

論文内容の要旨

博士論文題目

ナノ粒子の配置制御およびナノデバイス応用に関する研究

氏名 番 貴彦

(論文内容の要旨)

社会生活における様々な情報が電子化されることで利便性の向上が図られており、その膨大な情報を記憶や処理するために半導体素子が用いられている。そのため、情報化社会の発展と共に半導体素子の役割はますます重大になっている。特に膨大な記録を保存するメモリ素子は重要な役割を担う。この半導体の発展に大きく寄与してきたのが、コストの削減および性能の向上をもたらす素子の微細化である。しかしフォトリソグラフィに代表されるトップダウン型微細加工技術は限界が近づいており、プロセスの複雑化、長工程化が避けられない。そのためコストも比例するように増大しており簡便かつ低コストである微細化手法が望まれている。本研究では微細化手法の一つであるバイオナノプロセス (BNP) の発展を促進するとともに、実際に BNP を活用することで、これまでにない微細な構造を有する半導体素子を作製、動作を実証する。これにより微細化手法に新たな方法を提示し、素子微細化に寄与することを目的とする。特にナノ粒子配置技術に重点を置き、ナノ粒子抵抗変化メモリ (ReRAM) および超微細 Floating Gate Memory (FGM) の2種のデバイスについて動作実証を行った。

配置技術では Si 基板上で可能であったナノ粒子の単一配置技術を、金属膜上に応用範囲を広げた。これは BNP の応用性が格段に広がり、様々な微細デバイス作製につながる。また、V 溝を用いたナノ粒子の一次元配列を溶液の滴下、スピンドライするだけで可能とした。この技術も、本研究で扱ったメモリ素子応用以外においてもスピン伝搬、プラズモン変調など様々な応用が期待される。

これらを応用して作製された単一ナノ粒子 ReRAM および超微細 FGM はそれぞれ、sub-10 nm の素子である。単一ナノ粒子 ReRAM はバイポーラ型の抵抗変化動作を示し、 10^3 回の繰り返し動作を確認した。また、超微細 FGM は I_D - V_G 特性においてヒステリシスが発現し、メモリ動作を示した。これは sub-10 nm のチャンネルを持つ素子が単一のナノ粒子に蓄積された電荷がその動作電流を制御していることを示す成果である。この結果より電子がバリステック伝導する超微細領域であっても、近傍におかれたナノ粒子の影響を受けることが明らかとなった。本研究で提示されたナノ粒子配置技術はナノデバイスの作製に十分に活用できると考えられ、素子微細化に寄与する重要な成果であると考えられる。

(論文審査結果の要旨)

本研究はトップダウン微細加工技術とバイオ材料、技術を利用したボトムダウン微細構造物構築技術を組み合わせた技術である BNP を活用することで、sub-10 nm の微細な構造を有する半導体素子を作製、動作を実証することを目的とした研究である。現在の微細化技術は限界が来ており、新たな微細化手法が強く求められている。本研究では BNP を活用することで新たなナノ構造体作製手法を提示し、sub-10 nm の素子構造を持つ、単一ナノ粒子 ReRAM および V 溝型 JL-FET を用いた超微細 Floating Gate Memory (FGM) を作製、動作実証する。本論文は 7 つの章から構成されている。

第 1 章では、背景、目的について記述したあと、第 2 章および第 3 章では単一ナノ粒子 ReRAM を作製するため、フェリチンによる酸化タンタルのナノ粒子の形成および、金属膜上への単一配置技術について扱った。形成したナノ粒子は UV/O₃ 処理によりタンパク質の除去を行うことで Ta₂O₅ に非常に近い組成となることが明らかになり、その直径は 4.5 nm であった。また単一配置技術は、pH 7 において電位が十分に低い金属であれば応用可能であることを実証した。第 4 章では、これらを組み合わせることで単一ナノ粒子を用いた ReRAM を作製し、その動作特性について検証した。バイポーラ型の抵抗変化動作を示したほか、10³ 回以上の繰り返し動作を示した。

また、第 5 章では超微細 FGM の作製のため、V 溝を用いたナノ粒子の 1 次元配列を行った。DLVO 理論を応用することで、ナノ粒子の精密な 1 次元配列を達成した。第 6 章では、このナノ粒子配列をフローティングゲートとして作製されたナノ粒子埋込 V 溝型 JL-FET を作製し、動作実証を行った。I_D-V_G 特性においてヒステリシスが発現し、メモリ動作を示した。これは極小デバイスにおいて単一のナノ粒子に蓄積された電荷がその動作電流を制御していることを示す。また各種メモリ特性を取得している。これは sub-10 nm のチャンネル長を持つ微細な FGM の特性を得られたことを示す。他にナノ粒子の材料を変更することで特性に大きな違いが表れた。仕事関数の違いによるものが大きいとみられるが、この成果はナノ粒子の材質を変更することで極微小領域のチャンネルにおける様々な知見が得られることを示唆している。このことより電子が散乱されないような極微小領域であっても、近傍におかれたナノ粒子の影響を示す結果となった。

以上のように本論文は、生体超分子の特異的な機能を積極的に活用することで、現在の最先端加工精度を超える sub-10 nm の微細な素子の作製をし、動作実証した。これらの成果は、素子の微細化技術の発展に強く寄与するものと考えられ、学術的にも意義深い。よって審査員一同は本論文が博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認めた。