量子化機能素子の概要

坂本 統徳*

(受付1991年12月24日, 掲載決定1992年4月11日)

The Outline of Quantum Functional Devices

Tsunenori SAKAMOTO*

(Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono Tsukuba-shi, Ibaraki 305, Japan)

(Received December 24, 1991, Accepted April 11, 1992)

1. はじめに

量子力学的効果と言うと、物理の教科書の記述以外では我々にはこれまで馴染みが薄かった。ところが最近、微細加工技術の進歩によって、電子素子の寸法が小さくなるにつれて、量子化現象が電流・電圧特性などの中に比較的手軽に観察できるようになってきた。このような分野は、従来の電子素子を取り扱うようなマクロスコピックな領域と、原子・分子を取り扱うようなミクロスコピックな領域の中間と言う意味で、メゾスコピック領域と呼ばれており、新しい物理の分野としての学問的興味と、素子に応用できれば新機能が期待できるということから、多くの研究者の関心を集めている。欧米の主要研究機関ではすでにこれに関する基礎的研究が精力的に行われており、また国内では科技厅および文部省においてプロジェクトが進められている。

そのような情勢の中で、通産省工業技術院の次世代産業基盤技術研究開発制度の91年度新規テーマとして、「量子化機能素子の研究開発」が発足した。これは、半導体の極微小寸法領域において発現するさまざまな量子力学的効果を動作原理に応用した新機能素子の実現に係わる基盤技術を確立することを目的としており、他のプロジェクトに比較して集積システムへの応用に重点が置かれていると言えよう。本論文では、量子化機能素子プロジェクトを中心に量子効果素子の研究開発の背景、目的、原理、素子イメージ、要素技術、波及効果等について述べる。

て述べる。

2. 背景および目的

21世紀の高度情報化社会においては、情報処理の高度化と多様化が求められ、処理すべき情報量が飛躍的に増大することが予想されている。このため、これを支える情報処理システムのハードウェアの構成要素である電子素子に対して、超高速・大容量（低消費電力）・新機能といった性能をもつ新素子の開発の要請が一層顕著になると考えられる。

これまでの情報処理の目ざましい進歩は、半導体マイクロエレクトロニクス技術、なかでもシリコン素子の微細化による高集積化技術の着実な発展によって支えられてきた。その代表的なものとして、記憶素子（DRAM）を例にとれば、それを構成している要素素子であるMOSトランジスタは、素子寸法の比例縮小の法則（scaling rule）に従って微細化が行われ、図1に示すように高集積化が着実に進展してきた。この図に見られるように、最近の20年間は3年毎に約4倍のペースで集積度の向上を果たしてきており、現在では、既に1 μm を下回るゲート長を持つMOSトランジスタの集積化により、4MビットDRAMの商用生産がされており、また、試作段階ではすでに64MビットDRAMも開発されつつある。このままの勢いで進展すると、21世紀初頭には既存の素子構造を用いて、少なくとも1ギガビット（ゲート長では0.1~0.2 μm の領域）程度までの集積化が可能との見通しが得られつつある。

しかし、特性寸法（素子特性を決めている寸法：この

* 電子技術総合研究所（〒305 茨城県つくば市梅園1-1-4）

図1 ダイナミックメモリにおける素子寸法の縮小の傾向。

場合はゲート長)が $0.1\mu\text{m}$ 以下の領域に踏み込むと、これまで有効であった比例縮小則や製造技術の改良等による性能の向上は、さまざまな困難に阻害され始め、やがて破綻を迎えると予想されている。この原因としては、以下に示すようなものがあげられる。

- ① 素子構造・物理量の統計的な変動によって素子特性がゆらぎ、協調動作に必要な均一性を確保できなくなる。
- ② 素子の動作速度が電子の飽和速度によって制限される。
- ③ 素子の制御能力・駆動能力が、微細化してもそれ以上向上しなくなり、むしろ低下する。
- ④ 配線が長くなったり、素子分離不完全のために生じる素子間結合によって、寄生的な負荷が相対的に非常に大きくなる。

したがって、現在の集積回路の姿は、その構成素子および結合方法について、抜本的な変革を迫られることになるのは必至である。この限界をブレイクスルーするために、今までは素子微小化の阻害要因でしかなかったトンネル効果や、ホットエレクトロン効果などの量子効果を積極的に素子動作に取り入れようとする基礎研究が国内外で行われており、そのような素子は一般に量子効果素子 (quantum effect device) と呼ばれている。特に、量子化機能素子プロジェクトでは、特性寸法が $0.1\mu\text{m}$ 以下の半導体極微細構造において発現するさまざまな量子化現象を応用して、新しい集積システムを実現するための基盤技術を確立することを目的としている。

このような基盤技術の確立によって、例えば、下に示すような従来にない新しい性能・機能を有する素子の実

現が期待される。

- ① 量子細線中の電子の高移動度現象を利用した超高速素子。
- ② 極微細構造によるトンネル効果を利用した多値論理素子。
- ③ 量子箱構造によって電子を蓄積または転送することを利用した大容量メモリ素子や並列処理演算素子。
- ④ コヒーレント電子波をキャリアとして用いることによって得られる干渉、回折、反射等の現象を利用した多値論理素子、超高速スイッチング素子、センサ素子等。

これらの素子のイメージについては4節で述べる。

3. 量子効果素子の原理

従来の電子素子においては、走行する電子の平均自由行程よりも素子の特性寸法の方がはるかに大きく、電子の振る舞いは多数の粒子として統計的手法で取り扱うことができた。また、このような素子の最高動作速度は、(チャンネルの長さ/電子の飽和速度)で制限されていた。ところが特性寸法が $0.1\mu\text{m}$ 以下に縮小されてくると、電子は粒子としてではなく波としての性質が顕著になってきて、電子の分散関係が変わり、エネルギー準位が離散化したり、ミニバンド構造を持つようになったりするなど、いろいろな現象が発現してくる。そのような量子力学的な現象を素子動作に応用したものが量子効果素子であるが、その源流は、1970年にIBMの江崎玲於奈博士の提唱した「超格子」の概念に遡ることが出来る¹⁾。

超格子は、図2(a)に示すように異なった結晶を電子のド・ブロイ波長程度の厚み($\sim 10\text{nm}$)で交互に積層すると、膜に垂直方向の電子の動きが周期的ポテンシャルによって変調(反射)され、エネルギーバンド構造がミニゾーンに分割される結果、電子がブリュアン帯域の端まで加速可能となって、超高周波のプロッホ振動が得られるというものであった。このようなアイデアを手がかりとして、工技院・次世代制度の「超格子素子の研究開発」プロジェクトは1981年に発足した。以来、10年間にわたって半導体の超格子構造や超薄膜構造を用いた素子の研究開発が実施された結果、共鳴トンネル効果を用いたホットエレクトロン素子(RHET)による論理演算基本集積回路の実現²⁾を始めとして、超格子素子の実現に係わる基盤技術で多くの成果を得て1991年3月にプロジェクトは終了した。

超格子プロジェクトでは、原子層オーダーの成長制御技術によって、図2(a)のような膜厚方向だけを精密に制御して作製した超格子、いわゆる一次元超格子を開発の対象とした。今後さらに、図2(b), (c)に示すよう

図2 1次元, 2次元, 3次元の超格子構造と電子の閉じ込め状態の概念図.

に, 結晶成長を二次元方向さらには三次元方向にも精密制御することが出来れば, その中での量子化現象をより顕在化させることが出来ると予想されている.

例えば, 図2(b)に示すような, いわゆる量子細線構造が実現されると, 中を流れる電子の散乱が大幅に抑制されるため, 高電子移動度が得られることが1980年に榊によって指摘されている³⁾. また, このような量子細線中においては, 伝導電子の平均自由行程も長くなるために, 電子波は単一モードになって, その位相は長い距離にわたって保存され, いわゆるコヒーレント電子波が得られることになる. その結果, 干渉, 回折, 反射などの電子の波動性に起因するさまざまな量子効果を発現させることができると期待されている. このようなメゾスコピック系の電子伝導現象を解明することを目的として, 「榊量子波プロジェクト」等の研究が行われている.

また, 図2(c)に示すような, いわゆる量子箱構造が実現されると, これらの量子箱においては, 状態密度は特定の離散的なエネルギー位置に集中してくる. その結果, 電子の散乱機構が抑制されたり, 隣接した量子井戸間で各種の量子準位間の遷移や, 高効率のキャリア注入が可能になるなどのさまざまな量子効果がさらに顕在化するものと考えられる. これらの効果をうまく制御して動作原理に取り込むことが出来れば, 全く新しい機能を持った素子を実現することが期待される.

このような極微細構造が実現できれば, 光素子の分野でも半導体レーザーの高効率化など, さまざまな波及効果が期待されているが, 本プロジェクトでは電子素子への応用に目的をしぼっているため, ここでは紙面の都合で, 量子効果の光素子への応用についての言及は割愛する.

4. 研究開発の範囲と素子イメージ

4.1 範囲とその特徴

上に述べたような原理に基づく量子効果デバイスに関して, 現在, 我が国で実施されている代表的なプロジェクトをあげると以下のようなものがある.

①「榊量子波プロジェクト」: 科技庁創造科学推進事業, (1988~1993年の5年間, 総括責任者: 榊裕之・東大先端研教授)

②「メゾスコピック・エレクトロニクス」: 文部省大型基礎プロジェクト(大学-民間共同研究), (1988~1993年の6年間, 研究代表者: 生駒俊明・東大生産研教授)

③「メゾスコピック領域における電子波干渉効果の基礎」: 文部省重点領域, (1990~1993年の3年間, 領域代表者: 難波進・阪大基礎工教授)

これらのプロジェクトは, 量子化現象の解明などメゾスコピック物理の追求にやや重点が置かれている. それに対して, 量子化機能素子プロジェクトにおいては, これらの先行プロジェクトで得られた量子効果の物理的解明などの成果も十分に活用しつつ, それらのデバイスへの応用によって, 全く新しい集積システムを構築することに重点が置かれているのが特徴であり, このようなプロジェクトは国内外を通じて他に例を見ないものである. この目的のために研究開発すべき素子は, 超高速・大容量・新機能といった特徴の他に, 以下に示すような二つの条件を満たすことが必要であると考えられる.

① 常温に近い温度で動作可能なこと: ヘリウム温度以下でしか動作しない素子では, 実用化の大きな障害となる. 動作温度は微細加工の精度にも依存するために,

現時点で何度で動作するか予測するのは困難であるが、最終的に常温で動作できなくても、最低77 K以上の温度で、それが原理的に可能であるとの見通しを得ることが期待される。

② 集積化可能なこと：個別素子としては動作しても、入出力分離や増幅度が充分なものでないと集積化は困難で、その応用はセンサーなどに限られることになり、高度情報処理システムへの応用という目的を持つ主流の素子になることは出来ない。量子効果を発現するには原理的に化合物半導体の方がシリコンよりも有利で、また研究が先行しているが、それらを集積回路に組み込んで量子化機能を実証するとすると、集積技術の進んでいるシリコンにも期待される。

4.2 量子化機能素子のイメージ

量子化現象には多種多様のものがあるが、素子に応用した際に上に述べた二つの条件を満足するものとなると、取り組むべき対象はある程度しぼられることになる。それらを応用したものをここでは便宜的に、①量子化微構造素子、②量子単位素子、③量子波動素子、の三つのタイプに分類して、以下にこれらの素子の原理やイメージについて述べる。量子化機能素子のプロジェクトでは、これらのイメージをより具体化させたものや、発展させたものが取り上げられると考えられる。

4.2.1 量子化微構造素子

極微細構造中において、電子のトンネル効果、無散乱弾道走行（バリスチック）効果や単一電子トンネル効果等を利用する素子で、その一例としてトンネル制御素子の基本原理を図3に示す。江崎ダイオードの例で良く知られているように、トンネル効果は高速で、しかも温度に依存しない現象であるため、常温で動作する高速素子への応用が期待されている。しかし、二端子素子のままでは回路設計に自由度がなく、集積化は困難である。もし、図3に示すように半導体中に設けたトンネル障壁層に第三の電極を付加することによって、障壁の厚さ、あるいは高さを変調できるような三端子素子構造を作製す

図3 三端子トンネル制御素子の概念図。

ることができれば、上記の欠点を克服できることになる。しかし、トンネル障壁は薄くて抵抗が高いので、ここに直接制御電極を付加するのは工夫を要する。

トンネル制御素子のもう一つの考えは、この障壁層の中に量子井戸を設けた共鳴トンネル構造にして、トンネル確率を制御する方法であり、これは既に共鳴トンネル・ホットエレクトロン・トランジスタ（RHET）として開発されている²⁾。このRHETの欠点の一つは、トンネルが同じ伝導帯間（intra-band）で起きるので、オフの場合の電流の遮断性が悪く、電流のピークと谷の比率（P/V比）があまり大きく出来ないことである。このマージンが少ないと、集積回路を自由に設計することが難しい。P/V比を大きくするには、江崎ダイオードのように伝導帯一価電子帯間の inter-band トンネル現象を利用する方法が原理的に優れている。その一例として、

図4 量子箱構造とそのエネルギーバンド構造の概念図。

図5 量子箱を用いたメモリ素子の概念図。ワード線とビット線の交差した個所に絶縁物で囲まれた量子箱を設け、そこに共鳴トンネル効果で電荷を注入・蓄積する。

図6 量子箱メモリ素子と1メガビットメモリ素子の寸法の比較。

InAs/AlSb/GaSb 系の共鳴ヘテロ構造による inter-band トンネル素子で、P/V 比=88(77 K) が得られている⁴⁾。

4.2.2 量子準位素子

これは量子井戸に形成された電子のエネルギー準位間の遷移現象を素子動作に利用する素子である。

いま、図4(a)に示すような数10 nm 程度の半導体活性層を絶縁物で取り囲んだ量子箱構造を作製すると、その量子箱中では、図4(b)に示すように電子の存在するエネルギー準位がとびとびの値に量子化され、そこに一定の数の電子を蓄積することができ、メモリ素子への応用が期待される。また、トンネル可能な程度にそれぞれの量子箱を接近させて配置すれば、その間に電界を印加することによって、量子箱に形成されたエネルギー準位間における電子の遷移が可能となり、これを利用して論理素子を実現することも可能と考えられる。

このような量子準位効果を用いた素子の概念図を図5に示す。半導体基板上において、ワード線とビット線の交差した個所に、絶縁物で囲まれた数10 nm の寸法の量子箱を配置すると、適当な電圧を印加することによって、共鳴トンネル効果で、この中に電子を蓄積することが可能となり、大容量メモリの実現が期待できる。しかし実際にはギガビット程度に高集積化したメモリになると、このような従来方式による書き込み・読み出しが困難になると考えられるため、周辺メモリセルと結合した動作をするセルラー・オートマトンのような新しい概念のアーキテクチャーが必要になると考えられる⁵⁾。

このような量子箱素子が従来素子と比較して、いかに

小さなものであるかの概念図を図6に示す。量子箱をメモリセルとして用いると、現在の1 M ビット DRAM のメモリセルの1/100以下の寸法で、しかも蓄える電子の数は1~100個程度と3桁以下になり、計算上は数100ギガビット/cm²程度の大容量メモリも実現可能となる。

4.2.3 量子波動素子

これは半導体中での電子の波動性を利用し、干渉、反射、回折等の量子波動現象を動作原理に利用する素子である。

従来の半導体素子のチャンネル中においては、図7(a)に示すように電子は不純物や原子層ステップあるいは結晶格子に衝突しながら走るため、移動度は低い値になっている。また、このような頻繁な散乱が起きるために電子波の干渉効果は明瞭には現れない。ところが前に述べたように、電子の波長程度の断面積をもつ量子細線を、不純物や原子層ステップがないように高精度に作製し、量子細線中に形成される電子の基底準位と第1励起準位のエネルギー差を十分大きくすることができれば、電子の散乱が抑制され非常に高い移動度が得られる可能性がある⁶⁾。またこのような量子細線中を伝搬する電子波はシングルモードになって、その位相は長い距離にわたって保存されることになる。このことを利用すれば、例えば図7(b)に示すように複数の量子細線を隣接して設けると、伝播の途中で一つのチャンネルから他のチャンネルへと共鳴トンネル効果によって電子波の位相を保ったまま遷移させることも可能になる。

図8はこの原理を応用した量子波動スイッチング素子

(a) 従来の素子

(b) 量子細線素子

図7 従来素子と量子細線素子のチャンネル中を流れる電子の状態の比較。(a) 従来素子では散乱のため電子の移動度は低い。(b) 量子細線素子では移動度が高くなり、高速性が期待される。また、電子波の位相を保存したまま隣接した量子細線にトンネル効果で遷移することも可能となる。

の概念図である。この図に示すように、半導体基板上に絶縁層で囲まれた量子細線導波路を、バイアス無しでは結合しない程度の距離(数10 nm程度)に隣接して多数作製する。入力部からチャンネル中を伝搬して来た電子波は、途中に設けられた制御電極に電界を加えて量子細線間の結合状態を強くした場合には、隣接のチャンネルに遷移することが可能となる。このことを利用すれば、超高速で、超低消費電力のスイッチング素子の実現が期待される。ただし、このままでは増幅作用がないのが問題である。

5. 研究開発の要素技術

上記のような素子を実現するためにブレークスルーを必要とする要素技術は、以下のように考えられる。

① 量子化構造の形成・評価技術

量子化機能素子実現のキーテクノロジーである、ナノメートルオーダーの3次元的微構造を作製する技術、およびその評価技術である。そのような要素技術としては、成長技術に関しては、MBE, MOCVD, ALE等、微細加

図8 量子細線の導波路構造を用いたスイッチング素子の概念図。入力電極から導波路の一つに注入された電子はコヒーレント波として直進して出力部に到達するが、途中に設けられた制御電極に電圧を印加して結合度を強めた時には、電子波は隣接した導波路にスイッチングされる。

工技術としては、電子線やイオン線等を用いたレジストレスの低損傷プロセス技術等、また、評価技術としては、STMや電子ビーム等のマイクロプローブを用いた極微細構造の評価技術等が挙げられる。これらの個々の技術の現状については、本特集号の中で後ほど詳細に述べられる。

② 量子化機能の制御技術

量子化構造中で発現するさまざまな物理現象を計測・分析することにより、量子化機能を効果的に制御する技術で、このためには量子化のシミュレーション技術の開発等も重要になると思われる。

③ 量子化機能を用いた要素素子構築技術

量子化現象に基づく電子輸送の制御技術を活用して、集積システムの機能単位を構成する要素素子を作製・評価する技術で、例えば、現在のCMOS構造に相当するような集積化機能単位を量子化構造でも開発する必要があると考えられる。

④ 集積システム構築技術

上記の要素素子を多数有機的に結合して、所望の高度な情報処理機能を発揮する集積システムを構築する技術で、そのためには新しいアーキテクチャ概念の構築が必要になると考えられる。

このうち①の技術は、素子の微細化という大きな流れの中で、従来から不断に取り組みられているが、②は量子効果素子の流れで最近注目を集めているものであり、③および④は量子化機能素子プロジェクトによって新たに上げられたものである。

図9 量子化機能素子の研究開発によってもたらされる波及効果。

6. 期待される効果

量子化機能素子の研究開発によってもたらされる、さまざまな波及効果の概念図を図9に示す。本プロジェクトのような基礎的な研究開発では、予想外の可能性が拓けたり、また、その逆に途中で見通しが行き詰まったりすることもあるので、現時点で研究開発の波及効果を明確に予想するのは困難であるが、一応以下のようなことが考えられる。

(1) ナノメータ領域のプロセス技術・素子化技術の開発によって、100ギガビットを越える超高集積回路素子、テラヘルツ領域の超高速素子、超多重多機能素子等の開発の基礎技術が確立され、21世紀の高度情報化社会における多様な情報処理のニーズに対応できる。

(2) 量子化機能を主体とした微細構造物理の新分野が開拓され、それに基づいた全く新しい原理に基づく新素子が開発され、21世紀以降のマイクロエレクトロニクス発展の基盤となる。

(3) 既存の材料に基づき従来の材料・デバイス技術の限界をブレイクスルーし、設計通りの結晶構造を持った

人工材料を得る技術が構築され、新しい概念の結晶の創製およびメゾスコピック物理学の大きな発展を促す。

7. 研究開発体制

本プロジェクトの研究実施者は、国立研究機関としては電子技術総合研究所が、また委託側としては助新機能素子研究開発協会を通して、日立製作所、富士通、日本電気、松下電器、ソニー、モトローラの6企業が参加する。また、この他に東大、阪大、九大などにも研究委託がされる予定である。

8. おわりに

量子化機能素子は、量子力学的寸法領域において発現するさまざまな量子化現象を、積極的に素子動作に応用して新しい機能を創出し、21世紀の高度な情報処理ニーズに対応するデバイス技術の新しい基盤を築こうとするものであり、その成果は広く人類全体の「共通の財産」となると考えられる。しかし、量子化現象を工学的に制御し、集積化デバイスの実現を図るという総合的な研究開発は、国内外を通じてほとんど行われていないのが現状である。現今の情勢を考えれば、我が国が率先して産・官・学を結集し、国際的協力も図りつつ、この量子化機能素子に係わる基礎的かつ広範な分野の研究開発を長期にわたり組織的に進める必要があると考えられる。また、量子化機能素子のような基礎的・先端的研究においては、最終的な成果は研究開発の発足時には予測しがたい点があり、これらの研究の途中で、新たな応用の可能性が展開することも充分予想されるので、それに対しては柔軟に対応できるかどうかは、プロジェクトの成功を支配する重要なキーになるものと思われる。

〔文 献〕

- 1) L. Esaki and R. Tsu, IBM J. Res. Develop., **14** (1970) 61.
- 2) K. Imamura, M. Takatsu, H. Ohnishi, T. Mori, T. Adachihara, S. Muto, and N. Yokoyama, Proc. of Cornell Conference (1991).
- 3) H. Sakaki, Jpn. J. Appl. Phys., **19** (1980) L735.
- 4) J. R. Soderstrom, D. H. Show, and T. C. McGill, Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 1094.
- 5) R. T. Bate, G. A. Frazier, W. R. Frensley, J. W. Lee, and M. A. Reed, Proc. of SPIE, Quantum Well and Superlattice Physics, **792** (1987) 26.