

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 11462 号
------	---------------

氏 名 張 海

論 文 題 目

Study on Formation and Characterization of Fe-based Silicide Nanodots on Ultrathin SiO₂ for Functional Memories
(鉄系シリサイドナノドットの形成と機能性メモリデバイス応用に関する研究)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	宮崎 誠一
委員	名古屋大学	教授	堀 勝
委員	名古屋大学	教授	豊田 浩孝
委員	名古屋工業大学	教授	市村 正也
委員	静岡大学	教授	立岡 浩一

論文審査の結果の要旨

張海君提出の論文「Study on Formation and Characterization of Fe-based Silicide Nanodots on Ultrathin SiO₂ for Functional Memories (鉄系シリサイドナノドットの形成と機能性メモリ応用に関する研究)」は、次世代メモリに搭載し得る機能要素として、多様な電子状態を取り得る鉄系シリサイドのナノスケール構造に着目し、現在のSi-ULSIプロセス技術と整合性の良いリモート水素プラズマを活用したプロセスにおいて、極薄シリコン酸化膜上に鉄系シリサイドナノドットを高密度・一括形成できることを明らかにすると共に、シリサイド相制御の指針を明らかにしている。本論文は、6章で構成されており、各章の詳細は下記の通りである。

第1章では、序論として、研究背景、目的および概要について述べている。研究背景では、本論文を理解する上で重要な鉄系シリサイドの特徴と他機関からの鉄系シリサイドナノドット形成手法やこれら手法の特徴や課題をまとめており、鉄系シリサイドナノドットの電子デバイス応用について言及している。本研究の主目的が、極薄シリコン熱酸化膜上に結晶相を制御した鉄系シリサイドナノドットを高密度・一括形成する手法を確立することであり、その重要性を説明している。

第2章では、本論文で用いているリモート水素プラズマ支援プロセスによる金属ナノドットの形成手法やナノドットの評価装置の概要を説明している。リモート水素プラズマをシリコン熱酸化膜上に形成した耐酸化性の極薄金属膜に外部非加熱で照射した場合、原子状水素の再結合に起因した局所加熱により、金属原子が表面マイグレーション・凝集することから金属ナノ構造が高密度に一括形成できることが分かっているが、本論文では、この手法を極薄シリコン熱酸化膜上の鉄と非晶シリコンの極薄積層膜に適用することで、ナノドット形成とシリサイド化反応が同時進行し、鉄系シリサイドナノドットを高密度・一括形成できることを着想し、その根拠を明らかにしている。

第3章では、自然酸化し易い鉄薄膜のリモート水素プラズマ処理によって、下地シリコン熱酸化膜上で、鉄原子の表面マイグレーション・凝集が促進されることを実証している。具体的には、シリコン熱酸化膜上に形成した極薄鉄膜に外部非加熱でリモート水素プラズマ処理を施し、ガス圧力および投入電力がドット形成および面密度に及ぼす影響を明らかにしている。投入電力依存性では、電力の増加に伴いドット面密度が線形に増加する結果が得られており、この結果を、表面に入射する原子状水素フラックスの増大によって、表面温度が上昇し、凝集作用が促進したことで説明している。圧力依存性では、20Pa以下の領域では、圧力の増加に伴いドット面密度の大幅な増大が認められるものの、27Pa以上では、ドット面密度が減少傾向にあり、平均ドットサイズも減少することを明らかにし、27Pa以上の領域では、圧力の増加に伴い鉄膜表面への原子状水素の入射量が低下していることで解釈している。得られた成果は、プラズマパラメータの制御により鉄原子の表面マイグレーションと凝集を促進させることで、面密度 $\sim 10^{11}\text{cm}^{-2}$ の鉄ナノドットが形成できることを実験的に示しており、鉄シリサイドナノドットの高密度形成への展開を示す重要な知見を得ている。

第4章では、第2章で提案した極薄非晶質シリコン膜を極薄鉄膜で挟んだ極薄積層膜にリモート水素プラズマ処理を施すことで、電気的に絶縁分離された $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットが面密度 $\sim 4.3 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ で形成できることを実験的に明らかにしている。シリコン熱酸化膜上に形成した非晶質シリコンと鉄の極薄二層膜をリモート水素プラズマ処理した場合、第3章で述べた通り鉄単層膜と同様にナノドットの形成が認められ、面密度に顕著な変化は認められないものの、ドット高さが鉄ナノドットに比べ ~ 2 倍であることを明らかにしている。また、形成したナノドットのラマン散乱スペクトルから形成したナノドットの結晶相は、 $\beta\text{-FeSi}_2$ であることを明らかにし、鉄/非晶質シリコン/鉄の極薄積層膜におけるナノドットの形成は、極薄鉄膜表面で原子状水素の再結合が高効率に生じる際に発生する生成熱により上層鉄原子の表面マイグレーション・凝集と共に下層の非晶質シリコン膜との合金化反応が進行した結果であると解釈している。得られた成果は、プラズマパラメータとともに、積層膜の初期膜厚がシリサイド相制御に重要であることを示している。

第5章では、シリサイド相制御を目的として、異なる膜厚比の鉄/非晶質シリコン/鉄を積層した極薄構造にリモート水素プラズマ処理を施した結果が述べられており、初期膜厚およびプラズマパラメータを精密制御することで、ホイスラー合金として知られた Fe_3Si 相のナノドットが高密度・一括形成できることを実証している。初期膜厚を精密制御して形成したナノドットの室温磁化特性を調べた結果、僅かながらヒステリシスが認められ、飽和磁化値が DO_3 型 Fe_3Si 結晶薄膜の報告値と同程度であり、ガス圧力の増大に伴い飽和磁化が増大することを明らかにしている。さらには、X線回折による結晶構造評価から、20Pa処理で DO_3 型 Fe_3Si ナノドットが形成されたことを確認するとともに、シリサイド相制御の指針を明らかにしている。得られた成果は、ナノドットを活用したスピンのメモリ開発に有用な知見である。

論文審査の結果の要旨

第6章では、本論文で明らかにした研究成果を総括するとともに、残された今後の課題について述べている。

以上のように本論文では、鉄系シリサイドナノドットの高密度・一括形成並びにシリサイド相制御を実現し、形成したナノドットの帯電・帯磁特性を明らかにしている。これらの得られた結果は、ナノスケール領域の金属シリサイド形成や物性制御に有用な指針を与えるものであり、学術的に意義が高い。さらに、低消費電力フローティングゲートメモリに応用展開するにあたり極めて重要な成果が得られており、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である張海君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。