

超高性能カーボンナノチューブ単一電子トランジスタの集積化技術を開発

従来の半導体集積回路技術のみで製作可能、特性が1000倍向上

産総研ナノテクノロジー研究部門では、カーボンナノチューブを用いた量子効果ナノデバイスの一つである単一電子トランジスタの集積化技術を開発した。さらに、この単一電子トランジスタの電流密度を従来比で1,000倍向上させることに成功した。これにより、素子の信号/雑音比を3桁向上させることができた。

この技術開発により、室温では従来不可能であった大気中や溶液中における単一の電荷の検出が可能になる。このことは、将来の量子相関素子の実現や超高密度メモリへの応用、DNA・蛋白質等を高感度検知するバイオ応用などに大きく貢献するものと考えられる。



●写真 カーボンナノチューブ単一電子トランジスタ計測装置

不可能とされていた単一トランジスタの微細加工技術と量産

量子効果ナノデバイスは、従来にない様々な新しい特性を有しているため、その実用化を目指した研究が行われているが、量子効果を室温で明瞭に観測するためには数10nm以下の微細構造が必要である。このような微細構造を作製するためには、電子ビーム露光装置やフォーカスイオンビーム装置、原子間力顕微鏡などの最新の技術が必要である。これらの技術を用いれば数10nm以下の微細構造の作製は可能であるが、デバイスを1個ずつ個別に作製しなければならないために膨大な時間を要し、その生産性は極めて低く、量産は不可能であった。

また量子効果デバイスの一つで最もその将来性が囁望されている単一電子トランジスタは、電子を1個ずつ個別に制御して動作する素子のため、究極の低消費電力素子や単一の電荷を検知する超高感度センサー素子として期待されている。しかしながらこの単一電子トランジスタを完全に室温で動作させるには1~2nmの微細構造を作製する必要がある。これは従来の微細加工技術では非常に困難なサイズであり、しかも量産する技術は全くなかった。

最近応用研究が活発になってきているカーボンナノチューブは、その数nmという微細な構造からナノエレクトロニクス素子への応用が期待されている。しかしながらあまりにも微細な構造のために取扱が非常に困難であり、特に電子デバイスへの応用に際して必要不可欠な、カーボンナノチューブの位置や方向の指定が極めて困難であるという問題を有していた。この問題を解決しない限り、カーボンナノチューブを用いた量子効果ナノデバイスや単一電子トランジスタの実用化は不可能であると考えられていた。

異分野融合で最高の性能 - カーボンナノチューブとフォトリソグラフィ技術 -

当研究部門では、微細性に優れたカーボンナノチューブと量産性に優れたフォトリソグラフィ技術を組み合わせて、量子効果ナノデバイスの一つである高性能な単一電子トランジスタの開発に取り組んできた。その結果、従来困難であったカーボンナノチューブの位置の指定の問題を解決し、室温で動作する超高性能の単一電子トランジスタの量産手法を確立した。さらに、この単一電子トランジスタは従来の単一電子

トランジスタと比較して1,000倍の高電流密度を実現し、ほぼ量子限界に近い最高の性能を示すことを確認した。

カーボンナノチューブの成長位置を制御する手法の確立

カーボンナノチューブを電子デバイスに応用するための一番基本となる技術はその位置制御である。従来は、予め作製しておいた金属電極へアルコール溶媒に混ぜたカーボンナノチューブを滴下させ、偶然に電極間に渡ったカーボンナノチューブの電気特性を測定するという手法が用いられてきた。しかしながらこの手法では素子作製の歩留まりが極めて悪いという問題があった。そこで我々は図1に示すような触媒パターンニング法を提案し、カーボンナノチューブの成長位置を制御する手法を確立した。

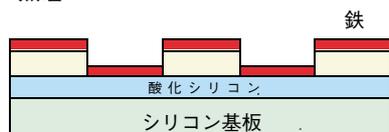
本手法は、

1. 酸化シリコン/シリコン基板上に、通常集積回路技術で用いられるフォトリソグラフィ技術で、ナノデバイスの電極となる形状にフォトレジスト

1) フォトレジスト パターニング



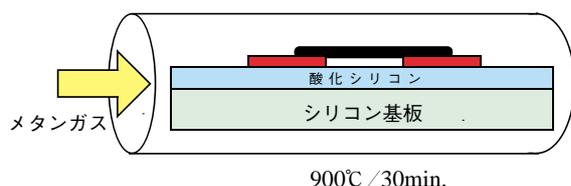
2) 鉄触媒の蒸着



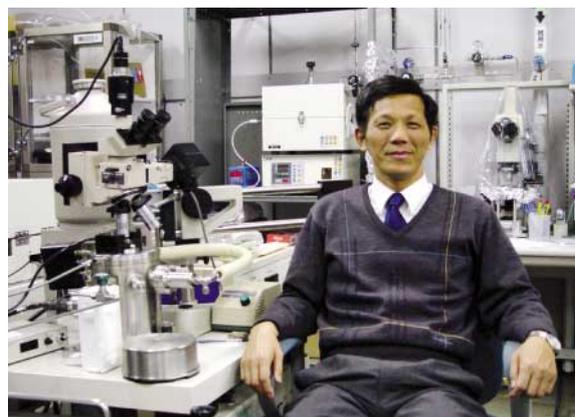
3) リフトオフ



4) カーボンナノチューブ成長



● 図1 カーボンナノチューブの位置制御成長法



● 集積化技術を開発したナノテクノロジー研究部門 松本総括研究員

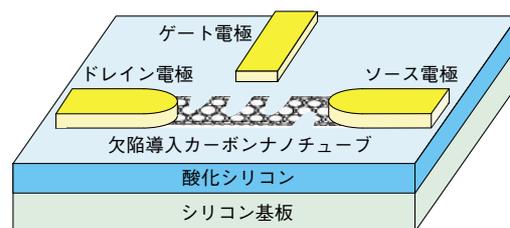
をパターンニングする（パターンのサイズは、電極幅が $20 \mu\text{m}$ 、電極間 間隔が $4 \mu\text{m}$ ）。

2. 真空蒸着装置を用いて極薄膜の鉄金属を試料全体に形成する。
3. アセトンを用いてフォトレジストを溶解させることにより、鉄極薄膜の電極パターンが形成される。
4. この試料を熱化学気相成長炉に入れ、 900°C において30分間メタンガスを流す。

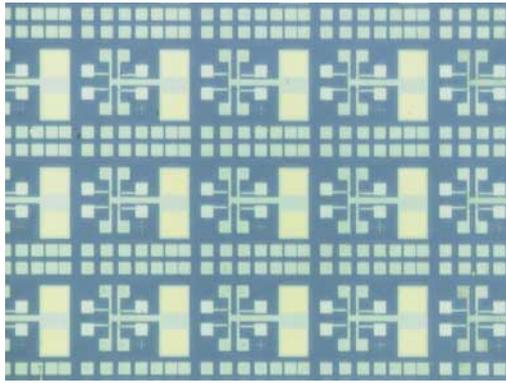
これによりパターンニングした鉄が触媒として働き、これを核として直径 $\sim 1\text{nm}$ の単層カーボンナノチューブが成長し、2つの電極パターン間を橋渡しする。この手法により、電極間に一度に大量に単層カーボンナノチューブを成長させることが可能になる。

カーボンナノチューブ単一電子トランジスタの構造

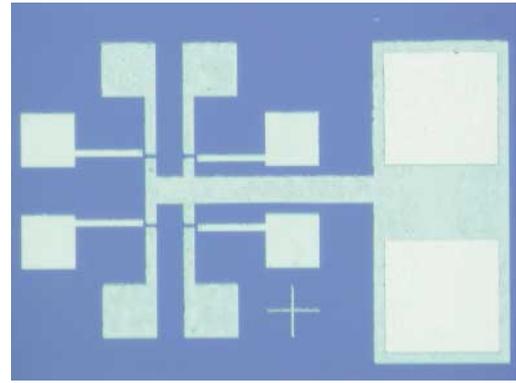
前述の電極間に成長したカーボンナノチューブに化学的処理を施し、欠陥を多数導入する。カーボンナノチューブの欠陥を導入した位置は絶縁性となる。従って欠陥位置は微小なトンネル接合として働き、欠陥と欠陥の間は、直径 $\sim 1 \text{ nm}$ の超微細量子ドットとして働く。この欠陥を含んだカーボンナノチューブをチャンネルに用いて、単一電子トランジスタを完成させた。



● 図2 欠陥を導入したカーボンナノチューブをチャンネルとして用いた単一電子トランジスタの構造図



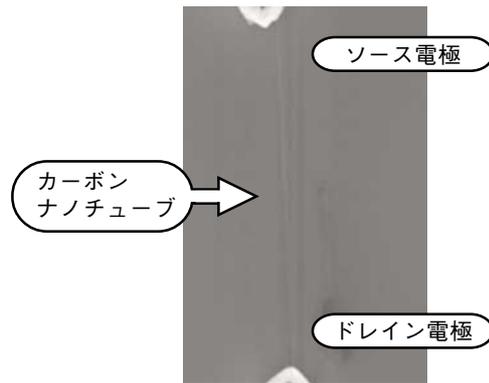
(a)全体の顕微鏡写真



(b) 1ユニットの顕微鏡写真



(c) 1単一電子トランジスタの顕微鏡写真



(d)カーボンナノチューブの電子顕微鏡写真

● 図3 通常のフォトリソグラフィー技術で量産したカーボンナノチューブ単一電子トランジスタの顕微鏡写真

構造図を図2に示す。カーボンナノチューブを成長させた金属触媒の上からオーミック電極の金属電極を形成して、これをカーボンナノチューブに電子を流し込むソース電極、電子を取り込むドレイン電極とする。カーボンナノチューブに近接して金属電極を形成し、カーボンナノチューブの中の電子の数を制御するゲート電極とする。

図3は、1cm四方の基板に同時に形成した400個のカーボンナノチューブ単一電子トランジスタの一部を撮影した顕微鏡写真である。電極間隔を拡大した図3(d)の電子顕微鏡写真では、電極間に1本のカーボンナノチューブが成長していることが分かる。このカーボンナノチューブが単一電子トランジスタのチャネルとして働く。フォトリソグラフィー技術を用いた手法で形成しているために、一度に大量のカーボンナノチューブ単一電子トランジスタを作製することが可能となった。

カーボンナノチューブ単一電子トランジスタの電気的特性を室温で測定

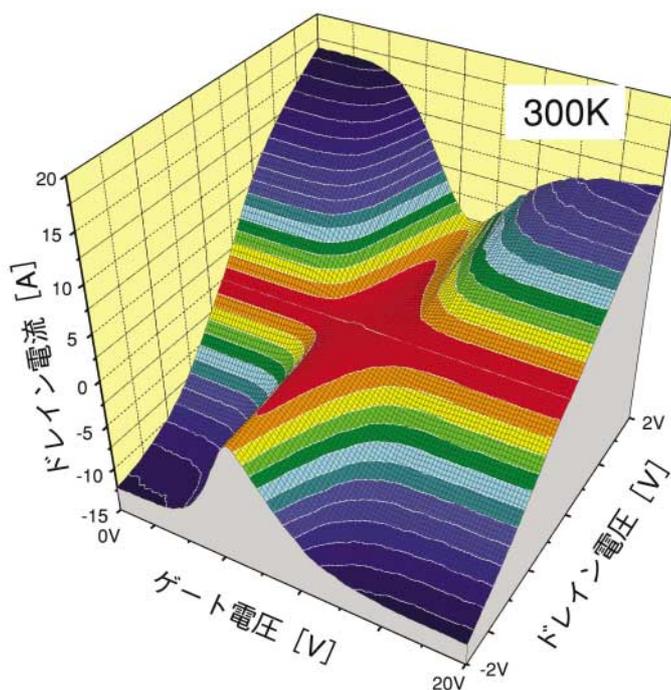
カーボンナノチューブ単一電子トランジスタの電気

的特性を室温で測定した。図4はカーボンナノチューブを流れる電流（ドレイン電流）のゲート電圧とドレイン電圧の依存性を三次元的に表示したものである。縦軸がカーボンナノチューブを流れるドレイン電流、2つの横軸がそれぞれゲート電圧とドレイン電圧になっている。この図において、ドレイン電流がゲート電圧を変えることにより、よく流れる状態や流れにくい状態に大きく変化していることが分かる。この様子を分かりやすくするために、電圧を印加しているにもかかわらず、ドレイン電流がほとんど流れない領域を「赤」で表示してある。この「赤」で表示した領域は菱形（ダイヤモンド形）をしていることが分かる。この領域は1個の電子がクーロンブロック現象によってカーボンナノチューブ内に閉じこめられ、別の電子がカーボンナノチューブ内に移動しようとしてもその電子の移動が禁止されている状態を示している。このような特性は、その形からクーロンダイヤモンド特性と呼ばれており、従来室温で測定することは非常に困難であった。ところが本研究成果では、カーボンナノチューブの微細な構造と化学処理により導入した欠陥により、容易に1~2nmという微細な構造を形成する

事ができるようになったことで、電子を1~2nmという微細な領域に閉じ込めることができ、クーロンダイヤモンド特性を室温で測定することが可能になった。この特性を利用すると、室温で電子を1個1個測定する事が可能になる。

量子限界値に近い特性を持つ単一電子トランジスタ

さらに図4より、ドレイン電流の値が10~15マイクロアンペアであることが分かる。従来の単一電子トランジスタのドレイン電流は1~10ナノアンペアのオーダーなので、ほぼ1,000倍近い大きな電流が流れていることが分かる。これはカーボンナノチューブの高い導電性と良好なオーミック電極のためである。この大きなドレイン電流のために、信号電流にノイズが全く現れない高性能な特性が得られる。信号/雑音比は10,000である。このドレイン電流の値からトンネル接合抵抗を計算すると約100k Ω となり、これは量子抵抗のほぼ10倍の値である。単一電子トランジスタにおいて量子ドット内部に一個の電子を閉じ込めておくには、トンネル抵抗は量子抵抗のほぼ10倍が必要であると言われている。従って本研究の単一電子トランジスタは、ほぼ量子限界の値に近い極限の特性が得られていると言える。これはカーボンナノチューブの高導電性と、欠陥導入による1~2nmの微細構造の作製により可能になったと言える。



このように形成したカーボンナノチューブ単一電子トランジスタは、従来の集積回路技術だけを用い、一切の高度なナノテクノロジープロセスを使用していない。そのため、高性能な単一電子トランジスタを容易に大量生産することが可能であり、将来の応用面で大きな貢献が期待される。またこの手法を適用すれば、将来の様々なナノエレクトロニクスデバイスの大量生産にも結びつく重要な技術であると考えられる。

単一電子トランジスタが拓く応用技術

単一電子トランジスタには、その本質的な超低消費電力特性と高い電荷感度特性から様々な応用に展開できると大きな期待が寄せられているが、従来「その室温動作が非常に困難であること」「電流密度が極めて低いこと」「その大量生産がほとんど不可能であること」という3つの問題から、実用化はまだまだ先のことと考えられていた。ところが、カーボンナノチューブを利用する本成果によって、これら3つの大きな課題が一挙に解決されたため、従来から考えられていた様々な単一電子トランジスタの応用展開が可能になると期待される。例えば、室温で1個1個の電子の分布を検知することが可能であることからDNA・蛋白質等の高感度検知などのバイオ応用、量子相関素子の実現、超高密度メモリへの応用などが考えられる。

●本研究は産総研と科学技術振興事業団（戦略的創造研究推進事業）ならびに株式会社富士通研究所 ナノテクノロジー研究センターと共同で行われた。

●図4 カーボンナノチューブ単一電子トランジスタの室温におけるクーロンダイヤモンド特性
従来の単一トランジスタ特性よりも1,000倍大きなドレイン電流が得られている。
赤い領域が電子が一個カーボンナノチューブ内部に閉じ込められている領域を示す。

●問い合わせ
〒305-8568
茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2
独立行政法人 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門
総括研究員 松本 和彦
E-mail k.matsumoto@aist.go.jp