

報告番号	甲 第 12499 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Si 基板上 GaN 高周波パワーデバイスに向けた AlN 下地層及び GaN 層の高品質化に関する研究
(Study on improvement of characteristics of AlN buffer and GaN layers for GaN high frequency power device on Si substrate)

氏 名 松本 光二

論 文 内 容 の 要 旨

化合物半導体は一般的に広く用いられているシリコン (Si) 半導体では実現不可能な分野で利用されてきた。今後、電子機器を使ったアプリケーションの高度化、複雑化とそれに伴う電力需要の増大などの課題に対応するために、化合物半導体の活躍の場はますます増えると予想される。化合物半導体の中でも窒化ガリウム (GaN) 半導体を使ったデバイスは高電子移動度トランジスタ (HEMT) を中心に、高周波や高パワーデバイスにおいて、従来の Si デバイスを凌駕するポテンシャルを保有している。このために、従来デバイスの低消費電力化だけでなく、Si 半導体デバイスではこれまで対応できなかった電力、周波数範囲での利用が期待されている。GaN 結晶成長については自立基板を得ることが難しいことから、一般的に異種材料基板上に薄膜を成長する、ヘテロエピタキシャル成長技術が用いられている。薄膜の成長手法としては有機金属気相エピタキシャル成長 (MOVPE) 法が良く用いられる。さらに GaN 薄膜成長用基板としては、これまで一般的に用いられているサファイア (Al_2O_3) 基板より安価で大面積な材料である、Si 基板がコスト及び従来の Si デバイスとの混載の点から期待されているが、GaN 結晶中の転位密度の高さや Si 基板表面近傍のキャリア濃度の変化等の問題がある。

本研究では Si 基板上の GaN 結晶成長技術の中でも特に重要な、下地層である窒化アルミニウム (AlN) 層の成長が表面の GaN 単結晶層に与える影響に関して詳しく調べた。さ

らに GaN 結晶自体の結晶品質改善、GaN 成長による Si 基板抵抗変動の抑制に関しても取り組んだ。

第 1 章ではこれまでに化合物半導体が果たしてきた役割を述べると共に、本論文中で扱う半導体材料である GaN 結晶に期待されていることを述べた上で、GaN 結晶育成技術の課題について整理し、本研究の目的を明らかにした。

第 2 章では実験に用いた MOVPE 装置の概略及び典型的な成長プロセス及び本研究で用いた評価手法に関して説明した。

本研究では減圧横型 MOVPE 装置を用いて成長を行った。Ⅲ族原料としてトリメチルガリウム (TMGa) とトリメチルアルミニウム (TMAI)、V族原料としてアンモニア (NH₃) を用いた。また、Si 原料についてはモノメチルシラン (MMSi)、テトラメチルシラン (TMSi) を用いた。キャリアガスとして水素 (H₂)、窒素 (N₂) を用いた。本研究では Si 基板は 2 inch (111)面を用いた。評価手法としては、結晶性の評価には X 線回折 (XRD) 法、表面モフォロジーの評価には走査電子顕微鏡 (SEM)、結晶配列や欠陥を評価には透過電子顕微鏡 (TEM)、Si 基板、AlN 層中の不純物濃度分布には二次イオン質量分析 (SIMS)、結晶にかかる応力の評価は Raman 分光、Si 基板のキャリア濃度分布評価は広がり抵抗測定 (SR)、表面転位密度については原子間力顕微鏡 (AFM) でそれぞれ評価した。

第 3 章では AlN の成長初期プロセスである Al 供給プロセスに着目し、本プロセス時間を変えることにより、AlN の結晶性がどのように変化するか、またその AlN の結晶性の影響を受けてその上に成長する GaN 層がどのような表面モフォロジーが形成されるのか調査し、その結果について検討を行った。評価には TEM などを用い、AlN 層の結晶構造と GaN 層の表面モフォロジーおよび結晶性の関係について詳細に考察した。

その結果、Al 供給プロセスの時間が短い場合には、Si 基板表面を覆う Al 原子が少なく、高密度で AlN 結晶が成長することが分かった。高密度の AlN 結晶はそれぞれが会合する際に多くの転位と共に引っ張り応力を発生させるため、AlN 層中の転位密度が高くなり、GaN 結晶のクラック発生原因にもなっている。また、AlN 層中の多くの転位により、AlN 層の一部に傾いた配向の結晶が発生していることが確認できた。傾いた結晶はその上に成長する GaN 結晶成長を妨げるため、GaN 層表面のピット形成に寄与することが明らかになった。

一方、Al 供給プロセスの時間が長い場合には、Si 基板上に存在する余剰な Al が部分的に Si 基板表面に凝集し、Si と反応、合金化することが分かった。さらに、合金化した基板表面には傾いた配向の AlN 結晶が成長することが確認できた。しかし、Al 供給プロセスの時間が長い場合でも、Si 基板表面において Al が凝集していない部分では適切な Al が表面を覆っているために、その部分では結晶性の高い AlN 層が成長した。

適切な Al 供給プロセス時間で AlN 層を成長した場合は初期成長における AlN 結晶が大きく、密度が低いことが確認できた。そのために AlN 結晶の会合頻度が少なく、AlN 層中に発生する転位密度は、TMAI 時間が短い場合よりも少なくなることが確認された。その結

果、傾いた配向の結晶が発生せず、ピットの無い GaN 表面を得ることができると結論付けた。

第 4 章では一般的に用いられる SiN_x 中間層を用いた転位低減手法について、転位抑制効果を検証し、その上でより効率的に転位の低減が可能である、成長炉内でのエッチングと SiN_x 中間層を組み合わせた低コストのプロセスについて検討した。

従来用いられている SiN_x 中間層を用いた手法について、GaN テンプレート層の上に SiN_x 層を成膜した後と、その上に追加 GaN 結晶の成長した後で表面モフォロジーを比較した。その結果、GaN テンプレート層表面の転位が存在する場所には SiN_x が成膜されず、転位がある場所を起点として追加 GaN 結晶は成長することが明らかになった。このため、GaN テンプレート層中の転位が追加成長した GaN 結晶中に伝播しやすいことが分かった。

GaN テンプレート層の転位を選択的にエッチングし、ピットを形成する手法としては、H₂ と NH₃ を用いたエッチングを試みた。その結果、H₂ と NH₃ を同時に供給する手法では狙い通りのピットを形成できず、SiN_x 層を成膜した後、H₂ 雰囲気中に NH₃ を間欠的に供給する手法が有効であった。本手法では NH₃ が供給されないステップでは、H₂ により転位付近の GaN 結晶と共にその周りの結晶についても分解が進むものの、NH₃ が導入されるステップでは GaN 結晶のマストランスファーにより安定した面が形成され、転位の周り以外では結晶の再配置が起こることにより、転位に対する選択的なエッチング効果と表面平坦性を両立できたものと理解できる。

さらに、ピット形成後に第二 SiN_x 層を成膜することにより、ピット壁からの追加 GaN 成長を無くし、ピット上部での転位発生を抑制できることが分かった。ピット壁からの GaN 結晶成長はピット上部における結晶会合を招くことで、転位の再発生を引き起こす。このため、ピット形成後の第二 SiN_x 層成膜プロセスは GaN テンプレート表面に成長する GaN 結晶密度を少なくでき、GaN 結晶会合が少なく、GaN 層中の転位密度を低減に寄与することが分かった。

追加 GaN 成長条件に関しては、GaN 結晶密度を少なくするため、成長温度を高くするほうが良いことが分かった。また、追加 GaN 層中に伝播する転位の屈曲効果及び GaN 表面の平坦化を両立するためには高圧力条件下、低 V/Ⅲ比での GaN 結晶成長の後、低圧力条件下、高 V/Ⅲ比での GaN 結晶成長の二段階成長が適当であった。低 V/Ⅲ比で GaN を成長した場合には結晶密度が少なく、結晶会合頻度が低いために転位の発生を抑制できる一方で、GaN 結晶表面に低角度のファセットが発生するために、発生した転位を屈曲させる効果が低い。一方で、高 V/Ⅲ比による GaN 結晶成長は高角度のファセットが発生しやすくなり、転位を屈曲させやすい働きがあるとともに、GaN 結晶表面の平坦化にも有効である。

今回検討した手法により、Si 基板表面に成長した GaN 結晶における表面転位密度は $6.7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ を達成した。この転位密度は従来の SiN_x 層を用いた手法よりも一桁程度少ない。本手法では、反応炉外でのプロセスがないために、低コストで高品質結晶が実現できる。

第 5 章では Si 基板上の GaN 成長プロセスにおいて、Si 基板表面近傍の抵抗率変化をも

たらずプロセスを特定し、その抑制手法について検討した。

Si 基板上に AlN 下地層および GaN 層を成長するプロセスにより、Si 基板中に Al、Ga、C が拡散することを確認した。また、深さ 0~1 μm の領域で Al と Ga 濃度を合計したプロファイルとキャリア濃度プロファイルが一致しているため、この領域では Si 基板中に拡散した Al と Ga がアクセプタとして活性化していると結論付けた。

Si 基板中に Al、Ga が拡散するプロセスを特定するために、切り分け実験を行った。この実験により、Si 基板中に拡散する Ga は、反応炉内に堆積した Ga 由来の生成物がキャリアガスである H_2 によって分解されて Si 基板に飛来して Si 基板へ拡散するプロセスと、GaN 成長中に Ga 原料が AlN 下地層を通して Si 基板に拡散するプロセスが主な原因であることを示した。一方、Si 基板中に拡散する Al 濃度は AlN 下地層成長前の TMAI プロセス時間に強く依存することを示した。これは Si 基板表面に存在する未反応の Al が Si 基板中に拡散したためと推定した。

これら Si 基板中への Al、Ga 汚染によるキャリア濃度の変化を抑制する手法に関しても検討を行った。Ga 汚染を抑制するためには、反応炉内にダミー Al 化合物を堆積する手法を提案した。この手法により、反応炉内からの Ga による Si 基板表面の汚染を抑制することができ、Si 基板の Ga 濃度を一桁程度改善することが可能であることを示した。また、Al 汚染を抑制するためには、TMAI プロセス後に TMAI の供給を停止し、 H_2 と NH_3 のみを供給する手法を提案した。この手法により、Si 基板表面の Al と NH_3 が反応し、窒化が進むために Si 基板への Al 汚染量を一桁以上抑制可能であることが分かった。

本研究成果により Si 基板上の AlN 下地層の成長の理解が進み、GaN 層の表面モフォロジー改善や転位密度低減がなされた。また、GaN 結晶成長プロセスによる Si 基板キャリア濃度への影響についても明らかになった。この取り組みにより、GaN 結晶を用いた高周波パワーデバイスのリーク電流、オン抵抗、寄生損失等の電気特性を改善することができる。これにより、低消費電力、高性能、低コストな高周波パワーデバイスが世の中で広く用いられるようになるものと考えられる。