

特集

2

「トンネルトランジスタ」で道が開けた！

理論限界を突破する 省エネデバイス

パソコンやスマートフォンだけでなく、コンピュータで制御されるクルマや家電などに幅広く使われているLSI（半導体集積回路）。だが、高性能化、高集積化が進むに伴い、過剰な電力消費や発熱などの問題も深刻化している。「トンネルトランジスタ」はこれらの問題を一挙に解決する省エネデバイスだ。



シリコン基板上に化合物半導体の「ナノワイヤ」を作製するための結晶成長装置の前で。ゴミ、チリの混入を避けるため、クリーンルームでの作業が必要だ。

富岡 克広 とみおか・かつひろ

JSTさきがけ専任研究者

北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター

2003年群馬大学工学部電気電子工学科卒業、同大学大学院工学研究科電気電子工学科修士課程修了、北海道大学大学院情報科学研究科情報エレクトロニクス専攻博士課程修了。博士（工学）。日本学術振興会特別研究員、北海道大学大学院情報科学研究科グローバルCOE研究員を経て、09年から現職。

日進月歩でパソコンやデジタル家電は進化している。それを支えるのは、頭脳となるLSI（半導体集積回路）の高性能化だ。LSIは構成要素であるトランジスタ（電界効果トランジスタ：FET）を小さくして集積度を高め、数を増やすことで、高性能化してきた。最新のLSIで使われているトランジスタは最大で15億個、大きさは22ナノ（10億分の1）メートルだ。しかし、LSIの消費電力、発熱量が非常に大きく

なることが問題となり、集積度の限界が近づいている——そんな状況を打ち破る、新しいトランジスタの開発にJSTさきがけ専任研究者の富岡克広さんが成功した。

トランジスタは電圧をかけたときに電流が流れるか流れないかで1（オン）と0（オフ）を判定する。このスイッチ機能がコンピュータのデジタル計算に応用されているのだ。スイッチング性能を示す「サブスレッショルド

係数」という数値が小さいほど、電圧が低く、消費電力が少なくて済む。普通のトランジスタは半導体の中を“ソース電極”から“ドレイン電極”に向かって流れる電子の数を“ゲート電極”の電圧で制御して、電流をオン／オフしているため、この数値の理論限界は60mV/桁だ。しかし、富岡さんが開発に成功した新型トランジスタは21mV/桁と極めて小さな値になるのだ。



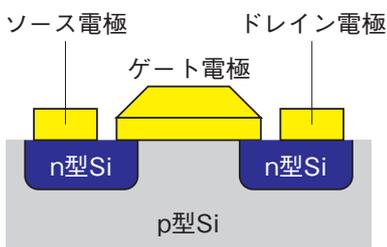
縦型で実用化できると考えていた

新型トランジスタはなぜ従来型の理論限界を大幅に突破することができたのか？従来のトランジスタは平面型だが、新型は縦型になっていることが大きい。

縦型のメリットは、平面型と比較して集積度を4倍に増やせることだ。また、縦型だと側面にゲート電極を付けられるので、水道の蛇口にバルブをいくつも付けたようなイメージで、リーク電流（漏れ電流）を抑えられ、待機電力を大幅に減らせる。

「ただ、縦型自体の発想は私ではなく、

■従来のトランジスタの平面構造



トランジスタ（電界効果トランジスタ：FET）では“ソース電極”から“ドレイン電極”に向かって半導体中を進む電子の流れを“ゲート電極”に加えた電圧で制御している。

1989年に東北大学の舩岡富士雄名誉教授が最初に提唱したものです。トランジスタを円柱状に立体化することで低消費電力化、高集積化、高速化が図れるという論文を発表されたのです」

平面型と比較すると、縦型は立体集積することになるので、三次元ゲート構造、電極構造の積層化など、技術的なハードルが高い。最近はリーク電流を抑えるために立体ゲート構造のトランジスタも登場しているが、縦型は実用化されていない。

富岡さんが縦型トランジスタに着目したのは、もともと化合物半導体の結晶成長の研究を専門にしていたためだ。群馬大学工学部、同大学大学院で学生時代から研究を重ね、北海道大学大学院で福井孝志教授のもと、Ⅲ-V族化合物半導体※1のナノワイヤ※2選択成長の研究を始めた。

「学生時代から、シリコン基板上に化合物半導体を成長させてデバイスを作りたいと思っていました。極微小な平面構造の中で原子を制御し並べる技術は限界に近づいています。そこで、ナノワイヤを垂直に結晶成長させる技術を開発すれば、縦型トランジスタを実用化できると思ったのです。そういった技術は80年代から研究されていますが、結晶の格子サイズが異なるため結晶欠陥が

縦型トランジスタの可能性を追究しました。

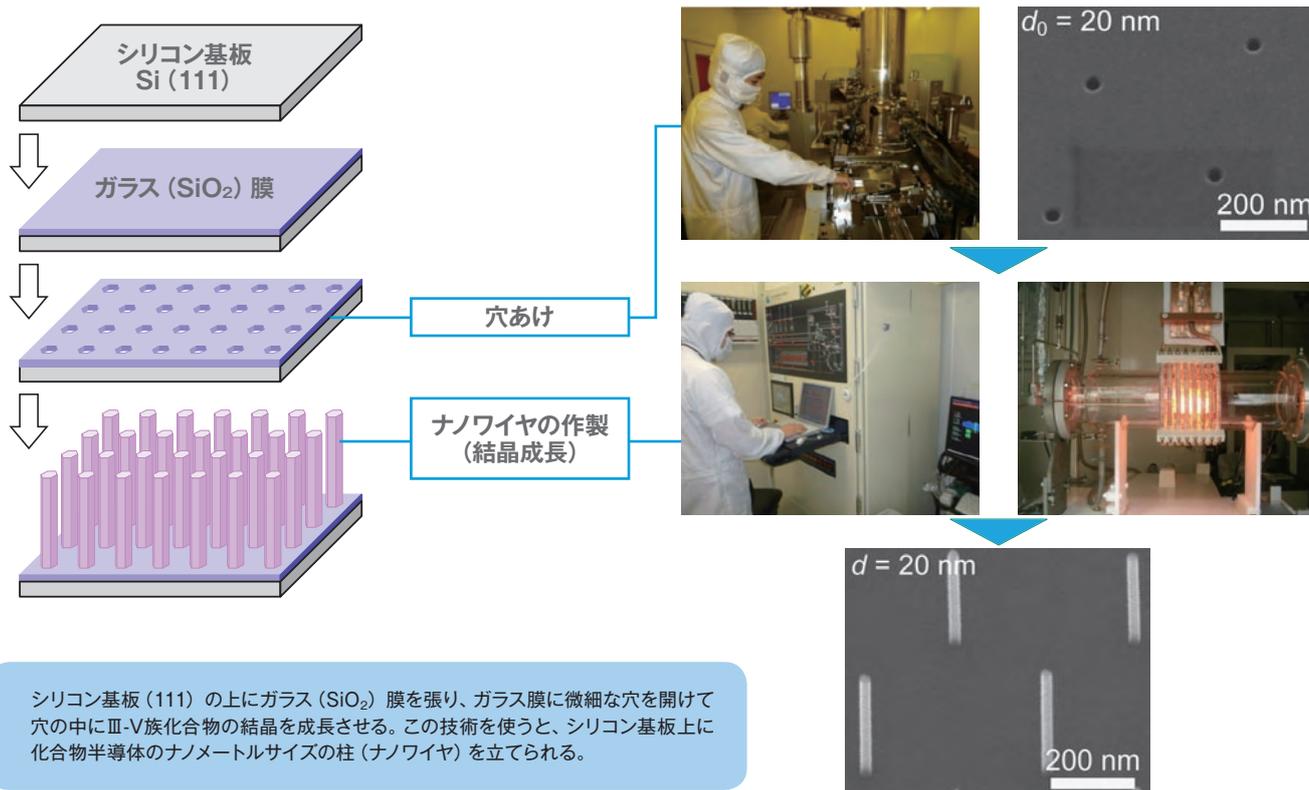


起こりやすいことが問題でした。また、シリコン基板の上に化合物半導体を成長させても、熱膨張係数の差が大きいため基板が反ってしまい、使い物にならなくなるのです。私は『選択成長』という技術を使って、シリコン基板とⅢ-V族化合物をうまくつなげられるのではないかと思います。シリコン基板

【用語解説】

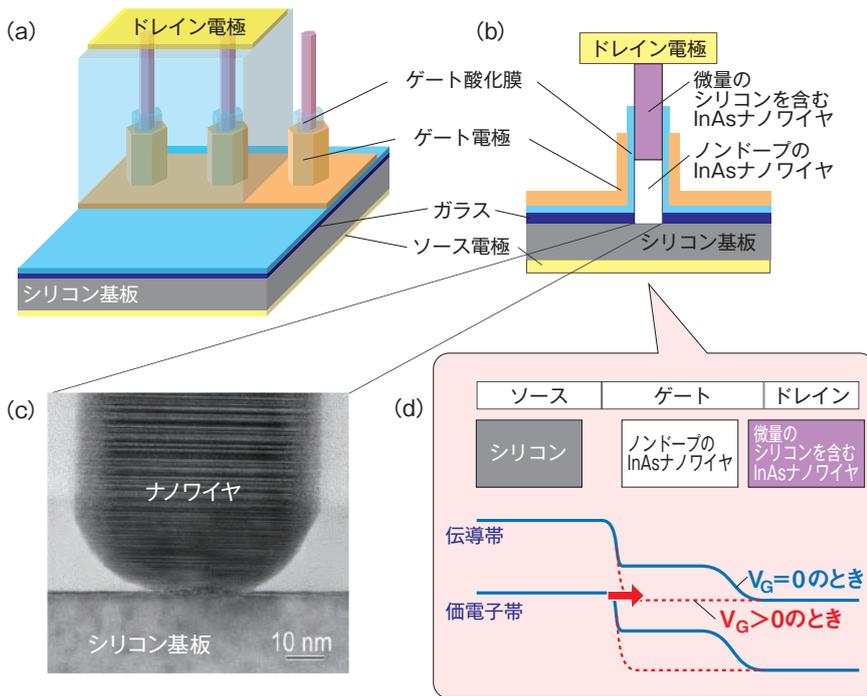
- ※1 Ⅲ-V族化合物半導体
Ⅲ族元素（アルミニウムやインジウムなど周期表の13族（3B族）に属する元素）とV族元素（リンやヒ素など周期表の15族（5B族）に属する元素）を組み合わせた半導体。
- ※2 ナノワイヤ
ナノメートル単位の細い線状の物体。

■新型トランジスタのナノワイヤ作成方法



シリコン基板（111）の上にガラス（SiO₂）膜を張り、ガラス膜に微細な穴を開けて穴の中にⅢ-V族化合物の結晶を成長させる。この技術を使うと、シリコン基板上に化合物半導体のナノメートルサイズの柱（ナノワイヤ）を立てられる。

■開発したトンネルトランジスタ素子



- (a) 縦型トランジスタ素子の模式図。ナノワイヤの側面をゲート酸化膜とゲート電極で包んだ構造になっている。
- (b) 同素子の断面図。ナノワイヤは、不純物を入れていないノンドーピングのInAs（インジウムヒ素）層と、不純物を入れたInAs層で作られている。シリコン基板とInAsナノワイヤの接合界面に「トンネル効果」が生まれる。
- (c) 同素子のInAsナノワイヤとシリコン基板の接合界面。
- (d) 同素子のバンド構造（結晶中のエネルギー準位）。電圧をかけていないとき ($V_G=0$; 青線)、シリコンの電子はナノワイヤへ移動できない。正 ($V_G>0$) の電圧をかけると、バンド構造の一部は赤色破線のように変化し、シリコン価電子帯とナノワイヤの伝導帯が近づき、シリコン側の電子がナノワイヤ側へトンネル（透過）する。

の表面にきれいにガラス(SiO₂)の膜を作り、そのガラスに微細な穴を開けてⅢ-V族化合物結晶を成長させる方法を試し、2008年にはⅢ-V族の一つである、インジウムヒ素のナノワイヤの柱をシリコン基板上に均一に位置制御して成長させる技術を確認できました」

この技術は単純に見えるが、シリコン基板の最表面原子をV族原子に入れ替えて接合界面をなじませるなど、富岡さんにより細かなプロセスが加えられている。

「縦型トランジスタの試作時は、垂直なナノワイヤに対して、立体的な加工を行わなければならない、その工程が一番困難でした。全部で20工程くらいありますが、そのうち一つでも失敗してはいけません」

トンネル効果が起こっていた

「シリコン上にインジウムヒ素の結晶を成長させたものの電気特性を測ってみると、シリコンとインジウムヒ素の間で不思議な振

る舞いを示す電子が数多く見られたのです。この電子の動きを制御できれば、縦型というだけでなく、新しいトランジスタを開発できるかもしれないと考えました」

電子の不思議な振る舞い、それは「トンネル効果」を富岡さんに期待させるものだった。

トンネル効果とは、超えることができないエネルギー（ポテンシャル）の壁を、粒子がある一定の確率でトンネル（透過）する現象のことを指す。半導体中のトンネル効果はノーベル物理学賞受賞の江崎玲於奈博士が1958年に発見した。トンネル効果はダイオードには利用されているが、トランジスタへの応用例はない。

「トンネル効果は、従来のトランジスタではリーク電流の原因の一つであるためタブー視されていたのです。しかし、トランジスタの微小化が限界に近づく中、トンネル効果を使えば、これまでの理論限界を超えることができることから、一躍、注目され始

めたのです」

だが、「トンネルトランジスタ」の研究は進んでいなかった。前述のように、従来のトランジスタは22ナノメートル（髪の毛1本の4000分の1）まで微小化が進んでいる。トンネル効果を制御するためにはこの小さな領域の中に不純物原子を規則正しく入れなければならない。それは現在の科学技術では不可能だと言われていた。

若い力で驚きの省エネデバイスを実現

富岡さんのさきがけでの研究テーマは「Si/Ⅲ-V族半導体超ヘテロ界面の機能化と低電力スイッチ素子の開発」。機能化とは「トンネル効果」のことであり、低電力スイッチ素子とは、「トンネルトランジスタ」のことだ。

「さきがけに応募したときは、この構造でトンネル効果が生まれる可能性を感じていましたが、確証はありませんでした。トンネル効果を制御するため、ナノワイヤにどんな不純物を混ぜて、結晶をどのように成長させるかを考える必要がありました。実際には、延べ3万個くらいのサンプルを作り、実証する作業を繰り返しました」

福井教授らのアドバイスを受けながら、富岡さんは材料の検討・設計から、膨大な量のトランジスタの試作、実証までを一人でこなし、32歳という、さきがけ研究者の中でも若手の富岡さんならではのパワーだ。

「さきがけの課題はプレッシャーが大きくて、ある程度結果が出るまで、半年くらいは不安で眠れない日もありました（笑）。ただ、もしさきがけがなかったら、トンネルトランジスタの研究に着手できなかったかもしれません。追い込まれて、集中して研究したから、成果を上げられたのだと思います」

そして、完成したのが左上図(b)に示す積層構造の縦型トランジスタだ。この形だとバンド構造（結晶中の電子のエネルギー準位）は図(d)の青線のようになるが、正の電圧 ($V_G>0$) を加えると赤色破線のように変化し、シリコンの価電子帯の電子がナノワイヤの伝導帯にトンネル（透過）するので、急に電流が流れると考えられる。実験の結果、予測通り電流はわずかな電圧でも急激に流れ、冒頭に述べたように、サブスレッショルド係数は21mV/桁まで小さくなった。従来のトランジスタの理論限界を大きく超える、約3分の1の電圧で駆動させることができたのだ。



数十ナノメートルという超微細な穴を作成するための電子線リソグラフィ装置。紫外線を嫌う工程のため、紫外線をカットしたイエローランプの部屋で作業する。

「トランジスタのサブスレッショルド係数を半分にできれば、使う電圧も半分になります。電力はその2乗に比例するので、この係数を半分にできれば1/4、3分の1ならば1/9に減らすことができます」

トランジスタ自体の消費電力が抑えられるだけではない。このトランジスタは、電圧がオフの状態では、電子がシリコンとナノワイヤの間を通ることができないため、電流が流れない。現在、家庭のテレビなどの家電の待機電力だけで原子力発電所が数基分の電力が使われていると言われるが、このトランジスタを使えば、その分の待機電力はほぼ必要なくなる。また、スマートフォンなどモバイル電子機器の電池の持ちも格段によくなるはずだ。

数年以内には 実用化のめどをつける

今回の研究成果は、2012年6月にアメリカ・ハワイで開催された半導体国際会議の最高峰の一つ「VLSIシンポジウム

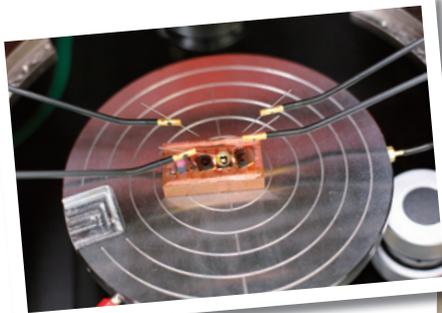
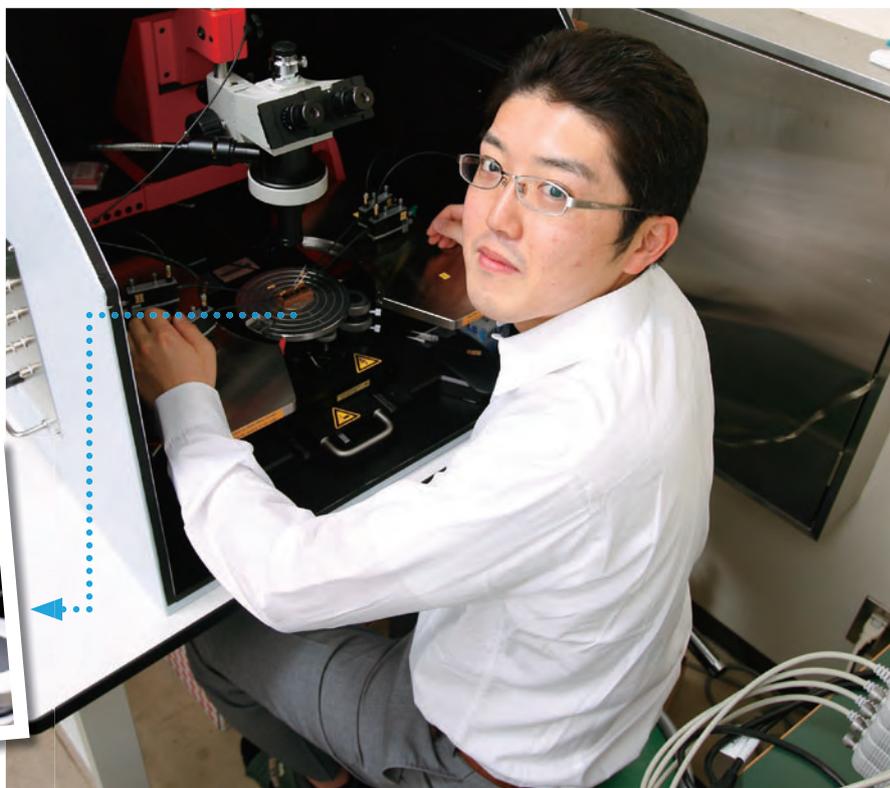
2012」で招待講演として発表され、大きな反響を呼んだ。世界中の企業が開発競争を繰り広げる中、日本の新進気鋭の研究者によって夢の省エネデバイスが実現する道筋が開かれたのだ。このデバイスの実用化には、どのような課題があるのだろうか？

「今回開発したトランジスタは、『n型』と呼ばれるタイプのもので、トランジスタには、電圧を加えるとスイッチがオンする『n型』と電圧を加えるとオフする『p型』があ

り、この二つを組み合わせることで回路としてCMOS（シーモス、Complementary Metal Oxide Semiconductor; 相補型金属酸化膜半導体）を動作させることができます。LSIに載せるにはCMOSにする必要がありますので、次のステップとして『p型』のトンネルトランジスタの開発に取り組んでいるところです。また、現在は“シリコン基板（111）”という特殊な面でナノワイヤを成長させていますが、一般にトランジスタの作成工程で使われている“シリコン基板（100）”の面でナノワイヤを成長させる技術の確立も、量産するための課題です」

今後の進展に期待を寄せる企業も多く、富岡さんは実用化のための産学官連携体制での研究推進も視野に入れているという。

「研究レベルでの実証はあと数年で終わらせて、それ以降は、実用化に向けての研究を進めたいと思っています。実用化するかしないかではなく、実用化させなければならないと考えています」



完成したトランジスタのスイッチ特性を測定する装置。さまざまな測定機器を用いて3万個もの試作品の実証作業を行い、「夢のトランジスタ」は誕生した。