

論文の内容の要旨

論文題目 Study on InGaAs Surface Control for Realizing High Quality InGaAs MOS Interfaces

(高品質 InGaAs MOS 界面形成のための InGaAs 表面制御についての研究)

氏 名 星井 拓也

III-V 族化合物や Ge などのチャネル素材はそのキャリアの高いバルク移動度から、近年問題視されている Si MOSFET の微細化限界を打ち破るためのテクノロジーブースターの一つとして期待されている。InGaAs は高い電子移動度と適度なバンドギャップを有しており、結晶中の電子の有効質量も小さいことから極短チャネルにおけるバリスティック伝導においても有利であると考えられている。そのため、InGaAs MOS 構造についての研究が盛んに行われており、Si を上回る実効移動度を示す FET も報告されてきている。それらの報告は主に $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ を用いた S パッシベーションと ALD で成膜した Al_2O_3 を組み合わせたゲート構造を有しているが、MOS 構造の界面準位密度(D_{it})は $10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 程度のもので報告されていない。Si MOS 構造の典型的な D_{it} が $10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 未満であることを考えると、InGaAs MOS 界面の D_{it} は十分に低減されているとは言い難く、界面特性改善の要因も十分に解明されていない。そこで本論文では、高品質 InGaAs MOS 界面形成のための表面処理技術として、InGaAs 表面のプラズマ窒化に注目し、MOS 界面特性への効果の検証とその効果の要因を検討を行った。プラズマ処理の手法としては、低エネルギー・低圧力でプラズマを発生させることが可能な ECR プラズマを採用した。

はじめに、InGaAs 基板に ECR スパッタ装置で形成した SiO_2 絶縁膜についての検討を行った。酸素分圧の高い状態での SiO_2 堆積は、InGaAs 表面を強く酸化してしまい、結果として表面ポテンシャルの変化を大きく阻害することがわかった。一方で、酸素分圧の低い状態で堆積を行うことで、表面酸化が抑制され、比較的大きなポテンシャル変化がえられた。

次に、InGaAs 表面に窒化物層を導入した後、真空状態を破らずに連続して、酸素分圧の低い条件での SiO₂ 堆積を行い、MOS 界面を形成した。窒化物層として ECR スパッタ SiN 中間層と窒素プラズマによる InGaAs 表面窒化を検討した。ECR スパッタ SiN 絶縁膜は単層では良好な特性を示さないが、中間層として用いることで SiO₂/InGaAs MOS 特性を改善させることができることがわかった。一方、InGaAs 表面を窒化処理することでも、MOS 特性の改善がみられた。低温コンダクタンス法を用いて D_{it} 評価を行ったところ、窒化物層の導入による D_{it} 低減が確認された。SiN 中間層と InGaAs 表面窒化を比較すると、表面窒化の方が一様に低い D_{it} を示すことがわかった。

表面窒化による界面特性の改善には窒化だけでなく、その後のアニールを行うことが重要であることもわかった。アニール温度が上昇するにつれ、D_{it} が低下し、C-V スイングが大きくなった。また、アニールによる特性改善は、フォーミングガスアニールと窒素アニールで大きな違いがみられないことから、熱の効果によるところが大きいことも分かった。加えて、窒化 InGaAs MOS 構造の断面 TEM 像から、界面のアモルファス層側に 1.2nm 程度のコントラストの遷移領域が観察された。これは窒化によって形成された窒化物層によるものであると考えられる。一方、XPS による測定から、表面窒化により InGaAs 酸化物の形成が抑制されことに加え熱処理による Ga-N 結合の増加が界面特性の改善に大きく寄与していることが示唆された。結果として、SiO₂/InGaAs MOS 界面において $2.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ という InGaAs MOS 界面として十分に低い界面準位密度が得られた。この改善には MOS 界面における III-V 酸化物の低減に加え、Ga-N 結合の形成が重要であると考えられることから、界面に Ga-N 結合を形成することが InGaAs をはじめとする III-V MOS 界面特性を改善するために有効であることが示唆された。

続いて、窒化 InGaAs 界面と ALD-Al₂O₃ 絶縁膜の組合せについて検討した。本研究では実験装置の構成上、ECR プラズマ窒化後に ALD プロセスを行うためには、窒化表面を大気曝露する必要があるため、大気曝露後も窒化物と酸化物が顕著に増減するわけではないことを XPS 測定で確認した。N1s XPS スペクトルにおける窒素ピーク強度は ALD プロセス前後でも大きな変化はなく InGaAs 表面の窒素は十分に保存されていることがわかった。続いて、窒化時間をパラメータとして 1-nm ALD-Al₂O₃/InGaAs 構造の XPS スペクトルを取得したところ、表面窒化によって窒素が導入され、その導入量は時間とともに増加するが、一定程度で飽和していることがわかった。また、プラズマ窒化によって InGaAs 基板に導入された窒素は As と置換反応を起こしていることがわかった。さらに、窒化反応だけでなく酸化反応も同時に進行しており、窒素導入が飽和した後に酸化が支配的に進んでいることが示唆された。加えて、置換され

た As は周辺の酸素あるいは In 酸化物と結合し、脱離していることが示唆された。次に、これらの界面の D_{it} を評価したところ、 D_{it} 改善には最適な窒化時間が存在することがわかった。XPS の結果と合わせて考えると、窒素導入が飽和し酸化反応が支配的になると D_{it} が増加していると考えられ、界面の酸素増加が特性の劣化要因であることを強く示唆している。また、ECR プラズマを発生させるためのマイクロ波の出力と最適窒化時間の相関から InGaAs 表面窒化による D_{it} 改善には基板に到達する窒素イオン量が強く寄与していることがわかった。ここで、室温での D_{it} 評価において最も良い値を得たマイクロ波出力 250W、窒化時間 7min という条件について、中間層膜厚と EOT を評価したところ、物理膜厚が約 1.6nm であると見積もられ、0.65nm の EOT 増加が起こっていることがわかった。さらに EOT 極限を見積もるために角度分解 XPS を用いて界面部分の深さ方向の元素分布を見積もったところ、絶縁膜/半導体界面は $In_{0.4}Ga_{0.6}N/InGaAs$ 界面であると考えられ、InGaAs 層の物理膜厚は 0.4nm 程度、EOT 増加は 0.13nm 程度と見積もられた。このことから極限的には 0.13nm の EOT 増加で、今回得られたレベルの界面特性改善が期待できることがわかった。最後に、この Al_2O_3 /窒化 InGaAs MOS キャパシタの C-V 特性と D_{it} 分布を評価し、InGaAs MOS 界面形成手法として主流となっている $(NH_4)_2S$ 溶液を用いた S パッシベーションと ALD- Al_2O_3 絶縁膜で作製した Al_2O_3/S 終端 InGaAs MOS キャパシタと比較した。InGaAs 表面窒化により、ヒステリシスの増大は見られるものの、S 終端と比べて急峻かつ周波数分散の少ない C-V 特性が得られた。また D_{it} 分布の評価より、 Al_2O_3 /窒化 InGaAs MOS キャパシタの D_{it} は総じて Al_2O_3/S 終端 InGaAs MOS キャパシタの D_{it} より低いことが示された。 D_{it} の最小値は $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ であり、伝導帯端でも 3×10^{11} 程度であった。

本研究では、高品質 InGaAs MOS 界面形成のための技術として、ECR プラズマを用いた InGaAs 表面窒化に注目し、その効果を検討した。InGaAs 表面に窒素プラズマを照射することで、窒素イオンを主たる反応種として、As 元素を置換する形で N 原子が結晶中に導入され、熱処理を加えることで絶縁膜/半導体界面に Ga-N 結合の増加がおり、これが界面特性の改善に大きく寄与していることが示唆された。このような ECR プラズマ窒化を InGaAs 表面に施すことで、ECR スパッタ SiO_2 及び ALD- Al_2O_3 を絶縁膜とする InGaAs MOS キャパシタにおいて、MOS 界面特性の改善を確認した。以上のことから、InGaAs MOS 界面の特性改善のための一つの指針として、界面に Ga-N 結合を多く含み、酸素を極力含まない界面窒化物層を形成する、ということが提案された。