

報告番号	甲 第 14057 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 高耐圧縦型 GaNp-n 接合ダイオード作製に向けたハライド気相成長に関する研究  
(Study on halide vapor phase epitaxy for vertical GaN p-n junction diode with high breakdown voltage)

氏 名 大西 一生

## 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、縦型 GaN パワーデバイスの高耐圧化を目指して、高純度 GaN の高速成長が期待できるハライド気相成長 (HVPE) 法に着目し、HVPE 成長技術の確立に向けた結晶成長条件の探求や p 型伝導制御に関する研究をまとめたものであり、6 章で構成される。

第 1 章では、窒化物半導体の歴史およびパワーデバイス材料としての GaN の特徴を述べた後、GaN パワーデバイスの現状とその課題について説明している。特に、高耐圧 GaN パワーデバイス作製に向けて結晶成長手法を確立することの必要性を述べ、本論文の目的と位置づけを明確化している。現在使用される Si 系パワーデバイスの性能は、既に Si の物性限界に達しており、飛躍的な性能向上は困難であることから、更なる省エネルギー化に向けて新材料の使用が望まれている。GaN はその優れた物性から、Si と比べて高耐圧・低オン抵抗のパワーデバイスへの応用が期待されている。しかしながら、高耐圧化に必須である低ドーピング濃度を有する GaN 厚膜ドリフト層の成長技術が未確立であることから 10 kV 以上の高耐圧パワーデバイスは社会実装されていない。従来、デバイス構造の成長手法として有機金属気相成長 (MOVPE) 法が広く用いられている。しかしながら、その成長速度は数  $\mu\text{m/h}$  程度である点、キャリアを補償する炭素が  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  以上混入する点から、縦型パワーデバイス構造の成長手法として課題を抱えている。本論文では、数十～数百  $\mu\text{m/h}$  の成長速度を有し、原理的に炭素を含まず高純度な GaN が成長できる HVPE 法に着目し、高耐圧の縦型 GaN パワーデバイスの作製に向けた HVPE 成長技術の確立を目指している。

第 2 章では、本研究で用いた HVPE 装置の概要、典型的な成長条件、および、成長させ

た GaN 中の残留不純物について述べている。異なる成長温度にて HVPE 成長させた GaN の成長速度は成長温度に大きく依存していないことから、本論文にて使用する結晶成長条件は原料輸送によって律速されていることを確認している。また、結晶成長条件の予測に有用である熱力学解析の概要を説明し、その解析結果を示している。さらに、電気的特性評価に使用した Hall 効果測定の詳細についても説明している。

第 3 章では、Si ドーピングによる n 型 GaN 中のドナー濃度制御と結晶成長時における供給 V/III 比と基板オフカット角度が n 型 GaN ドリフト層の表面モフォロジーに与える影響について述べている。高性能なパワーデバイスを作製するためには、低ドナー濃度で平坦な表面を有するデバイス構造を成長させることが重要となる。しかしながら、パワーデバイス構造に適した HVPE 成長条件の知見は乏しい。本論文では、n 型 GaN ドリフト層の HVPE 成長条件の確立に向けて、まず n 型 GaN 中のドーピング濃度制御についてまとめている。SiCl<sub>4</sub> を前駆体に用いた Si ドーピングを行い、10<sup>16</sup>–10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> までの範囲に渡り Si 供給比でドナー濃度が制御可能であることを確認している。一方で、10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> 以下の範囲においては、装置を構成する石英管に起因する Si が意図せず混入ことから、石英フリー化による Si 濃度低減の重要性を指摘している。次に、供給 V/III 比と基板オフカット角度をそれぞれ変化させながら n 型 GaN を HVPE 成長させ、その表面モフォロジー変化を調べている。高供給 V/III 比または低オフカット角度においては、高密度なスパイラルヒロックが、低供給 V/III 比または高オフカット角度においては、平坦な表面がそれぞれ形成することを見出している。また、成長させた全ての試料において、その実効ドナー濃度は成長条件および基板オフカット角度に依存しないことを確認している。成長条件による表面モフォロジーの傾向を記述するために、熱力学解析と古典的な結晶成長モデルである Barton, Cabrera, Frank (BCF) モデルを適用している。スパイラル成長からステップフロー成長へ遷移するオフカット角度 (臨界オフカット角度) は熱力学解析から算出される気相過飽和度に依存し、気相過飽和度の低下に伴って臨界オフカット角度は小さくなることを見出している。また、その臨界オフカット角度の気相過飽和度は BCF モデルを用いて説明可能であることを示している。

第 4 章では、HVPE 法による p 型 GaN の作製に関して述べている。縦型 p-n 接合ダイオードや金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタの作製にむけて、p 型層の作製技術は非常に重要な要素である。しかしながら、信頼できる p 型 GaN の HVPE 法による作製は報告されておらず、その作製技術は未確立であった。これは使用される Mg の蒸気圧が高いことに起因した Mg 濃度の制御の困難性、Mg と石英の反応性の高さによる安全性によるものと推察される。本論文では、p 型原料として蒸気圧が低く石英との反応性の低い MgO に着目し、MgO と HCl の反応を用いた p 型ドーピングを試みている。MgO 温度および HCl の供給分圧によって GaN 中の Mg 濃度が 10<sup>16</sup>–10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> の広範囲で制御できることを明らかにし、MgO と HCl との反応によって生成される MgCl<sub>2</sub> が前駆体となることを実験的に示している。また、MgO の蒸気圧に起因した Mg の意図しない混入は見られないことも見

出している。HVPE 成長した Mg 添加 GaN はフォトルミネッセンス測定から 3.2 eV および 2.9 eV 付近に Mg アクセプタに起因する発光が観察された。そこで、Hall 効果測定を用いて電気的特性を評価したところ、Mg アクセプタによる p 型伝導性を示した。 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  の Mg 濃度を有する p 型 GaN の正孔移動度の散乱要因を解析したところ、その計算値は実験値と非常によく一致しており、130 K 以下ではイオン化不純物散乱、130–380 K では変形ポテンシャル散乱、380 K 以上では、有極性光学フォノン散乱が支配的な散乱要因であることを見出している。一方で、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  程度の Mg 濃度を有する p 型 GaN 中にピラミッド状の極性反転領域 (PID) が形成されること、PID 中に高濃度の Mg が混入することを走査型透過電子顕微鏡およびエネルギー分散型 X 線分析法を用いて確認している。この高 Mg 濃度 p 型 GaN のアクセプタ濃度は Mg 濃度と比べて低いことから、PID に混入する Mg がアクセプタとして機能しない可能性が示唆される。以上より、本章では MgO を利用した Mg ドーピング技術を確立し、HVPE 法によって初めて p 型 GaN が作製できることを実証している。また、HVPE 法によって作製される p 型 GaN の電気的特性を明らかにし、その特性は従来の MOVPE 法によって作製される p 型 GaN と同様であることを確認している。つまり、本論文で得られた p 型 GaN の電気的特性は成長手法に依らない材料固有の物性である。

このように、MgO を用いることによって HVPE 法による p 型 GaN 作製技術を確立できた。しかしながら、Mg ドーピング時における課題も明らかとなった。HVPE 法によって Mg ドーピングを行った後に成長させた無添加 GaN 中に Mg が意図せず混入することが阿確認された。これは、Mg ドーピング後に成長炉内に Mg が残存するメモリー効果として広く認識されている。メモリー効果は、バイポーラトランジスタ構造の成長を困難にする、装置稼働率の低下を招くことから抑制することが必須である。そこで、装置内の温度低下を抑制することによって Mg メモリー効果の抑制を試みている。一定の改善は確認されたが完全な抑制は達成できていない。メモリー効果のメカニズムを解明し、Mg ドーピングに適した HVPE 装置を設計・作製することが重要であると結論付けている。

第 5 章では、HVPE 法による縦型 p-n 接合ダイオードの作製を試みている。30  $\mu\text{m}/\text{h}$  の成長速度で p-n 接合を成長させたところ、p-n 界面に高濃度の Fe が混入することがわかった。成長速度を 3  $\mu\text{m}/\text{h}$  に小さくすることによって、界面に混入する Fe 濃度が抑制できることを確認している。P-n 界面における Mg は MgO に供給する HCl 分圧によって制御できることを二次イオン質量分析法を用いて確認し、走査型電子顕微鏡から明瞭な p-n 界面が形成されることを見出している。一方で、p-n 接合界面の急峻性、つまり n 型層から p 型層へ遷移する膜厚は約 200 nm と MOVPE 法によって作製される p-n 接合と比べて厚いことも確認された。この遷移層の膜厚は成長速度に依存せず同程度であることから、遷移層膜厚は Mg の偏析に律速されておらず、GaN 中に Mg 取り込まれる前に石英製成長ノズルに Mg 前駆体が優先的に付着するためと考えられる。次に、縦型 p-n 接合ダイオードを作製し、その電流-電圧特性を評価している。P-n 接合界面に高濃度の Fe が混入したデバイスでは

明瞭な整流性が確認されなかった。一方で、接合界面の Fe 濃度を抑制したデバイスは明瞭な整流性が確認された。順方向電流-電圧特性から算出した理想因子の最小値は 1.6 であった。また、このデバイスは 25–200 °C の範囲において非破壊の電圧降伏現象を観測した。観測された降伏電圧の温度依存性は報告されている GaN の絶縁破壊電圧とよく一致していたことから、アバランシェ降伏による絶縁破壊と結論できる。以上から、アバランシェ降伏を示す縦型 p-n 接合ダイオードが HVPE 法を用いて作製できることを実証した。これは、HVPE 法が縦型パワーデバイスの成長手法として高いポテンシャルを有することを示している。しかしながら、その特性オン抵抗はユニポーラリミットには達していない。また、逆方向リーク電流が MOVPE 成長によって作製される p-n 接合ダイオードと比べて 3 桁以上高いことも確認され、そのリーク箇所がデバイス内部に起因することをエミッション顕微鏡によるリーク箇所の観察から明らかにしている。今後、リーク要因の特定および HVPE 成長条件の改善によって、HVPE 成長によって作製される縦型パワーデバイスの性能向上が期待できると結論付けている。

第 6 章は、本論文の総括である。各章で得られた HVPE 法による高耐圧縦型パワーデバイスの作製に関する知見をまとめ、残された課題と今後の展望について述べている。