) 程度の大きさになり, 非常に小さいので, 電子は熱的なエネルギーにより簡単にトンネルしてしまい, 単一電子トンネリングは観測できない。言い換えると

$$U \equiv \frac{e^2}{2C_\Sigma} \gg k_\mathrm{B} T \tag{1.8}$$

を満たすような十分な低温にしてはじめて単一電子トンネリングを観測することができるのである。ここで, k_B はボルツマン定数, T は絶対温度である。表 1.1 に便宜のため, キャパシタンス C とチャージングエネルギー $e^2/(2C)$ および $e^2/(2C) = k_\mathrm{B}T$ とおいたときの 温度 T をまとめておいた。キャパシタンスの値が aF ($= 1 \times 10^{-18}$ F) まで小さくなると $U \simeq 80$ meV, $e/C_\Sigma \simeq 0.16$ V となり, 単電子トンネルが普通の実験で十分観測できるようになる。

さて, それでは 1 aF のような小さなトンネルキャパシタを作製することはできるのだろうか? 平行平板モデルではキャパシタンスは $C = \varepsilon S/d$ (ε は絶縁体の誘電率, S は電極面積, d は電極間距離) である。ε を何桁も小さくすることはできないので, 小さなキャパシタンスを実現するには d を大きくするか S を小さくしなければならない。一方, トンネルキャパシタは電極間を電子がトンネルしなければならない。トンネルの確率は d を大きくすると指数関数的に小さくなるので, d はあまり大きくできない。トンネル障壁のバリヤの高さにも依存するが, 典型的には電子がトンネルできる厚さは 10 nm 程度までであろう。とする

表 1.1: 容量 (C) とチャージングエネルギー ($U = e^2/(2C)$), クーロンギャップの大きさの目安 (e/C), および $U = k_{\mathrm{B}}T$ となる温度をまとめたもの。

C (F)	$U = e^2/(2C)$ (eV)	e/C (V)	Temperature (K)
1×10^{-12}	8.0×10^{-8}	1.6×10^{-7}	9.3×10^{-4}
1×10^{-15}	8.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}	0.93
1×10^{-18}	8.0×10^{-2}	1.6×10^{-1}	930
1×10^{-21}	80	160	9.3×10^{5}

と, 小さなトンネルキャパシタを実現するには S を小さくするしか方法がないことになる。例えば, $\varepsilon = \varepsilon_0$ (ε_0: 真空の誘電率) と $d = 10$ nm を仮定すると 1 aF のキャパシタを作るためには $S \simeq 1 \times 10^{-15}$ m^2 = 1000 nm^2 $\simeq$ 32 nm $\times$ 32 nm 程度の電極面積のキャパシタを作ればよいことになる。前節で述べたように, この程度の微細加工は現在でも研究室レベルならすでに行なわれている。また, 量産レベルで作製可能になるのもそれほど遠い将来ではない。

さて, ここまでで単電子トンネル (クーロンブロッケード) について簡単に紹介したが, キャパシタンスの電荷の揺らぎについては全く無視してきた。キャパシタンスの電荷は様々な要因によって揺らいでいる。その揺らぎの大きさが電子 1 つの電荷 e よりも大きい時には, ここまでで議論したことは意味を持たなくなる (つまり, クーロンブロッケードが起きなくなる)。単電子デバイスでは, 従来は問題にならなかったような素子中の電荷の揺らぎが素子の動作に大きな影響を与えるのである。この電荷の揺らぎが, 第 3 章の環境インピーダンスとも大きな関係があるのである。

ここで単電子トンネルを観測するための条件をまとめておくと, まず, トンネル抵抗については,

$$R_{\mathrm{T}} \gg R_{\mathrm{q}} \tag{1.9}$$

でなければいけない。というのは, ここまでの議論のように, 電子はトンネル接合のどちら側にいるのかを区別できなければいけないからである。R_{T} が小さいと電子の波動関数はトンネル接合の両側にわたって広がっていることになり, トンネル前後の電荷の変化について

の議論ができなくなる。2 番目の条件は,

$$U \equiv \frac{e^2}{2C_\Sigma} \gg k_\mathrm{B}T \tag{1.10}$$

である。これは, 電子が熱エネルギーをもらって, チャージングエネルギーよりも大きなエネルギーを持つと本来クーロンブロッケードのためにトンネルが禁止されている条件のときにでも, 電流が流れてしまうためである。さらに, 前述のように, 単一のトンネル接合では, 高インピーダンス環境でないとクーロンブロッケードは起こらない。

1.3 本研究の目的と論文構成

ここまでで述べてきたように, 単電子トンランジスタは, その提案からすでに 約 20 年が経ち, 実験的な検証もされ, その多彩な物理を我々の前に現している。現在のその分野の主流をなす研究の方向としては,

1. 人工原子, 人工分子, 近藤効果 などの純粋に学術的な研究 [TAH96, FAT+02, GGSM+98, COK98]
2. 新しい回路アーキテクチャと併せて, 新しいパラダイムを目指したもの [TLP93, LT93, TL94, YKK+01]
3. 室温動作や集積化や既存の回路との役割分担など, 実用化を目指したもの [YIH+93, HIS+96, IFS+96, ZGC98]
4. カーボンナノチューブなどの新素材の利用を目指したもの [BCM+97, TDD+97, WKG03]

などに分類できると思われる。しかし, 単電子トランジスタは, デバイス単体としての特性がすべて解明された訳ではない。単一電子トンネル現象やその起源であるクーロンブロッケード現象の物理に対する理解を深め, その応用の可能性を検討し, 新しい型の単電子トランジスタの研究を進めることは, 単電子エレクトロニクスの今後の発展のために非常に重要である。そのような観点から, 本論文では単電子トランジスタの新しい制御法について検討を加えることを目的とした。

単電子トランジスタを制御する方法としては, 現在主として使われている容量結合したゲートを用いる制御法の他にも, 抵抗結合したゲートを用いるもの, および環境インピーダンス変調を利用するものがあることを述べ, 理論と実験の両方から検討を加えた。

第 1 章では, 本研究を遂行するにあたっての歴史的な背景と現状についてまとめ, 本研究の意義を明確にした。さらに, 本論文全体のイントロダクションとして, 単電子トンネル現象の起原となっているクーロンブロッケードについて, 電気回路的な説明を加えた。

第 2 章では, 抵抗結合型単電子トランジスタについての理論と実験をまとめた。抵抗結合型単電子トランジスタは, その提案以来実現されてこなかったが, ゲート抵抗としてトンネル抵抗を利用すれば, 当初提案されたデバイス特性に近い特性をもつ単電子トランジスタが実現できることを示した。

第 3 章では, 環境インピーダンス制御型単電子トランジスタについての理論と実験をまとめた。単一電子トンネル現象は, 環境インピーダンスと呼ばれる外部インピーダンスの影響を強く受けることは知られていたが, その現象を利用すれば, 単電子トランジスタの制御に使えることをここで提案し, 数値計算でその特性を示し, さらに実験によって実際にそのようなデバイスが実現可能であることを示してた。

第 4 章では, 本論文全体の研究成果を総括し, 本研究で得られた主要な結論についてまとめた。

1.4 記号, 変数, 定数 のまとめ

本論文で使用する略号, 記号, 変数, 定数などは, 初めて使うときに定義するように心がけているが, 途中から読む場合もあると思われるので, 便宜のため, 主要な記号について以下にまとめておく。

表 1.2: 略号, 記号, 変数, 定数のまとめ

記号	意味
SET	単電子トランジスタ (Single-Electron Transistor)
C-SET	容量結合型 SET (Capacitively-coupled SET)
R-SET	抵抗結合型 SET (Resistively-coupled SET)
Z-SET	環境インピーダンス制御型 SET
2DEG	2 次元電子ガス (2-Dimensional Electron Gas)
SEM	走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope)
π	円周率 (= 3.141592654)
i	虚数単位 ($\sqrt{-1}$)
i, j, k	整数を表す
$\boldsymbol{k}$	波数ベクトル
d	微分, 積分の記号
d	幅や長さなどを表す
e	自然対数の底 (= 2.718281828)
e	電子の電荷の絶対値 ($= 1.60217733 \times 10^{-19}$ C)
k_{B}	ボルツマン定数 ($= 1.380658 \times 10^{-23}$ JK^{-1})
T	温度 (特に断らない時は絶対温度)
ε_0	真空の誘電率 ($= 8.854188 \times 10^{-12}$ Fm^{-1})
h	プランク定数 ($= 6.620755 \times 10^{-34}$ Js)
$\hbar$	$h/(2\pi)$ ($= 1.05457266 \times 10^{-34}$ Js)
R_{q}	抵抗の量子 ($= \pi\hbar/e^2 = h/(2e^2) \simeq 12.9$ kΩ)
$\mathcal{H}$	ハミルトニアン演算子
E_{F}	フェルミレベル
μ	電子の移動度
μ	化学ポテンシャル
n	電子の密度
$a^{\dagger}_{\boldsymbol{k},\sigma}$	電子の生成演算子
$a_{\boldsymbol{k},\sigma}$	電子の消滅演算子
$[p, q]$	負の交換関係 ($pq - qp$ のこと)
$\langle \cdots \rangle$	統計平均

第2章　抵抗結合型単電子トランジスタ

2.1　緒言

単電子デバイスの研究は1980年代の中頃の K. K. Likharev の提案から始まった [Lik87, Lik88]。彼は初めの論文のなかで, 容量結合型単電子トランジスタ (C-SET) と抵抗結合型単電子トランジスタ (R-SET) の2つの型の単電子トランジスタを提案している [Lik87, Lik88]。それらの模式図を 図 2.1 に示す。C-SET はアイランドにキャパシタ C_g を介してゲート電圧を印加し, デバイスを制御するのに対し, R-SET では アイランドに抵抗 R_g を介してゲー

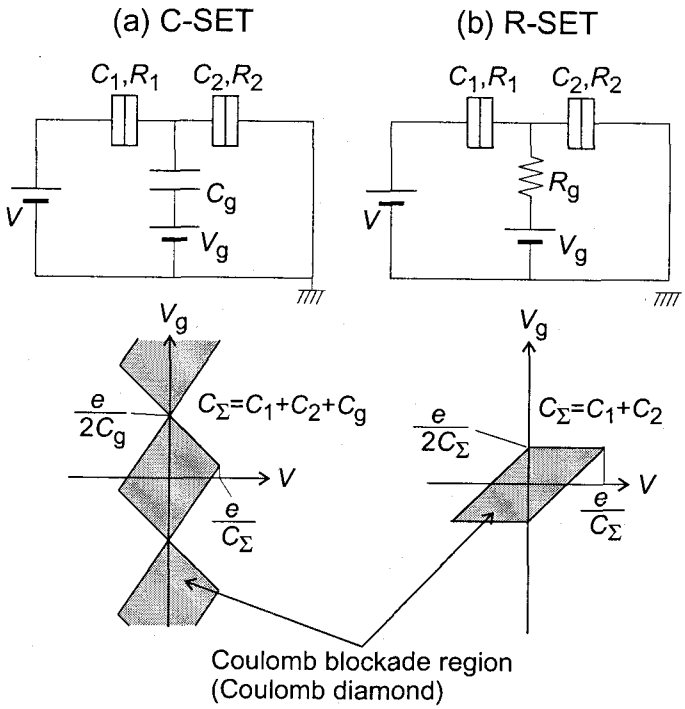


図 2.1: (a) C-SET と (b) R-SET の模式図とクーロンブロッケード領域

ト電圧を印加する構造になっている。図 2.1 にはこれらの素子で, クーロンブロッケードのために電流が流れない領域 (クーロンブロッケード領域または, クーロンダイヤモンドと呼ばれる) もいっしょに示してある (ただし, 絶対零度の時の図である)。

図 2.1 からわかるように, C-SET と R-SET のクーロンダイヤモンドの違いは以下のようになる。(1)C-SET ではクーロンダイヤモンドは V_g 軸に沿って周期的に現れるのに対し, R-SET ではただ 1 つしかない。(2)C-SET ではクーロンダイヤモンドは 4 つの傾いた線で囲まれているのに対し, R-SET では 2 つの水平な線と 2 つの傾いた線で囲まれている。

C-SET ではアイランドの初期電荷 (オフセットチャージと呼ばれる) が 0 であるとは限らない。図 2.1(a) のクーロンダイヤモンドはオフセットチャージが 0 の時の図である。もしオフセットチャージが 0 でなければ, クーロンダイヤモンドは図の縦軸に沿って平行に移動することになる。このことは, C-SET の動作点をずらすことになり, 実用上は大きな問題となる。たとえば, C-SET を集積化した時に, それぞれの C-SET のオフセットチャージの大きさはバラバラの値をとるので, 回路の誤動作の原因となる。しかし, R-SET では, アイランドは抵抗 R_g を通して電源に接続されているので, 初期チャージは必ず 0 にできる。従って, R-SET のクーロンダイヤモンドの中心は必ず V_g-V 平面の原点にある。このことは, R-SET の大きな長所である。また, R-SET のクーロンダイヤモンドの形からわかるように, クーロンダイヤモンドの端のところでは, V_g の微小な変化に対して, トランジスタの特性が急激に変化している。このことは, R-SET のゲートを入力端子として用い, ドレインに負荷抵抗を入れて出力信号を取りだすことを考えたときに, 非常に大きな電圧ゲインがあることを意味している。(絶対零度では原理的には電圧ゲインが ∞ になる。) C-SET では電圧ゲインが小さいことがひとつの問題となっているのに対し, このことは R-SET の大きな特長である。

上に述べたように単電子デバイスは C-SET と R-SET の 2 つの型が提案されていたにもかかわらず, その後の発展は C-SET をベースにしたものに偏っている。例えば, 単電子ポンプや単電子ターンスタイルなどが提案されているが, それらは C-SET を組み合わせたものである。また, 高温 (室温) 動作を目指した研究や, 単電子メモリーの研究も盛んに行なわれているが, それらも C-SET をベースにしている。R-SET に関する報告は提案者自らのもの [Lik87] [Lik88] [DCK+91] を含めて, 数えるほどしかない [YJIS96] [Kor98]。とくに実験に関するものはひとつ [DCK+91] しかみつからない。しかもこの文献では R-SET に特徴的なクーロンダイヤモンドを観測することに成功していない。このように R-SET の実現が難

しい理由は, アイランドのすぐそばの小さな領域に, 大きな抵抗値をもつ抵抗を作り込むことが実験的に困難であることと, R_g が存在するために発生する ナイキストノイズのためにアイランドの電荷の揺らぎが大きくなってしまい, クーロンブロッケードが起きにくくためと考えられる [Kor98]。しかし, 単電子デバイスを実用化する際に, 先述の R-SET の長所はたいへん魅力的である。また, 様々なタイプの単電子デバイスがある方が, 回路設計の上でも有利であろう。そのような観点から, 本章では R-SET を試作しその伝導特性の評価および, 理論的な検討を行なったので, それらを紹介する。

なお, この章の研究成果を初めに発表した原著論文は, [WKIG99, WNG+00, WMN+00] であるので, 参照されたい。

2.2 理論

図 2.2 に, ゲート抵抗の部分も微小トンネル接合でできている単電子トランジスタを示す。C_3, R_3, V_3, I_3 は, 以下の文章の中で C_g, R_g, V_g, I_g と書くこともあるが, 同じものを指している。このようなデバイスは, R_3 $(= R_g)$ を ∞ にすると, いわゆる容量結合型の単電子トランジスタ (C-SET, 図 2.1(a)) の特性が得られるはずであるし, $C_3 = C_g$ を大きくして, $R_3 = R_g$ を適当な値にすると, 抵抗結合型の単電子トランジスタ (R-SET, 図 2.1(b)) の特性に近づくはずである。従って, 図 2.2 のデバイスの特性を計算できるようにしておくと, 様々なタイプの SET の特性を計算するのに役立つことになる。

この節ではオーソドックス理論と呼ばれている方法を用いて, 図 2.2 のようなデバイスの伝導特性を計算する手法について述べる。オーソドックス理論は, トンネル確率を用いたレート方程式に基づいて電流を計算するもので, この分野ではよく用いられる手法である。たとえば, この分野の教科書的な文献である [Kra91] や [GD92] などでも解説されている。しかし, 図 2.2 のようなデバイスに適用した例は文献ではみつからないし, また, 数値計算を始められるほど具体的な数式を載せている文献もみつからないので, この節でまとめておくことにする。

図 2.2(a) のように記号を定義し, アイランドの電位を V_I と書くことにすると,

$$V_{i,I} \equiv V_i - V_I \tag{2.1}$$

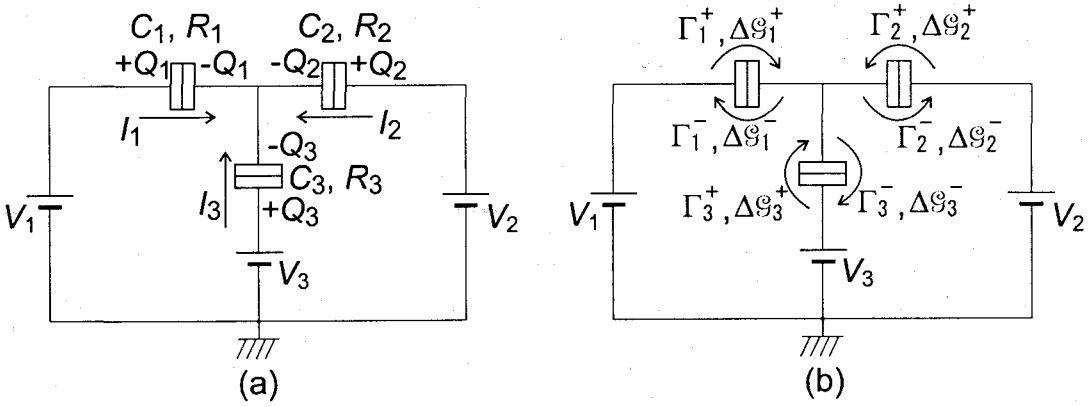


図 2.2: ゲート抵抗も微小トンネル接合でできている SET

は, 各トンネル接合にかかっている電圧である。

$$-Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0 \tag{2.2}$$

$$\frac{Q_1}{C_1} - \frac{Q_2}{C_2} = V_1 - V_2 \tag{2.3}$$

$$\frac{Q_3}{C_3} - \frac{Q_2}{C_2} = V_3 - V_2 \tag{2.4}$$

$$\tag{2.5}$$

これらの式より, Q_i を解き, $V_{i,\mathrm{I}} = Q_i/C_i$ をもとめると,

$$V_{i,\mathrm{I}} = V_i - \frac{\sum_{i=1}^{3} C_i V_i}{C_\Sigma} \tag{2.6}$$

となる。ここで $C_\Sigma = \sum_{i=1}^{3} C_i$ である。

ここで, $\sigma(Q,t)$ という確率を考える。これは, ある時刻 t において, アイランドの電荷が Q である確率である。ただし, 単電子現象が見えるためには,

$$Q = Q_0 - ne \qquad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots) \tag{2.7}$$

と量子化されていると仮定する。この $\sigma(Q,t)$ の時間変化に対して, 次の式が成立するはず

である。

$$\frac{\partial\sigma(Q,t)}{\partial t} = \sum_{i=1,2,3}\Big\{\Gamma_i^+(Q-e)\sigma(Q-e,t)+\Gamma_i^-(Q+e)\sigma(Q+e,t) \\ -(\Gamma_i^+(Q)+\Gamma_i^-(Q))\sigma(Q,t)\Big\} \tag{2.8}$$

ここで, $\Gamma_i^{\pm}$ は, 図 2.2(b) に示したように, トンネル接合 i において, それぞれ, 電子がアイランドに向かって (+ のとき), あるいはアイランドから外に向かって (− のとき), 単位時間あたりにトンネルする確率であり,

$$\Gamma_i^{\pm}(Q) = \frac{1}{e^2}\frac{1}{R_i}\Delta\mathcal{G}_i^{\pm}(Q)\left[1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta\mathcal{G}_i^{\pm}(Q)}{k_\mathrm{B}T}}\right]^{-1} \tag{2.9}$$

とあらわされる [Kra91]。また, $\Delta\mathcal{G}_i^{\pm}$ は $\Gamma_i^{\pm}$ のトンネルにともなう自由エネルギーの変化であり,

$$\Delta\mathcal{G}_i^{\pm}(Q) = \Delta U^{\pm} \mp eV_{i,\mathrm{I}} \tag{2.10}$$

$$\Delta U^{\pm}(Q) = \frac{Q^2}{2C_\Sigma} - \frac{(Q\mp e)^2}{2C_\Sigma} = \frac{e}{C_\Sigma}(-\frac{e}{2}\pm Q) \tag{2.11}$$

である。C_i, R_i, V_i, T を与え, 式 (2.8) を解くと $\sigma(Q,t)$ が求められ, $\sigma(Q,t)$ を用いると, トンネル接合 i を流れる電流は,

$$I_i(t) = e\sum_Q \sigma(Q,t)(\Gamma_i^-(Q)-\Gamma_i^+(Q)) \tag{2.12}$$

とあらわされる。ここで, $\sum_Q$ とは, 式 (2.7) の n を使えば $\sum_{n=-\infty}^{+\infty}$ の意味である。

2.3 実験

単電子デバイス (微小アイランドや微小トンネル接合) の作製方法については, すでに様々な方法が試みられ成功しているが, 本研究では, 変調ドープ GaAs/AlGaAs ヘテロ基板と金属ショットキーゲートを用いる方法を採用した [KJvdVH91]。この方法は, ポイントコンタクトにおけるコンダクタンスの量子化の観測に成功して以来 [vWvHB+88], 基礎研究の分野ではよく用いられる方法である。この方法で作製された微小トンネル接合は, ゲート電圧を変えることによって, トンネルバリアの高さや幅 (つまりトンネル抵抗) を調整することがで

きるというのが最大の長所である。つまり, 少数の試作デバイスを作製し, ゲート電圧を変えることによって, 様々な条件を作り出すことができるのである。一方, ポテンシャルの変化がゆるやかなので, 急峻で高いトンネルバリアを実現できないのが短所である。従って, 非常に微小なアイランドを作製し, 高温で動作する単電子デバイスを実現するのは, この方法では困難である。従って, 本研究では, 希釈冷凍機を用いて極低温 (数十 mK) まで冷却することによって, 単電子効果を観測している。実用化を睨んだ研究では, 室温動作が非常に重要であるのはもちろんであるが, 本研究で扱っている内容は, 基本的には物質に依存しない現象であるので, デバイスの材料や作製方法を変更することによって, 高温で動作させることが可能になる。

2.3.1 試料作製

試料作製プロセスを以下にまとめる。また, プロセスフローを図 2.3 に簡単に示した。

1. 分子線エピタキシー (Molecular Beam Epitaxy; MBE) 法によって, 変調ドープ $GaAs/Al_{0.27}Ga_{0.73}As$ シングルヘテロ構造の結晶を成長した。MBE 装置は Varian 社 Modular GenII を用いた。成長温度は約 600°C であった。エピタキシャル基板の構造は, サンプルによって多少異なることもあるが, 典型的には図 2.4 に示した通りである。ヘテロ界面に存在する 2 次元電子ガス (2DEG) の典型的な濃度や移動度は 2〜3 $\times 10^{11}$ cm^{-2} および 10^4〜10^5 cm^2/Vs であった。このような基板を成長後, 約 5mm 角の大きさに切断して以降のプロセスで用いた。
2. 紫外線用のポジ形レジストである AZ1350J を 5000 rpm でスピンコートし, 60 °C で 3 分間ベークした。密着露光法によりホールバー状のパターンを露光した。AZ1350J は市販のポジ形レジストとしてよく用いられるものである [野々87]。現像/リンス 後, リン酸 (H_3PO_4), 過酸化水素水 (H_3O), 水 (H_2O) の混合液 (H_3PO_4:H_3O:H_2O = 1:1:30) で 60 秒間エッチングした。このときの エッチング深さは 200 nm 程度であった。
3. そのようして作製したメサ形状の 2DEG にオーミック電極を形成するため, 再び AZ1350J を用いた紫外線露光によって, 電極の形状をパターニングし, 抵抗加熱蒸着法によって, 金ゲルマニウム (AuGe: Ge 12%), ニッケル (Ni), 金 (Au) を蒸着した。アセトン (Acetone, CH_3COCH_3) の中でリフトオフし, アルゴン (Ar) ガス雰囲気中で 460 °C で 240 秒間

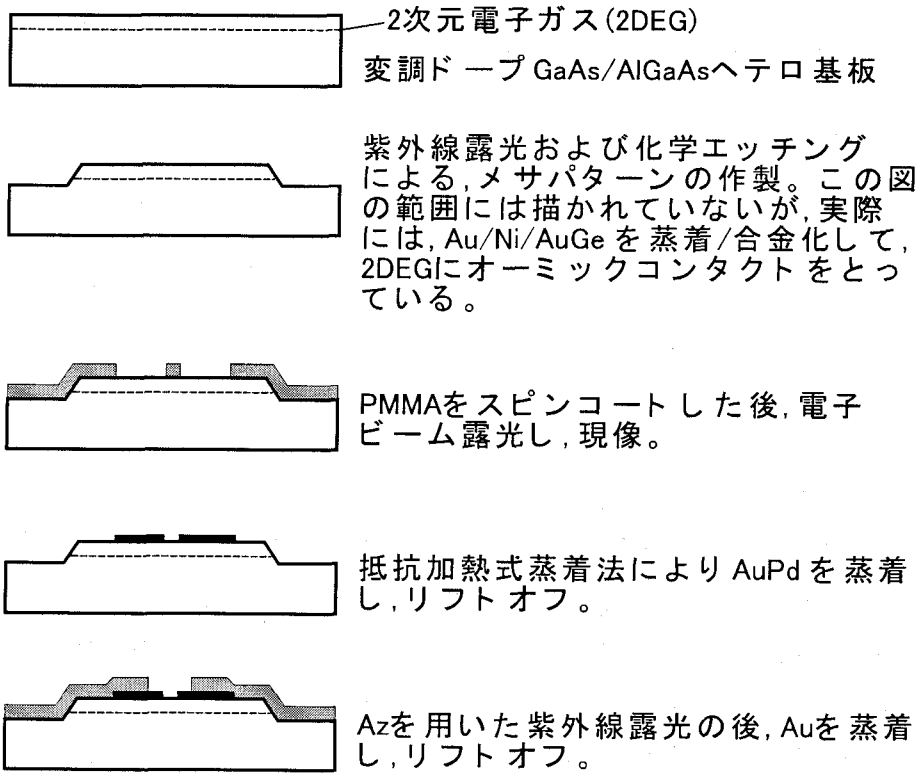


図 2.3: 試料作製プロセス

加熱して合金化した。

4. 電子ビーム用のポジ形レジストであるポリメタクリ酸メチル (PolyMethylMetacrylate: PMMA) を 8000 rpm でスピンコートし, 170 °C で 2 時間ベークした。PMMA は代表的なポジ型電子線レジストであり感度が低いけれども高解像度のためよく用いられている [野々87]。電子ビーム露光装置は, 日本電子社製の NSF-2D を用いた。電子銃としては, タングステンチップ (< 100 >W) 上に ZrO をコートしたものを用いている。チップ先端部の (100) 面には Zr と 酸素分子の反応により安定でかつ仕事関数の低い表面層が形成される。この電子銃は熱電界放出によって電子ビームを得ているため, 高輝度でビームの安定性が高い。加速電圧は 50 kV を用いた。このシステムを用いて, 線幅 8 nm

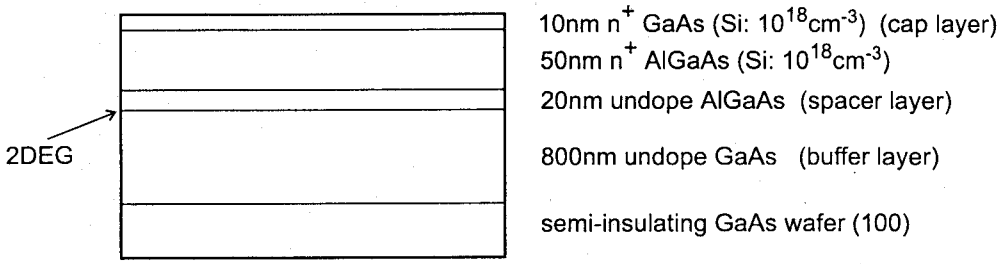


図 2.4: エピタキシャル基板の構造

のパターンが描画可能であることが実証されている [EGN+84]。電子ビーム露光によって微小電極パターンを描画したあと, メチルイソブチルケトン (MethylIsobutylKetone: MIBK) と 2-プロパノール (2-Propanol: IPA) の 混合液 (MIBK:IPA=1:3) を 25 °C にし, 30 秒間現像した。リンスには IPA を用いた。その後, 抵抗加熱蒸着により, AuPd を蒸着し, トリクロロエチレン (トリクレン, $CHCl{=}CCl_2$) 中でリフトオフした。AuPd は GaAs 基板との密着性がよく, また, 蒸着したときの粒径が小く, 2DEG へのダメージが小さいので, 微小金属ゲートの作製に適している [REA+91]。

5. 金線を用いて配線するためにはより大きな面積の電極が必要なので, もう一度, AZ1350J を用いた紫外線露光によりパターニングし, 抵抗加熱法により Au を蒸着し, アセトン中でリフトオフすることにより, そのような電極を作製した。

2.3.2 低温での伝導特性評価

完成した試料は, 16 端子の DIP パッケージにマウントした。DIP パッケージは, 市販のハンダ付け用のヘッダソケットを利用し, 希釈冷凍機にセットした時の熱伝導がよくなるように, 無酸素銅を直方体に削り出したものを試料の裏側にあたるようにした。希釈冷凍機の中では, 混合器 (ミキシングチャンバー) から伸びている金属の棒とこの無酸素銅を接触させることにより試料を冷却した。

^{3}He-^{4}He 希釈冷凍機は, 1 K から 数 mK の 2 桁以上の温度域を長時間連続的に作りだす

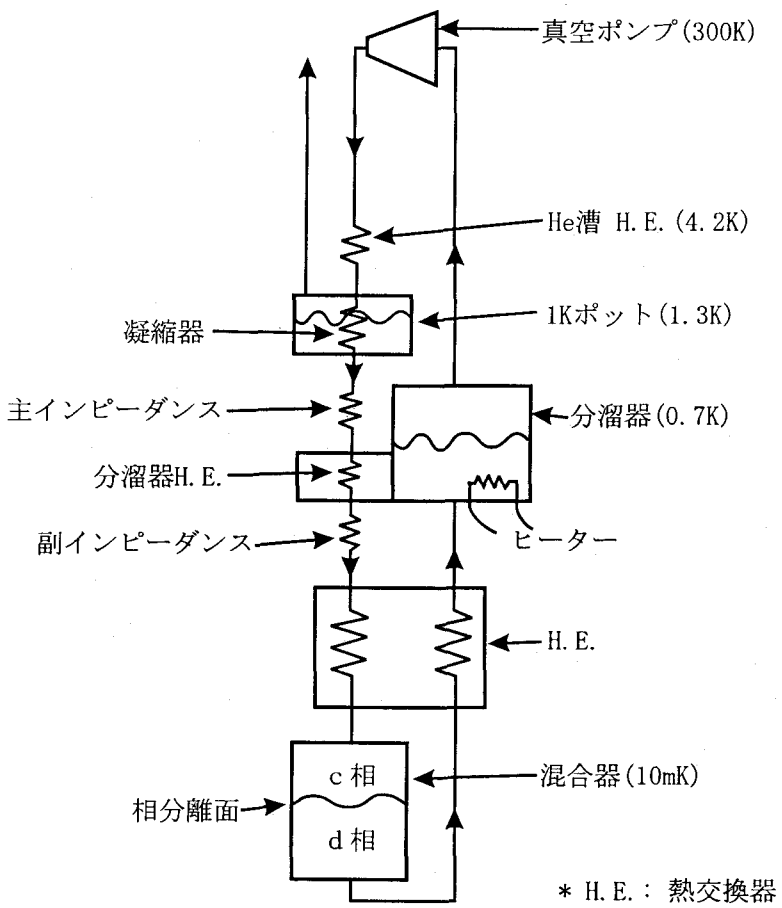


図 2.5: ^{3}He-^{4}He 希釈冷凍機の構成図 [小林 95]。

ことのできる冷凍機であり, 低温実験ではよく使われている [小林 95]。本研究では, Oxford 社製の Kelvinox100 を用いた。この装置の最低到達温度は 17 mK であり, 100 mK における冷却能力は 100 μW である。以下に ^{3}He-^{4}He 希釈冷凍機の構造と原理を簡単に述べる。図 2.5 に, ^{3}He-^{4}He 希釈冷凍機の構成の模式図を示す。まず, ^{3}He-^{4}He の混合ガスを 減圧した ^{4}He で冷却して液化する。その時の ^{3}He-^{4}He 混合液の相図を図 2.6 に示す。

^{3}He-^{4}He 混合液は, 三重点 (0.87 K) 以下では 2 本の共存線をもち, 図 2.6 中の右側の共存

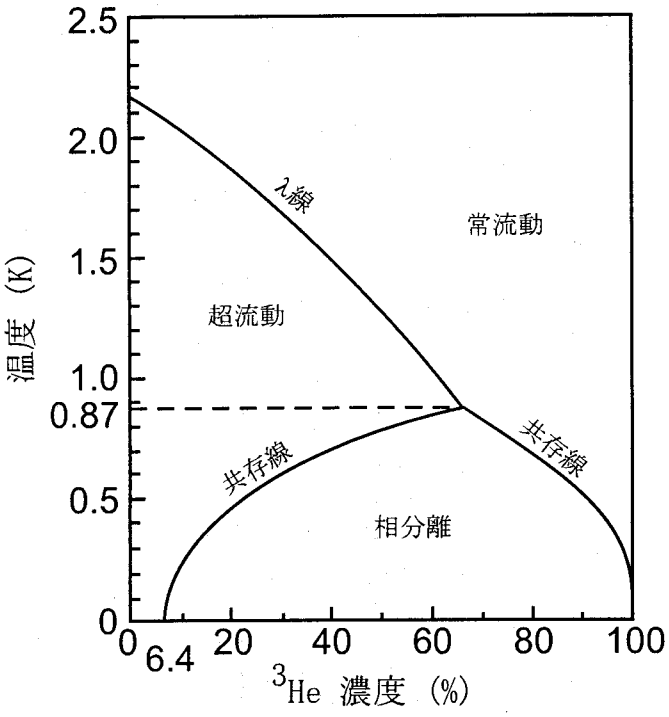


図 2.6: ^{3}He-^{4}He 混合液の相図 [小林 95]

線上の状態 (^{3}He-濃厚相, c 相) と左側の共存線上の状態 (^{4}He-濃厚相, d 相) の 2 相に分離する。^{3}He は ^{4}He に比べて軽いため, c 相は d 相の上に浮かぶことになる。この c 相と d 相の相分離面が, 混合器 (mixing chamber) にくるように, あらかじめ, ^{3}He と ^{4}He の混合ガスの量を調整してある。c 相中の ^{3}He を d 相中に溶け込ますことにより, エントロピー差に比例した吸熱 (冷却) が起こるのである。そのように c 相中の ^{3}He を d 相中に溶け込ますには, d 相から分溜によって ^{3}He を選択的に取り除かなければいけない。分溜器 (still) のヒーターを調整し, ここの温度を約 0.7 K にすることにより, d 相から ^{3}He を撰択的に蒸発させ, 真空ポンプで排気することができる。排気された ^{3}He ガスは, 液体 ^{4}He を減圧することにより, 1.3 K 程度まで冷却した 1K pot の中の凝縮器 (condenser) で液化し, 再び混合器に送られて行く。この循環によって, 継続的に低温を維持することができる。

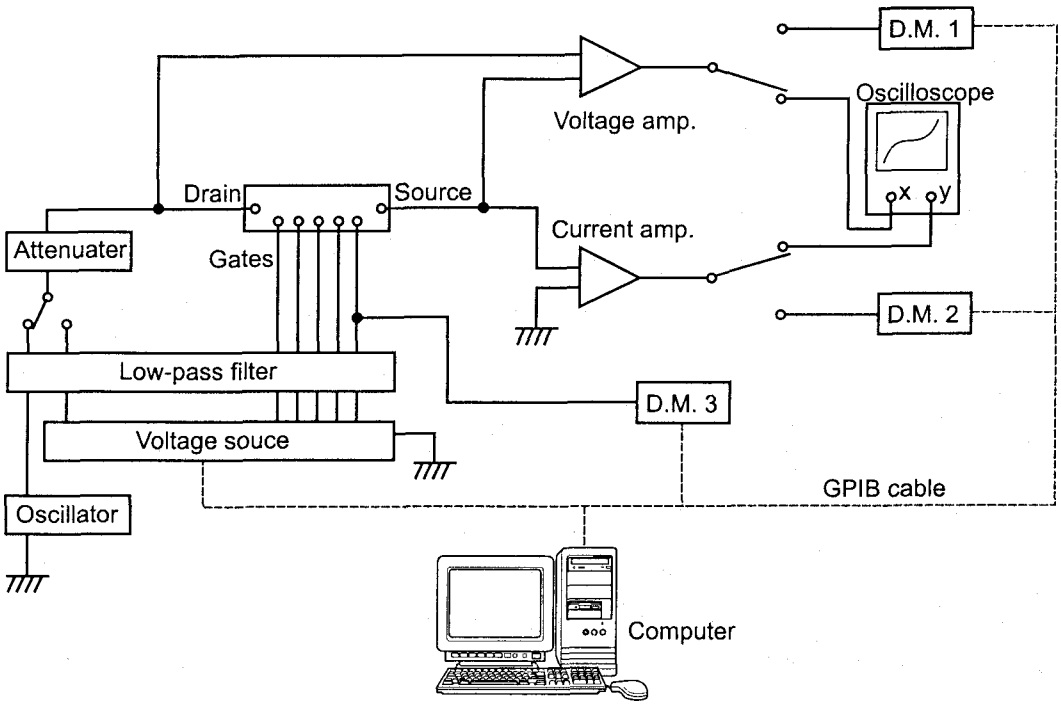


図 2.7: 測定系の模式図 (D.M. は Digital Multimeter の略)

試料の伝導特性の評価は, ピコアンペア (pA) オーダーの微弱な電流を測定しなければいけないので, 文献 [Put96] などを参考にし, ノイズの除去には特に留意した。図 2.7 に, 測定系の模式図を示す。図中の電圧源 (Voltage Source) は, Keithley 社製の モデル 213 を用いた。この電圧源の出力を Low-pass Filter を通して, ノイズをとってから用いている。Low-pass Filter は, 3.3 μF と 1 kΩ の RC 回路を用いた。典型的には ソースとドレインの間に 数 mV 程度の電圧を印加するので, 電圧源で発生させた 数 V の電圧を Attenuater で 3 桁ほど小さくした。Attenuater は 通常の抵抗器による分圧 (1 MΩ と 1 kΩ で約 3 ケタ電圧を下げた) を用いた。測定中固定しているゲート電圧には, Low-pass Filter を通した電圧源の電圧を印加しているだけであるが, 測定中掃引しているゲート電圧は, デジタルマルチメータ (D.M.3) で電圧をモニタした。D.M.3 には Keithley 社製の モデル 2000 を用いた。ドレイン

とソースの間の電圧は電圧アンプ (Voltage Amplifier) で増幅したのち, デジタルマルチメータ (D.M.1) でモニタした。クーロンブロッケードが起きているときには, ドレイン-ソース間のインピーダンスは非常に大きくなっているので, この電圧アンプは入力インピーダンスの大きいものを用いなければいけない。ミリボルト程度の電圧を測定するだけなら, 通常のデジタルマルチメータでも可能であるが, 入力インピーダンスの大きなものが必要であったので, このアンプを使用した。アンプのゲインは 100 倍で用いた。実際に使用したアンプは, DL Instruments 社製の ITHACO model 1201 Low Noise Preamplifier であった。このアンプの入力インピーダンスは直流では 1 GΩ 以上が保証されており, 普通は 5 GΩ 程度である。D.M.1 には アドバンテスト社製のモデル R6551EMC を用いた。ソース電流の測定では, ピコアンペア程度の微弱な電流を測定する必要があり, 電流アンプ (Current Amplifier) を用いた。このアンプの性能は, 電圧アンプとともに, 低ノイズ測定にとって非常に重要である。本研究では, DL Instruments 社製の ITHACO model 1211 Current Preamplifier を ゲイン 10^{-9} から 10^{-8} A/V で用いた。電流アンプの出力電圧をモニタするデジタルマルチメータ (D.M.2) としては, アドバンテスト社製の モデル R6551EMC を用いた。電圧源とデジタルマルチメータは GPIB インターフェース によってコンピュータに接続されている。ここで, 測定系をコンピュータからのノイズから守るために, 光ファイバーを用いた GPIB ケーブルを使用した。測定時には, まず, オシロスコープ (IWATSU SS-7602 SYNCHROSCOPE) で電流-電圧特性を表示しながら, ゲート電圧を変化させ, 測定パラメータ (各ゲートの電圧) を決定したのち, コンピュータ上で測定用のプログラムを実行した。オシロスコープで観測しているときには, ドレイン電圧用の電圧源は, 発信器 (NF 社製 マルチファンクションシンセサイザ 1945) を用いた。多くのゲート電極があり, それらのゲート電圧の組み合わせは無限にあるので, この様な方法で, あらかじめ測定パラメータを限定することが重要であった。ドレインやソースのトンネル抵抗のゲート電圧依存性を測定するときには, RV-Elektroniikka Oy PICOWATT 社製の 交流レジスタンスブリッジ AVS-47 も用いた。

2.4 実験結果および検討

抵抗結合型単電子トランジスタ (R-SET) を実現するために, 図 2.8 に示すようなデバイスを作製した。写真はデバイスのトップヴューである。白く写っている部分が微小金属 (AuPd) ゲートで, 黒っぽい部分が半導体基板の表面である。微小金属ゲートに負バイアスを印加す

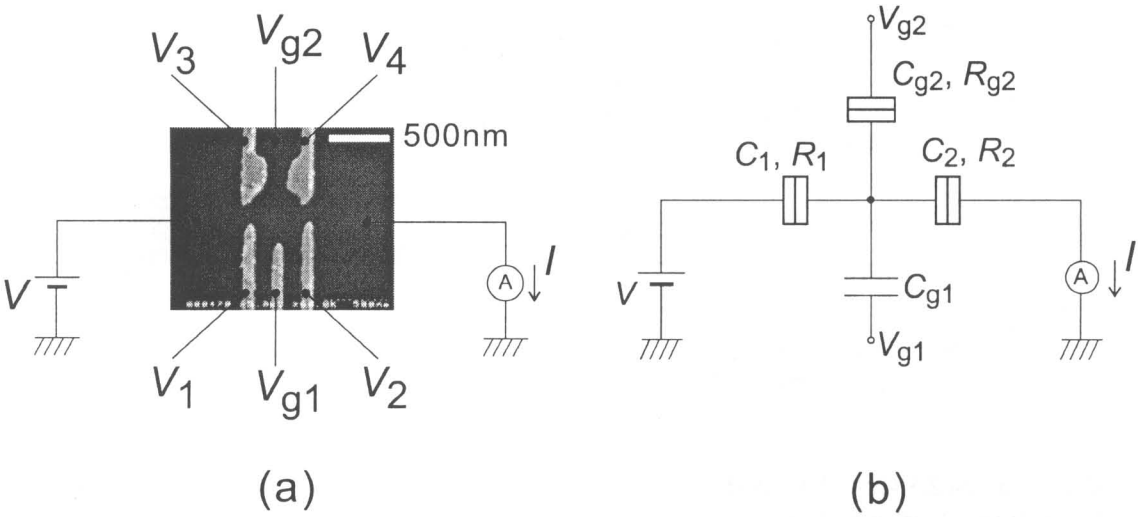


図 2.8: (a) RSET 実現のために作製した試料の SEM 写真。(b) 等価回路。R_{g2}, C_{g2} は V_3, V_4 の関数に, R_1, C_1 は V_1, V_3 の関数に, R_2, C_2 は V_2, V_4 の関数になっている。

ることによって, その直下の 2 次元電子ガスが空乏化し, 単電子トランジスタが形成される。図には, 測定時のドレイン電圧の印加とソース電流の測定の様子も模式的に描かれている。また, 5 つのゲート電極にはグランド電位に対して負のバイアス電圧を印加したが, それらのゲート電圧の記号もこの図で定義している。これらのゲートに負のバイアス電圧を印加し, ゲート電極直下およびその周辺の 2 次元電子ガスを空乏化した様子を図 2.9 に模式的に表している。それぞれのゲート電極に印加する負バイアスを調整することにより, ドレイン, ゲート, ソースの抵抗を調整することができる。

この実験に用いた基板は, ゲート抵抗のところで散乱がおこり, トンネル抵抗ではなく通常の抵抗が実現できるかもしれないことを期待して, 移動度の低いものを選んで用いた。希釈冷凍機はホール測定のために磁場を掃引すると, 希釈冷凍機の各部の金属にうず電流が流れて熱を発生するため, ホール測定時には温度がわずかに上昇し, 50 mK 程度になっていた。その温度におけるホール測定の結果から, この実験で用いた基板の 2DEG の密度と移動は,

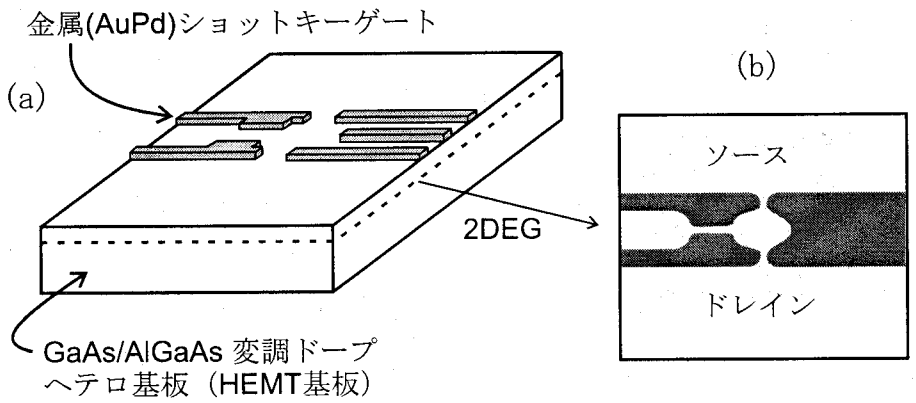


図 2.9: (a) 図 2.8 のデバイスの模式図。(b) ゲート電極に負バイアスを印加した時に 2 次元電子ガス層に形成される空乏パターンの模式図。負バイアスの大きさを調整することにより, ソース, ゲート, ドレインの抵抗を調整できる。

それぞれ, $n = 2.1 \times 10^{11}$ cm^{-2}, 3.3×10^4 cm^2/Vs であった。

ホール測定の後, 希釈冷凍機の温度が下がるのを待ち, 約 30 mK となったところで以降の測定を行った。まず, V_1-V_3, V_2-V_4, V_3-V_4 のそれぞれのゲート電極対に負バイアスを印加し, ドレイン抵抗, ソース抵抗, ゲート抵抗が $0 \lesssim R \leq \infty$ の範囲で可変であることを確認した。

次に, 作製したデバイスが, 測定温度 (30 mK) において, 十分チャージングエネルギーが大きく, 単電子の伝導を観測することができていることを確認するため, V_{g1} のショットキーゲートをゲート電極とした通常の C-SET としての特性を観測した。図 2.10 がその結果である。ここでは, V_1, V_2, V_3, V_4, V_{g2} はそれぞれ −0.729 V, −0.728 V, −0.790 V, −0.790 V, 0 V に固定し, 様々な V_{g1} に対して I–V 特性を 測定し, その結果を 3 次元的にプロットした。この条件では, V_3 と V_4 の負バイアスを十分大きくしてある (−0.79 V) ので, その両電極の間はピンチオフになっている。すなわち, V_{g2} の部分からアイランドやソース電極に電流は流れない条件になっている。従って, アイランドはソースおよびドレイン電極とトンネル接合を介してつながっているが, V_{g2} の電極とはつながっていないことになる。また, V_{g1} の電極は, アイランドと容量的に結合していることになり, この測定では, V_{g1} をゲート電極として使っている。図 2.10(b) に, C-SET に特徴的なクーロンダイヤモンド (図 2.1(a)) が

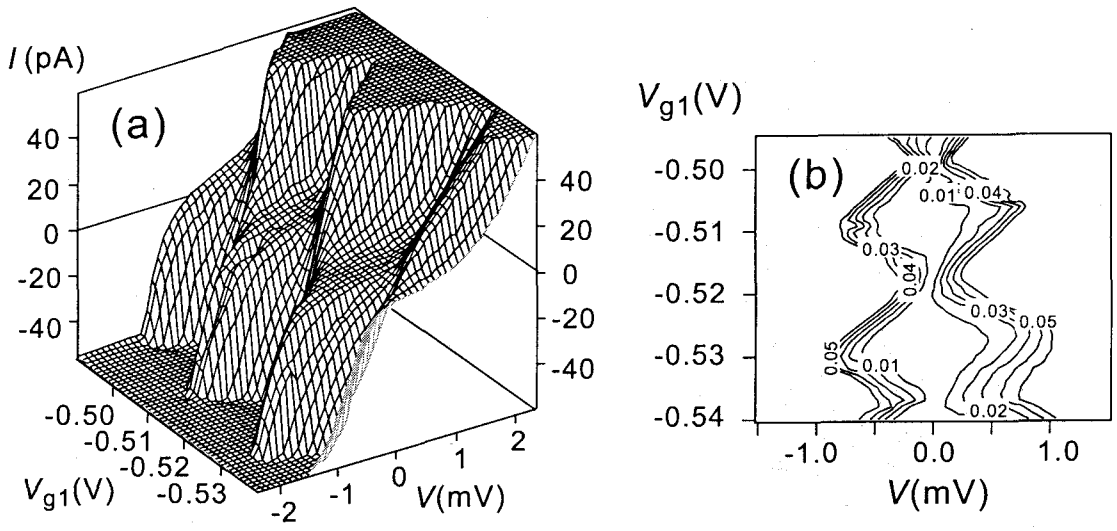


図 2.10: 図 2.8 のデバイスで V_{g1} の Schottky ゲートを用いて観測した C-SET の特性。(a) V_1, V_2, V_3, V_4, V_{g2} はそれぞれ −0.729 V, −0.728 V, −0.790 V, −0.790 V, 0 V に固定し, V_{g1} を動かしたときの I–V 特性を 3 次元プロットしたもの。±60 pA のところにプラトーがあるように見えるが, これは, データ処理のために出現したもので, 実際の測定データは存在しない。(b) は (a) のデータから作成した $|I|$ の等高線表示。

観測されており, このデバイスでは, この測定温度で, 確かに単電子輸送が起こっていることがわかる。また, このデータから, アイランドのトータルキャパシタンスとゲートキャパシタンスを見積もると, それぞれ, $C_\Sigma \simeq 200$ aF, $C_g \simeq 10$ aF であり, このアイランドのチャージングエネルギーは $e^2/(2C_\Sigma) \simeq 0.4$ meV であったことになる。

つぎに, V_3 と V_4 の負バイアスを小さくすることによって, V_{g2} の電極とアイランドの間の抵抗 R_g を ∞ から 有限の値まで動かし, R-SET が実現できるかどうかを調べてみた。図 2.11 に, $V_3 = V_4 = -0.444$ V の時の結果を示す。V_1, V_2, V_{g1} はそれぞれ, −1.19 V, −1.32 V, −0.52 V に固定している。V_3 と V_4 の値を動かしたときには, ソースとドレインのトンネル抵抗の値が変化してしまうので, V_1 と V_2 も動かすことにより, ソースとドレインのト

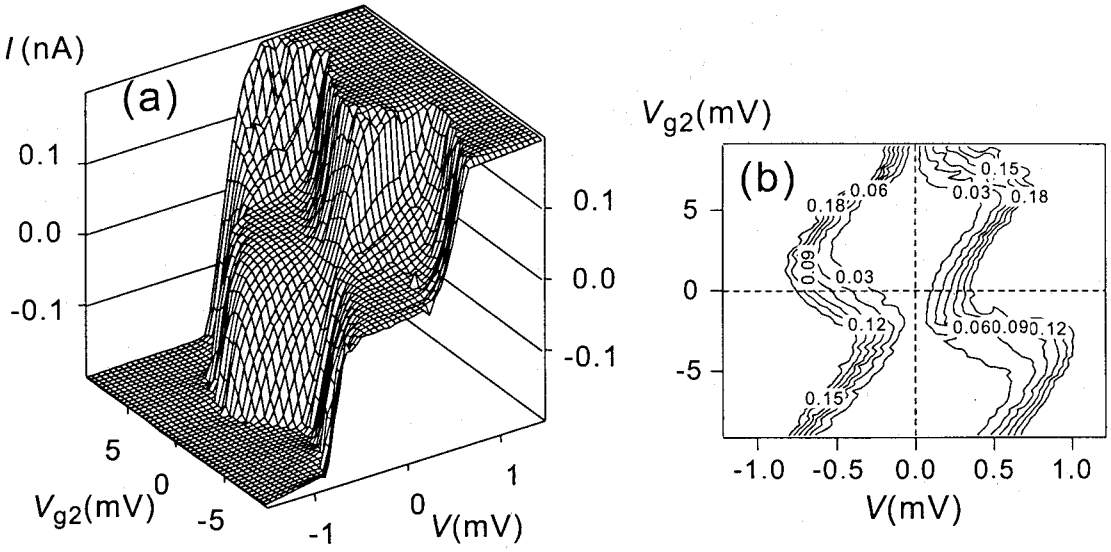


図 2.11: 図 2.8 のデバイスで, V_{g2} をゲートとしたときの伝導特性。(a) $V_1 = -1.19$ V, $V_2 = -1.32$ V, $V_3 = -0.444$ V, $V_4 = -0.444$ V, $V_{g1} = -0.52$ V にした時の I-V-$_{g2}$ 特性を 3 次元プロットしたもの。(b) は (a) のデータから作成した V_{g2}-V 平面での $|I| = 0.03, 0.06, \cdots, 0.18$ nA の等高線。

ンネル抵抗の値が大きく変わらないようにしている。ここでは, V_3, V_4 がまだ (負に) 大きいため, R_g は ∞ とみなすことができ, このデバイスは V_{g2} をゲート電極とする C-SET の特性を示している。

図 2.12 は, さらに, V_3 と V_4 を小さくしたときの結果を示している。ここでは, $V_1 = -1.23$ V, $V_2 = -1.33$ V, $V_3 = -0.415$ V, $V_4 = -0.415$ V, $V_{g1} = -0.52$ V に固定している。$V_3 = V_4 = -0.415$ V とすることにより, ゲート抵抗を小さくし, そのときに, 先ほどと同様に ソースとドレインのトンネル抵抗が小さくならないように V_1 と V_2 も変えている。

図 2.12(b) では, $V_{g2} \gtrsim 3$ mV と $V_{g2} \lesssim -1$ mV のところで, ドレイン-ソース電圧が 0 でもソースに電流が流れているのがわかる。これは, ゲートから流れているはずなので, R_g が有限であることがわかる。また, クーロンダイヤモンドは, V_g 軸に沿ってくり返さずに, ひ

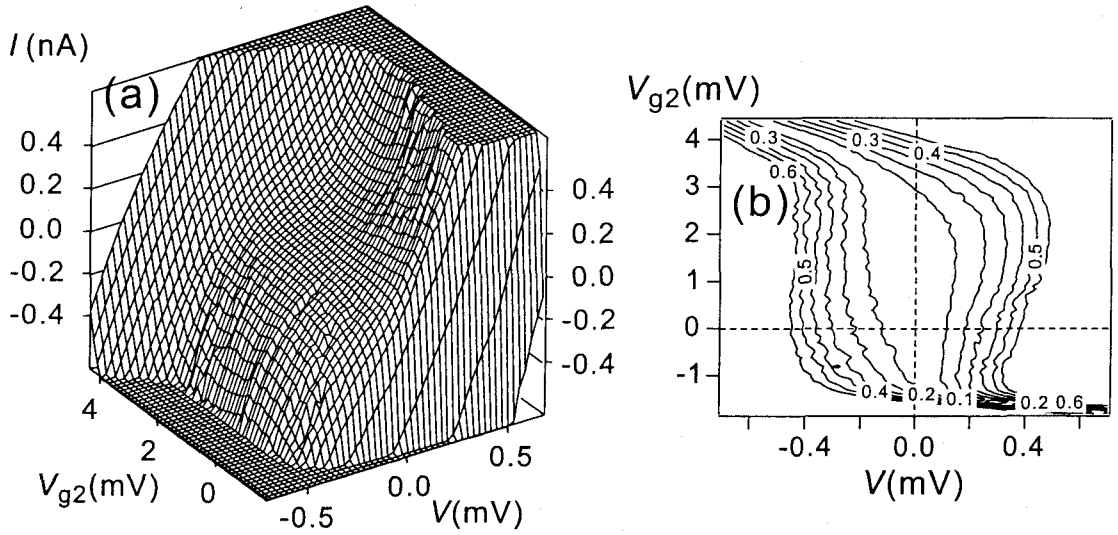


図 2.12: 図 2.8 のデバイスで, V_{g2} をゲートとしたときの伝導特性。(a) $V_1 = -1.23$ V, $V_2 = -1.33$ V, $V_3 = -0.415$ V, $V_4 = -0.415$ V, $V_{g1} = -0.52$ V にした時の I-V-$_{g2}$ 特性を 3 次元プロットしたもの。(b) は (a) のデータから作成した V_{g2}-V 平面での $|I| = 0.1, 0.2, \cdots, 0.6$ nA の等高線。

とつしか存在していない。しかし, R-SET の伝導特性として理論的に予測されたように (図 2.1(b)) クーロンダイヤモンドの中心が V_g-V 平面の中心になっていない。このことは, このデバイスがアイランドのオフセットチャージの影響を受けていることを示唆している。これは, ゲート抵抗 R_g がトンネル抵抗でできているためそこでのクーロンブロッケードが起こっているためと考えられる。すなわち, 今回作製したデバイスは, 図 2.1(b) のような等価回路にはなってなくて, 図 2.2 のようになっていると考えられる。移動度の悪い基板を使ってみたが, 実際には, ゲート抵抗がトンネル抵抗になってしまったのである。

そこで, ゲートがトンネル抵抗でできている図 2.2 のようなデバイスの伝導特性を前述のオーソドックス理論を元にして数値計算してみた。具体的には, 式 (2.8) の連立微分方程式を数値的に解き, 得られた $\sigma(Q)$ をつかって, 式 (2.12) から定常状態の電流を求めた。数値

計算の手法については, 文献 [PTVF92] や [森正 86] も参考にしたが, 最終的には [渡辺 89] に掲載されていたルンゲクッタ法のルーチンを使った。また, 言語としては, Fortran77 用のプリプロセッサである Ratfor を用いた [KP81]。また, 式 (2.8) の連立微分方程式は, 厳密には無限個の式を連立させることになるが, 実際には, 十分な低温と低いバイアス電圧を仮定するので, $|Q/e|$ が大きいところでは $\sigma(Q) \simeq 0$ となる。したがって, 式 (2.7) の n を使えば $-30 < n < 30$ 程度で十分であった。式 (2.12) の $\sum$ についても同様であった。数値計算の手順を簡単にまとめると以下のようになる。まず, 温度, トンネル接合のパラメータ, およびオフセットチャージを, それぞれ, $U/k_{\mathrm{B}}T$, C_{g}:C_1:C_2, R_{g}:R_1:R_2, Q_0/e の比で与える。時刻 $t = 0$ において, $\sigma(0) = 1$, $\sigma(n) = 0$ ($n \neq 0$ のとき) の初期条件を与え, 系の時間発展の様子を, ルンゲクッタの方法で式 (2.8) の微分方程式を数値的に解くことによって求める。十分時間がたったところで, 系が定常状態になるので, その時の $\sigma(n)$ を用いて式 (2.12) より電流を計算する。

図 2.13 は, $R_{\mathrm{g}}/R_1 = R_{\mathrm{g}}/R_2 = 100$, $C_{\mathrm{g}}/C_1 = C_{\mathrm{g}}/C_2 = 1$, $U/(k_{\mathrm{B}}T) = 100$, $Q_0/e = -0.2$ のときの数値計算の結果である。R_{g} が R_1 や R_2 に対して十分大きいため (100 倍), このデバイスは C-SET としての特徴を示している。すなわち, 図 2.1(a) のようなクーロンダイヤモンドを示している。実験結果の図 2.11 に対応していると思われる。

図 2.14 は, $R_{\mathrm{g}}/R_1 = R_{\mathrm{g}}/R_2 = 1$, $C_{\mathrm{g}}/C_1 = C_{\mathrm{g}}/C_2 = 10$, $U/(k_{\mathrm{B}}T) = 100$, $Q_0/e = -0.2$ 計算結果を示している。図 2.14(b) に示されているように, このデバイスでは R_{g} が小さくなったため, R-SET 的な伝導特性を示している。すなわち, 図 2.1(b) のようなクーロンダイヤモンドを示している。ただし, 完全な R-SET と異なっているのは, オフセットチャージ (Q_0) のために, クーロンダイヤモンドが中心からずれていることである。このように, ゲート抵抗をトンネル抵抗にすると, R-SET の長所のひとつであった, オフセットチャージの影響を受けない (動作点がくるわない) という特徴は失われるが, もうひとつの長所であった, 電圧ゲインが高いという特徴は図 2.14(b) で示されているように実現できる。実験で観測されたクーロンダイヤモンド (図 2.12(b)) の中心がずれていたのは, ここで計算されたように, ゲート抵抗がトンネル抵抗でできていたためにオフセットチャージの影響を受けたためであると考えられる。

図 2.12(b) と図 2.14(b) のクーロンダイヤモンドの形はかなり異なっている。この原因は, 実験ではオフセットチャージは制御不能 (サンプル依存) であり, また, R_1 と C_1, R_2 と C_2,

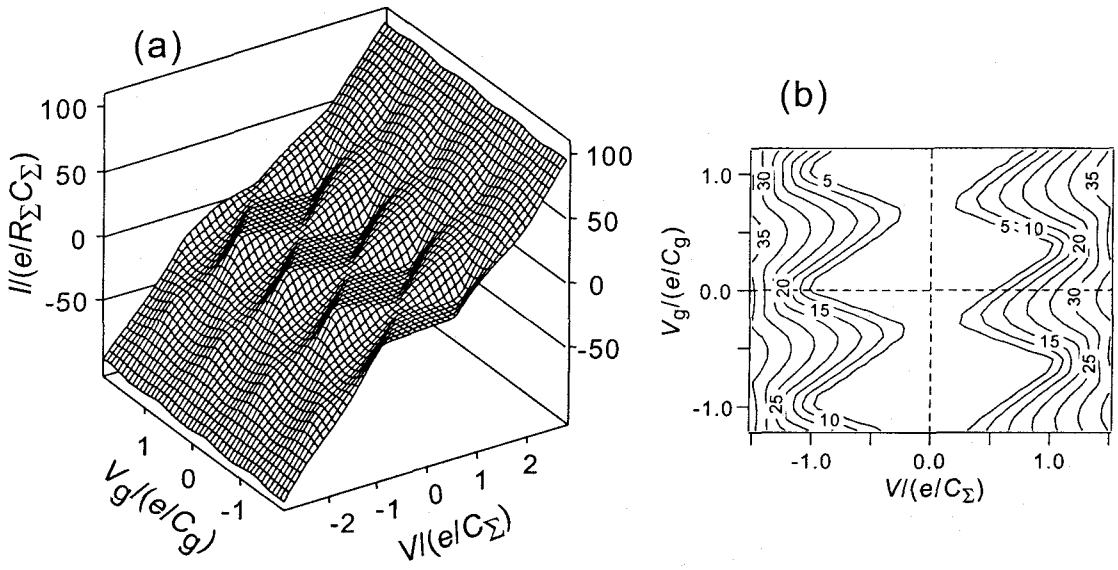


図 2.13: 図 2.2 で示したようなゲート抵抗がトンネル抵抗になっている R-SET の伝導特性をオーソドックス理論をもとに数値計算した結果。(a) $R_g/R_1 = R_g/R_2 = 100$, $C_g/C_1 = C_g/C_2 = 1$, $U/(k_BT) = 100$, $Q_0/e = -0.2$ のときの I-V_g-V 特性。(b) は (a) の結果から作成したクーロンダイヤモンド。$|I/(e/R_\Sigma C_\Sigma)| = 5, 10, \cdots, 35$ の等高線を示している。

R_g と C_g, の関係なども同様に現在のサンプル作製法では正確な制御は不可能であることによると思われる。つまり, 実験では, トンネル抵抗とトンネルキャパシタンスを独立に制御することができていないので, 計算で仮定しているパラメータと同じにはなっていないと思われる。図 2.14 のような結果を実験で得るためには, ゲートキャパシタンス C_g が大きいことが重要である。そこで, 次に, 別のサンプルを作製し, 同様の測定をしてみた。試料の SEM 写真を図 2.15(a) に示す。写真の左側の 4 つのゲート電極は, グランド電位に固定しており, 本研究では使用していない。また図 2.15(b) には測定時のゲート電圧の記号の定義も示している。この試料の作製に用いた 変調ドープ GaAs/AlGaAs ヘテロ基板中の 2DEG の濃度と移動度を, 50 mK におけるホール測定から求めると, それぞれ, 2.7×10^{11} cm^{-2}, 1.3×10^5

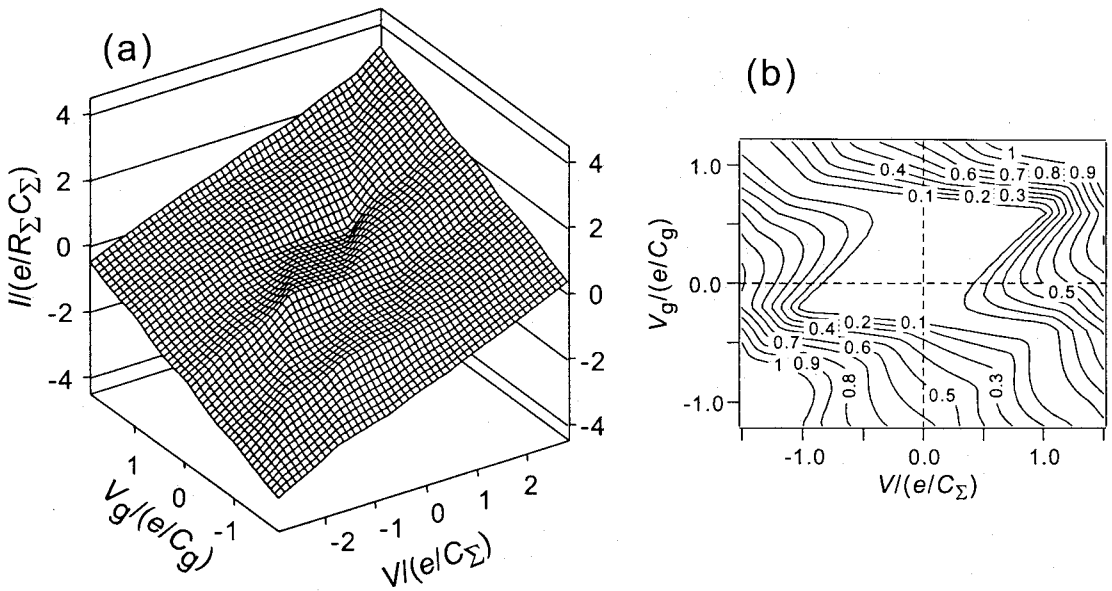
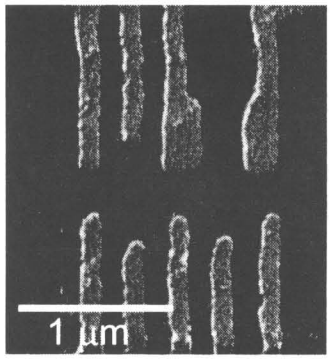


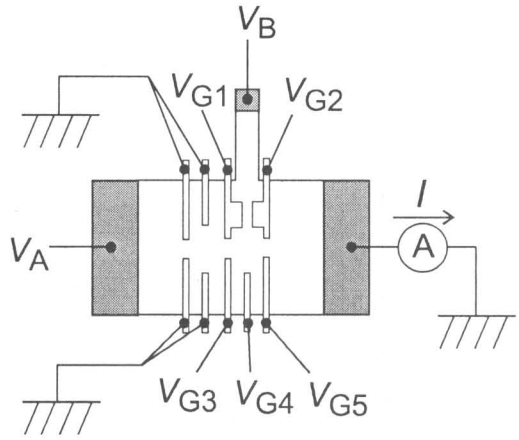
図 2.14: 図 2.2 で示したようなゲート抵抗がトンネル抵抗になっている R-SET の伝導特性をオーソドックス理論をもとに数値計算した結果。(a) $R_g/R_1 = R_g/R_2 = 1$, $C_g/C_1 = C_g/C_2 = 10$, $U/(k_BT) = 100$, $Q_0/e = -0.2$ のときの I-V_g-V 特性。(b) は (a) の結果から作成したクーロンダイヤモンド。$|I/(e/R_\Sigma C_\Sigma)| = 0.1, 0.2, \cdots, 1.0$ の等高線を示している。

$cm^2/V\ s$ であった。この試料においても, 測定温度 (30 mK) で単電子輸送が起こっていることを確認するために, はじめに, V_A をドレイン電極とし, V_{G1} と V_{G2} を負に十分大きくすることによってその間をピンチオフにし, V_{G4} の ショットキー電極をゲートとして用いたときの (通常の) C-SET の特性を測定した。結果を図 2.16 に示す。この測定では, V_B, V_{G1}, V_{G2}, V_{G3}, V_{G5} はそれぞれ, 0 V, −0.65 V, −0.68 V, −0.65 V, −0.68 V に固定した。この結果から, 通常の C-SET のクーロンダイヤモンドが確認されたので, この試料は, 測定温度 (30mK) で単電子輸送が起こっていることが確認できた。

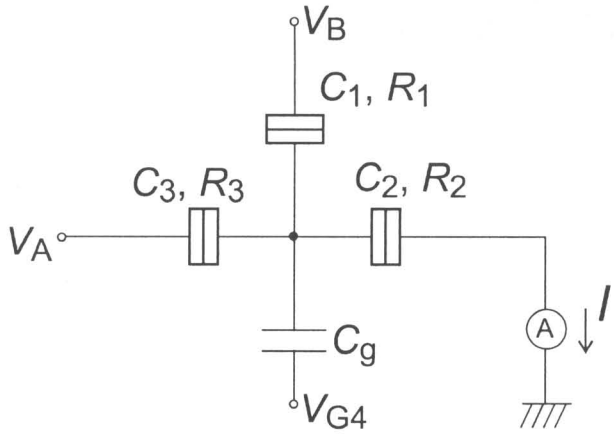
次に, 図 2.14(b) のようなクーロンダイヤモンドを得るために, ゲートのトンネルキャパシタンス C_g を大きくすることを試みた。そのために, ショットキー電極 G1 と G3 の間の部



(a)



(b)



(c)

図 2.15: 作製した試料の (a) SEM 写真。(b) 測定系の模式図。(c) 等価回路。R_1, C_1 は, V_{G1}, V_{G2} の関数に, R_2, C_2 は, V_{G2}, V_{G5} の関数に, R_3, C_3 は, V_{G1}, V_{G3} の関数になっている。

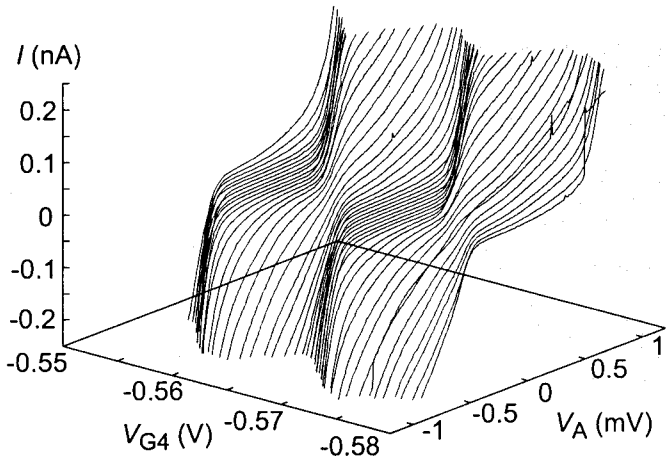


図 2.16: 図 2.15 の I–V 特性。V_{G4} をゲート電極とし, V_B, V_{G1}, V_{G2}, V_{G3}, V_{G5} はそれぞれ, 0 V, −0.65 V, −0.68 V, −0.65 V, −0.68 V に固定した。通常の C-SET のクーロンダイヤモンドが観測されている。

分をゲートとして用いることとし, G1 と G2 の間の部分をドレインとして用いることにした。トンネルバリアの両側が空間的に離れている方がトンネルキャパシタンスが小さくなることが期待できるからである。そのようなセッテイングで測定したときの結果を図 2.17 に示す。この測定では, V_A をゲートとして用い, V_{G1}, V_{G2}, V_{G3}, V_{G4}, V_{G5} はそれぞれ, −0.398 V, −0.514 V, −1.32 V, −0.795 V, −0.994 V に固定した。また, このデータから V_g-V 平面での電流の等高線を作ったものを 図 2.18 に示す。観測されたクーロンダイヤモンドの形は, 数値計算の図 2.14(b) とほぼ同じになっており, 電圧ゲインの高いデバイスの実現に成功している。このサンプルでは, オフセットチャージがほとんど 0 になっており, クーロンダイヤモンドの中心が V_g-V 平面の中心になっているが, これは, 偶然であったと考えられる。

図 2.17 の状態のときのドレイン, ソース, ゲートの抵抗がどの程度になっているかを単独で測定するのは困難である。なぜなら, ポイントコンタクトの抵抗値は R_q より大きいところでは, ショットキーゲートのバイアス電圧に非常に敏感であり, また, すぐそばに別のショットキー電極がある場合には, その影響も受けるからである。従って, ドレイン, ソース, ゲー

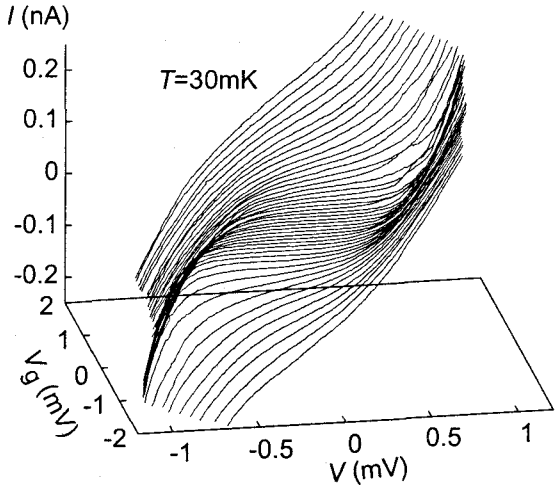


図 2.17: 図 2.15 の I–V 特性。V_{A} をゲートとして用いた。V_{G1}, V_{G2}, V_{G3}, V_{G4}, V_{G5} はそれぞれ, -0.398 V, -0.514 V, -1.32 V, -0.795 V, -0.994 V に固定した。

トの抵抗を以下のようにして見積もった。クーロンブロッケードが破れ, デバイスに電流が流れているとき, すなわち, クーロンダイヤモンドの外側での R-SET の等価回路は図 2.19 のようになっていると考えられる。このような回路の電流は簡単に計算でき,

$$I_2 = \frac{R_1 V_{\mathrm{g}} + R_{\mathrm{g}} V}{R_1 R_2 + R_1 R_{\mathrm{g}} + R_2 R_{\mathrm{g}}} \tag{2.13}$$

となる。従って, 図 2.17 の クーロンギャップ の外側の I–V_{B} の傾き は $\frac{R_{\mathrm{g}}}{R_1 R_2 + R_1 R_{\mathrm{g}} + R_2 R_{\mathrm{g}}}$ となるはずである。また, 図 2.18 で $I = 0$ の線の傾きは $-R_{\mathrm{g}}/R_1$ となるはずである。以上の議論と, $R_1 = R_2$ を仮定すると, このサンプルでは, $R_1 = R_2 \simeq 1$ MΩ, $R_{\mathrm{g}} \simeq 10$ MΩ となり, いづれも, $\gg R_{\mathrm{q}}$ であることが確認できる。

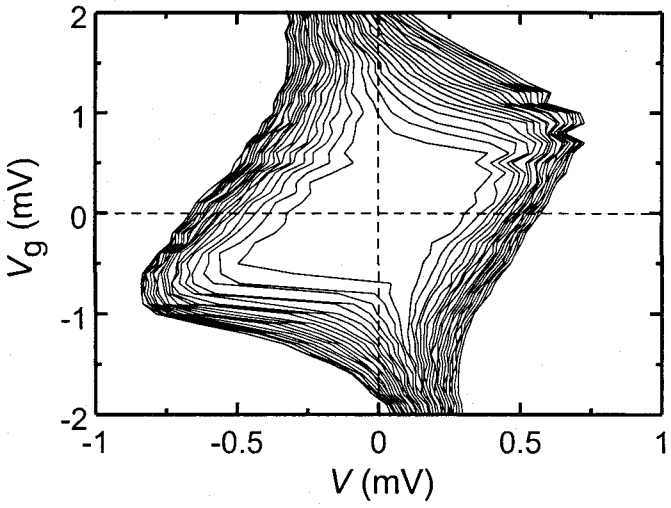


図 2.18: 図 2.17 のデータから作成した電流の等高線表示 (クーロンダイヤモンド)。$|I| = 2.5, 5.0, 7.5, \cdots, 50$ pA の等高線をプロットしている。

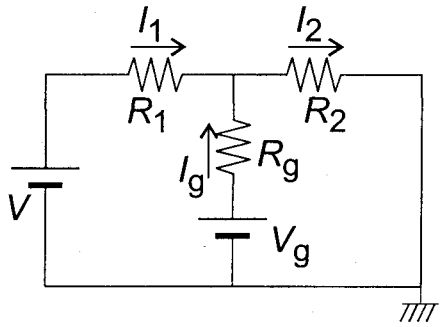


図 2.19: クーロンダイヤモンドの外側での等価回路

2.5 結言

この章では, K. K. Likharev による理論的な提案以来, 実現されて来なかった抵抗結合型単電子トランジスタ (R-SET) について, 検討を加えた。最初の理論的な提案によると, R-SET には,

- オフセットチャージの影響を受けない
- 電圧ゲインが非常に大きい

の 2 つの長所がある。

R-SET の実現を困難にしている要因は,

- 非常に小さい領域に高い抵抗を実現するのが難しい
- ゲート抵抗でのナイキストノイズにより電荷の揺らぎが生じ, 単一電子伝導が起こらなくなる。

などが考えられる。そこで, ゲート抵抗をトンネル抵抗にすることによって, これらの問題を解決し, R-SET を実現できると考え, 理論, 実験の両面から検討を加えた。理論的には, そのようなゲート抵抗がトンネル抵抗になっている R-SET の伝導特性をオーソドックス理論に基づいて計算した。実験では, 変調ドープ AlGaAs/GaAs ヘテロ構造基板中に存在する 2 次元電子ガスを結晶表面の金属ゲートを用いて空乏化する手法でデバイスを作製した。作製されたデバイスでは, 本来の R-SET の持っていた「オフセットチャージの影響を受けない」という長所は失われてしまったが, 「電圧ゲインが大きい」という長所が残っていた。これは, 数値計算の結果とも一致していた。

第3章　環境インピーダンス制御型単電子トランジスタ

3.1　緒言

単電子トンネル現象の原因となるクーロンブロッケードはトンネル接合に接続された外部インピーダンス (環境インピーダンス) の影響を強く受けることが知られている [DEGI90, IG91, 等]。ところが, 現在までに行なわれてきたこの分野の研究の大部分は環境インピーダンスの影響を無視し, 環境インピーダンスを低インピーダンスとして扱っている。その理由は, 実験では, リード線の浮遊容量の影響で環境インピーダンスは低くなることがほとんどで, 高インピーダンスにするには試料構造を工夫する必要があるからである。というのは, クーロンブロッケードが問題となるような系では aF ($= 10^{-18}$ F) のオーダーの容量を扱っており, リード線の浮遊容量がすぐに aF と同程度になってしまうからである。高インピーダンス環境での実験を報告している数少ない文献を挙げると [CSC91, PFHF93, SIiK95] などである。

しかし, 実験的には低インピーダンス環境の方が実現しやすいからといって, 単電子デバイスの伝導特性を議論する際に環境インピーダンスの効果を無視してよいということにはならない。本章では, 環境インピーダンスが単電子デバイスに与える影響について, まず理論的に検討し, その後, 実験でその効果を観測する。これらのことを通して, 環境インピーダンスを変調することは単電子デバイスを制御する方法として利用できることを指摘し, その制御性について議論する。また, リード線の浮遊容量が制御性に与える影響についても検討する。環境インピーダンス変調を単電子トランジスタの制御に用いると, アイランドに容量的に結合したゲートが必要なくなり, アイランドのトータルキャパシタンスを低く抑えることが出来るので, 高温動作に有利であると考えられる。

理論の出発点となっているのは日暮, 岩渕, 長岡による文献 [HIN95] である。この文献では, 2 重トンネル接合におけるクーロンブロッケードに環境インピーダンス (インダクタンス) が与える影響を, 自己無撞着な形式で与えている。この章全体の出発点になっている論文なので, 私自身の仕事ではないが, 3.2.1 で簡単に紹介する。その後, 抵抗やキャパシタン

スを含んだ一般の環境インピーダンスの場合に理論を拡張し, デバイス特性の数値計算を行なった。環境インピーダンスをこのように一般化しておくことは, 実験結果と理論とを比較検討する場合に重要である。さらに, 理論で予測されたデバイス特性を実際に実験で観測した結果を 3.3 にまとめている。

なお, この章にまとめた研究成果を初めに発表した原著論文は, [WIH+98, WYI+98, WYH+98, WIH+99b, WYH+99, WYF+99, WIH+99a] であるので, 参照されたい。

3.2 理論および数値計算

3.2.1 単電子トンネルにおける inductive 環境インピーダンスの影響

この章の内容は日暮, 岩渕, 長岡による文献 [IHN93, HIN95] が出発点となっている。この文献では inductive 環境インピーダンスが 2 重トンネル接合に与える影響を正確に扱っている。この仕事は私の仕事ではないが, 後の議論の出発点となっている式や記号がたくさんでてくるので, このセクションで, その内容を簡単に紹介しておく。

2 重トンネル接合の定式化

図 3.1 に示すような 3 つの電極と 2 つのトンネル接合からなる系の電気伝導について量子論的に考えたい。環境インピーダンス $Z_{\mathrm{env}}(\omega)$ としては, インダクタンス L_{env} のみを考えることにする。このとき, $Z_{\mathrm{env}}(\omega) = \mathrm{i}\omega L_{\mathrm{env}}$ である。ここで, $\mathrm{i} = \sqrt{-1}$ であり, ω は角周波数である。このような系のハミルトニアンは第 2 量子化の方法を用いると

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{\mathrm{T}} \tag{3.1}$$

$$\mathcal{H}_0 = \mathcal{H}_{\mathrm{es}} + \mathcal{H}_{\mathrm{em}} \tag{3.2}$$

$$\mathcal{H}_{\mathrm{es}} = \sum_{i=1}^{3} \sum_{\boldsymbol{k},\sigma} \epsilon_i(\boldsymbol{k}) a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)\dagger} a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)} \tag{3.3}$$

$$\mathcal{H}_{\mathrm{em}} = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)^2}{2L} + \frac{Q_1^2}{2C_1} + \frac{Q_2^2}{2C_2} - Q_1 \frac{\mu_{2,1}}{e} - Q_2 \frac{\mu_{3,2}}{e} \tag{3.4}$$

$$\mathcal{H}_{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{2} \left\{ \mathcal{H}_{\mathrm{T}}^{(i)} + \mathcal{H}_{\mathrm{T}}^{(i)\dagger} \right\} \tag{3.5}$$

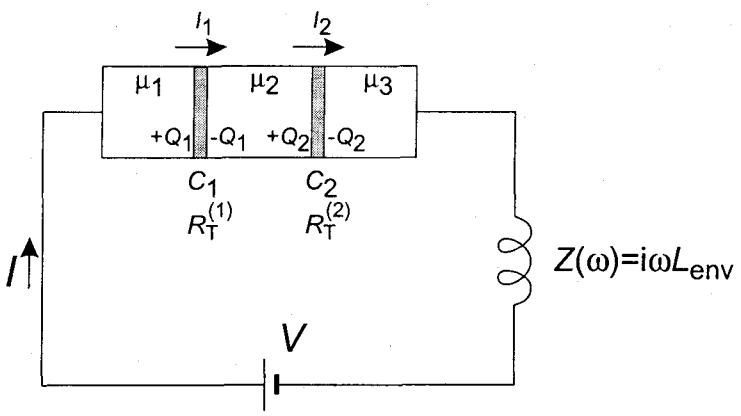


図 3.1: 電圧バイアスされた 2 重トンネル障壁

$$\mathcal{H}_{\mathrm{T}}^{(i)} = \sum_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{k}',\sigma} T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{k}'}^{(i)} \mathrm{e}^{\mathrm{i}e\varphi_i/\hbar} a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)\dagger} a_{\boldsymbol{k}',\sigma}^{(i+1)} \tag{3.6}$$

とかける。ただし, $a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)\dagger}$, $a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)}$ は それぞれ i 番目の電極における波数 $\boldsymbol{k}$, エネルギー $\epsilon_i(\boldsymbol{k})$, スピン σ を持つ電子の生成および消滅演算子である。また, Q_1 Q_2 C_1 C_2 は図 3.1 中に定義されている電荷とキャパシタンスであり, e は電気素量である。φ_1 φ_2 は それぞれ Q_1 Q_2 に正準共役な物理変数で, 磁束に対応している。$\mu_{i+1,i} = \mu_{i+1} - \mu_i$ であり, μ_i は i 番目の電極のケミカルポテンシャルである。$T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{k}'}^{(i)}$ は i 番目のトンネル接合において状態 $\boldsymbol{k}'$ から 状態 $\boldsymbol{k}$ へのトンネルをあらわす行列要素であり, $(i+1)$ 番目の電極で波数 $\boldsymbol{k}'$ を持つ電子を消滅し i 番目の電極で波数 $\boldsymbol{k}$ を持つ電子を生成している様子をあらわしている。Q_i と φ_i は次の正準交換関係を満たす。

$$[Q_i\,,\varphi_j] = \mathrm{i}\hbar\delta_{i,j}\ ,\ [Q_i\,,Q_j] = [\varphi_i\,,\varphi_j] = 0 \tag{3.7}$$

ここで $\hbar$ は Planck 定数を 2π で除したものであり, $\delta_{i,j}$ は Kronecker のデルタをあらわす。

さて, 次式を用いて変数を $(Q_1, Q_2, \varphi_1, \varphi_2) \to (Q, q, \varphi, \psi)$ と変換する。

$$Q_i = Q + (1-\kappa_i)\eta_i q \tag{3.8a}$$

$$\varphi_i = \kappa_i\varphi + \eta_i\psi \tag{3.8b}$$

ここで, $\kappa_i = C/C_i$, $\eta_i = (-1)^i$ $(i = 1, 2)$, $C = C_1C_2/C_\Sigma$, $C_\Sigma = C_1 + C_2$ と定義した。Q はキャパシタンス Q_1 と Q_2 をひとつの直列合成キャパシタンス C と見た時のキャパシタン

ス C に蓄積するチャージをあらわし, q はキャパシタンス C_Σ を持つアイランドに蓄積された余分のチャージをあらわしている。これらの新しい変数は

$$[Q\,,\varphi] = [q\,,\psi] = \mathrm{i}\hbar \tag{3.9a}$$

$$[Q\,,q] = [Q\,,\varphi] = [\varphi\,,\psi] = [\varphi\,,q] = 0 \tag{3.9b}$$

の交換関係を満たすことは容易に確認できる。これらの新しい変数を使うと, ハミルトニアン $\mathcal{H}_{\mathrm{em}}$ は

$$\mathcal{H}_{\mathrm{em}} = \mathcal{H}_{\mathrm{env}} + \mathcal{H}_{\mathrm{c}} \tag{3.10}$$

と書ける。ここで,

$$\mathcal{H}_{\mathrm{env}} = \frac{\varphi^2}{2L} + \frac{Q^2}{2C} - QV \tag{3.11a}$$

$$\mathcal{H}_{\mathrm{c}} = (q/e - n_c)^2 U \tag{3.11b}$$

$$U = \frac{e^2}{2C_\Sigma} \tag{3.11c}$$

$$n_c = \frac{-\mu_{2,1} + \kappa_1 eV}{2U} \tag{3.11d}$$

である。ここでもういちどトータルのハミルトニアンを書いておくと,

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{\mathrm{T}} \tag{3.12a}$$

$$\mathcal{H}_0 = \mathcal{H}_{\mathrm{es}} + \mathcal{H}_{\mathrm{env}} + \mathcal{H}_{\mathrm{c}} \tag{3.12b}$$

である。

トンネル電流の計算方法

i 番目のトンネル接合を流れる電流をあらわす演算子は

$$\mathcal{I}_i \equiv -\frac{\mathrm{d}Q_i}{\mathrm{d}t} \tag{3.13}$$

である。ここで, 電流の向きは図 3.1 に示した向きが正の向きになるように選んである。式 (3.13) の右辺に Heisenberg の運動方程式を用いると, $\mathcal{I}_i$ は

$$\mathcal{I}_i = \frac{\mathrm{d}Q_i}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{\mathrm{i}\hbar}[Q_i\,,\mathcal{H}] \tag{3.14}$$

となる。ここで $\mathcal{H}$ は式 (3.12a) であらわされるトータルのハミルトニアンである。トータルハミルトニアンに前節の具体的な内容を代入し, 交換関係を計算すると,

$$\mathcal{I}_i = \frac{e}{\mathrm{i}\hbar}\left(\mathcal{H}_{\mathrm{T}}^{(i)} - \mathcal{H}_{\mathrm{T}}^{(i)\dagger}\right) \tag{3.15}$$

となる。$\mathcal{I}_i$ は演算子であり, 実際に観測できる電流の値 I_i は $\mathcal{I}_i$ の統計平均値ということになる。しかしそれは厳密には解けないので, $\mathcal{H}_{\mathrm{T}}$ を摂動と考え, 最低次のみを考えると,

$$I_i = \frac{1}{\mathrm{i}\hbar}\int_{-\infty}^{0} \mathrm{d}t\, \langle[\mathcal{I}_i\,, \mathcal{H}_{\mathrm{T}}(t)]\rangle \tag{3.16}$$

となる。ここで

$$O(t) = e^{\mathrm{i}t\mathcal{H}_0/\hbar} O e^{-\mathrm{i}t\mathcal{H}_0/\hbar} \tag{3.17}$$

を用いて, 相互作用表示に移った。また, $\langle\cdots\rangle$ は

$$\langle\cdots\rangle = \frac{\mathrm{Tr}\left(e^{-\beta\breve{\mathcal{H}}_0}\cdots\right)}{\mathrm{Tr}\left(e^{-\beta\breve{\mathcal{H}}_0}\right)} \tag{3.18a}$$

$$\breve{\mathcal{H}}_0 = \mathcal{H}_0 - \sum_{i=1}^{3}\sum_{\boldsymbol{k},\sigma} \mu_i a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)\dagger} a_{\boldsymbol{k},\sigma}^{(i)} \tag{3.18b}$$

で定義される 有限温度におけるグランドカノニカル集団のアンサンブル平均である ($\beta = \frac{1}{k_{\mathrm{B}}T}$, k_{B} は Boltzmann 定数, T は絶対温度)。この後の細かい式の変形は省略するが, 式 (3.16) の続きを計算すると,

$$I_i = \frac{1}{eR_{\mathrm{T}}^{(i)}}\left(\kappa_i eV + 2U\eta_i\left\langle\frac{q}{e}\right\rangle_{\mathrm{c}} - \Phi_i(eV)\right) \tag{3.19}$$

となる。ここで, $\langle\cdots\rangle_{\rm c}$ は $\mathcal{H}_{\rm c}$ の固有状態を使って計算されたアンサンブル平均をあらわしている。また, ここで出てきた関数は以下のように定義されている。

$$\begin{aligned}\Phi_i(eV) &= \frac{{\rm i}\hbar}{\pi} \\ &\times \int_{-\infty}^{+\infty} {\rm d}t \left(\frac{\pi}{\beta\hbar}{\rm cosech}\frac{\pi t}{\beta\hbar}\right)^2 \tilde{\mathcal{F}}_{\varphi}^{(-)}({\rm i}t,\kappa_i)\left\langle \sin\left\{\frac{t}{\hbar}\left(\kappa_i eV + 2U\eta_i\frac{q}{e}\right)\right\}\right\rangle_{\rm c}\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\tilde{\mathcal{F}}_{\varphi}^{(-)}(it,\kappa_i) = \frac{1}{2}\left\{\tilde{\mathcal{F}}_{\varphi}(it,\kappa_i) - \tilde{\mathcal{F}}_{\varphi}(-it,\kappa_i)\right\} \tag{3.21}$$

$$\tilde{\mathcal{F}}_{\varphi}(\tau,\kappa_i) = \mathcal{F}_{\varphi}(\tau,\kappa_i)\exp(-U\tau/\hbar) \tag{3.22}$$

$$\mathcal{F}_{\varphi}(\tau,\kappa_i) = \left\langle T_\tau e^{-i\kappa_i e\varphi(\tau)/\hbar} e^{i\kappa_i e\varphi(0)/\hbar}\right\rangle_{\rm env} \equiv \exp\left\{\kappa_i^2 J(\tau)\right\} \tag{3.23}$$

$$J(\tau) = \frac{E_{\rm c}}{\hbar\omega_L}\left\{\coth\frac{\beta\hbar\omega_L}{2}(\cosh\omega_L\tau - 1) - \sinh\omega_L|\tau|\right\} \tag{3.24}$$

$$E_{\rm c} = \frac{e^2}{2C} \tag{3.25}$$

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{L_{\rm env}C}} \tag{3.26}$$

図 3.1 中に示したような回路を流れるトータルの電流 I は, 式 (3.19) であらわされる電流 I_i を用いて

$$I_1 = I_2 (\equiv I) \tag{3.27}$$

となるように自己無撞着に決めることができる。

3.2.2 一般の環境インピーダンスへの拡張

図 3.2 に示すように, 環境インピーダンス $Z(\omega)$ として インダクタンス $L_{\rm env}$ だけではなく抵抗 $R_{\rm env}$ と 容量 $C_{\rm env}$ もあるとき, すなわち

$$\frac{1}{Z_{\rm env}(\omega)} = \frac{1}{R_{\rm env} + {\rm i}\omega L_{\rm env}} + {\rm i}\omega C_{\rm env} \tag{3.28}$$

のときを扱えるように前節の理論を拡張する。本来は配線の浮遊容量や自己インダクタンスは, 分布定数回路として扱うべきであるが, この図では, デバイスの端から見たときの合成インピーダンスを模式的に表している。

ここでは, ハミルトニアンを構成して前節の議論をたどることは極めて困難となるが, 文

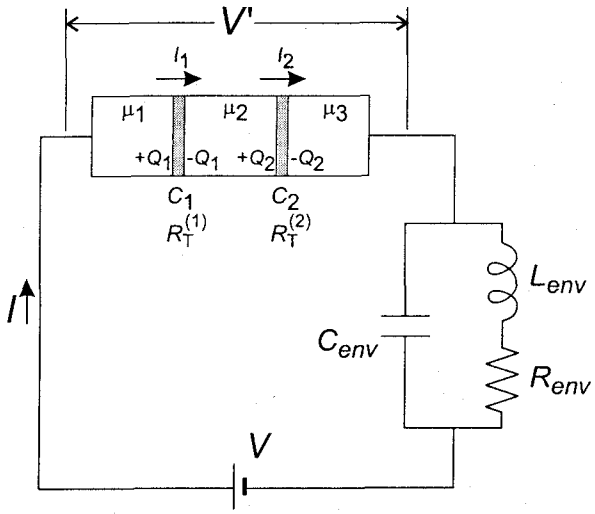


図 3.2: 一般の環境インピーダンスと 2 重トンネル障壁の模式図

献 [IG91] と同様に式 (3.24) であらわされていた $J(\tau)$ が

$$J(\tau) = \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}\omega}{\omega} \frac{\mathrm{Re}Z_\mathrm{t}(\omega)}{R_\mathrm{q}} \left\{ \coth \frac{\beta\hbar\omega}{2} \times (\cosh \omega_L \tau - 1) - \sinh \omega|\tau| \right\} \tag{3.29}$$

($R_\mathrm{q} = \pi\hbar/e^2 \fallingdotseq 13\ \mathrm{k}\Omega$) となる点を考慮し, かつ R_env における電圧降下を考慮すれば, 本質的には前節の議論は変わらない。ここで, トータルインピーダンス Z_t は次式で定義される。

$$\frac{1}{Z_\mathrm{t}(\omega)} = \mathrm{i}\omega C + \frac{1}{Z_\mathrm{env}(\omega)} \equiv \mathrm{i}\omega C + \mathrm{i}\omega C_\mathrm{env} + \frac{1}{R_\mathrm{env} + \mathrm{i}\omega L_\mathrm{env}} \equiv \mathrm{i}\omega C_\mathrm{t} + \frac{1}{R_\mathrm{env} + \mathrm{i}\omega L_\mathrm{env}} \tag{3.30}$$

ここで, $C_\mathrm{t} = C + C_\mathrm{env}$ である。また, C の定義は式 (3.8b) の下に与えられている。

さて, 実際の計算では, R_env における電圧降下を考慮しなければならないので, 実際にトンネル接合にかかっている電圧 V' $(= V - R_\mathrm{env} I)$ が前節の式の V のところに現れる。V' に対して, 電流 I やアイライド状態を計算したあと, $V \equiv V' + R_\mathrm{env} I$ の関係をつかって V と I の関係に変換する必要がある。

3.2.3 数値計算

この節では, 前節の式を使って, 環境インピーダンスの抵抗成分 R_env が 2 重トンネル接合のアイランド状態や電流に与える影響を数値的に調べる。図 3.3 にアルゴリズムをまとめて

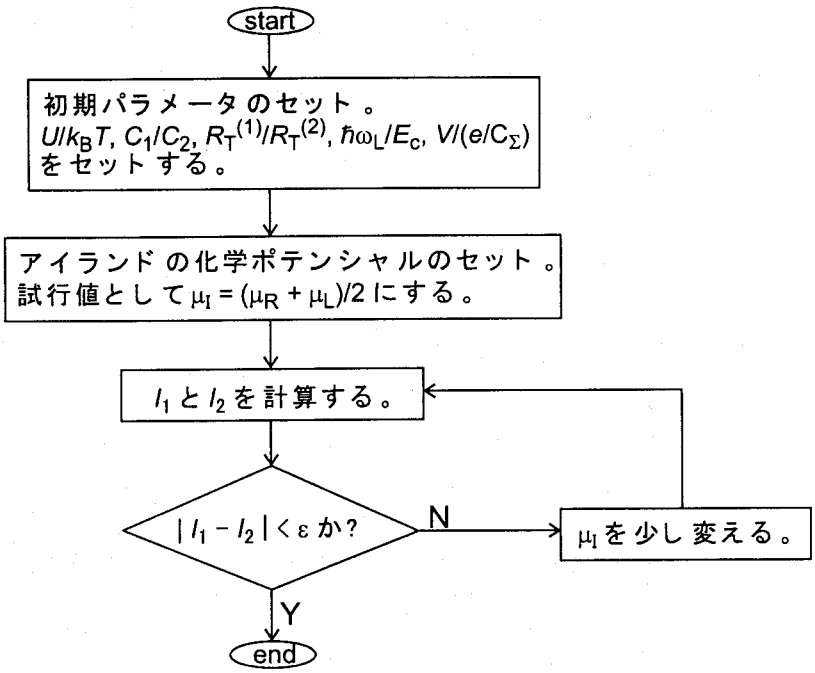


図 3.3: 数値計算のアルゴリズム

おく。数値計算では, 無限大までの積分区間の数値積分をしないといけないが, 文献 [渡辺 89] を参考にし, 二重指数関数型公式を用いた数値積分を行った。それ以外の部分では特に困難な部分はなかった。

浮遊容量の影響を無視した場合

まず, 初めに, 配線の浮遊容量の影響を無視した場合 ($C_{\rm env} = 0$) の結果について示す。図 3.4 に $U/k_{\rm B}T = 25$, $C_1/C_2 = 10$, $R_{\rm T}^{(1)}/R_{\rm T}^{(2)} = 100$ の時のアイランドチャージ数と電流のバイアス電圧 V と $R_{\rm env}$ に対する依存性の計算結果を示す。ここでは, $L_{\rm env}$ は十分小さいところで固定しており, $R_{\rm env}$ を $0.001 \leqq \hbar\omega_R/E_{\rm c} \leqq 10$ の範囲で動かしている。ここで $\omega_R = 1/(RC)$ である。HEMT 構造の表面に金属 Schottky ゲートをとりつけた デバイスで典型的な値として, $C_1 = 500$ aF, $C_2 = 50$ aF, $R_{\rm T}^{(1)} = 1000R_{\rm q}$, $R_{\rm T}^{(2)} = 10R_{\rm q}$ の場合を考えると, $U/k_{\rm B}T = 25$, $\hbar\omega_L/E_{\rm c} = 1$ はそれぞれ $T \simeq 67$ mK $L_{\rm env} = 3$ nH に相当す

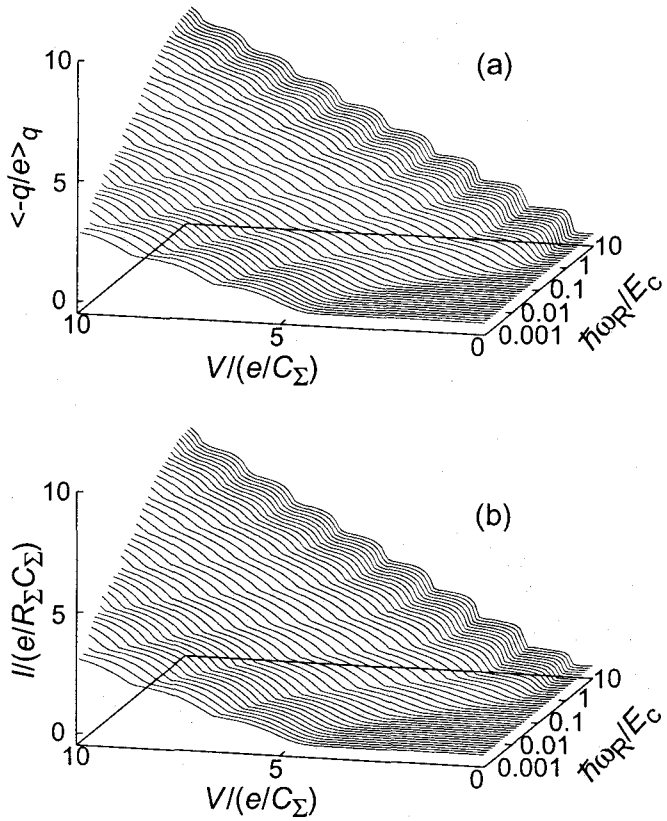


図 3.4: (a) アイランドチャージ, (b) 電流 のバイアス電圧 V と環境インピーダンスの抵抗成分 $R_{\rm env}$ に対する依存性の数値計算結果。$U/k_{\rm B}T = 25$, $C_1/C_2 = 10$, $R_{\rm T}^{(1)}/R_{\rm T}^{(2)} = 100$, $\hbar\omega_L/E_{\rm c} = 1$ とした。

る。また, 図の軸を規格化している単位はそれぞれ, $e/C_\Sigma \simeq 0.3$ mV, $e/(R_\Sigma C_\Sigma) \simeq 22$ pA, $\hbar\omega_R/E_{\rm c} = 10 \rightarrow R \simeq 822\Omega$, $\hbar\omega_R/E_{\rm c} = 0.001 \rightarrow R \simeq 8.22$ MΩ となり, 実験で十分観測できる値であることがわかる。

図 3.4 から, $R_{\rm env}$ ($\hbar\omega_R/E_{\rm c}$) の値によって, クーロンギャップやクーロンステアケースの様子が変わっていることがわかる。このことは, $R_{\rm env}$ を可変にすることで, アイランドチャージ数や電流が制御できることを意味している。この単電子デバイスの新しい制御法は, 単電子回路の設計の自由度を増大させ, また, 通常の単電子トランジスタ (C-SET。図 2.1 参照) のようにアイランドに容量的に結合した制御ゲート電極を必要としないため, アイランドの

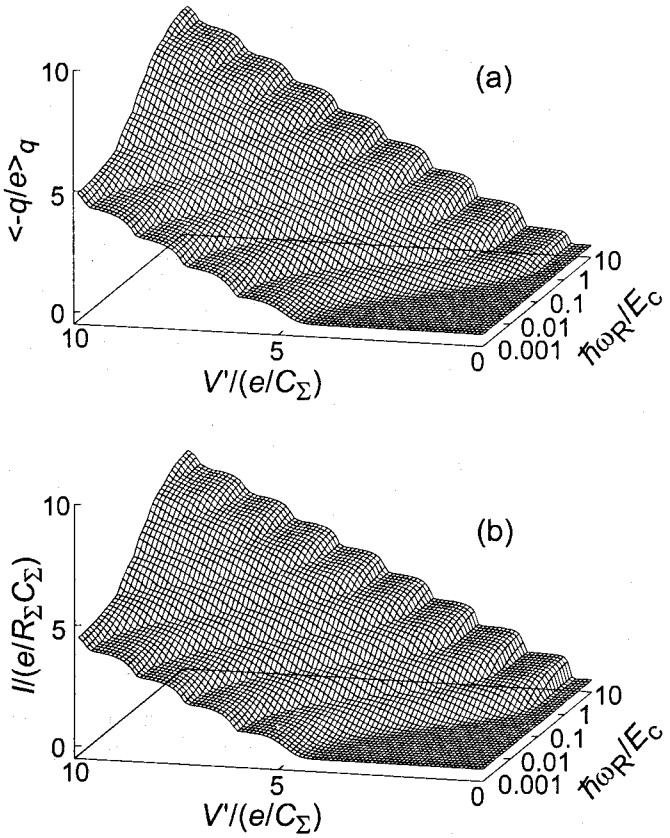


図 3.5: 図 3.4 の横軸を $V' \equiv V - RI$ としてプロットしなおしたグラフ

トータル容量を低くおさえることが可能となり, 結果として単電子デバイスの高温動作の可能性を増大させる。

図 3.4 の横軸を V ではなくて V' にしてプロットしなおしたのが 図 3.5 である。横軸を V にしていると R_{env} での電圧降下の影響で実質的に 2 重トンネル接合にかかる電圧が低下したために見かけ上アイランドチャージや電流が制御できているようにみえる可能性があるが, 横軸を V' にすることによってそのような可能性を排除し純粋にクーロンブローケードの電磁場環境効果による特性変化のみを抽出することができる。この図から, 2 重トンネル接合の電流電圧特性が, 離れたところのインピーダンスが変化した影響をうけて, 変化している様子がはっきりと読みとれる。ただ, 電流が流れていない領域では $V' = V$ であること

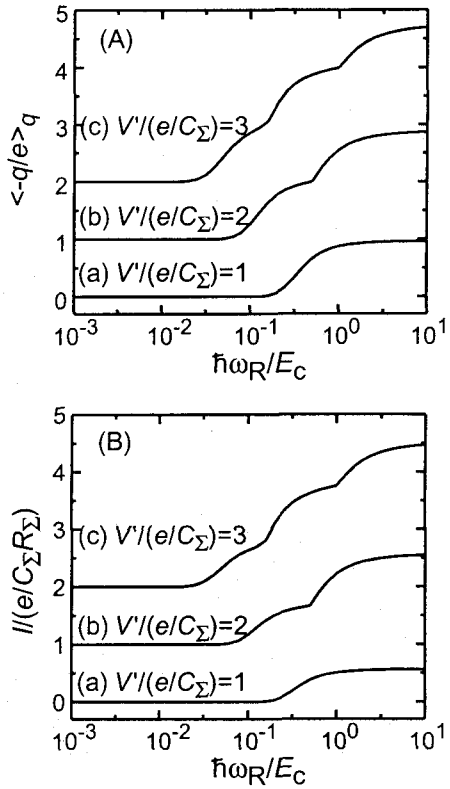


図 3.6: 図 3.5 の断面図。縦軸は見やすさのためにオフセットさせている。

と, 低インピーダンス領域では $R \simeq 0$ なのでやはり $V' = V$ であるので, デバイスの on-off 特性を見るには図 3.4 でも図 3.5 でもほとんど差がない。

図 3.5 の $V' = \text{const.}$ の面での断面図を作ったのが図 3.6 である。この図より, バイアス電圧が一定で, R_{env} を変化させるとアイランドチャージ数と電流が制御できていることが読みとれる。

浮遊容量の影響を考慮した場合

ここまでで, 配線浮遊容量の影響を無視した時, 環境インピーダンスの抵抗成分 R_{env} が単電子デバイスを制御できることを示したが, 現実のデバイスでは配線の浮遊容量を無視することはできない。浮遊容量 (環境インピーダンスの容量成分 C_{env}) は図 3.2 に示すように

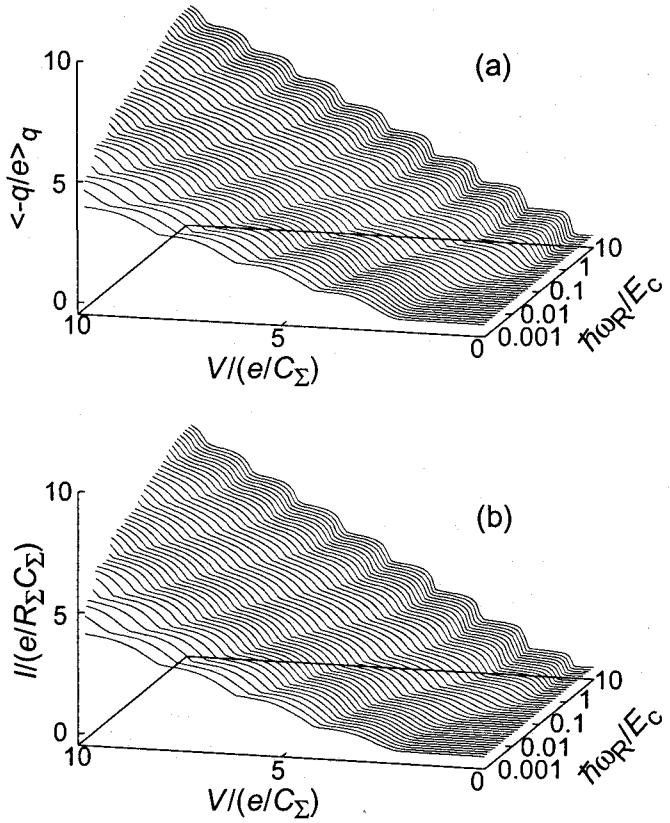


図 3.7: $C_{\rm env}/C = 1$ の時の計算結果。$C_{\rm env}$ 以外のパラメータは図 3.4 と同じである。

$R_{\rm env}$ に対して並列に入るので, 環境インピーダンスを低い方へ導く。したがって, $R_{\rm env}$ を大きくして高インピーダンス領域を実現しようとしても $C_{\rm env}$ が存在するために 低インピーダンス領域にとどまってしまうことになる。ここで, $C_{\rm env}$ を考慮した場合の数値計算を示し, 環境インピーダンス変調効果を観測するための $C_{\rm env}$ の限界値について議論する。

図 3.4 と同じパラメータで $C_{\rm env}/C = 1$ の時の計算結果を図 3.7 に示す。また, 図 3.4 と同じパラメータで $C_{\rm env}/C = 10$ の時の計算結果を図 3.8 に示す。$C_{\rm env}/C = 1$ の時には, 環境インピーダンスによる伝導特性の変調効果は見られているが, $C_{\rm env}/C = 10$ ではほとんど見られなくなっていることがわかる。それでは, $C_{\rm env}/C$ がどの程度までは 変調効果がのこるのかを見るために, $R_{\rm env}$ を高インピーダンスに止めておいて ($\hbar\omega_R/E_{\rm c} = 0.001$), $C_{\rm env}/C$ を

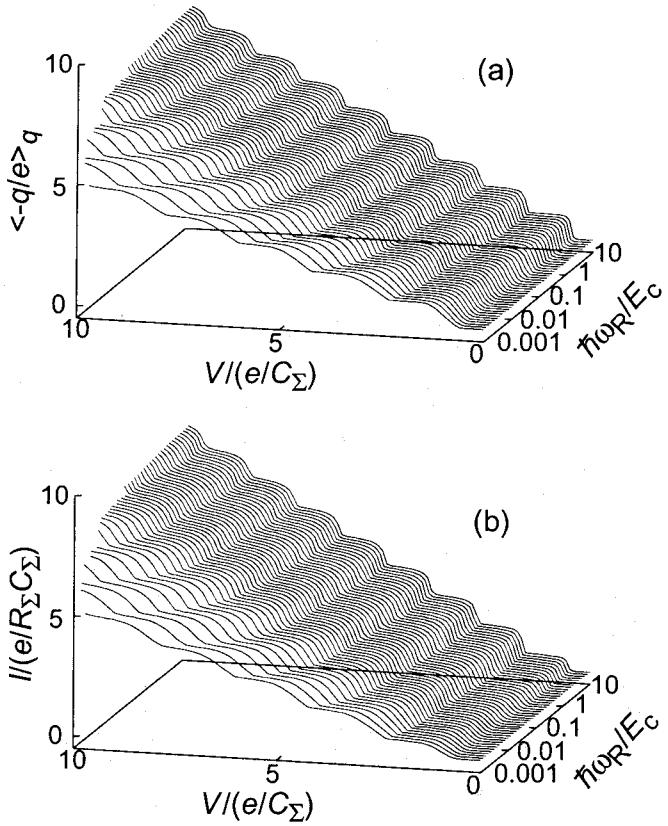


図 3.8: $C_{\rm env}/C = 10$ の時の計算結果。$C_{\rm env}$ 以外のパラメータは図 3.4 と同じである。

動かした時のアイランドチャージ数と電流の計算結果を図 3.9 に示す。徐々に変化しているため境界値を定義するのは難しいが, ぼぼ $C_{\rm env}/C \gtrsim 10$ の領域では環境インピーダンスによる変調の効果が残っているといえる。このような境界値がどのようにして決まるのかを以下に考察する。低温での, 高インピーダンス極限と低インピーダンス極限のクーロンギャップの大きさは, 一般的に, それぞれ,

$$V_{\rm c}^{\rm (H)} = \sum_{i=1}^{2} \left[{\rm i}\hbar\kappa_i^2 \frac{{\rm d}J(0)}{{\rm d}t} + U \right] / e \,, \tag{3.31}$$

$$V_{\rm c}^{\rm (L)} = \min\left\{ \frac{e}{2C_1}, \frac{e}{2C_2} \right\} \tag{3.32}$$

と書ける。この $V_{\rm c}^{\rm (H)}$ のところの $J({\rm i}t)$ に 式 (3.29) を代入して計算すると, 図 3.2 のデバイ

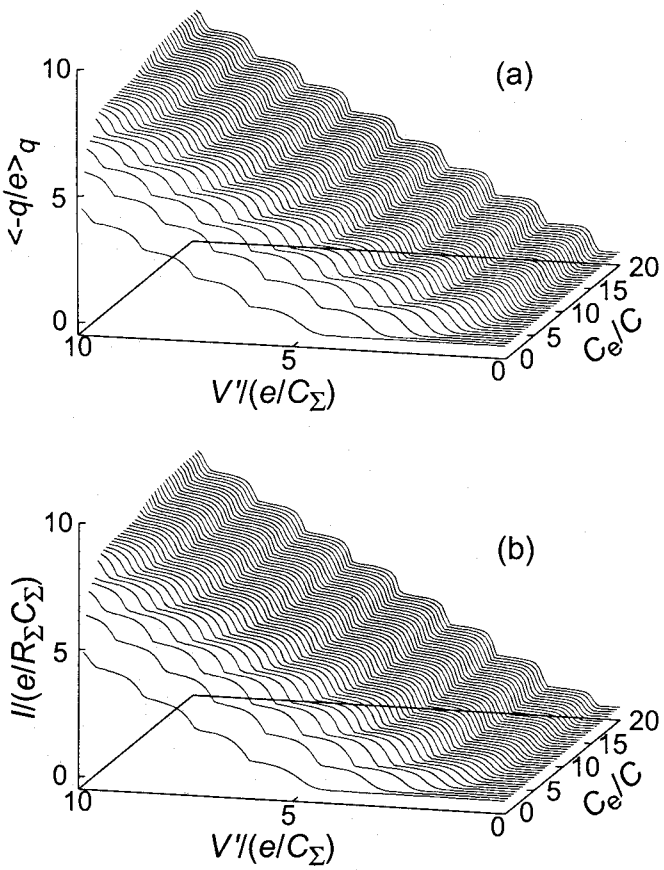


図 3.9: R_{env} を高インピーダンスに止めておいて ($\hbar\omega_R/E_{\mathrm{c}} = 0.001$), C_{env}/C を動かした時のアイランドチャージ数と電流の計算結果。R_{env}, C_{env} 以外のパラメータは図 3.4 と同じである。

スの高インピーダンス時のクーロンギャップは,

$$V_{\mathrm{c}}^{(\mathrm{H})} = \frac{e}{2C_{\mathrm{t}}} = \frac{C}{C_{\mathrm{t}}}\frac{E_{\mathrm{c}}}{e} \tag{3.33}$$

となり, 図 3.1 のデバイスの $V_{\mathrm{c}}^{(\mathrm{H})} = \frac{E_{\mathrm{c}}}{e}$ に比べると, $\frac{C}{C_{\mathrm{t}}}$ だけ小さくなることがわかる。ここで, $V_{\mathrm{c}}^{(\mathrm{H})} = V_{\mathrm{c}}^{(\mathrm{L})}$ となるところが, 環境インピーダンスによる変調効果がなくなるところであるので, その条件を求めてみると,

$$\left[\frac{C_{\mathrm{env}}}{C}\right]_{\mathrm{c}} = \max\left\{\frac{C_1}{C_2}, \frac{C_2}{C_1}\right\} \tag{3.34}$$

となることがわかる。これが環境インピーダンス制御型単電子トランジスタがその制御性を失う浮遊容量の大きさを与える。

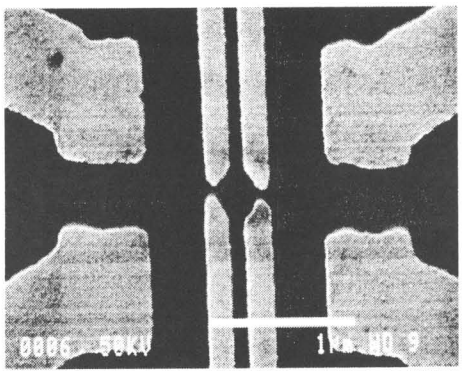


図 3.10: 環境インピーダンス変調効果を観測するために作製した試料の電子顕微鏡写真

3.3 実験結果および検討

ここまでで議論した, 環境インピーダンス変調による単電子デバイスの制御を実際に観測するために, 図 3.10 に示す試料を作製した。試料作製プロセスは第 2 章と同様なので, ここでは省略する。実験に用いた変調ドープ AlGaAs/GaAs ヘテロ基板の 2 次元電子ガスの密度と移動度は, 50 mK で, それぞれ, $n = 4.1 \times 10^{11}$ cm^{-2}, $\mu = 1.1 \times 10^5$ cm^2/Vs であった。写真の中央付近にクーロンアイランドがある。四方の大きな電極は環境インピーダンスを制御するためのものである。

このデバイスを希釈冷凍機を用いて約 30 mK に冷却し, 図 3.11(a) に模式的に示されるような測定系で伝導特性を測定した結果が図 3.11(b) である。この測定では, V_1 と V_2 はそれぞれ, -0.621 V, -0.662 V に固定している。$V_{\rm env}$ を負に大きくすることによって, 環境インピーダンスが大きく (高く) なり, 前節の数値計算で示されていたように, クーロンギャップが大きくなっていく様子が観測されている。実際の resistive な環境インピーダンス $R_{\rm env}$ が $V_{\rm env}$ のどのような関数になっているかを知るために, クーロンギャップの外側での I–V の傾きから $R_{\rm T}^{(1)} + R_{\rm T}^{(2)} + R_{\rm env}$ を見積もり, プロットしてみたのが, 図 3.12 である。

この図から, -0.4 V $\lesssim V_{\rm env} < 0$ V の範囲では $R_{\rm env}$ は 0 とみなしてよく, $R_{\rm T}^{(1)} + R_{\rm T}^{(2)} \simeq 21$ MΩ となっていることがわかる。図 3.12 から $R_{\rm T}^{(1)} + R_{\rm T}^{(2)} \simeq 21$ MΩ を引くことによって,

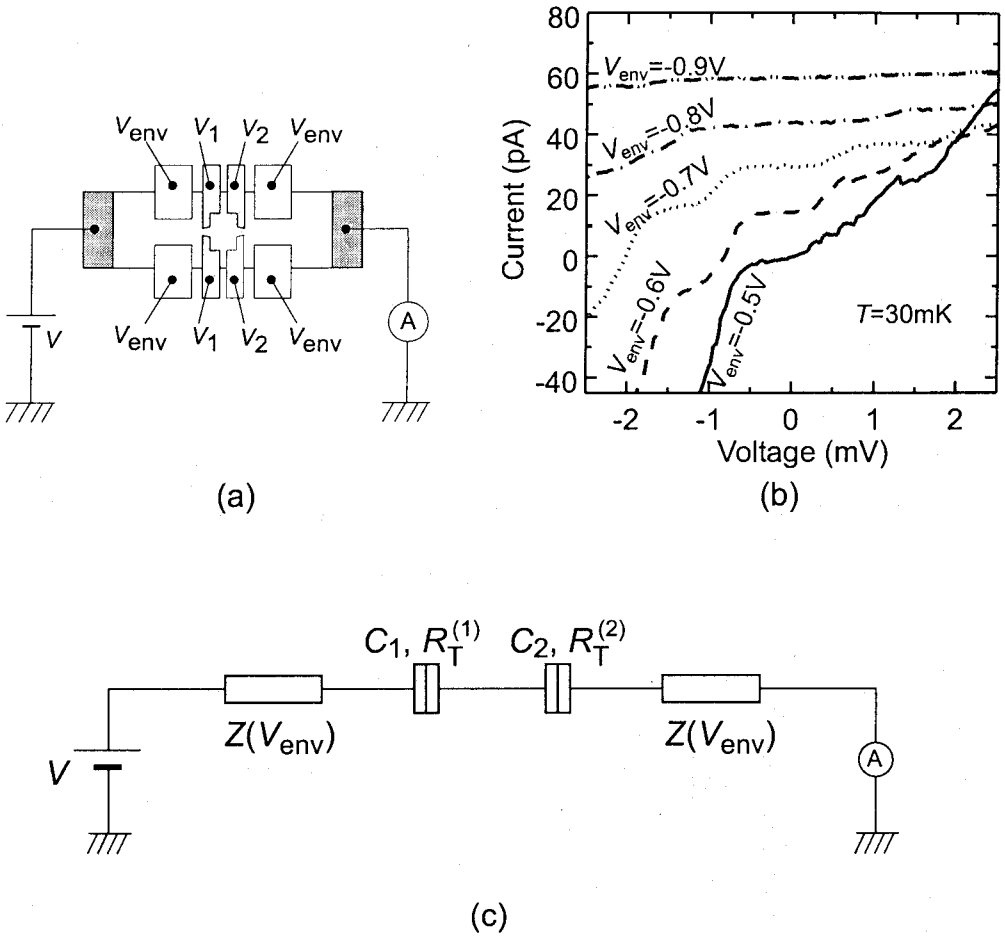


図 3.11: (a) 測定系の模式図。(b) 図 3.10 に示す試料の低温での I–V 特性。$V_1 = -0.621$ V, $V_2 = -0.662$ V とした。負の $V_{\rm env}$ を大きくすることによって環境インピーダンス ($R_{\rm env}$) を大きくすることができる。このグラフでは, 見やすさのため, 縦軸方向にオフセットしてプロットしてあるが, 実際にはすべての I–V 曲線は原点 ($V = I = 0$) を通っている。(c) 等価回路。$R_{\rm T}^{(1)}$, C_1 は V_1 の関数に, $R_{\rm T}^{(2)}$, C_2 は V_2 の関数に, Z は $V_{\rm env}$ の関数になっている。

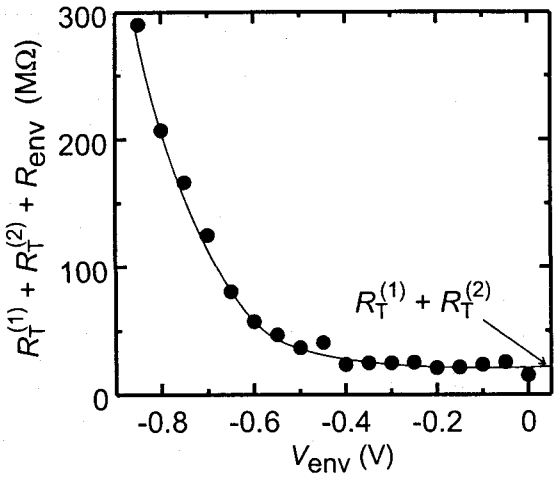


図 3.12: 図 3.11 のクーロンギャップの外側の I–V 特性の傾きからもとめた $R_{\mathrm{T}}^{(1)}+R_{\mathrm{T}}^{(2)}+R_{\mathrm{env}}$

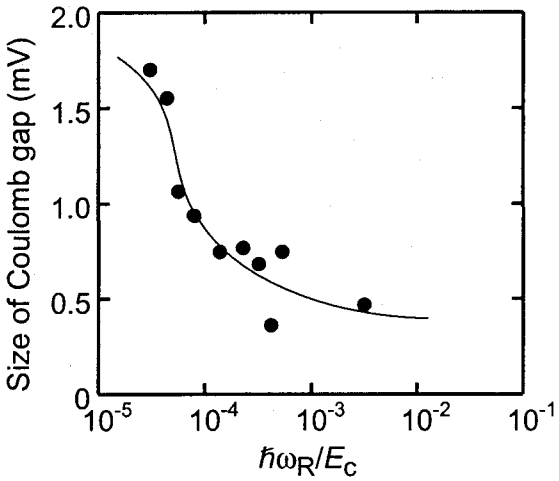


図 3.13: 図 3.11 図 3.12 の結果から求めたクーロンギャップの大きさ vs $\hbar\omega_R/E_{\mathrm{c}}$

$R_{\rm env}$ を $V_{\rm env}$ の関数として知ることができるので, クーロンギャップの大きさを $\hbar\omega_{\rm R}/E_{\rm c}$ の関数としてプロットすることができる。図 3.13 がそのようなプロットである。この図は, 数値計算の結果 (図 3.4) と直接比べられるべきものである。これらの図を比べてみると, 定性的には一致しているが, 値は異なっている。この理由は, C_1/C_2, $R_{\rm T}^{(1)}/R_{\rm q}$, $R_{\rm T}^{(2)}/R_{\rm q}$, などのパラメータを数値計算では仮定しているが, 実験では, それらのパラメータを決めることができていないためであると考えられる。さらに, 浮遊容量も考慮する必要があると思われる。

クーロンギャップの中では, 原理的には電流は 0 であるが, 実際の実験では, 有限温度の効果やコトンネリングの効果のために, わずかの電流が流れている。今回の実験ではその値は $\lesssim 1$ pA 程度であった。$R_{\rm env}$ は 高インピーダンスの場合でも 100 MΩ のオーダーなので, $R_{\rm env}$ での電圧降下は 大きくても 0.1 mV 程度である。実験で観測されたクーロンギャップの増大, 部分的にはこの電圧降下のためであると考えられるが, クーロンギャップの増大は 1 mV 程度あるので, 環境インピーダンスによる変調効果が, 主な原因であると考えられる。

3.4 3 端子構造による環境インピーダンス変調効果の確認

前説までで, 環境インピーダンス制御型単電子トランジスタ (Z-SET) を提案し, 数値計算の結果を示し, さらに Z-SET が実際に実現可能であることを実験で示した。しかし, 実験結果については, 環境インピーダンスを変調するためにゲート電極の電圧を変化させると, クーロンアイロンドにまでその影響がおよび, その結果として, クーロンギャップが変化しているのではないかという疑問がある。本当に環境インピーダンス変調の効果が実験で観測されていることを確認するために, この節では Z-SET の クーロンアイロンドに容量結合のゲート電極をつけた構造について検討を加える。Z-SET は そのようなゲートがなくても SET の制御ができることが特長のひとつなのだが, この節では, あえてゲート電極を有する Z-SET について検討する。さらに, 3 端子構造にすることによって, 非対称環境インピーダンスの効果についても検討できるようになったので, それについてもまとめる。

3.4.1 数値計算

図 3.14 に, アイランドに容量結合のゲート電極を有した構造の模式図を示す。簡単のため, 環境インピーダンスについては, inductive なもののみを考えることにするが, 前節の議論よ

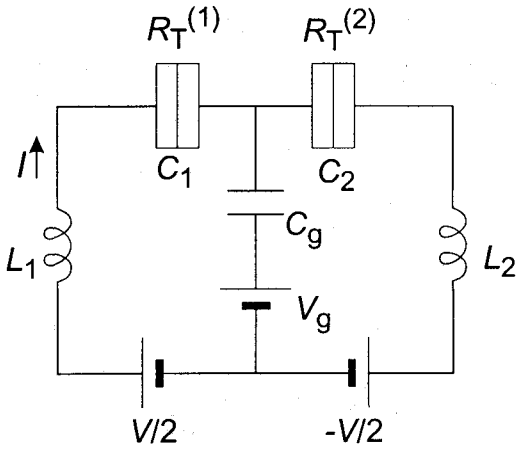


図 3.14: 3 端子構造の 2 重トンネル接合の模式図。環境インピーダンスはインダクティブなもののみを考えることにした。

り, resistive な環境インピーダンスの場合でも定性的には同じ結果になる。このような系の伝導特性を計算するには, 前節の理論 [HIN95] を拡張する必要がある。基礎的な理論の拡張は岩渕先生の仕事なので, 文献 [岩渕 98] を挙げるだけにし, ここでは, 数値計算の結果のみを議論することにする。

図 3.15 に, 図 3.14 に示される 3 端子構造の I–V 特性を自己無撞着に数値計算した結果を示す。図 3.15(a) では, 低インピーダンス ($\hbar\omega_L/E_c = 10$, $\omega_L \equiv 1/\sqrt{(L_1+L_2)C}$, $C \equiv C_1C_2/(C_1+C_2)$) を仮定しているので, 良く知られたクーロンダイヤモンドとクーロンステアケースが再現されている。しかし, 図 3.15(b) では, 高インピーダンス ($\hbar\omega_L/E_c = 0.001$) を仮定しているので, クーロンダイヤモンドの形状が変化していることがわかる。前節の 2 端子構造の時には, 高インピーダンスにするとクーロンギャップが大きくなるということしか分からなかったが, ここでは, 高インピーダンスになると, クーロンギャップが完全には閉じなくなるという特徴があることがわかる。この特徴を用いれば, 可変環境インピーダンスの効果が実験で観測されているのかどうかを確認することができる。

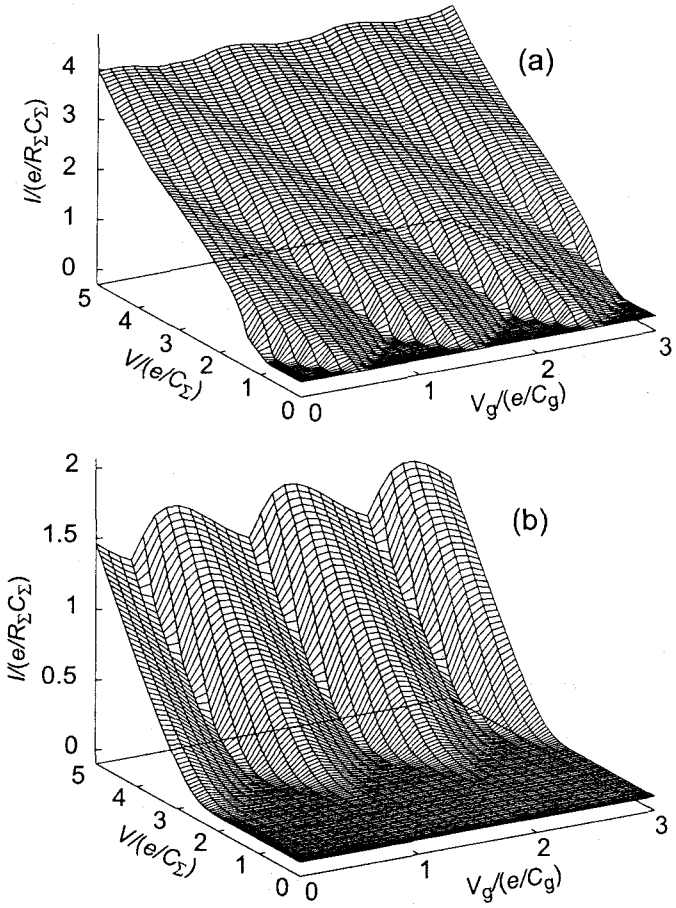


図 3.15: 図 3.14 に示される 3 端子構造の I–V 特性を自己無撞着に数値計算した結果。$U/(k_{\mathrm{B}}T) = 50$, C_1:C_2:$C_{\mathrm{g}} = 1 : 2 : 2$, $R_{\mathrm{T}}^{(1)}/R_{\mathrm{T}}^{(2)} = 10$ とした。環境インピーダンスについては, (a) では低インピーダンス ($\hbar\omega_L/E_{\mathrm{c}} = 10$), (b) では高インピーダンス ($\hbar\omega_L/E_{\mathrm{c}} = 0.001$) が仮定されている。ここで, $\omega_L \equiv 1/\sqrt{(L_1+L_2)C}$, $C \equiv C_1C_2/(C_1+C_2)$, $E_{\mathrm{c}} \equiv e^2/(2C)$ である。

3.4.2 実験

実際にそのような実験をするために, 図 3.16 に示すようなデバイスを作製した。V_{env} のゲートで環境インピーダンスを制御するのは前節と同じであるが, ここでは V_{MG1} と V_{MG2} のゲートがクーロンアイロンドに容量的に結合しているところが異なっている。

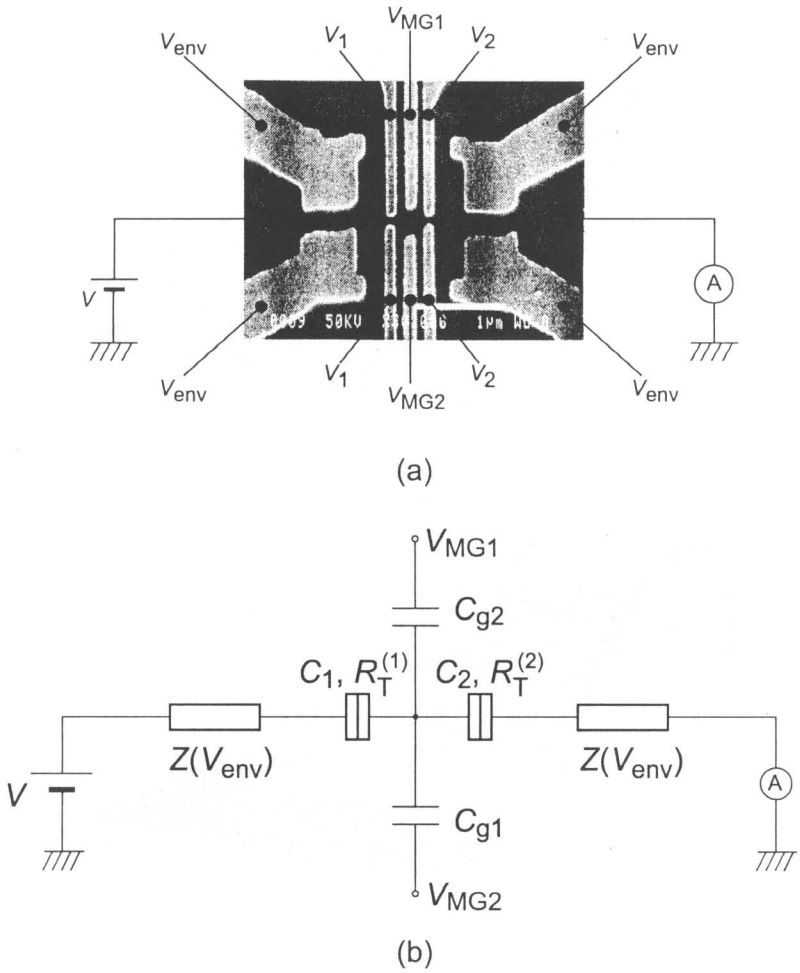


図 3.16: (a) クーロンダイヤモンドを観測するための, 容量結合したゲート電極をもった, 環境インピーダンス制御型単電子トランジスタの電子顕微鏡写真。(b) 等価回路。$R_T^{(1)}$, C_1 は V_1 の関数に, $R_T^{(2)}$, C_2 は V_2 の関数に, Z は V_{env} の関数になっている。

図 3.16 のデバイスの低温 (30 mK) での伝導特性の測定結果が図 3.17 と図 3.18 である。

図 3.17(b) と図 3.18(b) を比べると, 前節での結果と同じように, クーロンギャップのサイズが高インピーダンスでは大きくなっていることは分かる。しかし, ここで重要なことは, 数値計算 (図 3.15) で示したように, 高環境インピーダンスになると, クーロンダイヤモンドが

閉じなくなる現象が実際に観測されていることである (図 3.17 と図 3.18 の中に矢印で示した部分)。

HEMT 基板の表面に作製した金属ショットキーゲートは, リード線のキャパシタンスを増大させるので, このような方法で可変環境インピーダンスを (特に, 高環境インピーダンスを) 実現できるかどうか実験を始めた当初は疑問であったが, ここでの実験結果は, 可変環境インピーダンスによる単電子トランジスタの制御が, 実際にこのデバイスで起こっていることを示している。

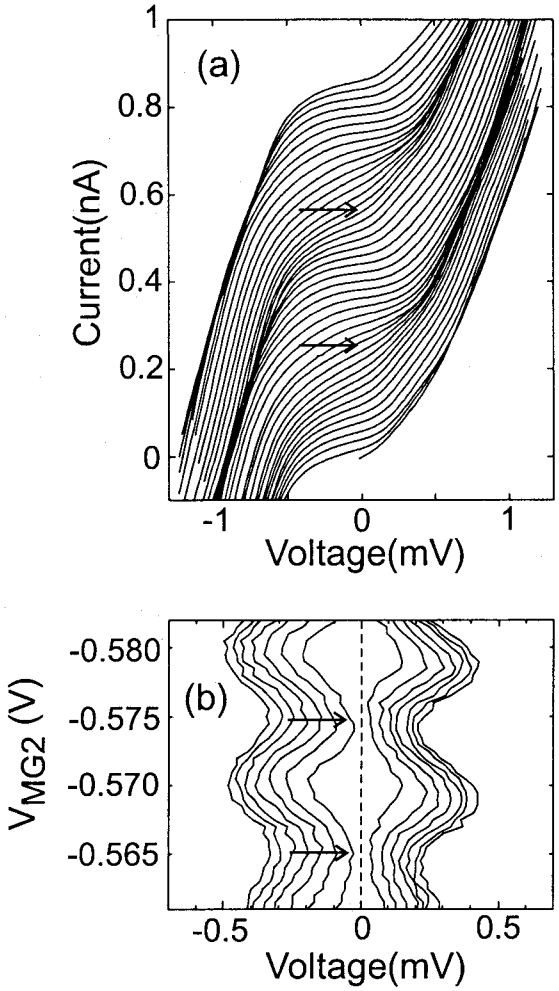


図 3.17: 低環境インピーダンスの時のクーロンダイヤモンド。(a) $V_{\mathrm{env}} = -0.4$ V, $V_1 = -0.771$ V, $V_2 = -0.759$ V, $V_{\mathrm{MG1}} = -0.550$ V に固定しておき, 様々な V_{MG2} に対して, I–V 特性を測定したもの。V_{MG2} は, -0.56 V から -0.583 V まで 0.5 mV きざみで動かしている。また, 結果は縦方向にオフセットしてプロットしてある。(b) (a) のデータから作成した V_{MG2}-V 平面での $|I|$ の等高線プロット。$|I| = 10, 20, 30, \cdots, 70$ pA の等高線を表示している。

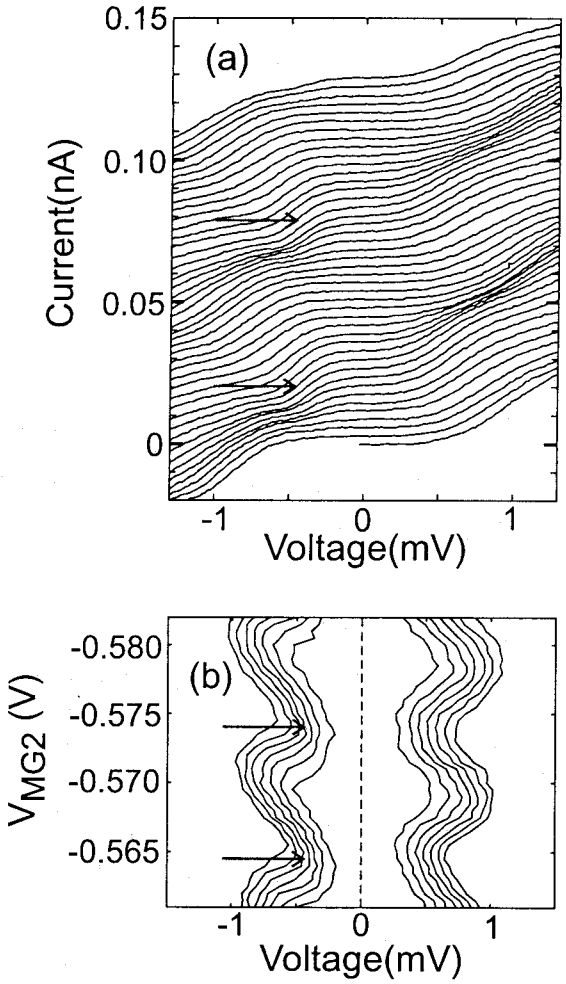


図 3.18: 高環境インピーダンスの時のクーロンダイヤモンド。(a) $V_{\mathrm{env}} = -0.68$ V, $V_1 = -0.771$ V, $V_2 = -0.759$ V, $V_{\mathrm{MG1}} = -0.550$ V に固定しておき, 様々な V_{MG2} に対して, I–V 特性を測定したもの。V_{MG2} は, -0.56 V から -0.583 V まで 0.5 mV きざみで動かしている。また, 結果は縦方向にオフセットしてプロットしてある。(b) (a) のデータから作成した V_{MG2}-V 平面での $|I|$ の等高線プロット。$|I| = 2, 4, 6, \cdots, 14$ pA の等高線を表示している。

3.4.3 非対称環境インピーダンスの効果

ここまでで, 図 3.14 に示した 3 端子構造について検討してきたが, この構造では, 左右の環境インピーダンスが非対称, すなわち, 一方が高インピーダンスで他方が低インピーダンスという情況について, 数値的に解析することができるので, ここでは, そのような非対称環境インピーダンスの効果について検討したい。そのためには, トンネル接合のパラメータ ($R_{\mathrm{T}}^{(1)}$, $R_{\mathrm{T}}^{(2)}$, C_1, C_2) については, 対称にしておく必要がある。でないと, 得られた結果の起原がわからなくなるからである。まずは, そのような対称なトンネル接合で対称な低環境インピーダンスのときの I-V 特性の計算結果が図 3.19(a) である。ここでは, 低環境インピーダンス ($\hbar\omega_{L1}/E_{\mathrm{c}} = \hbar\omega_{L2}/E_{\mathrm{c}} = 10$) なので, よく知られたクーロンダイヤモンドが再現されている。また, トンネル接合のパラメータが対称 ($R_{\mathrm{T}}^{(1)}/R_{\mathrm{T}}^{(2)}/ = C_1/C_2 = 1$) なので, クーロンステアケースは見えていない。図 3.19(b) には同時に計算された電極電荷のゆらぎの大きさの期待値 ($\langle(Q_i - \langle Q_i\rangle)^2\rangle$) とアイランドチャージの期待値 ($\langle q/e\rangle$) を示している。低環境インピーダンスのときには, アイランドチャージ q のゆらぎは低く抑えられているが, その他の電極チャージ Q_i ($i = 1, 2, 3$) は大きく揺らいでいることがわかる。このような電極電荷の大きな揺らぎは低インピーダンス環境の特色である。比較のため, 低環境インピーダンスでトンネル接合を非対称 ($R_{\mathrm{T}}^{(1)}/R_{\mathrm{T}}^{(2)}/ = C_1/C_2 = 10$) にした時の計算結果が図 3.20 である。よく知られているクーロンステアケースが再現できている。図 3.20(b) では, ステアケースのプラトーからプラトーに移り変わるときには (アイランドチャージの数が移り変わるときには), アイランドチャージ q のゆらぎも少し大きくなっている様子が読み取れる。仮定している温度は十分低いので, これらの電荷の揺らぎは, 温度のために起こっているのではなくて, 量子力学的な不確定性によるものである。これらの電荷の揺らぎについては, 定性的にはよく議論されるが, 具体的な値を示している文献が見付からないので, 図が多くなって冗長ではあるが, ここに示しておきたい。

トンネル接合については図 3.19 と同じパラメータを使い, 環境インピーダンスを対称に高くしたとき ($\hbar\omega_{L1}/E_{\mathrm{c}} = \hbar\omega_{L2}/E_{\mathrm{c}} = 0.001$) の計算結果が図 3.21 である。図 3.21(a) を見ると, これまでの議論のように, クーロンギャップが大きくなり, さらに, クーロンダイヤモンドが閉じないという特徴が再現されている。また, 図 3.21(b) から, 高インピーダンス環境のときには, アイランドチャージ q のみでなく, 全ての電極チャージ Q_i ($i = 1, 2, 3$) のゆらぎが抑えられているのが分かる。これが高インピーダンス環境の特色である。しかし, 図

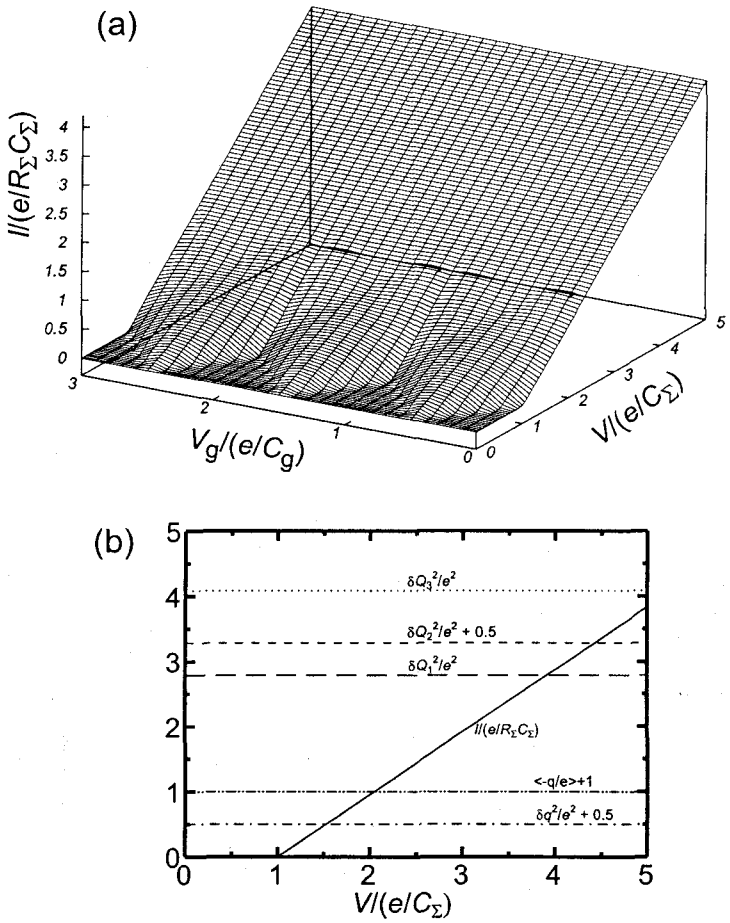


図 3.19: (a) 対称低環境インピーダンスの時のクーロンダイヤモンド。トンネル接合のパラメータも対称にしてある。$\hbar\omega_{L1}/E_c = 10$, $\hbar\omega_{L2}/E_c = 10$, $U/k_BT = 50$, $C_1 : C_2 : C_g = 1 : 1 : 1$, $R_T^{(1)}/R_T^{(2)} = 1$, $Q_0/e = 0$ とした。(b) 同時に計算した電極チャージの揺らぎの大きさとアイランドチャージの期待値。

3.19(a) と図 3.21(a) を見ると, これらの 2 つのクーロンダイヤモンドは位相は同じである。すなわち, $V_g = 0$ のところが最も広いことがわかる。

次に, トンネル接合のパラメータは同じく対称のままで ($R_T^{(1)}/R_T^{(2)}/ = C_1/C_2 = 1$), 環境インピーダンスを一方は高インピーダンスに ($\hbar\omega_{L1}/E_c = 0.001$), 他方を低インピーダンスに ($\hbar\omega_{L2}/E_c = 10$) した時の数値計算の結果が図 3.22 である。クーロンギャップの大きさと

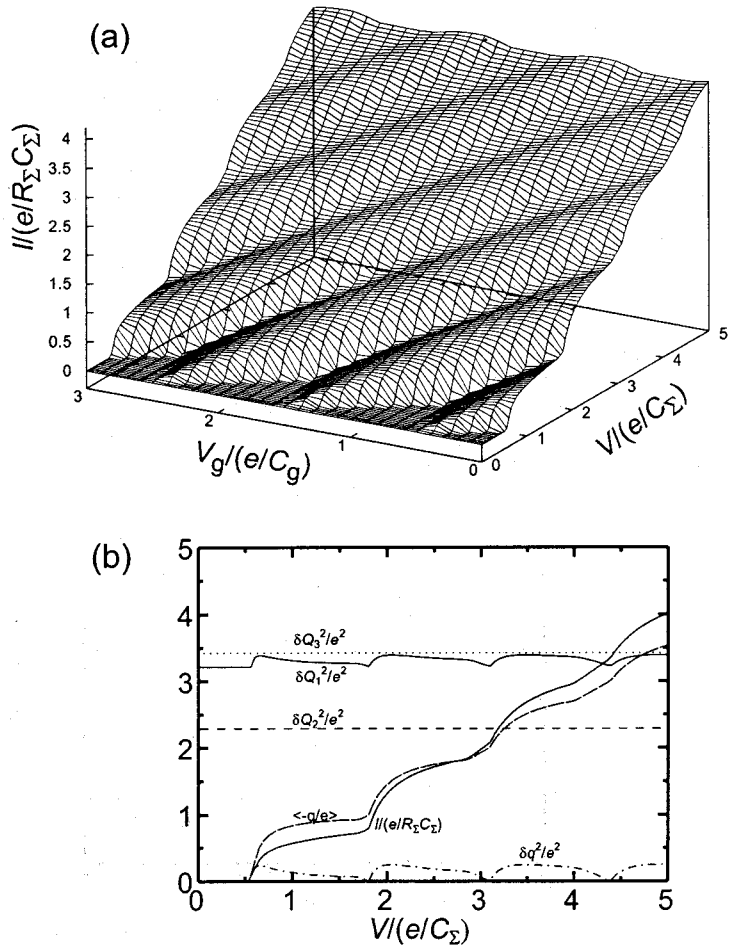


図 3.20: 対称低環境インピーダンスの時のクーロンダイヤモンド。トンネル接合のパラメータを非対称にしてある。$\hbar\omega_{L1}/E_c = 0.001$, $\hbar\omega_{L2}/E_c = 0.001$, $U/k_BT = 50$, $C_1 : C_2 : C_g = 10 : 1 : 1$, $R_T^{(1)}/R_T^{(2)} = 10$, $Q_0/e = 0$ とした。(b) 同時に計算した電極チャージの揺らぎの大きさとアイランドチャージの期待値。

しては, 対称高インピーダンス (図 3.21) のときと対称低インピーダンス (図 3.19) のときの中間的な大きさになっているだけだが, ここで興味深いのは, クーロンダイヤモンドの位相がずれていることである。すなわち, $V_g = 0$ のところで, クーロンダイヤモンドの幅が小さくなっている。もちろん, V_g 軸に沿ったクーロンダイヤモンドの周期は変わっていない。このように, クーロンダイヤモンドの位相がずれるのは, クーロンアイランドにオフセットチャー

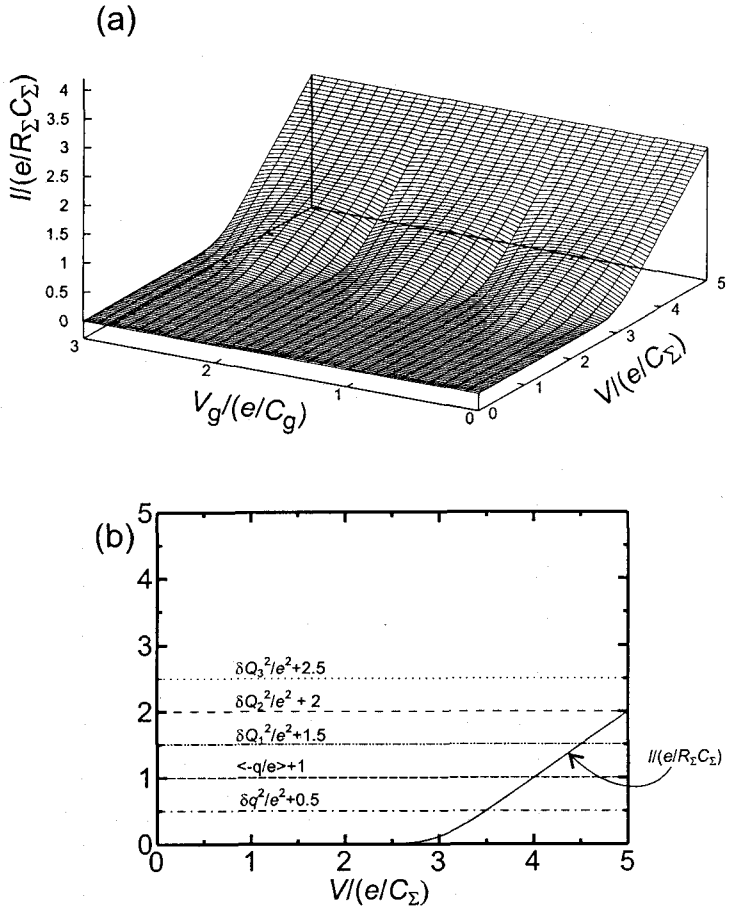


図 3.21: 対称高環境インピーダンスの時のクーロンダイヤモンド。トンネル接合のパラメータも対称にしてある。$\hbar\omega_{L1}/E_c = 0.001$, $\hbar\omega_{L2}/E_c = 0.001$, $U/k_BT = 50$, $C_1 : C_2 : C_g = 1 : 1 : 1$, $R_T^{(1)}/R_T^{(2)} = 1$, $Q_0/e = 0$ とした。(b) 同時に計算した電極チャージの揺らぎの大きさとアイランドチャージの期待値。

ジがある場合によく知られた現象である。しかし, この計算ではオフセットチャージは 0 として計算している。すなわち, 「非対称環境インピーダンスには, アイランドのオフセットチャージと似たような効果がある。」と推定できる。そこで, 図 3.22(b) を見ると, クーロンギャップの外側 ($V/(e/C_\Sigma) > 1$) では, たしかに $\langle q/e \rangle \neq 0$ となっている様子が分かる。本来, オフセットチャージは, クーロンギャップの外側に限らず常に存在するものなので, この

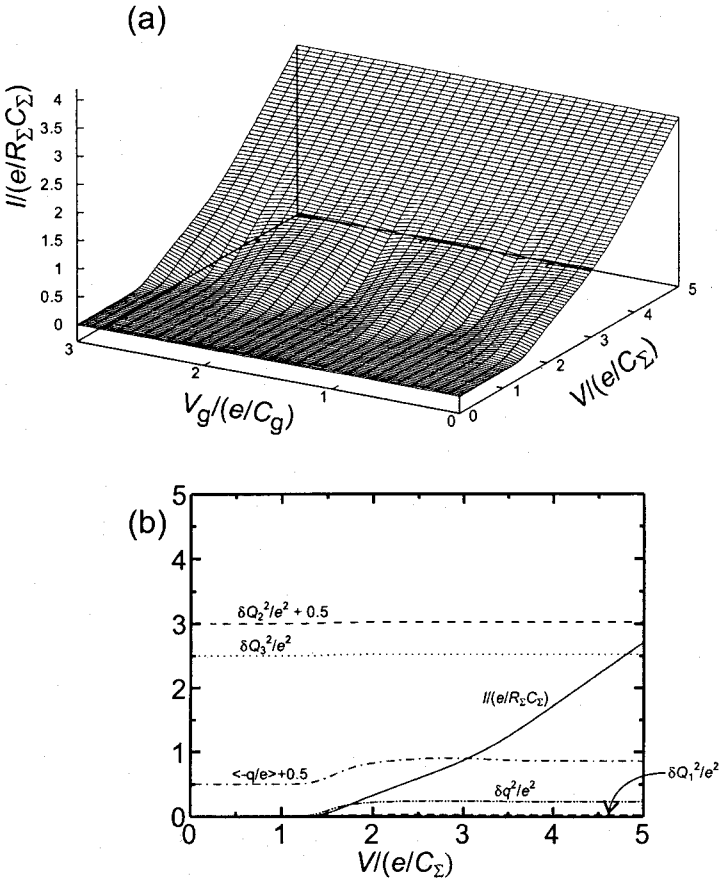


図 3.22: 非対称環境インピーダンスの時のクーロンダイヤモンド。トンネル接合のパラメータは対称にしてある。$\hbar\omega_{L1}/E_c = 0.001$, $\hbar\omega_{L2}/E_c = 10$, $U/k_BT = 50$, $C_1 : C_2 : C_g = 1 : 1 : 1$, $R_T^{(1)}/R_T^{(2)} = 1$, $Q_0/e = 0$ とした。(b) 同時に計算した電極チャージの揺らぎの大きさとアイランドチャージの期待値。

非対称環境インピーダンスのために出現したアイランドチャージとは起源が異なっているのはもちろんである。しかし, 非対称環境インピーダンスを用いると, クーロンダイヤモンドの位相をずらすことができるというのは, 結果的にはオフセットチャージと同じ効果があるといえるので, この効果を利用すれば, C-SET の動作点をずらしてしまうオフセットチャージをキャンセルできる可能性があり, 極めて興味深い。この非対称環境インピーダンスの効果を実験で確かめるには, 2 つのトンネル接合のパラメータ ($R_T^{(1)}$, $R_T^{(2)}$, C_1, C_2) を正確に同

じにする必要があるため, 極めて困難であり, 将来の課題として残されている。

3.5 結言

この章では, 環境インピーダンスを変調することにより, 単電子トランジスタを制御する手法を提案し, 理論, 数値計算, 実験によって検討を加えた。この制御法を用いれば, 単電子トランジスタのアイランドに容量的に結合したゲート電極を必要としないため, 単電子トランジスタの高温での動作には有利である。

理論 (数値計算) では, 環境インピーダンスを変化することにより, 単電子トランジスタのアイランドのチャージを e のオーダーで制御し, トランジスタを on-off させることができることを示した。

実験では, 変調ドープ AlGaAs/GaAs ヘテロ基板中の 2 次元電子ガスを結晶表面の金属ゲートで空乏化する手法を用いて, Z-SET を実現し, 実際に環境インピーダンスを変化することによって, クーロンギャップが変化することを確認した。また, この観測された現象の起源を確認するために, 容量結合したゲート電極をもつ 3 端子構造において, 環境インピーダンスを変化させたときのクーロンダイヤモンドの形状の変化を観測した。

さらに, 非対称環境インピーダンスにすると, アイランドのオフセットチャージと同様の効果があることを, 数値計算で示した。この現象を利用すれば, C-SET の動作点をずらしてしまうオフセットチャージの影響をキャンセルできる可能性があり, 非常に興味深い。

第4章　結論

単電子トランジスタを制御する方法としては, 現在主として使われている容量結合したゲートを用いる制御法の他にも, 抵抗結合したゲートを用いるもの, および環境インピーダンスの変調を利用するものがあることを述べ, 理論 (数値計算) と実験の両方から検討を加え, 以下の結論を得た。

第2章では, 抵抗結合型単電子トランジスタについて, オーソドクス理論に基づく数値解析と実験を行った。R-SET は, その理論的な提案以来実現されてこなかったが, 本研究により, 以下の結論を得た。

- ゲート抵抗をトンネル抵抗にすることによって, 当初提案されていた特性に近い特性をもつ R-SET の実現が可能である。
- そのようなデバイスは, ゲート抵抗の大きさによっては, C-SET の様な特徴も示す。すなわち, C-SET と R-SET の両方の特徴をもつデバイスである。
- そのようにして実現された R-SET では, 当初予測されていた「トランジスタの特性がオフセットチャージの影響を受けない」という長所が失われているが, 電圧ゲインが大きいという長所が残っている。

第3章では, 単電子トランジスタの新しい制御法として, 環境インピーダンス制御型の単電子トランジスタを提案し, セルフコンシステントな数値計算と実験を行った結果以下の結論を得た。

- 現在広く用いられている C-SET のように, アイランドに容量的に結合したゲート電極を用いなくても, 環境インピーダンスを変調することにより単電子トランジスタのアイランドチャージの数を制御したり, on-off を制御したりできることを数値計算で示した。

- 浮遊容量のため, 高環境インピーダンスを実現するのは難しいが, 浮遊容量がどの程度大きくなると, 環境インピーダンスによる SET の制御が不可能になるかについて検討し, その限界を明らかにした。
- 実際にデバイスを試作し, 環境インピーダンスを変調することにより単電子トランジスタの特性が変化することを実験的にも示した。
- 非対称環境インピーダンスは, アイランドのオフセットチャージと同様の効果があり, クーロンダイヤモンドの位相をずらすことを数値的に示した。この現象を利用すると, C-SET の動作点をずらすオフセットチャージの影響をキャンセルできる可能性がある。

参考文献

[BCM+97] Marc Bockrath, David H. Cobden, Paul L. McEuen, Nasreen G. Chopra, A. Zattl, Andreas Thess, and R. E. Smalley. Single-electron transport in ropes of carbon nanotubes. *Science*, Vol. 275, pp. 1922–1925, March 28 1997.

[COK98] Sara M. Cronenwett, Tjerk H. Oosterkamp, and Leo P. Kouwenhoven. A tunable kondo effect in quantum dots. *Science*, Vol. 281, pp. 540–544, July 1998.

[CSC91] A. N. Cleland, J. M. Schmidt, and John Clarke. Influence of the environment on the coulomb blockade in submicrometer normal-metal tunnel junctions. *Phys. Rev. B*, Vol. 45, No. 6, pp. 2950–2961, February 1991.

[DCK+91] P. Delsing, T. Claeson, G. S. Kazacha, L. S. Kuzmin, and K. K. Likharev. 1-d array implementation of the resistively-coupled single-electron transistor. *IEEE Tran. Mag.*, Vol. 27, pp. 2581–2584, 1991.

[DEGI90] M. H. Devoret, D. Esteve, H. Grabert, and G. L. Ingold. Effict of the electromagnetic environment on the coulomb blockade in ultrasmall tunnel junctions. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 64, No. 15, pp. 1824–1827, April 1990.

[EGN+84] F. Emoto, K. Gamo, S. Namba, S. Samoto, and R. Shimizu. 8 nm wide line fabrication in pmma on si wafers by electron beam exposure. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 24, No. 10, pp. L809–L811, October 1984.

[ELR91] D. M. Eigler, C. P. Lutz, and W. E. Rudger. An atomic switch realized with the scanning tunnelling microscope. *Nature*, Vol. 352, pp. 600–603, August 1991.

[ES90] D. M. Eigler and E. K. Shveizer. Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, Vol. 344, pp. 524–526, April 1990.

[FAT+02] Toshimasa Fujisawa, David Guy Austing, Yasuhiro Tokura, Yoshiro Hirayama, and Seigo Tarucha. Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms. *Nature*, Vol. 419, pp. 278–281, September 2002.

[GD92] Hermann Grabert and Michel H. Devoret, editors. *Single Charge Tunneling –Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures.* NATO ASI Series. Plenum Press, 1992.

[GGSM+98] D. Goldhaber-Gordon, Hadas Shtrikman, D. Mahalu, David Abusch-Magder, u. Meirav, and M. A. Kastner. Kondo effect in a single-electron transistor. *Nature*, Vol. 391, pp. 156–159, January 1998.

[GZ68] I. Giaever and H. R. Zeller. Superconductivity of small tin particles measured by tunneling. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 20, No. 26, pp. 1504–1507, June 1968.

[HIN95] Hitoshi Higurashi, Shuichi Iwabuchi, and Yosuke Nagaoka. Coulomb blockade and current-voltage characteristics of ultrasmall double tunnel junctions with external circuits. *Phys. Rev. B*, Vol. 51, pp. 2387–2398, 1995.

[HIS+96] Toshiro Hiramoto, Hiroki Ishikuro, Kenichi Saito, Tomoyuki Fujii, Takuya Saraya, Gen Hashiguchi, and Toshiaki Ikoma. Fabrication of si nanostructures for single-electron device applications by anisotropic etching. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, No. 12B, pp. 6664–6667, December 1996.

[IFS+96] H. Ishikuro, T. Fujii, T. Saraya, G. Hashiguchi, T. Hiramoto, and T. Ikoma. Coulomb blockade oscillations at room temperature in a si quantum wire metal-oxide-semiconductor field-effect transistor fabricated by snisotropic etching on a silicon-on-insulator substrate. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 25, pp. 3585–3587, June 1996.

[IG91] G. L. Ingold and H. Grabert. Finite-temperature current-voltage characteristics of ultrasmall tunnel junctions. *Europhysics Lett.*, Vol. 14, pp. 371–376, 1991.

[IHN93] Suichi Iwabuchi, Hitoshi Higurashi, and Yosuke Nagaoka. Effect of electronic states of electrodes on coulomb blockade. In *Proc. 4th Int. Symp. on Foundations of Quantum Mechanics: JJAP Series*, Vol. 9, pp. 126–129, 1993.

[KJvdVH91] L. P. Kouwenhoven, A. T. Johnson, N. C. van der Vaart, and C. J. P. M. Harmans. Quantized current in a quantum-dot turnstile using oscillating tunnel barriers. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 67, No. 12, pp. 1626–1629, 1991.

[Kor98] A. N. Korotkov. Theoretical analysis of the resistively-coupled single-electron transistor. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, pp. 3226–3228, 1998.

[KP81] Brian W. Kernighan and P. J. Plauger. ソフトウエア作法 (木村泉訳). 共立出版, 1981.

[Kra91] B. Kramer, editor. *Quantum Coherence in Mesoscopic Systems.* NATO ASI Series. Plenum Press, 1991.

[Kub62] Ryogo Kubo. Electronic properties of small metallic particles. *Phys. Lett.*, Vol. 1, No. 2, pp. 49–50, April 1962.

[Lik87] K. K. Likharev. Single-electron transistors: electrostatic analogs of the dc squids. *IEEE Tran. Mag.*, Vol. 23, No. 2, pp. 1142–1145, March 1987.

[Lik88] K. K. Likharev. Correlated discrete transfer of single electrons in ultrasmall tunnel junctions. *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 32, No. 1, pp. 144–158, January 1988.

[LJ69] John Lambe and R. C. Jaklevic. Charge-quantization studies using a tunnel capacitor. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 22, No. 25, pp. 1371–1375, June 1969.

[LT93] Craig S. Lent and P. Douglas Tougaw. Lines of interacting quantum-dot cells: A binary wire. *J. Appl. Phys.*, Vol. 74, No. 10, pp. 6227–6233, November 1993.

[PFHF93] D. Popović, C. J. B. Ford, J. M. Hong, and A. B. Fowler. Effect of quantum fluctuations of the environment on the coulomb blockade in a single barrier. *Phys. Rev. B*, Vol. 48, No. 16, pp. 12349–12352, October 1993.

[PTVF92] William H. Press, Sau A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in Fortran, The Art of Scientific Computing, Second Edition.* Cambridge University Press, 1992.

[Put96] Anton F P Van Putten. *Electronic Measurement Systems, Theory and Practice.* Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, second edition, 1996.

[REA+91] M. J. Rooks, C. C. Eugster, J. A. Del Alamo, G. L. Snider, and E. L. Hu. Split-gate electron waveguide fabrication using multilayer poly(methylmethacrylate). *J. Vac. Sci. Tech. B*, Vol. 9, No. 6, pp. 2856–2860, 1991.

[SIiK95] Yoshihiro Shimazu, Seiichiro Ikehata, and Sun ichi Kobayashi. Dependence of coulomb blockade in ultrasmall single tunnel junctions on tunnel resistance. *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 64, No. 8, pp. 2738–2741, August 1995.

[TAH96] S. Tarucha, D. G. Austing, and T. Honda. Shell filling and spin effects in a few electron quantum dot. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 77, No. 17, pp. 3613–3616, October 1996.

[TDD+97] S. T. Tans, M. H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R. E. Smalley, L. J. Geerligs, and C. Dekker. Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires. *Nature*, Vol. 386, pp. 474–477, April 1997.

[TL94] P. Douglas Tougaw and Craig S. Lent. Logical devices implemented using quantum cellular automata. *J. Appl. Phys.*, Vol. 75, No. 3, pp. 1818–1825, February 1994.

[TLP93] P. Douglas Tougaw, Craig S. Lent, and Wolfgang Porod. Bistable saturation in coupled quantum-dot cells. *J. Appl. Phys.*, Vol. 74, No. 5, pp. 3558–3566, September 1993.

[vWvHB+88] B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel, and C. T. Foxon. Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 60, No. 9, pp. 848–850, 1988.

[WIH+98] Fujio Wakaya, Shuichi Iwabuchi, Hitoshi Higurashi, Yosuke Nagaoka, and Kenji Gamo. Single electron tunneling device controlled by environmental impedance modulation. *Solid-State Electronics*, Vol. 42, No. 7–8, pp. 1401–1405, 1998.

[WIH+99a] F. Wakaya, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo. Effects of asymmetric environment on the island charge state of single-electron transistors. *Microelectronic Engineering*, Vol. 47, pp. 193–195, 1999.

[WIH+99b] Fujio Wakaya, Shuichi Iwabuchi, Hitoshi Higurashi, Yosuke Nagaoka, and Kenji Gamo. Possible control method for single-electron tunneling based on environmental-impedance modulation. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 1, pp. 135–137, 1999.

[WKG03] F. Wakaya, K. Katayama, and K. Gamo. Contact resistance of multiwall carbon nanotubes. *to be published in Microelectric Engineering*, 2003.

[WKIG99] Fujio Wakaya, Kazuki Kitamura, Shuichi Iwabuchi, and Kenji Gamo. Transport properties of a resistively-coupled single-electron transistor. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 4B, pp. 2470–2472, 1999.

[WMN+00] F. Wakaya, S. Mandai, S. Nakamichi, S. Iwabuchi, and K. Gamo. Capacitively- and resistively-coupled single-electron transistor. *MIcroelectronic Engineering*, Vol. 53, pp. 195–198, 2000.

[WNG+00] Fujio Wakaya, Shinya Nakamichi, Kenji Gamo, Shunji Manda, and Shuichi Iwabuchi. Resistively coupled single-electron transistor using tunnel gate resistor. *Superlattices and Microstructures*, Vol. 27, No. 5/6, pp. 603–606, 2000.

[WYF+99] F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Furuichi, H. Higurashi, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo. Single-electron transistor controlled by environmental impedance: Effects of capacitive environmental impedance. *Microelectronic Engineering*, Vol. 46, pp. 153–156, 1999.

[WYH+98] Fujio Wakaya, Fumiyoshi Yoshioka, Hitoshi Higurashi, Shuichi Iwabuchi, Yosuke Nagaoka, and Kenji Gamo. Controllability of single electron tunneling and charge in coulomb diamond caused by environmental impedance modulation'. In *Proceedings of 2nd International Workshop 'Physics and Modeling of Devices based on Low-Dimensional Structures'*, pp. 88–92, Aizu, Japan, March 12–13 1998.

[WYH+99] Fujio Wakaya, Fumiyoshi Yoshioka, Hitoshi Higurashi, Shuichi Iwabuchi, Yosuke Nagaoka, and Kenji Gamo. Control of single-electron device using environmental impedance modulation. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 5A, pp. 2812–2815, 1999.

[WYI+98] F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo. Single-electron tunneling device with variable environmental impedance. *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 13, pp. A107–A110, 1998.

[YIH+93] K. Yano, T. Ishii, T. Hashimoto, T. Kobayashi, F. Murai, and K. Seki. Room-temperature single-electron memory using fine-grain polycrystalline silicon. In *IEEE International Electron Devices Meeting*, pp. 541–544, 1993.

[YJIS96] N. Yoshikawa, Y. Jinguu, H. Ishibashi, and M. Sugahara. Complementary digital logic using resistively coupled single-electron transistor. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 1140–1145, 1996.

[YKK+01] Takashi Yamada, Yoshitaka Konoshita, Seiya Kasai, Hideki Hasegawa, and Yoshihito Amemiya. Quantum-dot logic circuits based on the shared binary-decision diagram. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 7, pp. 4485–4488, July 2001.

[ZGC98] Lei Zhuang, Lingjie Guo, and Stephen Y. Chou. Silicon single-electron quantum-dot transistor switch operating at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, No. 10, pp. 1205–1207, March 1998.

[岩渕 98] 岩渕修一. メゾスコピック系の物理. パリティ物理学コース クローズアップ. 丸善, 1998.

[小林 95] 小林俊一, 大塚洋一. 低温技術. 物理工学実験 7. 東京大学出版会, 東京, 第 2 版, 1995.

[森正 86] 森正武. Fortran77 値計算プログラミング. 岩波コンピュータサイエンス. 岩波書店, 1986.

[朝日 01] 朝日新聞 (大阪夕刊)2001 年 8 月 10 日. ＩＴ支える半導体産業「世界最小」目指し競争, 2001.

[直野 96] 直野典彦. 転換期の半導体・液晶産業. 日経 BP 出版センター, 1996.

[渡辺 89] 渡辺力, 名取亮, 小国力（編）. Fortran77 による数値計算ソフトウェア. 丸善, 1989.

[日経 02] 日経新聞 (大阪)2002 年 8 月 20 日. パソコン向けＤＲＡＭ現行品種再び下落へ 256 メガビット品へ世代交代, 2002.

[日経 03] 日経新聞 (大阪)2003 年 1 月 9 日. 最速半導体を量産-回路線幅 90 ナノメートル-, 2003.

[野々87] 野々垣三郎. 高分子新素材 One Point 3, 微細加工とレジスト. 共立出版, 1987.

謝辞

大阪大学教授蒲生健次先生に感謝致します。蒲生先生は, 私が学生の頃より現在まで, 常に暖かく私の研究を指導して下さってます。時として, 同じような事の繰り返しに陥りがちな私の研究を, 蒲生先生は常に新しい分野へと軌道修正して下さいました。

大阪大学名誉教授難波進先生に感謝致します。難波先生は, いちはやくナノサイエンス, ナノテクノロジー, メゾスコピック系の物理・技術の重要さに気づかれ, 私が学部の学生の頃に (1985 年ごろ) 講義の余談として話をして下さいました。このことは, 私がこの分野の研究者になるきっかけとなりました。

大阪大学教授小林猛先生に感謝致します。小林先生は, お忙しい中貴重な時間を割いてくださり, 多くの有益なご議論をして下さいました。

大阪大学教授岡本博明先生に感謝致します。岡本先生には, 特に環境インピーダンスの理論について, 有益な議論をしていただき, 多くの貴重な示唆をいただきました。

大阪大学助教授弓場愛彦先生に感謝致します。弓場先生には, 半導体プロセス, 真空装置を使用する上での常識など, この分野のイロハを教えていただきました。

大阪大学講師柳沢淳一先生に感謝致します。柳沢先生には, 日頃より有益な議論をしていただいております。

大阪大学蒲生研究室河崎清氏に感謝致します。河崎氏には実験装置の作製や改良の際に相談にのっていただき, また実際の工作においても, 不器用な私をずいぶん助けていただきました。

大阪大学極限科学研究センター美濃邦夫氏に感謝致します。美濃氏には紫外線露光マスクを作製していただきました。また, 電子ビーム露光装置の修理やメンテナンス時にはいつもお世話になりました。

奈良女子大学教授岩渕修一先生に感謝致します。岩渕先生は, 不勉強な私に, いつも丁寧に教えてくださり, 多くの重要な示唆をいただきました。特に, 環境インピーダンス制御型単電子トランジスタの研究は, 岩渕先生の基礎理論をもとに, 私が拡張し, さらに数値計算

と実験をおこなったもので, 岩渕先生との共同研究がなければこの論文は完成しなかったでしょう。

大阪大学名誉教授邑瀬和生先生, 大阪大学助教授鷹岡貞夫先生, 大阪大学助手音賢一先生に感謝致します。邑瀬研究室の方々には, 私が学生の頃より, 低温実験のイロハを教えていただきました。また, 蒲生研究室の希釈冷凍器や測定系を立ち上げる際に多くの非常に有益な助言をいただきました。

英国 Cambridge 大学教授 Haroon Ahmed 先生, John Cleaver 先生, および David G. Hasko 先生, G. A. C. Jones 先生, Edmund Linfield 博士, James Thompson 博士 に感謝致します。Ahmed 先生 と Hasko 先生 には私が Cambridge 大学に滞在中, 実験装置を使わせていただき, また試料作製についての多くの有益な助言をいただきました。これらの助言は現在の私の研究手法のかかすことのできない一部となっております。また, Jones 先生 Linfield 博士 Thompson 博士は Cambridge 大学で真空一貫プロセスの研究に取り組まれており, 私が Cambridge 大学に滞在中に多くの有益な議論をしていただきました。

日本電気 (株) の阪本利司博士に感謝致します。阪本氏には蒲生研究室の希釈冷凍器と測定系を立ち上げる際に, 多くの非常に有益な助言をいただきました。

大阪大学基礎工学部蒲生研究室の学生でありました, 北村一樹氏, 吉岡史善氏, 中道真也氏, 萬代俊治氏に感謝致します。彼らは, この論文に掲載した実験の一部を私と共同で進めました。

最後に, 私事になりますが, 私の両親に感謝致します。私が現在, 非常におもしろい仕事をさせていただき, 充実した日々を送っておりますのも, 私を愛し, 育て, 大学院まで進学させて下さった両親のおかげであることに改めて感謝する次第です。

研究業績

発表論文

1. Y. Takagaki, F. Wakaya, Y. Kusumi, S. Takaoka, Y. Yuba, K. Gamo, K. Murase, and S. Namba, "Fabrication of Narrow Channels in GaAs-AlGaAs Heterostructures and the Lateral Quantization Effect", Microelectronic Engineering, vol. 9, pp. 353–356, 1989.

2. Y. Takagaki, F. Wakaya, S. Takaoka, K. Gamo, K. Murase, and S. Namba, "Fabrication of Ballistic Quantum Wires and Their Transport Properties", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 28, no. 10, pp. 2188–2192, Oct. 1989.

3. F. Wakaya, T. Kakuta, Y. Takagaki, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, T. Shiokawa, K. Gamo, and S. Namba, "Fabrication of GaAs/GaAlAs quantum wires with side gates", J. Vac. Sci. & Technol. B, vol. 8, no. 6, pp. 1794–1797, Nov./Dec. 1990.

4. F. Wakaya, Y. Takagaki, S. Takaoka, K. Murase, Y. Yuba, K. Gamo, and S. Namba, "Electron Focusing Effects in the In-plane Gated Structures", Superlattices and Microstructures, vol. 11, no. 3, pp. 273–275, 1992.

5. F. Wakaya, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Transport Properties of Coupled Electron Waveguides Buried in Heterostructure", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 12B, pp. 6242–6245, Dec. 1993.

6. F. Wakaya, A. Nozawa, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Low Energy Focused Ion Beam and Buried Electron Waveguides Fabrication", Microelectronic Engineering, vol. 23, pp. 123–126, 1994.

7. F. Wakaya, K. Umeda, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Investigation of In Situ Process for GaAs/AlGaAs Buried Quantum Wires", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33, no. 12B, pp. 7223–7227, Dec. 1994.

8. F. Wakaya, H. Otoi, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, K. Gamo, D. G. Hasko, G. A. C. Jones, and H. Ahmed, "Transport Properties and Fabrication of Coupled Electron Waveguides", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 34, no. 8B, pp. 4446–4448, Aug. 1995.

9. F. Wakaya, J. Takahara, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Confinement Po-

tential in an Asymmetrically Biased Quantum Point Contact", Extended Abstracts of the 1995 International Conference on Solid State Devices and Materials, Osaka, Japan, August 21–24, 1995, pp. 782–784, Aug. 1995.

10. M. Yoshiiwa, H. Kageyama, F. Wakaya, M. Takei, K. Gamo, and Y. Shirota, "1,3,5-Tris[4-(tert-Butoxycarbonylmethoxy)-phenyl]benzene as a Novel Electron-beam Positive Resist for Nanometer Lithography", J. Photopolymer Sci. Technol., vol. 9, no. 1, pp. 57–58, 1996.

11. M. Yoshiwa, H. Kageyama, Y. Shirota, F. Wakaya, K. Gamo, and M. Takei, "Novel class of low molecular-weight organic resists for nanometer lithography", Appl. Phys. Lett., vol. 69, no. 17, pp. 2605–2607, Oct. 1996.

12. F. Wakaya, T. Matsubara, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Investigation of growth interruption in the UHV total vacuum process for buried quantum structures", Microelectronic Engineering, vol. 30, pp. 475–478, Jan. 1996.

13. F. Wakaya, J. Takahara, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Confinement Potential in an Asymmetrically Biased Quantum Point Contact", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 35, no. 2B, pp. 1329–1332, Feb. 1996.

14. J. Yanagisawa, H. Nakayama, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Formation of buried two-dimensional electron gas in GaAs by Si ion doping using MBE-FIB combined system", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 396, pp. 701–705, 1996.

15. F. Wakaya, T. Matsubara, H. Nakayama, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Effects of growth interruption and FIB implantation in the UHV total vacuum process for the buried mesoscopic structures", Physica B, vol. 227, pp. 268–270, 1996.

16. J. Yanagisawa, H. Nakayama, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Fabrication of Laterally Selected Si Doping layer in GaAs Using Low-Energy FIB-MBE Combined System", J. Vac. Sci. & Technol. B, vol. 14, pp. 3938–3941, Nov./Dec. 1996.

17. H. Nakayama, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Characterization of Laterally Selected Si Doped Layer Formed in GaAs Using a Low-Energy FIB-MBE Combined System", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 438, pp. 187–192, 1997.

18. F. Wakaya, J. Yanagisawa, T. Matsubara, H. Nakayama, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Fabrication of buried quantum structures using FIB-MBE total vacuum process", Microelectronic Engineering, vol. 35, pp. 451–454, Feb. 1997.

19. J. Yanagisawa, H. Nakayama, K. Oka, M. Nakai, F. Wakaya, Y. Yuba, S. Takaoka, K.

Murase, and K. Gamo, "Characterization of Si-doped layer in GaAs fabricated by a focused ion beam/molecular beam epitaxy combined system", J. Vac. Sci. & Technol. B, vol. 15, pp. 2930–2933, Nov./Dec. 1997.

20. M. Matsutani, F. Wakaya, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Electron-Beam Induced Oxidation for Single-Electron Devices", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 36, no. 12B, pp. 7782–7785, Dec. 1997.

21. F. Wakaya, T. Matsubara, M. Nakayama, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Effects of growth interruption in in situ process for buried quantum structures", Microelectronic Engineering, vol. 41/42, pp. 591–594, Mar. 1998.

22. F. Wakaya, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single Electron Tunneling Device Controlled by Environmental Impedance Modulation", Solid State Electronics, vol. 42, no. 7-8, pp. 1401–1405, Jul.-Aug. 1998.

23. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single Electron Tunneling Device with Variable Environmental Impedance", Semiconductor Science and Technology, vol. 13, no. 8A, pp. A107–A110, Aug. 1998.

24. F. Wakaya, T. Matsubara, M. Nakayama, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Interface States Made by Growth Interruption during In Situ Process", J. Vac. Sci. & Tech. B, vol. 16, no. 4, pp. 2313–2316, Jul./Aug. 1998.

25. M. Nakayama, F. Wakaya, J. Yanagisawa, and K. Gamo, "Focused ion beam etching of resist/Ni multilayer films and applications to metal island structure formation", J. Vac. Sci. & Tech. B, vol. 16, no. 4, pp. 2511–2514, Jul./Aug. 1998.

26. F. Wakaya, F. Yoshioka, H. Higurashi, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Controllability of Single Electron Tunneling and Change in Coulomb Diamond Caused by Environmental Impedance Modulation", Proceeding of 2nd International Workshop "Physics and Modeling of Devices based on Low-Dimensional Structures", March 12-13, 1998, Aizu, Japan, pp. 88–92, 1998.

27. T. Kadota, H. Kageyama, F. Wakaya, K. Gamo, and Y. Shirota, "A Novel Low Molecular-Weight Organic Resist with High Sensitivity for Nanometer Lithography", J. Photopolymer Sci. Tech., vol. 11, no. 1, pp. 147–148, 1998.

28. T. Kadota, H. Kageyama, F. Wakaya, K. Gamo, and Y. Shirota, "Amorphous Molecular Materials: Development of Novel Positive Electron-beam Molecular Resist", J. Photopolymer Sci. Tech., vol. 12, no. 2, pp. 375–376, 1999.

29. F. Wakaya, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Possible Control Method for Single Electron Tunneling Based on Environmental Impedance Modula-

tion", Appl. Phys. Lett., vol. 74, no. 1, pp. 135–137, Jan. 4, 1999.

30. F. Wakaya, K. Kitamura, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Transport Properties of a Resistively-Coupled Single-Electron Transistor", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38, no. 4B, pp. 2470–2472, Apr. 1999.

31. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Control of Single-Electron Device Using Environmental Impedance Modulation", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38, no. 5A, pp. 2812–2815, May 1999.

32. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Furuichi, H. Higurashi, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single-Electron Transistor Controlled by Environmental Impedance: Effects of Capacitive Environmental Impedance", Microelectronic Engineering, vol. 46, pp. 153–156, May 1999.

33. F. Wakaya, S. Iwabuchi, H. Higurashi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Effects of asymmetric environment on the island charge state of single-electron transistors", Microelectronic Engineering, vol. 47, pp. 193–195, June 1999.

34. R. Kitawaki, F. Wakaya, and S. Iwabuchi, "Coulomb blockade and higher order tunneling effect in ultrasmall ferromagnetic double tunnel junction", Microelectronic Engineering, vol. 47, pp. 413–415, June 1999.

35. T. Kimura, F. Wakaya, J. Yanagisawa, Y. Yuba, and K. Gamo, "Exchange Interaction from Current and Voltage Probes in Galvanomagnetic Effect in Polycrystal Co Thin Film", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38, no. 8, pp. 4737–4740, Aug. 1999.

36. J. Yanagisawa, T. Goto, T. Hada, M. Nakai, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Carrier profile of the Si-doped layer in GaAs fabricated by a low-energy focused ion beam/molecular beam epitaxy combined system", J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 17, no. 6, pp. 3072–3074, Nov/Dec 1999.

37. M. Nakayama, J. Yanagisawa, F. Wakaya, and K. Gamo, "Focused Ion Beam Process for Formation of a Metal/Insulator/Metal Double Tunnel Junction", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38, no. 12B, pp. 7151–7154, Dec 1999.

38. R. Kitawaki, F. Wakaya, and S. Iwabuchi, "Coulomb blockade and enhancement of magnetoresistance change in ultrasmall ferromagnetic double tunnel junctions", *Quantum Coherence and Decoherence II* ed. by K. Fujikawa and Y. A. Ono, (North-Holland, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Shingapore-Tokyo, 1999) (Proceeding of the 6th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology -Quantum Coherence and Decoherence- (ISQM-Tokyo '98), pp. 173–176, 1999.

39. T. Goto, T. Hada, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Carrier

profiles and electron traps at a growth-interrupted", Appl. Sur. Sci., vol. 159-160, pp. 277–281, 2000.

40. F. Wakaya, S. Mandai, S. Nakamichi, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Capacitively- and resistively-coupled single-electron transistor", Microelectronic Engineering, vol. 53, pp. 195–198, Aug 2000.

41. F. Wakaya, S. Mandai, S. Nakamichi, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Resistively-coupled single-electron transistor using tunnel gate resistor", Superlattices and Microstructures, vol. 27, pp. 603–606, May/June 2000.

42. S. Tsubaki, N. Fujita, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Linear and nonlinear transports of coupled quantum dots", Superlattices and Microstructures, vol. 27, pp. 363–367, May/June 2000.

43. N. Fujita, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Transport of coupled double quantum dots in series", Physica E, vol. 7, pp. 420–424, May 2000.

44. T. Hada, T. Goto, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Carrier distribution profiles in Si-doped layers in GaAs formed by forcused ion beam implantation and successive overlayer growth", J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 18, pp. 3158–3161, 2000.

45. T. Kimura, F. Wakaya, J. Yanagisawa, Y. Yuba, and K. Gamo, "Magnetization process and resistance jumpls in a submicron-scale cross-shaped Co wire", J. Magn. Magn. Mater., vol. 222, no. 1–2, pp. 79–85, Dec. 2000.

46. T. Kimura, F. Wakaya, J. Yanagisawa, Y. Yuba, and K. Gamo, "Galvanomagnetic Effect of Submicron Exchange-Coupled Co/Ni Wire", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39, pp. 6526–6529, 2000.

47. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Magnetization Processes in Narrow and Wide Cross-shaped Co/Cu/NiFe", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, pp. 1246–1249, 2001.

48. T. Kimura, G. Mozumi, F. Wakaya, and K. Gamo, "Effects of Shape Anisotropy in CoO/Co/Cu/NiFe/Cu/Co wires", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, pp. 2241–2244, 2001.

49. T. Hada, H. Miyamoto, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Carrier activation in in situ Si-doped GaAs layers fabricated by a focused Si ion beam and molecular beam epitaxy combined system", Nucl. Instr. and Meth. B, vol. 175–177, pp. 751–755, Apr. 2001.

50. T. Kimura, Y. Itagaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Study of dipole interaction in micron-width NiFe/Cu/NiFe/NiO wire using exchange anisotropy", Appl. Phys. Lett., vol. 78, pp. 4007–4009, 2001.

51. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Galvanomagnetic Effect and Magnetization Process in CoO/Co/NiFe Film with Antidot Array", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, pp. 4524–4527, 2001.

52. T. Kadota, H. Kageyama, F. Wakaya, K. Gamo, and Y. Shirota, "Amorphous molecular materials: development of novel negative electron-beam molecular resists", Materials Science and Engineering C, vol. 16, no. 1–2, pp. 91–94, Oct. 20, 2001.

53. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Effect of stary field induced by cross shape in a 200-nm-wide Co wire", J. Magn. Magn. Mat., vol. 236, no. 3, pp. 262–266, Nov. 2001.

54. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Effects of Stray Fields in Fla-End and Pointed-End NiFe/Cu/NiFe/Nio Wires", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, pp. 6357–6359, 2001.

55. M. Yoshida, S. Murakami, M. Nakayama, J. Yanagisawa, F. Wakaya, T. Kaito, and K. Gamo, "Formation of narrow grooves on thin metal layer by focused ion beam etching", Microelectronic Engineering, vol. 57-58, pp. 877–882, 2001.

56. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Study of Dipole Interaction in Magnetic Multilayer Wires using Exchange Anisotropy", Proceedings of CJSTF 2001, pp. 137–140, 2001.

57. T. Kimura, Y. Itagaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Study of Magnetostatic Interaction in Magnetic Multilayer Wires Using Exchange Anisotropy", Trans. Magn. Soc. Jpn., vol. 2, no. 2, pp. 49–52, May 2002.

58. T. Kimura, Y. Itagaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Fabrication of Planar-Type Ferromagnet/Nonmagnet/Ferromagnet Structures by Using Multi-Angle Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 41, no. 6B, pp. 4385–4389, June 30, 2002.

59. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Control of magnetization rotation using submicron-wide cross geometry", J. Magn. Magn. Mater., vol. 248, no. 2, pp. 286–291, July 2002.

60. T. Kimura, Y. Itagaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Control of Domain structures in magnetic multilaer using submicron-patterned antiferromagnetic structure", Microelectronic Engineering, vol. 61–62, no. 1, pp. 585–591, July 2002.

61. F. Wakaya, T. Nagai, and K. Gamo, "Position Control of Carbon Nanotube Using Patterned Electrode And Electric Field", Microelectronic Engineering, vol. 63, no. 1–3, pp. 27–31, Aug. 2002.

62. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Fabrication of Spin-Current-Induced Domain-Wall-Nucleation Device in Planar Configuration", J. Vac. Sci. Tech. B, vol. 20, no. 6, pp. 2814–1818, Nov. 2002.

63. F. Wakaya, K. Katayama, and K. Gamo, "Contact Resistance of Multiwall Carbon Nanotubes", to be published in Microelectric Engineering.

国際会議

1. Y. Takagaki, F. Wakaya, Y. Kusumi, S. Takaoka, Y. Yuba, K. Gamo, K. Murase, and S. Namba, "Fabrication of Narrow Channels in GaAs-AlGaAs Heterstructures and the Lateral Quantizaion Effect", 14th Intern. Conference on Microlithography Microcircuit Engineering, Vienna, Austria, September 20–22, 1988.

2. Y. Takagaki, F. Wakaya, K. Gamo, S. Namba, and K. Murase, "Fabrication of Ballistic Quantum Wires ang the Transport Properties", 2nd Intern. MicroProcess Conference, Kobe, Japan, July 2–5, 1989.

3. F. Wakaya, T. Kakuta, Y. Takagaki, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, T. Shiokawa, K. Gamo, and S. Namba, "Fabrication of GaAs/GaAlAs Quantum Wires with Side-Gates", The 34th Intern. Symposium on Electron, Ion, and Photon Beams, San Antonio, Texas, USA, 1990.

4. F. Wakaya, Y. Takagaki, S. Takaoka, K. Murase, Y. Yuba, K. Gamo, and S. Namba, "Electron Focusing Effects in the In-plane Gated Structures", Intern. Symp. Nanostructures and Mesoscopic Systems, Santa Fe, New Mexico, USA, May 20–24, 1991.

5. F. Wakaya, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Transport Properties of Coupled Electron Waveguides Buried in Heterostructure", The 6th Intern. Micro-Process Conf., B-1-4, Hiroshima, Japan, July 19–22, 1993.

6. F. Wakaya, A. Nozawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Low Energy Focused Ion Beam and Buried Electron Waveguides Fabrication", Intern. Conf. Microcircuit Engineering 93, 3A.4, Maastricht, The Netherlands, Sept. 27–29, 1993.

7. F. Wakaya, A. Nozawa, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Buried Structure for Coupled Electron Waveguides", Engineering Foundation Conference on Surfaces and Interfaces in Mesoscopic Devices, Fa3, Kona, Hawaii, USA, April 24–29, 1994.

8. F. Wakaya, K. Umeda, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Investigation of In Situ Process for Buried Quantum Wires", The 7th Intern. MicroProcess Conf., B-5-4, Hsinchu, Taiwan, July 11–14, 1994.

9. F. Wakaya, H. Otoi, K. Umeda, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, K. Gamo, D. G. Hasko, G. A. C. Jones, and H. Ahmed, "Transport Properties and Fabrication of Coupled Electron Waveguides", International Workshop on Mesoscopic Physics and Electronics (MPE'95), H-6, Tokyo, Japan, March 6–8, 1995, p. 93.

10. F. Wakaya, J. Takahara, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Confinement Potential in an Asymmetrically Biased Quantum Point Contact", 1995 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM'95), S-VI-5, Osaka, Japan,

August 21–24, 1995, p. 782.

11. F. Wakaya, T. Matsubara, K. Umeda, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Investigation of the growth interruption in the UHV total vacuum process for the buried quantum structures", International Conference Micro- and Nano- Engineering 95 (MNE'95), K53, Aix-en-Provence, France, Septempber 26–28, 1995.

12. J. Yanagisawa, H. Nakayama, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Formation of buried two-dimensional electron gas in GaAs by Si ion doping MBE-FIB combined system", 1995 Fall meeting of Material Research Society (MRS), Boston, USA, November 27 – December 1, 1995.

13. F. Wakaya, T. Matsubara, H. Nakayama, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Effects of growth interruption and FIB implantation in the UHV total vacuum process for the buried mesoscopic structures", Third International Symposium on "New Phenomena in Mesoscopic Structures" (NPMS95), Q22, Maui, Hawaii, USA, December 4–8, 1995, pp. 374–376.

14. J. Yanagisawa, H. Nakayama, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Fabrication of Laterally Selected Si Doping layer in GaAs Using Low-Energy FIB-MBE Combined System", The 40th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN'96), O3, Atlanta, USA, May 28–31, 1996.

15. M. Matsutani, F. Wakaya, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Fabrication of Cr/Cr_2O_3 Structures Using E-Beam Direct Writing for Single Electron Devices", International Conference on Quantum Devices and Circuits, Alexandria, Egypt, June 4-8, 1996.

16. F. Wakaya, J. Yanagisawa, T. Matsubara, H. Nakayama, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Fabrication of buried quantum structures using FIB-MBE total vacuum process", International Conference Micro- and Nano- Engineering 96 (MNE'96), I26, Scotland, UK, Septempber 22–25, 1996.

17. F. Wakaya, "Investigation of growth interruption in MBE-FIB total vacuum system for buried quantum structures", The 7th Advanced Heterostructure Workshop (AHW'96), Hawaii, USA, December 1-6, 1996.

18. H. Nakayama, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Characterization of Laterally Selected Si Doped Layer Formed in GaAs Using a Low-Energy FIB-MBE Combined System", 1996 Fall meeting of Material Research Society (MRS), Boston, USA, December 2-6, 1996.

19. F. Wakaya, J. Yanagisawa, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "In-situ process for buried quantum structures using FIB-MBE combined system", Symposium on Nanometer Ion Beams: Science and Applications (at 30th Anniversary Scanning Mi-

croscopy, and Cells and Materials 1997 meetings), Chicago, USA, May 10-15, 1997.

20. J. Yanagisawa, H. Nakayama, K. Oka, M. Nakai, F. Wakaya, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Characterization of Si-doped layer in GaAs fabricated by a focused ion beam/molecular beam epitaxy combined system", The 41st International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN'97), C57, Dana Point, California, USA, May 27-30, 1997.

21. F. Wakaya, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Possibility of a New Type of Control Method for Single Electron Tunneling Based on Environmental Impedance Modulation", Silicon Nanoelectronics Workshop 1997 (Satellite Workshop of 1997 Symposium on VLSI Technology), Kyoto, Japan, June 8-9, 1997, pp. 34–35.

22. M. Matsutani, F. Wakaya, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Electron-Beam Induced Oxidation for Single Electron Devices", International Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC'97), 9C-5-33, Nagoya, Japan, July 7-10, 1997, p. 123.

23. F. Wakaya, T. Matsubara, M. Nakayama, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Effects of growth interruption in in situ process for buried quantum structures", International Conference Micro- and Nano- Engineering 97 (MNE'97), NFP-13, Athens, Greece, Septempber 15–18, 1997.

24. F. Wakaya, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single Electron Tunneling Device Controlled by Environmental Impedance Modulation", International Workshop on Nano-Physics and Electronics (NPE'97), K05, Tokyo, Japan, September 18–20, 1997, pp. 86–87.

25. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single Electron Device with Arbitrary Environmental Impedance", The 3rd International Workshop on Quantum Functional Devices (QFD'97), WeS1, Gaithersburg, MD, USA, November 5–7, 1997, pp. 63–64.

26. M. Nakayama, F. Wakaya, J. Yanagisawa, and K. Gamo, "Fabrication of metal island structures using a focused ion beam system", 1997 Japan USA Seminar on Formation of Ion Nanobeams and Applications to Materials Processing, Osaka, Japan, November 16-20, 1997.

27. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single Electron Tunneling Device with Variable Environmental Impedance", Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices 97 (SIMD'97), WE1.2, Maui, Hawaii, USA, December 8–13, 1997, pp. 75–76.

28. F. Wakaya, T. Matsubara, M. Nakayama, J. Yanagisawa, Y. Yuba, S. Takaoka, K. Murase, and K. Gamo, "Interface States Made by Growth Interruption during In Situ Process", The 25th Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor

Interfaces (PCSI-25), Tu1110, Salt Lake City, Utah, USA, January 18-22, 1998.

29. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Controllability of Single Electron Tunneling and Change in Coulomb Diamond Caused by Environmental Impedance Modulation", 2nd International Workshop "Physics and Modeling of Devices based on Low-Dimensional Structures", 30, Aizu, Japan, March 12-13, 1998.

30. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single-Electron Transistor Controlled by Environmental Impedance", UK-Japan Workshop on Physics and Application of Semiconductor Nanostructures, Kamakura, Japan, March 16-17, 1998.

31. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Control of Single-Electron Device Using Environmental Impedance Modulation", International Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC'98), 16A-9-2, Kyongju, Korea, July 13-16, 1998.

32. R. Kitawaki, F. Wakaya, and S. Iwabuchi, "Coulomb blockade and enhancement of magnetoresistance change in ultrasmall ferromagnetic double tunnel junctions", The 6th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology -Quantum Coherence and Decoherence- (ISQM-Tokyo '98), Hachioji, Japan, August 24-27, 1998.

33. F. Wakaya, K. Kitamura, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Transport Properties of Resistively-Coupled Single-Electron Transistor", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM'98), C-5-4, Hiroshima, Japan, September 7-10, 1998.

34. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Furuichi, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single-Electron Transistor Controlled by Environmental Impedance: Effects of Capacitive Environmental Impedance", International Conference Micro- and Nano- Engineering 98 (MNE'98), NFP-13, Leuven, Belgium, Septempber 22–24, 1998.

35. F. Wakaya, F. Yoshioka, S. Furuichi, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Single-Electron Transistor Controlled by Electromagnetic Environment Effect", 4th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures (NPMS'98), Q03, Kauai, Hawaii, USA, December 7–11, 1998, pp. 218–220.

36. R. Kitawaki, F. Wakaya, and S. Iwabuchi, "Coulomb Blockade and Higher Order Tunneling Effect in Ultrasmall Ferromagnetic Double Tunnel Junctions", 4th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures (NPMS'98), Q18, Kauai, Hawaii, USA, December 7–11, 1998, p. 259.

37. T. Kimura, F. Wakaya, Y. Yanagisawa, Y. Yuba, and K. Gamo, "Galvanomagnetic effect of Ni and Co magnetic wires", 1999 Spring meeting of Material Research Society

(MRS), San Francisco, USA, April 5–9, 1999.

38. J. Yanagisawa, T. Goto, T. Hada, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Carrier profile of Si-doped layer in GaAs fabricated by a low-energy focused ion beam/molecular beam epitaxy combined system", 43rd International Symposium on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, Marco Island, FL, USA, June 1-4, 1999.

39. N. Fujita, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Transport of Coupled Double Quantum Dots in Series", The 9th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS9), Hakata, Fukuoka, Japan, July 12–16, 1999.

40. S. Iwabuchi, R. Kitawaki, and F. Wakaya, "Effects of higher order tunneling and electromagnetic environment on magnetoresistance of ultrasmall ferromagnetic double tunnel junction", 22nd International Conference on Low Temperature Physics (LT22), Espoo and Helsinki, Finland, August 4–11, 1999.

41. F. Wakaya, S. Mandai, S. Nakamichi, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Capacitively- and resistively-coupled single-electron transistor", International Conference Micro- and Nano- Engineering 99 (MNE'99), NE12, Roma, Italy, September 21-23, 1999.

42. T. Kimura, K. Ikushima, F. Wakaya, and K. Gamo, "Resistance Jumps in Planar Hall Effect of Nano-Scale Co Magnetic Wire", 2nd MAGNETO-ELECTRONICS INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Nagano, Japan, October 20-22, 1999.

43. T. Goto, T. Hada, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Study of electron traps for growth-interrupted GaAs fabricated by a FIB/MBE combined system", Third International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces, Karuizawa, Japan, October 25-29, 1999.

44. F. Wakaya, S. Mandai, S. Nakamichi, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Resistively-Coupled Single-Electron Transistor Using Tunnel Gate Resistor", Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices 99 (SIMD'99), Maui, Hawaii, USA, December 5-9, 1999.

45. S. Tsubaki, N. Fujita, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. Gamo, "Linear and nonlinear transports of coupled quantum dots", Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices 99 (SIMD'99), Maui, Hawaii, USA, December 5-9, 1999.

46. Y. Yuba, S. Tsubaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Transport Characteristics of Coupled Double Quantum-Dots in In-Plane Gated AlGaAs/GaAs", 3rd SANKEN International Symposium on Advanced Nanoelectronics: Devices, Materials and Computing, Suita, Osaka, Japan, March 4 -15, 2000.

47. T. Kimura, F. Wakaya, J. Yanagisawa, and K. Gamo, "Hall resistance of Ni film with sub-micron-scale Co islands", International Symposium on Nanoscale Magnetism and

Transport, Sendai, Japan, March 8-10, 2000.

48. F. Wakaya, S. Iwabuchi, and K. Gamo, "Single-electron transistor controlled by environmental impedance modulation", Japan-UK 10+10 Meeting "New developments in Semiconductor Physics, Devices and Materials", Oxford, UK, March 13-14, 2000.

49. T. Hada, T. Goto, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. K.Gamo, "Carrier distribution profiles in Si doped layers in GaAs formed by focused ion beam implantation and successive overlayer growth", The 44th Intern. Conf. on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, California, May 30 - June 2, 2000.

50. T. Hada, H. Miyamoto, J. Yanagisawa, F. Wakaya, Y. Yuba, and K. K.Gamo, "Carrier activation in in situ Si-doped GaAs layers fabricated by a focused Si ion beam and molecular beam epitaxy combined system", 12th Intern. Conf. on Ion Beam Modification of Materials, Brazil, September 3-8, 2000.

51. M. Yoshida, S. Murakami, M. Nakayama, J. Yanagisawa, F. F.Wakaya, T. Kaito, and K. Gamo, "Formation of narrow grooves on thin metal layer by focused ion beam", Inter. Conf. on Micro- and Nano-Engineering, Germany, September 18-21, 2000.

52. F. Wakaya, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Effects of environmental impedance on charges at single-electron transistor", Japan-UK "10+10" Meeting, Kobe, Japan, September 22-24, 2000.

53. F. Wakaya, S. Iwabuchi, Y. Nagaoka, and K. Gamo, "Effects of environmental impedance on charges at single-electron transistor", 4th International Workshop on Quantum Functuinal Devices, SP1-16, Kanazawa, Japan, November 15-17, 2000.

54. T. Kadota, H. Kageyama, F. Wakaya, K. Gamo, and Y. Shirota, "Development of Novel Negative Electron-beam Molecular Resists", The International Union of Materials Research Societies - 6th International Conference in Asia, Hong Kong, August 23, 2000.

55. T. Kadota, M. Yoshiiwa, H. Kageyama, F. Wakaya, K. Gamo, and Y. Shirota, "Creation of Low Molecular-weight Organic Resists for Nanometer Lithography", The International Society for Optical Engineering MICROLITHOGRAPHY 2001, San Jone, California, USA, Feb. 25 – Mar. 2, 2001.

56. T. Kimura, Y. Itagaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Control of domain structures in magnetic multilayer using submicron-patterned antiferromagnetic structure", International Conference on Micro and Nano engineering 2001, France, Septermber 16–19, 2001.

57. T. Kimura, Y. Itagaki, F. Wakaya, and K. Gamo, "Fabrication of Planar-Type Ferromagnet/Nonmagnet/Ferromagnet Structures by Using Muli-Angle Deposition", 2001

International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Shimane, Japan, October 31 – November 1, 2001.

58. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Study of Dipole Interaction in Magnetic-Multilayer Wires Using Exchange Anisotropy", China-Japan Symposium on Thin Films 2001, China, November 5–8, 2001.

59. F. Wakaya, T. Nagai, and K. Gamo, "Position Control of Carbon Nanotube Using Patterned Electrode And", 5th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures (NPMS-5), C2, Outrigger Waikoloa, Hawaii, USA, November 25-30, 2001.

60. F. Wakaya, T. Nagai, and K. Gamo, "Position Control of Carbon Nanotube Using Patterned Electrode And Electric Field", Japan-UK 10+10 Meeting "Semiconductors, Nanostructures and Devices", George Hotel, Stamford, UK, January 14-15, 2002.

61. T. Kimura, T. Nakatsukasa, F. Wakaya, and K. Gamo, "Effects of Lorentz Field Induced by Current in Spin-Valve Narrow Wire", International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, March 5–8, 2002.

62. T. Kimura, F. Wakaya, and K. Gamo, "Fabrication of Spin-Current-Induced Domain-Wall-Nucleation Device in Planar Configuration", International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, California, USA, May 28–31, 2002.

63. F. Wakaya, K. Katayama, and K. Gamo, "Contact Resistance of Multiwall Carbon Nanotubes", International Conference Micro- and Nano-Engineering 2002, Lugano, Switzerland, September 16–19, 2002.

64. S. Iwabuchi, C. Tanaka, and F. Wakaya, "Theory on the Coulomb blockade and Current-Voltage Characteristics in Carbon Nanotube C-SET", Advanced Heterostructure Workshop, Hawaii, USA, December 1–6, 2002.

65. F. Wakaya, K. Katayama, and K. Gamo, "Contact Resistance of Multiwall Carbon Nanotubes", Advanced Heterostructure Workshop, Hawaii, USA, December 1–6, 2002.

国内会議・研究会等

1. 若家冨士男, 高垣雪彦, 鷹岡貞夫, 蒲生健次, 邑瀬和生, 難波進, “サイドゲートをもつ量子細線の電気伝導特性”, 第 36 回応用物理学関係連合講演会, 1pS14/III, p. 976, 千葉大学, 4/1–4/4, 1989.

2. 若家冨士男, 高垣雪彦, 阪本利司, 鷹岡貞夫, 弓場愛彦, 蒲生健次, 邑瀬和生, 難波進, “サイドゲートトランジスタにおけるシュブニコフ-ドハース振動”, 第 50 回応用物理学会学術講演会, 27aZ7/III, p. 1029, 福岡工業大学, 9/27–30, 1989.

3. 若家冨士男, 阪本利司, 谷口裕昭, 高垣雪彦, 鷹岡貞夫, 蒲生健次, 邑瀬和生, 難波進, “擬 1 次元量子細線における電子散乱”, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「メゾスコピック領域における電子波干渉効果の基礎」第 2 回研究回, p. 5, 大阪, 10/29–30, 1990.

4. 若家冨士男, 高垣雪彦, 鷹岡貞夫, 弓場愛彦, 邑瀬和生, 蒲生健次, 難波進, “Ar ミリングによって作製したサンプルにおけるエレクトロンフォーカシング”, 第 51 回応用物理学会学術講演会, 27pZL11/III, p. 1131, 岩手大学, 9/26–29, 1990.

5. 若家冨士男, 阪本利司, 谷口裕昭, 高垣雪彦, 鷹岡貞夫, 蒲生健次, 邑瀬和生, 難波進, “低温における高移動度 2DEG の電子散乱”, 日本学術振興会極限構造電子物性第 151 委員会原子オーダープロセシング分科会第 3 回研究会, p. 1, 嬉野温泉, 佐賀, 12/18, 1990.

6. 若家冨士男, 高垣雪彦, 鷹岡貞夫, 弓場愛彦, 邑瀬和生, 蒲生健次, 難波進, “バリスティック十字路における電界分布のシミュレーション”, 第 38 回応用物理学関係連合講演会, 28pM11/III, p. 1121, 東海大学湘南校舎, 3/28–31, 1991.

7. 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, 難波進, “高移動度 2DEG 境界における鏡面度”, 第 52 回応用物理学会学術講演会, 9aK6/III, p. 1161, 岡山大学, 10/9–12, 1991.

8. 若家冨士男, 蒲生健次, “低エネルギー FIB によるその場加工と結合電子波素子の作製”, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「メゾスコピック領域における電子波干渉効果の基礎」成果報告シンポジウム, pp. 63–66, 早稲田大学, 東京, 12/20–21, 1993.

9. 若家冨士男, 音居尚和, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “集束イオンビームによるメゾスコピック構造素子の作製”, 第 3 回大阪大学極限物質研究センター研究会, 大阪大学基礎工学部国際棟, 3/23, 1993.

10. 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “埋め込み型結合量子細線の伝導特性”, 第 40 回応用物理学関係連合講演会, 31pD4/III, p. 1265, 青山学院大学青山キャンパス, 3/29–4/1, 1993.

11. 若家冨士男, “電子波導波方向性結合器”, 第 68 回半導体物性等研究会, 千里ライフサイエンスセンター, 大阪, 7/2, 1993.

12. 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “埋め込み型電子波方向性結合

器の伝導特性", 第 54 回応用物理学会学術講演会, 28pZX6/III, p. 1212, 北海道大学, 9/27–9/30, 1993.

13. 音居尚和, 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "ショットキーゲートにより作製した結合量子細線の伝導特性", 第 54 回応用物理学会学術講演会, 28pZX11/III, p. 1214, 北海道大学, 9/27–9/30, 1993.

14. 若家冨士男, 梅田和宏, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "真空一貫プロセスによる GaAs/AlGaAs 埋め込み型結合量子細線の試作", 第 4 回大阪大学極限物質研究センター研究会, 大阪大学極限物質研究センター, 3/11, 1994.

15. 若家冨士男, 梅田和宏, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "埋め込み型結合量子細線の作製", 第 41 回応用物理学関係連合講演会, 28aV4/III, p. 1180, 明治大学, 川崎市, 3/28–31, 1994.

16. 音居尚和, 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "ショットキーゲートにより作製した結合量子細線における伝導特性 (2)", 第 41 回応用物理学関係連合講演会, 31pS6/III, p. 1261, 明治大学, 川崎市, 3/28–31, 1994.

17. 若家冨士男, 梅田和宏, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "埋め込み型結合量子細線の構造に関する検討", 第 55 回応用物理学会学術講演会, 20pT18/III, p. 1093, 名城大学, 名古屋市, 9/19–22, 1994.

18. 音居尚和, 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "ショットキーゲートにより作製した結合量子細線における伝導特性 (3)", 第 55 回応用物理学会学術講演会, 21pT5/III, p. 1134, 名城大学, 名古屋市, 9/19–22, 1994.

19. 若家冨士男, 蒲生健次, "埋め込み型結合量子細線の作製", 文部省科学研究費補助金重点領域研究「量子位相エレクトロニクス」第 2 回研究会, 東京工業大学, 東京, 10/21, 1994.

20. 音居尚和, 梅田和宏, 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "結合量子細線中の電気伝導", 日本学術振興会極限構造電子物性第 151 委員会, pp. 40–47, 千里ライフサイエンスセンター, 大阪, 12/19, 1994.

21. 若家冨士男, 蒲生健次, "FIB-MBE 真空一貫プロセスと埋め込み型結合量子細線の作製", 第 8 回知能集積化技術大学間合同研究会, メルパルク広島, 広島, 12/21–22, 1994.

22. 若家冨士男, 蒲生健次, "FIB-MBE 真空一貫プロセスと埋め込み型結合量子細線の作製", 文部省科学研究費補助金重点領域研究「量子位相エレクトロニクス」平成 6 年度成果報告会, pp. 59–64, 大阪サンパレス, 大阪, 2/2–3, 1995.

23. 若家冨士男, "GaAs/AlGaAs 結合量子細線の作製とその伝導特性", 第 5 回大阪大学極限物質研究センター研究会, 大阪大学極限物質研究センター, 3/10, 1995.

24. 音居尚和, 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "ショットキーゲートにより作製した結合量子細線における伝導特性 (4)", 第 42 回応用物理学関係連合講演

会, 29SZK12/III, p. 1252, 東海大学湘南校舎, 平塚市, 神奈川県, 3/28–31, 1995.

25. 若家冨士男, 柳沢淳一, 蒲生健次, "FIB-MBE 真空一貫プロセスによる GaAs-AlGaAs 埋め込み量子構造の作製", 文部省科学研究費補助金重点領域研究「量子位相エレクトロニクス」第 4 回定期研究会, 北海道大学百年記念会館, 札幌, 6/29–30, 1995.

26. 若家冨士男, 高原淳一, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "非対称量子ポイントコンタクトの伝導特性", 第 56 回応用物理学会学術講演会, 28pZM4/III, p. 1100, 金沢工業大学, 石川郡野々市町, 石川県, 8/26–29, 1995.

27. 松原隆彦, 若家冨士男, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "埋め込み量子構造作製のための成長中断効果の検討", 第 56 回応用物理学会学術講演会, 27aZM7/III, p. 1054, 金沢工業大学, 石川郡野々市町, 石川県, 8/26–29, 1995.

28. 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 蒲生健次, "埋め込み量子構造作製のための FIB 注入および成長中断の効果", 文部省科学研究費補助金重点領域研究「量子位相エレクトロニクス」平成 7 年度成果報告会, 虎ノ門パストラル, 東京, 2/1–2, 1996.

29. 松谷正博, 若家冨士男, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "高温動作 SET のための EB 直接描画による Cr/Cr2O3 構造の作製", 第 43 回応用物理学関係連合講演会, 26pZA7/I, p. 62, 東洋大学朝霞校舎, 3/26-29, 1996.

30. 松原隆彦, 中尾光洋, 中山博方, 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "埋め込み量子構造作製のための成長中断と FIB 注入の効果", 第 43 回応用物理学関係連合講演会, 29pW1/III, p. 1310, 東洋大学朝霞校舎, 3/26-29, 1996.

31. 中山博方, 柳沢淳一, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, "低エネルギー FIB-MBE 真空一貫プロセスによる GaAs への Siδ-ドープ層形成", 第 43 回応用物理学関係連合講演会, 26aZT9/II, p. 540, 東洋大学朝霞校舎, 3/26-29, 1996.

32. 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 蒲生健次, "埋め込み量子細線構造デバイス", 文部省科学研究費補助金重点領域研究「量子位相エレクトロニクス」および民間との共同研究「量子ナノエレクトロニクス」合同定期研究討論会「量子効果デバイスの新概念（第 2 回）」, 東京工業大学大岡山キャンパス, 7/12, 1996.

33. 松谷正博, 若家冨士男, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "高温動作 SET のための EB 直接描画プロセスの研究", 第 57 回応用物理学会学術講演会, 9aB9/I, 九州産業大学, 9/7-10, 1996.

34. 奥島基嗣, 弓場愛彦, 若家冨士男, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "スプリットゲートによる単一電子トランジスタの作製", 第 57 回応用物理学会学術講演会, 9pB1/I, 九州産業大学, 9/7-10, 1996.

35. 松原隆彦, 中山博方, 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, "埋め込み量子構造作製のための成長中断と FIB 注入の効果 (その 2)", 第 57 回応用物理学会学術講演会, 7pZC3/III, p. 1067, 九州産業大学, 9/7-10, 1996.

36. 中山博方, 柳沢淳一, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “低エネルギー FIB-MBE 真空一貫プロセスによる GaAs 中への Siδ- ドープ層形成 (II)”, 第 57 回応用物理学会学術講演会, 7pZA8/II, 九州産業大学, 9/7-10, 1996.

37. 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 蒲生健次, “FIB-MBE その場プロセスによる埋め込み量子構造の作製”, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「量子位相エレクトロニクス」平成 8 年度成果報告会, 大阪サンパレスホテル, 2/5-6, 1997.

38. 若家冨士男, 岩渕修一, 日暮等, 長岡洋介, 蒲生健次, “環境インピーダンス制御型単一電子トランジスタ”, 大阪大学極限科学研究センター第 1 回年次研究会, 大阪大学極限科学研究センター, 3/19, 1997.

39. 奥島基嗣, 北村一樹, 藤田尚樹, 弓場愛彦, 若家冨士男, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “スプリットゲート単一電子トランジスタの電気伝導特性”, 第 44 回応用物理学関係連合講演会, 30aSZQ22/I, p. 94, 日本大学船橋校舎, 3/28-31, 1997.

40. 松谷正博, 若家冨士男, 吉岡史善, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “高温動作 SET のための EB 直接描画プロセスの研究 (その 2)”, 第 44 回応用物理学関係連合講演会, 30aSZQ25/I, p. 95, 日本大学船橋校舎, 3/28-31, 1997.

41. 松原隆彦, 中山雅義, 松原正浩, 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “埋め込み量子構造作製のための成長中断と FIB 注入の効果 (その 3)”, 第 44 回応用物理学関係連合講演会, 30pPA21/III, p. 1296, 日本大学船橋校舎, 3/28-31, 1997.

42. 中山博方, 中井正也, 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 蒲生健次, “低エネルギー FIB-MBE 真空一貫プロセスによる GaAs 中への Si δ ドープ層形成”, 第 44 回応用物理学関係連合講演会, 29pZ9/II, p. 607, 日本大学船橋校舎, 3/28-31, 1997.

43. 松原正浩, 若家冨士男, 音賢一, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “高温動作 SET のための EB 直接描画プロセスの研究 (その 3)”, 第 58 回応用物理学会学術講演会, 5aC3/I, p. 157, 秋田大学 (手形キャンパス), 10/2-5, 1997.

44. 吉岡史善, 若家冨士男, 弓場愛彦, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “環境インピーダンス変調による単一電子素子の制御”, 第 58 回応用物理学会学術講演会, 5pC7/I, p. 162, 秋田大学 (手形キャンパス), 10/2-5, 1997.

45. 北村一樹, 若家冨士男, 弓場愛彦, 岩渕修一, 鷹岡貞夫, 邑瀬和生, 蒲生健次, “Resistive and Capacitive 単一電子トランジスタの電気伝導特性”, 第 58 回応用物理学会学術講演会, 4pC12/I, p. 154, 秋田大学 (手形キャンパス), 10/2-5, 1997.

46. 中井正也, 中山博方, 岡健治, 柳沢淳一, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “低エネルギー FIB-MBE 真空一貫プロセスによる GaAs 中への Si δ-ドープ層形成 (IV)”, 第 58 回応用物理学会学術講演会, 3pZK/II, p. 654, 秋田大学 (手形キャンパス), 10/2-5, 1997.

47. 若家冨士男, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “環境インピーダンス変調による単電子トンネルの制御”, 日本物理学会 1997 年秋の分科会, 5p-N-3, p. 605, 神戸大学六甲台地区,

10/5-8, 1997.

48. 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “埋め込み構造を用いたスピン偏極２次元電子ガスの実現”, 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 30pR16/III, p. 1336, 東京工科大学, 3/28-31, 1998.

49. 中山雅義, 若家冨士男, 柳沢淳一, 蒲生健次, “集束イオンビームその場プロセスによる微小トンネル接合の作製”, 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 29pZB7/II, p. 686, 東京工科大学, 3/28-31, 1998.

50. 北村一樹, 若家冨士男, 藤田尚樹, 弓場愛彦, 岩渕修一, 蒲生健次, “抵抗結合および容量結合単一電子トランジスタの電気伝導特性”, 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 30aYE5/I, p. 186, 東京工科大学, 3/28-31, 1998.

51. 吉岡史善, 若家冨士男, 木村崇, 弓場愛彦, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “環境インピーダンス変調による単一電子素子の制御 II”, 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 30aYE6/I, p. 186, 東京工科大学, 3/28-31, 1998.

52. 若家冨士男, 吉岡史善, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “環境インピーダンス変調による単電子トンネルの制御 II”, 日本物理学会第 53 回年会, 1pQ-8, p. 606, 東邦大学習志野キャンパス、日本大学生産工学部津田沼キャンパス, 3/30-4/2, 1998.

53. 古市智, 若家冨士男, 弓場愛彦, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “環境インピーダンス変調による単一電子素子の制御 III”, 第 59 回応用物理学会学術講演会, 17pZK4/I, p. 144, 広島大学 (東広島キャンパス), 9/15-18, 1998.

54. 藤田尚樹, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “結合量子ドット系の電気伝導特性”, 第 59 回応用物理学会学術講演会, 17pZK6/I, p. 145, 広島大学 (東広島キャンパス), 9/15-18, 1998.

55. 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “メゾスコピック磁性細線における電流磁気効果”, 第 59 回応用物理学会学術講演会, 16aL5/I, p. 125, 広島大学 (東広島キャンパス), 9/15-18, 1998.

56. 中山雅義, 若家冨士男, 柳沢淳一, 蒲生健次, “集束イオンビームその場プロセスによる微小トンネル接合の作製 II”, 第 59 回応用物理学会学術講演会, 16aF10/II, p. 617, 広島大学 (東広島キャンパス), 9/15-18, 1998.

57. 北脇令子, 若家冨士男, 蒲生健次, 岩渕修一, “微小強磁性２重トンネル接合に於けるクーロンブロッケード III”, 日本物理学会 1998 年秋の分科会, 27pYG-3, 琉球大学、沖縄国際大学, 9/25-28, 1998.

58. 若家冨士男, 北脇令子, 蒲生健次, 岩渕修一, “微小強磁性２重トンネル接合に於けるクーロンブロッケード IV”, 日本物理学会 1998 年秋の分科会, 27pYG-2, 琉球大学、沖縄国際大学, 9/25-28, 1998.

59. 若家冨士男, “環境インピーダンス制御型単一電子トランジスタ”, 第7回スピンセンシング研究会, 塩坪温泉ホテル, 長野県軽井沢, 1/7-8, 1999.

60. 北脇令子, 若家冨士男, 岩渕修一, “微小強磁性トンネル接合でのクーロンブロッケードと高次トンネル過程の効果”, 特定領域「微小領域の磁性と伝導」平成10年度第2回研究会, 京都大学, 1/17-20, 1999.

61. 若家冨士男, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “単電子トランジスタにおける非対称環境インピーダンスの効果”, 第46回応用物理学関係連合講演会, 28aZM10/I, p. 214, 東京理科大学野田キャンパス, 3/28-3/31, 1999.

62. 椿修二, 藤田尚樹, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “結合量子ドット系における電荷輸送と検出”, 第46回応用物理学関係連合講演会, 28pZM8/I, p. 217, 東京理科大学野田キャンパス, 3/28-3/31, 1999.

63. 中道真也, 萬代俊治, 若家冨士男, 岩渕修一, 蒲生健次, “抵抗結合型単電子トランジスタの伝導特性”, 第46回応用物理学関係連合講演会, 28pZM9/I, p. 217, 東京理科大学野田キャンパス, 3/28-3/31, 1999.

64. 木村崇, 生嶋君弥, 若家冨士男, 蒲生健次, “メゾスコピック磁性細線における電流磁気効果2”, 第46回応用物理学関係連合講演会, 30aZN7/I, p. 197, 東京理科大学野田キャンパス, 3/28-3/31, 1999.

65. 木村崇, 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 蒲生健次, “多結晶Co薄膜の電流磁気効果における交換相互作用”, 第46回応用物理学関係連合講演会, 30aZN8/I, p. 197, 東京理科大学野田キャンパス, 3/28-3/31, 1999.

66. 北脇令子, 若家冨士男, 岩渕修一, “微小強磁性2重トンネル接合に於けるクーロン・ブロッケイド”, 日本物理学会第54回年会, 31aA12, 広島大学東広島キャンパス, 3/28-3/31, 1999.

67. 木村崇, 若家冨士男, 柳沢淳一, 蒲生健次　, “Ni、Coおよび Co/Ni 磁性細線における電流磁気効果”, 特定領域「微小領域の磁性と伝導」平成１１年度第1回研究会, 慶応義塾大学, 横浜, 6/17-18, 1999.

68. 椿修二, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “結合量子ドット系における電荷輸送”, 第60回応用物理学会学術講演会, 甲南大学, 神戸市, 9/1-4, 1999.

69. 木村崇, 生嶋君弥, 若家冨士男, 蒲生健次, “局所的に交換結合した Ni/Co 薄膜のホール抵抗”, 第60回応用物理学会学術講演会, 甲南大学, 神戸市, 9/1-4, 1999.

70. 中道真也, 萬代俊治, 若家冨士男, 岩渕修一, 蒲生健次, “抵抗結合型単電子トランジスタの伝導特性2”, 第60回応用物理学会学術講演会, 甲南大学, 神戸市, 9/1-4, 1999.

71. 木村崇, 若家冨士男, 柳沢淳一, 弓場愛彦, 蒲生健次, “Co/Ni 交換結合二層細線における電流磁気効果”, 日本物理学会1999年秋の分科会, 岩手大学, 9/24-27, 1999.

72. 木村崇, 生嶋君弥, 若家冨士男, 蒲生健次, “メゾスコピックスケール十字型磁性細線における電流磁気効果”, 第 23 回日本応用磁気学会学術講演会, 北九州国際会議場, 北九州市, 10/5-8, 1999.

73. 木村崇, 北井 聡, 若家冨士男, 蒲生健次, “強磁性／非磁性／強磁性体における電流磁気効果”, 日本物理学会 2000 年春の分科会, 24pPSB42, 関西大学, 3/22-25, 2000.

74. 木村崇, 北井 聡, 若家冨士男, 蒲生健次, “強磁性／非磁性／強磁性体における電流磁気効果”, 第 47 回応用物理学関係連合講演会, 30p-P14-12/I, 青山学院大学青山キャンパス, 3/28-31, 2000.

75. 木村崇, 若家冨士男, 柳沢淳一, 蒲生健次, “サブミクロン交差型磁性細線におけるホール抵抗の制御”, 第 47 回応用物理学関係連合講演会, 31a-P19-18/I, 青山学院大学青山キャンパス, 3/28-31, 2000.

76. 出原範久, 若家冨士男, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “単電子トランジスタにおける非対称環境インピーダンスの効果 II”, 第 47 回応用物理学関係連合講演会, 28p-S-8/II, 青山学院大学青山キャンパス, 3/28-31, 2000.

77. 鈴木正志, 椿修二, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “結合量子ドット系における電荷輸送 II”, 第 47 回応用物理学関係連合講演会, 28p-S-9/II, 青山学院大学青山キャンパス, 3/28-31, 2000.

78. 木村崇, 茂住厳, 若家冨士男, 蒲生健次, “サブミクロン Co/Cu/NiFe 細線における静磁気的相互作用”, 第 61 回応用物理学学術講演会, 北海道工業大学, 9/3-7, 2000.

79. 茂住厳, 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “Ar イオンミリングによる GMR 磁性細線の作製”, 第 61 回応用物理学学術講演会, 北海道工業大学, 9/3-7, 2000.

80. 吉田基, 村上晋哉, 中山雅義, 若家 冨士男, 柳沢淳一, 蒲生健次, “集束イオンビームその場プロセスによる微小トンネル接合の作製 III”, 第 61 回応用物理学学術講演会, 7aW3/II, 北海道工業大学, 9/3-7, 2000.

81. 若家冨士男, 岩渕修一, 長岡洋介, 蒲生健次, “アイランド電荷状態に対する非対象環境インピーダンスの効果”, 第 61 回応用物理学学術講演会, 3aT7/I, 北海道工業大学, 9/3-7, 2000.

82. 木村崇, 生嶋君弥, 若家冨士男, 蒲生健次, “サブミクロン強細線におけるホール抵抗の制御”, 第 24 回日本応用磁気学会学術講演会, 東京, 9/12-15, 2000.

83. 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “局所的に交換結合した磁性多層膜の電流磁気効果”, 第 55 回日本物理学会年次大会, 新潟大学, 9/22-25, 2000.

84. 板垣芳夫, 木村崇, 茂住厳, 若家冨士男, 蒲生健次, “アンチドット構造を有する磁性多層膜の電流磁気効果”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 31aV5/I, 明治大学駿河台キャンパス, 3/28-31, 2001.

85. 木村崇, 茂住厳, 板垣芳夫, 若家冨士男, 蒲生健次, “いくつかの磁性細線における磁気抵抗効果”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 31aV4/I, 明治大学駿河台キャンパス, 3/28-31, 2001.

86. 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “NiO/NiFe/Cu/NiFe 細線の電流磁気効果”, 第 56 回日本物理学会年次大会, 明治大学, 東京, 3/27-30, 2001.

87. 板垣芳夫, 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “面内配列強磁性/非磁性/強磁性構造の時期抵抗効果”, 第 62 回応用物理学会学術講演会, 愛知工業大学, 9/11–14, 2001.

88. 茂住厳, 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次, “Ar イオンミリングによる CPP-GMR 素子の作製”, 第 62 回応用物理学会学術講演会, 愛知工業大学, 9/11–14, 2001.

89. 木村崇, 板垣芳夫, 若家冨士男, 蒲生健次, “超微細加工反強磁性層を有するスピンバルブ膜の電流磁気効果”, 日本物理学会 2001 年秋季大会, 徳島文理大学徳島校, 9/22–25, 2001.

90. 木村崇, 板垣芳夫, 若家冨士男, 蒲生健次, “磁性多層膜細線における静磁気的相互作用の研究”, 日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学, 9/25–28, 2001.

91. 若家冨士男, 永井 孝佳, 蒲生健次, “微小電極と電界を用いたカーボンナノチューブの位置制御”, 第 49 回応用物理学関係連合講演会, 27p-V-10/III, p. 1338, 東海大学湘南キャパス, 3/27-30, 2002.

92. 久保邦之, 伊東将徳, 笠井誠朗, 柳沢淳一, 若家冨士男, 弓場愛彦, 蒲生健次, “集束 Mn イオンビームによる GaAs への Mn マスクレス局所注入”, 第 63 回応用物理学会学術講演会, 25a-B-13/II, 新潟大学五十嵐キャンパス, 9/24–27, 2002.

93. 木村晋也, 若家冨士男, 蒲生健次, “その場観察プレーティング法を用いたナノデバイスの作製”, 第 63 回応用物理学会学術講演会, 26a-S-4/I, 新潟大学五十嵐キャンパス, 9/24–27, 2002.

94. 若家冨士男, 片山幸司, 蒲生健次, “マルチウォールカーボンナノチューブのコンタクト抵抗”, 第 63 回応用物理学会学術講演会, 26a-S-5/I, 新潟大学五十嵐キャンパス, 9/24–27, 2002.

その他

1. 大阪大学低温センターだより No.96, pp.1-6, 1996 年 10 月, 研究ノート 「高温動作単一電子トンネリングデバイスのための Cr/Cr2O3 構造の作製と評価」 若家冨士男, 蒲生健次.

2. 社団法人生産技術振興協会創立 50 周年記念, 「科学と技術の礎 -大阪大学の研究成果-」(1999 年 1 月 29 日発行 非売品) pp.67-104, 「単電子素子と電荷揺らぎ -電子 1 つを情報担体とする究極の電子デバイスの実現を目指して- 」若家冨士男, 蒲生健次.

3. 大阪大学低温センターだより No.106, pp.1-7, 1999 年 4 月, 研究ノート 「環境インピーダンス制御型単電子トランジスタ」 若家冨士男, 蒲生健次.

4. 日本応用磁気学会誌 24(2000) pp.471-474, 「メゾスコピックスケール十字型磁性細線における電流磁気効果」木村崇, 生嶋君弥, 若家冨士男, 蒲生健次.

5. 日本応用磁気学会誌 25(2001) pp.695-698, 「サブミクロン強磁性細線におけるホール抵抗の制御」木村崇, 生嶋君弥, 若家冨士男, 蒲生健次.

6. 大阪大学低温センターだより No.120, pp.14-18, 2002 年 10 月, 研究ノート 「交換磁気異方性を用いた微細磁性多層膜における磁気双極子相互作用の研究」 木村崇, 若家冨士男, 蒲生健次.

著者略歴

- 1984(昭和 59) 年 3 月 大阪府立岸和田高等学校卒業
- 1988(昭和 63) 年 3 月 大阪大学基礎工学部電気工学科卒業
- 1990(平成 2) 年 3 月 大阪大学大学院基礎工学研究科物理系 (電気工学分野) 専攻前期課程修了　修士 (工学)
- 1991(平成 3) 年 6 月 大阪大学大学院基礎工学研究科物理系 (電気工学分野) 専攻後期課程中退
- 1991(平成 3) 年 7 月 大阪大学助手
- 所属学会
  - 日本応用物理学会
  - 日本物理学会
- 学会活動など
  - 第 14 回物理教育研究大会, 1997 年 8 月 1–2 日, 大阪大学, 実行委員
  - 1998 International Microprocess and Nanotechnology Conference, July 13-16, 1998, Kyongju, Korea, 実行委員
  - 第 59 回応用物理学会学術講演会 (1998 年 9 月 15 日〜18 日, 広島大学), 講演奨励賞審査員 (単一電子輸送現象)
  - 1999 International Microprocess and Nanotechnology Conference, July 6-8, 1999, Yokohama, Japan, 実行委員
  - 2000 International Microprocess and Nanotechnology Conference, July 11-13, 2000, Tokyo, Japan, 実行委員
  - 2001 International Microprocess and Nanotechnology Conference, October 31-November 2, 2001, Shimane, Japan, 実行委員
  - 2002 International Microprocess and Nanotechnology Conference, November 6-9, 2002, Tokyo, Japan, 実行委員