

論文審査の結果の要旨

氏名 小川 大輔

電界効果ドーピングは、電界効果トランジスタ (FET) のゲート電圧を変えることで、半導体 (絶縁体) のキャリア濃度を連続的・可逆的に変調可能なドーピング手法である。より高濃度のキャリアを変調するためには、高い比誘電率と高い絶縁破壊電界強度とを併せ持つゲート絶縁体が必要であるが、一般に強い電界を印加するためにゲート絶縁体を薄くすると、サイズ効果により比誘電率が低下するという問題が生じる。近年、層状酸化物を単層剥離して得られる酸化物ナノシートの稠密膜を多層化すると、10-20 nm の極薄領域でも、1 MV/cm の高電界下で 100 を超える比誘電率と 10^{-7} A/cm² の低いリーク電流密度とを実現可能であることが報告された。本論文では、ゲート絶縁体として理想的な性質を有する酸化物ナノシートに着目し、単一の酸化物ナノシートの絶縁・誘電特性の定性的・定量的評価と、酸化物ナノシートをゲート絶縁膜とする FET の試作要件について調べ、報告している。

本研究は以下の 8 章より構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文の背景および目的が述べられている。この章では、まず電界効果ドーピングの機構、歴史と応用に関する研究を概観し、固体・液体両方のゲート絶縁膜の長所・短所についても述べている。特に、固体のゲート絶縁層について、最も典型的な材料である SiO₂ と代替材料である high-*k* 酸化物に関する既往の研究をまとめ、現在の課題について議論している。既存のゲート絶縁材料は絶縁性に課題があり、酸化物ナノシートがその有効な解決手段となると述べている。

第 2 章は本研究の目的の概説であり、単一ナノシートのゲート絶縁性能の評価およびその電界効果デバイスへの応用を目的として掲げている。

第 3 章は実験手法とその原理の説明である。酸化物ナノシートの絶縁・誘電特性を評価する手法として、導電性 AFM による計測、マイクロキャパシタによる測定について述べている。また、マイクロキャパシタ作製に用いるリソグラフィ、電子線蒸着などの各手法についても解説している。さらに、酸化物ナノシートの合成方法や製膜方法についても説明している。

第 4 章は導電性 AFM を用いた単一の酸化物ナノシートの絶縁特性評価について述べている。原子平滑な導電性基板上に酸化物ナノシートを載せ、金コーティングしたカンチレバーを上部からアプローチすることで、単一ナノシートの面直

方向の絶縁性を定性的に評価している。その結果、単一ナノシートは良好な絶縁性を示すことを確認している。

第5章は、単一ナノシートを容量膜とするマイクロキャパシタの作成と評価について述べている。その結果、単一のナノシートは絶縁性・誘電性両方において、極めて良好な再現性を示すことを示している。絶縁性については、**Fowler-Nordheim** トンネリングで説明可能であり、**20 MV/cm** の高電界を繰り返し印加可能であることを報告している。一方、誘電性については、ナノシート-基板間の薄い空気層が大きな影響を及ぼし、**1 nm** 以下の極めて薄い空気層でも誘電率を**50**分の**1**にまで低下させると指摘している。

第6章は、ナノシートをゲート絶縁膜に用いたトップゲート型 **FET** の試作について述べている。トップゲート型は、チャンネルのサイズを単一ナノシートよりも小さくできるという利点があるため、究極的な電界効果ドーピングが可能であるが、実際に **FET** として動作させるには、基板の原子平坦性や、微細加工への制約があるため、ソース・ドレイン電極を半導体基板に埋め込んだ構造が有望であると指摘している。

第7章は、ナノシートをゲート絶縁膜に用いたボトムゲート型 **FET** の試作について述べている。ボトムゲート型では、ゲート絶縁膜形成後に微細加工が不要であるが、半導体層の面積を可能な限り小さくする必要があり、平板状の半導体単結晶を貼り付けた構造が有望であると指摘している。

第8章は結論と総括である。

以上のように、本論文は、単一の酸化物ナノシートの絶縁特性と、それをゲート絶縁膜に用いた電界効果ドーピングの方法を提案するものである。これらの研究は理学の展開に大きく寄与する成果であり、博士（理学）に値する。なお本論文は複数の研究者との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与は十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。