

論文内容の要旨

博士論文題目

サイズ・密度制御二次元ナノドット配列の作製とその電子注入評価

氏名 山田 聖人

フローティングナノドットゲートメモリ (FNGM) は次世代不揮発性メモリとして注目を集めている。FNGM では二次元ナノドット配列への電荷注入挙動がメモリ性能を決める重要な要因であり、ドットサイズと密度が電子注入に影響を与える。しかし、従来手法ではドットサイズと密度を独立に制御した二次元配列を作製できず、電子注入に与えるドットサイズと密度の影響を独立に評価した報告はこれまでなかった。本研究では、かご状タンパク質であるフェリチン (Fer、コア直径 7nm) とリステリアフェリチン (Lis-fer、コア直径 4.5nm) を用いて 2 種類の均一なナノ粒子を合成し、Si 基板上にこれら 2 種類の密度制御された二次元ドット配列を実現することで、初めてドットサイズと密度が与える電荷注入への効果について明らかにした。

第一に、シリコン基板表面へのアミノシラン分子修飾による正電荷を導入により負電荷をもつタンパク質の基板吸着を促し、さらにタンパク質の変性による表面電荷の低減を利用することで、最高 $1.8 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の酸化鉄ナノドットを内包したかご状タンパク質吸着固定を可能として。第二に、ランプ加熱炉による酸素雰囲気中急速熱処理により、ナノドットの凝集を排除したタンパク質選択除去に成功した。第三に、二種類のサイズの異なる酸化鉄ナノドットを持つかご状タンパク質 (Fer、Lis-fer) と、内部空洞にナノドットを持たないかご状タンパク質を混合吸着させることにより、ドットのサイズと密度を制御した二次元ナノドット配列を実現した。このドットサイズと密度を制御した二次元ナノドット配列が埋め込まれた MOS キャパシタの、C-V 測定から、高密度二次元ナノドット配列への電荷注入量は、単位面積あたりのドット半球曲面の面積の総和に比例することを見出し、ドット間隔が離れた低密度領域においては、その電荷注入量が大幅に増加することを示した。またこれらの実験結果を 2 種類のモデルにより解釈することを試み、それぞれ低密度と高密度において合理的な説明が可能であることを示した。

(論文審査結果の要旨)

フローティングナノドットゲートメモリは Emerging Device として注目されてきているが、このメモリでは、2次元ナノドット配列への電子またはホールの注入挙動が性能を決める重要なファクターである。しかし、これまでその配列のドットサイズと密度を制御して、電荷注入を測定した例はなかった。これは、従来のナノドット作製手法ではサイズと密度を独立して変化させることが出来なかったためである。今回、申請者は、サイズと密度を制御した、最高密度 $1.8 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ のナノドット配列を実現し、これを酸化シリコン中に埋め込んだ MOS 構造を作製することで、このドット配列への電荷注入の特徴を抽出した。得られた成果は以下のとおりである。

1. マイナス電荷を持つコアつき球殻状タンパク質をシリコン基板高密度に吸着させるため、基板表面をプラス電荷をもつ APTES で修飾し、両者の静電的引力と球殻状タンパク質変性を組み合わせることで、最高 $1.8 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ の、球殻状タンパク質の高密度吸着を実現した。
2. 酸素雰囲気中急速熱処理の手法を導入することで、シリコン基板上に形成された球殻状タンパク質 2次元配列から、コアの凝集を避けつつ、タンパク質だけを選択的に除去することに成功し、ドット間 4-5nm を維持した高密度ナノドット配列を実現した。
3. 2種類の球殻状タンパク質を鋳型として 2種類の一定のサイズを持つドットを内部空間で作製し、これをドットを持たない球殻状タンパク質と混合して基板上に吸着させることで、密度制御された 2種類の同一サイズナノドットの 2次元配列作製に成功した。
4. 高密度2次元ナノドット配列への電荷注入は、単位面積当たりのナノドット半球面の面積の総和に比例することを見出し、低密度では高密度ナノドットに比して多くの電荷注入が可能であることを実験的に示した。

以上のように、本論文では、電荷保持ノードである2次元ナノドット配列の、サイズと密度を独立して制御することに初めて成功し、考察の結果、ナノドット配列への電子注入量はナノドット半球面の面積の総和に比例することを明らかにした。本研究は、以上のように、フローティングゲートメモリの設計に重要な指針を与えるものとして学術的価値が高い。よって審査委員一同は、出された論文は博士（理学）論文として認定できると承認し、博士学位取得のための最終試験に合格したと判定した。