

審査の結果の要旨

氏名 齋藤 吉広

GaAs 電子デバイスはGaAsの持つ高い移動度や絶縁性といった特徴を生かし高速通信用素子として広く利用されている。しかしながらGaAsは、加熱によって容易に分解する、結晶欠陥が発生しやすい等の欠点も併せ持ち、その製造プロセスには多くの困難が存在するのにもまた事実である。本論文では、GaAs 電子デバイスの高性能化・低コスト化を念頭に、デバイス製造プロセスにおけるいくつかの重要な問題の解決を目指している。本論文は全8章よりなる。

第1章では、半導体エレクトロニクス発展の歴史を俯瞰し、本研究の対象であるGaAsと電子デバイスの主流であるSiの物性面での比較を行なった。GaAsには高速性という長所の反面、組成変動/表面酸化物の不安定性/機械的強度の不足などの短所がある。これらが不純物濃度制御の困難さやスリップラインの発生など、GaAs特有の問題につながっていることを明らかにした。

第2章では、GaAsに注入されたSi不純物の活性化の問題に関し、過去の文献のレビューを行なった。デバイス製造プロセスでは、GaAs表面の酸化、及び、アニール保護膜の性質が、活性化率に大きな影響を与えることが報告されている。メカニズムに関しては、酸化によるGa空孔増加とGaAs表面エッチング、保護膜による応力と保護膜へのGa外部拡散などが、重要な要因と考えられている。実際のデバイス製造においては、これらは活性化率に対して同時に寄与することが多い。しかし、過去の研究では、分析技術が未発達だったこともあって、その効果の切り分けは充分なされていない。この点を踏まえ、各効果を定量的に評価し、効果の切り分けを行なうことを本研究の目標とした。

第3章では、 O_2 プラズマプロセスによるGaAs表面酸化の問題を調べた。同プロセスにより、ウエハ間でFETの閾値電圧(V_{th})や注入層のシート抵抗(R_{sh})に大きな差が生じることが確認されている。まず数値計算により、活性化率低下とGaAs表面エッチングの効果の見積もりを行なった。次にTEM及びRBSを用いた分析実験で、その検証を行なった。結果として、表面エッチング量には全く差がないこと、及び、酸化によりGa空孔が増加し、活性化率低下につながっていることを明らかにした。

第4章では、GaAs表面酸化とGa外部拡散量の影響を調べた。Ga空孔増加に対して、 O_2 プラズマによる酸化の他に、アニール中のGa原子の保護膜への拡散(=外部拡散)も影響する。前章のTEM/RBSデータの詳細な解析から、酸化によるGa空孔増加は $1.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ と推定された。一方、Ga外部拡散については、TXRFとICP分析を組み合わせることで拡散量の絶対値を求めた。その結果、活性化率が低下したウエハのGa拡散量は $4.67 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ となっており、これは他のウエハの約3倍に相当する。2つの効果を合わせると、Ga空孔濃度はウエハ間で約10倍の差となっており、これが活性化率低下の原因であると考えられる。

第5章では、 SiN_x アニール保護膜の活性化率への影響について調べた。PE-CVDで形成され

る非晶質 SiN_x 膜は組成と構造に大きなバリエーションがあるが、その活性化率との関係には未解明の部分が多い。今回、組成の異なる SiN_x 膜を形成し、活性化率を評価した結果、やや N-rich な組成のときに活性化率が最大となることが明らかとなった。また、活性化率に影響を与えられている高温応力を in-situ 測定した結果、組成が N-rich になるに従って、単調に応力が減少していることを確認した。一方、Ga 外部拡散量については、活性化率が最大となるポイントで拡散量も最大となっていることが明らかとなった。活性化率に対しては、後者の方が支配的な要因であると考えられる。

高温応力/外部拡散と SiN_x 膜の組成/構造の関係についても解析を行なった。FT-IR などの分析結果から、高温応力は SiN_x 膜からの水素離脱と密接に関連しており、膜中に残留する Si-H 量が多いほど顕著になると考えられる。Ga 外部拡散に対しては、アニール中の SiN_x 膜密度の増加、及び、 SiN_x 膜成長初期に発生すると考えられる GaAs 表面酸化物のエッチング、の 2 つの効果が寄与していることが推定された。

また、本研究で得た知見を実際の GaAs MESFET 量産に適用し、 V_{th} 標準偏差としてウエハ面内で 0.007V、ウエハ間で 0.017V (@ゲート長 0.44 μm の E-FET) を実現した。

第 6 章では、 SiN_x 膜のもう 1 つの用途であるパッシベーション膜について、構造と物性を調べた。ここでの重要な特性の 1 つは真性応力であり、PE-CVD でのキャリアガスとして N_2 の他に He を添加することで応力を低減できることが知られている。本研究では、応力低下に対応して、膜密度と屈折率が増加していることを実験により確認した。これは、He 添加により膜が緻密になっていることを示唆している。また、シンクロトロン放射光を用いた X 線回折測定を試み、非晶質 SiN_x 薄膜の動径分布関数を求めることに初めて成功した。これにより、PE-CVD による SiN_x 薄膜とゾルゲル法による非晶質 SiN_x (バルク材料) や Si_3N_4 結晶との構造の差異を捕えることができた。

第 7 章では、スリップラインの発生を抑制するため、ファーネスアニール工程の改善を図った。まず、アニール冷却過程での温度差発生メカニズムについて、熱流体シミュレーションにより解析した。その結果、冷却は主としてウエハ周辺部から石英管への輻射によって進行すること、面内温度差はウエハ中心部から周辺部への熱伝導が輻射に比べて小さすぎると発生すること、石英管内の N_2 ガス流による冷却効果は輻射に比べて小さいことが明らかとなった。さらに、温度差低減策として、熱伝導率の高い AlN サセプタの適用、及び、冷却速度の緩和による輻射熱抑制が有効であることをシミュレーションあるいは実験により確認した。

第 8 章は本論文の総括であり、本論文で得られた成果を要約し、結果をまとめている。

本論文では、GaAs 電子デバイスの高性能化・低コスト化を念頭に、デバイス製造プロセスにおける重要な問題点の原因を解明し、得られた知見を基にいくつかの問題点を解決している。従って、本論文は、半導体プロセス工学の発展におおいに資するものであり、博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。