

特集②

単電子エレクトロニクス研究の動向

— 半導体集積回路の限界は突破できるか —

客員研究官 小口 信行*

材料・製造技術ユニット 高野潤一郎



1. はじめに

シリコンを基盤とした半導体デバイスとそれをういたコンピュータはムーアの法則に乗って急速な発展を遂げてきた。しかし微細化によるデバイスの動作上の問題と集積度の向上にともなう発熱の問題から限界が近いともいわれている。

科学技術振興事業団は「戦略創造プログラム」として、国（文部科学省）が2002年度に新たに示した6つの戦略目標の下に13の研究領域を設け、総額約44億円の資金を投入して革新的技術シーズの創出を目指した基礎的研究を進めている。その戦略目標の1つに「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」があり、集積化限界の克服に向けた重点的・集中的な取り組みが始められている。

また、2002年6月科学技術・学術審議会の策定した「ナノテクノロジー・材料に関する研究開発の推進方策」は、次の世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバ

イス・システムの構築に取り組む必要性を指摘している。この中で、従来の集積回路に使われてきたトランジスタとは異なり、単一の電子（単電子）で動作する新しい動作原理のデバイス・システムおよびその集積化に関する研究の重要性が指摘されている。

単電子で動作するデバイス・システムで集積回路を作ることができれば、従来の集積回路と比較し、消費電力が1万分の1から10万分の1程度と少なく済み、動作限界が緩和されるとともに、発熱によって集積回路が機能しなくなるという問題を回避できそうだという期待がある。

単電子で動作するデバイス・システムは、クーロンブロッケードと呼ばれる単電子に固有の新しい動作原理に基づいて機能する。その集積化のアプローチは次の3つに大別される。

(1)回路のアーキテクチャは現方式を踏襲し、従来の集積回路

- に使われてきたトランジスタを単電子トランジスタで置き換えることにより集積化限界を克服していこうとする研究（10年以内の実用化を目指す）
- (2)回路のアーキテクチャを単電子による動作に適した「二分決定グラフ方式」と呼ばれる新しい形に変えることにより、集積化限界を克服していこうとする研究（10年から15年後の実用化を目指す）
- (3)電気的な配線を使わない新しい情報処理方式、すなわち単電子を使ったセルオートマトンと呼ばれる構造を用いて集積化限界を克服していこうとする研究（(2)よりさらに将来の実用化を目指す）

本特集においては、このような単電子で機能する集積回路の実現に向けた研究開発の現状と将来展望をまとめる。

2. クーロンブロッケード現象

単電子で動作するデバイス・システムの動作原理はクーロンブロッケードと呼ばれる現象に基づいている。この現象は金属または半導体等の物質のサイズが小さくなると現れる。

非常に小さな金属あるいは半導

体島（クーロン島と呼ばれる）にナノメータの隙間（トンネルギャップと呼ばれる）で電極をつないだ場合、電子は電極からトンネル現象でこれらの島に移動する。金属あるいは半導体島が大きい場合はこの電子の移動は自由におこる

が、これらの島がナノメータサイズまで小さくなると、この電子の移動が阻止（ブロック）されてしまう。しかし電極にある一定以上の電圧を加えれば、電子は移動する。これをクーロンブロッケード現象という。

3. 単電子トランジスタの集積化

3 - 1

単電子トランジスタ

従来のトランジスタは1~10万個の電子からなる「電流」によって動作していた。しかし単電子トランジスタは、上に述べたクーロンブロッケード現象に基づき「電子1個（単電子）」により動作する。単電子トランジスタの構造を図1に示す。これは従来のトランジスタと同じソース、ドレイン、ゲートと呼ばれる3つの電極からなっているが、従来のトランジスタとは異なりこれらの電極の間に微細なクーロン島が配置されている。

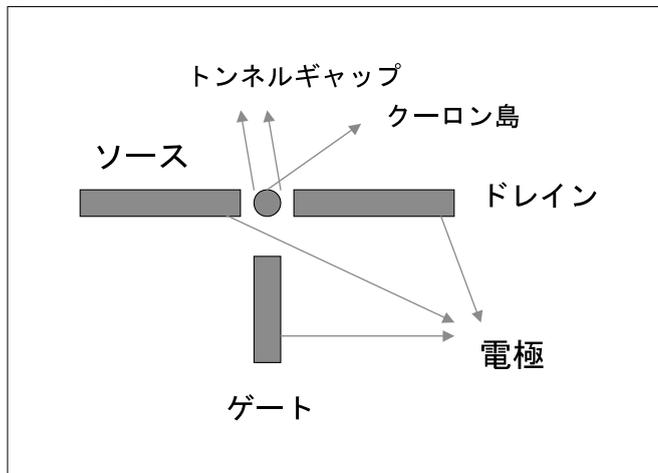
単電子トランジスタについては世界各所で多くの研究が行われており、研究対象材料も多い。この単電子トランジスタを実用化するためには、クーロン島の大きさをナノメートル程度まで小さくして室温で動作させる必要がある。研究の初期段階では、小さいサイズのクーロン島がなかなかできず低温でしか動作しなかったが、現在では金属、半導体などのいくつかの材料において単電子トランジスタとしての室温動作が確認されているものもある。

3 - 2

集積化

単電子トランジスタは構造自体が本質的に小さく高密度集積化に適しているが、この集積化に関する研究はまだ初期の段階にある。

図表1 単電子トランジスタ



東京工業大学の小田俊理教授は、単電子トランジスタの集積化に関する将来展望として次のコメントを寄せている。「従来のシリコン集積回路を構成しているデバイスに単電子トランジスタで置き換えることには困難がある。すなわち、多くの単電子トランジスタを微細な配線を用いて結ぶ必要があるが、ナノメータスケールの微細配線はまだ作製が困難である。また単電子トランジスタは単電子で駆動させるため、この出力を利用して動作できる次段の単電子トランジスタの数が制限されてしまう。今後は、単電子トランジスタだけでなく、シリコン集積回路と同一チップ上に形成する混成回路の研究が必要である。そのため、単電子トランジスタの材料としてはシリコンプロセスに整合する材料が求められる。単電子トランジスタの材料としてシリコンを使えば、現在のシリコン集積回路製造

ラインをほぼそのまま使える点が大変有利である。」

最近、東芝の内田博士らにより、単電子トランジスタと通常トランジスタの混成回路が1つのシリコンチップ上に作製されている。また同様な混成回路はNTT猪川博士らによっても作製されている。さらに日立製作所の矢野博士らのグループではクーロンブロッケード現象を利用することにより、シリコンを用いた単電子で動作するメモリを試作している。

シリコン以外の有望な材料としてはカーボンナノチューブをあげることができる。産業技術総合研究所の松本和彦博士らのグループは、最近カーボンナノチューブを用いた単電子トランジスタの集積化技術を開発した。カーボンナノチューブにより微細な配線も一緒にできてしまう。今後単電子トランジスタの集積化技術としてさらに発展していくと予想される。

4. 二分決定グラフ論理回路

現方式のシリコン集積回路においては、論理アーキテクチャとして、AND, OR, NOTなどの動作を行わせるためトランジスタを多

段に縦続接続している。この場合、配線も長くなり大電流が必要となる。

一方上述の単電子トランジスタ

は電流に換算すると非常にわずかな値である単電子で動作し、また周囲の微細な電気的変化によって誤作動が起こりやすい電荷敏感デ

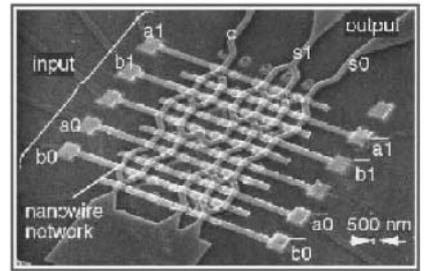
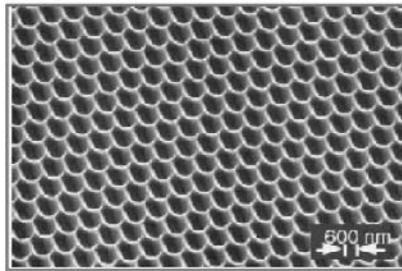
バイスである。そのため、従来の論理アーキテクチャを採用する限り、そもそもこの単電子トランジスタは上記第3章で述べたように、従来方式での集積化には適してはいないという懸念も指摘されている。

そのため、論理アーキテクチャを単電子による動作に適した形に変えることにより、単電子トランジスタの集積化とは別の概念で集積回路の限界を克服していこうとする研究も行われている。集積回路のアーキテクチャを単電子による動作に適した形、すなわち「二分決定グラフ」という新しいアーキテクチャに替えていこうという研究が行われている。

二分決定グラフに基づいて論理回路を構成することにより、簡便な回路設計が可能になると考えられている。また論理回路を構成するための基本動作は単純な二分岐スイッチであり、回路構成のためには入力にしたがって信号媒体の転送方向を切り替えることのできるさまざまな物理現象を利用できる。なかでも単電子で動作するデバイスでは集積化、低消費電力化の要請に合致している。

図2に北海道大学の長谷川英機教授らのグループにおいて、あらかじめ微細加工を施した基板に形成されたインジウムガリウム砒素 (InGaAs) ヘキサゴナル量子細線ネットワーク、およびこの技

図表2 加工基板上に形成されたInGaAsヘキサゴナル細線ネットワーク(左)、およびこの技術を利用して作られた二分決定グラフ集積回路(2bit加算器)



北海道大学長谷川研究室のweb siteから引用
http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/iiede/2_naiyou_j.html

術を利用して作られた二分決定グラフ集積回路(2bit加算器)の走査電子顕微鏡写真を示す。

二分決定グラフ集積回路においては、六角形が繰り返された網目状のナノスケール細線がネットワークを形成し、さらに直線状の微細な金属電極が配置されている。ナノスケール細線が接続するY字型の分岐が単電子トランジスタのスイッチとなっており、その動作が金属電極で制御される。これらにより論理回路が構成されている。

この二分決定グラフ集積回路の提唱者である長谷川教授は以下のコメントを寄せている。

「この二分決定グラフ回路方式は、論理アーキテクチャが従来の集積回路と異なり、出力を次段の入力とする現在の集積回路でとられている縦続接続方式ではないので、大電流駆動が不要となる。また、同じ機能を実現するのに必要なデバイスの数は、論理ゲート方

式より本方式の方が少ないこともわかっている。さらに、規則正しい構造で、細線ネットワークが配線をかねており、かつ個々の分岐スイッチには、ソース・ドレイン電極がないので、配線長の問題が大きく緩和され高密度集積化に適している。」

長谷川教授らはこの回路の材料としては、細線ネットワーク構造製技術が成熟している化合物半導体が現時点では最も適切な材料であると考えている。しかし、このような回路方式は化合物半導体ばかりではなく様々な材料に適用可能であり、近い将来シリコンで化合物半導体に匹敵する細線ネットワークが実現できれば、その方が現在のシリコン集積回路製造ラインをほぼそのまま使えるという観点から実用性が高いだろうとしている。

5. 量子ドットセルオートマトン

単電子トランジスタを利用した集積回路あるいは二分決定グラフ論理回路の集積化がさらに進んでいけば、やがては配線でつないだ単電子トランジスタ間の距離あるいは量子細線ネットワークのサイズも10ナノメートル以下になり、電子のトンネル効果が顕著になってくると予想される。このようにトンネル効果が顕著になると集積

回路は機能しなくなる。

デバイス間の長い配線が必要なく、単一電子による近接相互作用によって動作するセルオートマトン、特にナノメートルスケールの量子ドットを用いた量子ドットセルオートマトン(Quantum Cellular Automata; QCA)はこのような限界に対応できるものとして期待されている。

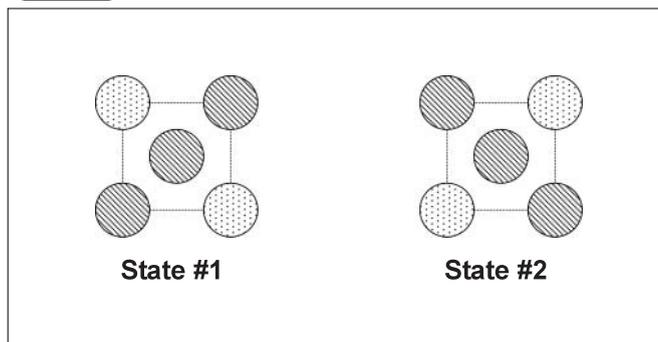
図3に5つのクーロン島(量子ドットとも呼ばれる)と2個の電子からなるセルを示す。

QCAはこのセルが単位となって機能する。2個の電子が左斜めの対角線の島に入っているとき(state #1) または右斜めの対角線の島に入っているとき(state #2) が一つのセル全体としてみてエネルギー的に一番低い状態にあるの

で、電子はどちらかの配置をとろうとする。このセルを2つ並べた場合、2つのセル内電子の並ぶ方向が直角になると（すなわち一つのセルはstate #1にありもう一方のセルはstate #2にある）2つのセルで近くにいる電子はお互い反発して異なるセル内の電子の配置は平行になろうとする。図4のようにたくさんセルを並べると、電子の配向は全部のセルで平行になろうとする。これをなんらかの方法で、一番左端のセル内電子の配向を90度反転させると、隣のセル内の電子も端のセル内電子の配向と平行になろうとし、ドミノ倒しのように全てのセル内の電子はその配向をそろえようとする。このように多くのセルの結合により、左端の情報を、配線を介さないうで反対側のセルに伝えることができ、このセルの配列を工夫することによりコンピュータに必要ないろいろな論理演算を行わせることができると考えられている。

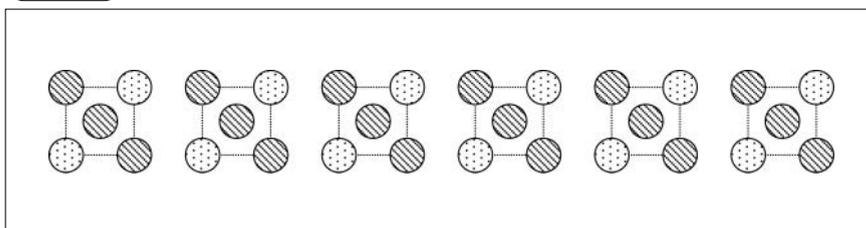
QCAは、現在まだ概念だけが提案されて原理的な実験が行われているにすぎない。今後室温で動作するQCAを実現するため、サイズの小さい量子ドット等の超微細構造を制御性よく、自己組織化などを活用して配列させる技術が確立することが必要である。最近では半導体などのいわゆる量子ドットばかりではなく、これらよりはるかに小さな構造の混合原子価をもつ4価のルテニウム錯体を使

図表3 5つのクーロン島からなるセルの模式図



点模様の島には電子が1個ずつ余分にはいっており、斜線の島にはこの電子がない。2個の電子の安定な配置としては左斜めの対角線の島にはいる場合 (state #1) と右斜めの対角線に入る場合 (state #2) がある。5つのクーロン島の間では電子のトンネルが起こる。

図表4 セルオートマトンの原理



セルを並べると各セル内の電子の配置は全部のセルで並行になろうとする。各セルの間では隣接するセルからの静電力は働くが、電子のトンネルは起こらない。

うことにより室温で動作するQCAが実現できそうだという提案があり、実現に向けた実験も米国で行われている。

QCAの動作シミュレーションに関する研究をかつて行っていた東芝研究開発センターLSIラボラトリーの榎本哲史氏はQCA研究の現状と将来展望に関して次のコメントを寄せている。

「米国ノートルダム大学のLentらにより提案されたQCAは微細化の極限デバイスとして考案されたが、量子ドットを正確に作製し、

かつ電子1つ1つを正確にコントロールする必要がある。まずこの方法を確立する必要があるだろう。また、今後LentらのQCAとは異なる新しい形のいろいろなセルオートマトン構造を追究していくことも必要であろう。」

QCAはまだまだ先が不透明な部分も多いが、実現できれば電子1個ずつを制御するぐらいの小さなエネルギーで駆動でき、また配線の問題もなくなるため現在の集積回路の集積度を飛躍的に高めることが期待できる。

6. 単電子エレクトロニクスに関する各国の研究開発状況

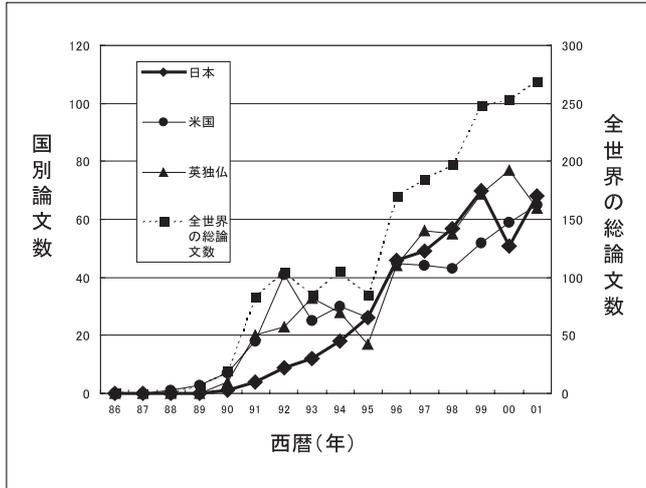
米国ISI社のデータベースにより、過去21年間（1981年1月～2002年10月）にわたり全世界で発表された論文のうち、単電子に関する論文の件数を調べた結果を表1にまとめた。単電子による新しいデバイス、システムの動作原理である「クーロンブロッケード (Coulomb Blockade)」というキー

ワードで検索される論文は合計1934件ある (図表5)。またこのうち単電子トランジスタ (single electron transistor) に関する論文は631件である (図表6)。単電子デバイス・システムの集積化を志向していると考えられる論文を検索するため、「単電子 (single electron)」 and 「論理 (logic)」 or

「メモリ (memory)」 or 「集積化 (integrated)」 というキーワードで調べると合計345件であった (図表7 - c)。さらに二分決定グラフによる論理回路に関する論文は11件、量子ドットセルオートマトンに関する論文は81件であった (図表7 - d)。

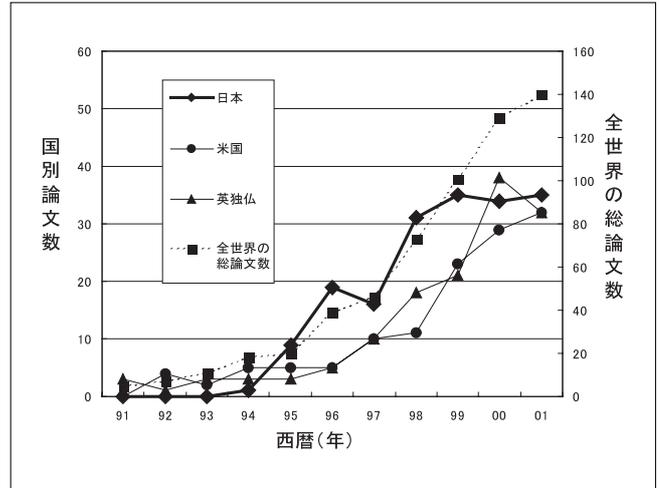
この表より我が国の「クーロン

図表5 coulomb blockade をキーワードとして検索



1986年以降合計1934件 (うち日本464件)、1985年以前はいずれの国からも発表はない。

図表6 single electron transistor をキーワードとして検索



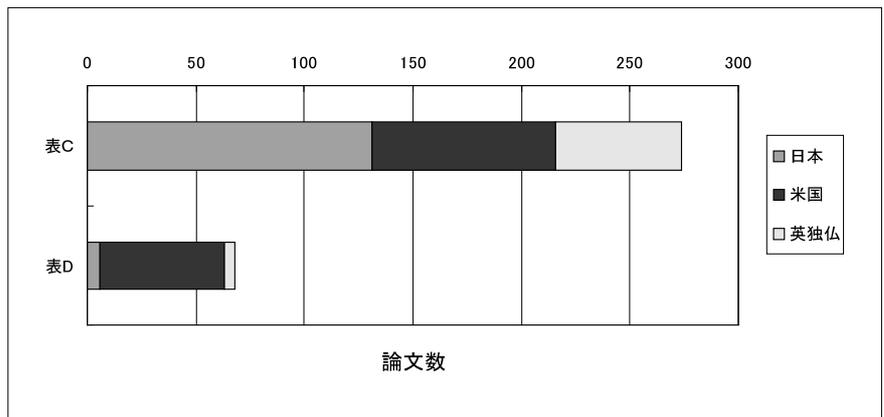
1991年以降現在まで631件 (うち日本205件)、1990年以前はいずれの国からも発表はない。

ブロッケード」「単電子トランジスタ」に関する研究は、米国、ドイツとともに群を抜いて多いことがわかる。特に「集積化」という応用を志向した研究は世界で一番活発に研究が行われていると言える。

「二分決定グラフに基づく論理回路」は、北海道大学の長谷川教授らにより提唱され、まだ研究が開始されて日も浅いため現在まで同大のグループからの発表が中心になっている。しかしこの方式はシリコンを含めた多くの材料に適用できると考えられ、今後研究の拡がりをみせてくると予想される。

また「量子ドットセルオートマトン (QCA)」に関しては米国からの発表が圧倒的に多い。QCAは1993年に米国ノートルダム大学のC. S. Lentらにより提唱され

図表7 (c) single electron and (logic or memory or integrated) をキーワードとして検索、(d) quantum-dot cellular automata or (quantum cellular automata and dot) or quantum dot cells or (cellular automaton and single electron) をキーワードとして検索



(c) 1991年以降現在までの総論文数345件 (うち日本138件)、1990年以前はいずれの国からも発表はない。(d) 1993年以降総論文数81件 (うち日本6件)

現在米国では同大学を中心に研究が活発に行われているが、日本ではわずかの動作シミュレーション

に関する研究はあるものの実験的な研究は一切行われてはいない。

7. おわりに

以上、次の世代の情報処理・通信を担うデバイスのうち、単電子で機能する集積回路の実現に向けた研究開発の現状と将来展望をまとめた。

我が国においては、単電子デバイス・システムの集積化を志向している研究は世界で一番活発に研究が行われている。二分決定グラ

フに基づく論理回路に関しては、我が国を中心に研究が立ち上がりつつある。量子ドットセルオートマトン (QCA) に関しては、米国で活発に研究が行われているが、我が国ではわずかの動作シミュレーションに関する研究はあるものの実験的な研究は一切行われてはいない。このQCAはまだま

だ先が不透明な部分も多いが、実現できれば現在の集積回路の集積度を飛躍的に高めることが期待できる。我が国においても今のうちに何らかの研究を始めておかないと完全に米国の後塵を拝する結果になりかねない。

長期的な視点から、「単電子エレクトロニクスの実現」のような

新原理デバイス・システムの構築に取り組む研究に対しては、第1章で紹介した科学技術振興事業団の「戦略創造プログラム」にとどまらず、今後もさらに継続的な研究資源の投入が必要であろう。

謝 辞

本特集をまとめるにあたり、東京工業大学量子効果エレクトロニクス研究センター小田俊理教授、北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻量子界面エレクトロニクス研究センター長、長谷川英

機教授、東芝研究開発センターLSIラボラトリー棚本哲史氏、独産産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門松本和彦総括研究員に多くのコメント、情報をいただきました。ここに深く感謝いたします。

