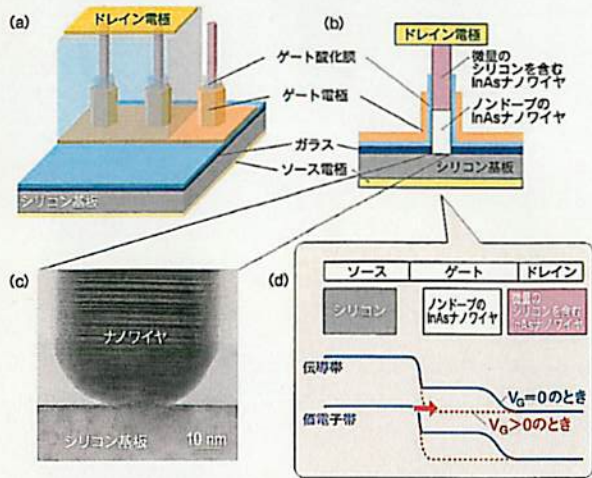




■開発したトンネルトランジスタ素子



(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プのInAs（インジウムと砒素）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単位）。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 ( $\text{SiO}_2$ ) 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、インジウムと砒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開発しました。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い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ないのです」

トンネル効果が起こっていた

「シリコン上にインジウムと砒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と砒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、一限、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、検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、実験までを一人でこなした。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単位）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。



「トランジスタのサブスレッショルド係数を半分できれば、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過す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特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、その分の特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



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。

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

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。紫外線を扱う工程のため、紫外線をカットしたイエローランプの部屋で作業する。

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だ。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。実用化するかしらないかではなく、実用化させなければならないと考えています」

