

主 論 文 の 要 約

論文題目 縦型 GaN パワーデバイス実現に向けた Mg
イオン注入プロセスに関する研究
(Study on Mg-ion implantation for the
realization of vertical GaN power devices)

氏 名 櫻井 秀樹

論 文 内 容 の 要 約

本論文は、省エネルギー社会の実現に資する高性能縦型 GaN パワーデバイス実現する鍵となるデバイス作製プロセスである、Mg イオン注入による局所的 p 型ドーピングの実現に関する研究成果をまとめたものである。

第 1 章では、本研究の背景、次世代パワーデバイスへの期待、イオン注入技術の歴史と特長、そして本研究の位置づけを述べている。電動自動車、エアコン、データサーバーなど電気エネルギーを用いる機器、装置などの省エネルギーを実現するためには、高性能（低損失）なパワーデバイスが不可欠である。現在、パワーデバイスは Si を用いて作製されているが、既に Si の物性限界まで性能向上は行われており、飛躍的な性能向上を実現するためには新しい半導体材料への移行が必要である。GaN を用いた縦型パワーデバイスは Si を大きく凌駕する超低損失を実現可能と期待されているが、いくつかの技術課題を抱えている。その中でも最も重要となるのが Mg イオン注入による局所選択的 p 型ドーピングである。これまで多くの研究が行われてきたが、デバイス作製に利用可能なレベルのドーピング技術の確立には至っていない。本研究では、Mg イオン注入後の活性化処理に超高压アニールを利用することを提案し、その基礎を確立することを目指している。

第 2 章では本研究で用いた実験装置及び実験手法について、予備実験や基礎検討も交えながら詳細に説明している。従来から試みられている活性化手法である高速熱アニール法 (Rapid Thermal Anneal: RTA) についてその課題について実験結果も踏まえて述べ、それに対する解決として本研究で提案する超高压アニール法 (Ultra-High-Pressure Anneal: UHPA) について詳細に説明している。超高压アニールは GaN の平衡蒸気圧以上の高压環境

下での活性化アニールであるため、RTA で問題となっていた熱分解反応を抑制し、さらに高温のアニールが可能になるため結晶欠陥低減の効果が期待できる。注入した Mg イオンの挙動、活性化を評価するための手法として、本研究で主に用いた、SIMS(Secondary ion mass spectrometry)、CL(Cathodoluminescence)、ホール効果測定についても説明している。

第 3～5 章では本研究における実験結果および解析結果について説明している。第 3 章では、超高压アニールによる Mg アクセプタ形成実証のために用いた試料構造と作製条件の説明と、各分析評価を用いた結果を説明し、最後にホール効果測定の温度特性結果と解析、そして超高压アニール温度を変えた時の p 型伝導特性の温度依存性を説明した。超高压アニールによる熱分解抑制の検証では、Atomic force microscope (AFM)による活性化アニール後の GaN 表面形状の評価を行い、従来の RTA(1300°C/0.5min/大気圧)では表面粗さ 23.8 nm に対し、超高压アニール(1400°C/15min/1GPa)では 1.0 nm であり、RTA よりも高温かつ長時間アニールにも関わらず、平坦な表面が観察され熱分解抑制を示した。また低温 CL の結果から、超高压アニールプロセスしたサンプルは RTA のサンプルに比べて格段に強い Near band-edge (NBE)およびドナー-アクセプタ-ペア(DAP)発光強度を示し、Mg アクセプタ形成を効果的に向上させると同時に窒素空孔(V_N)関連欠陥に由来するグリーン-ルミネッセンス(GL)を抑制する効果があることを示した。さらに超高压アニール後の SIMS 分析から Mg 熱拡散現象が確認され、Mg プロファイルは注入後の Box-profile 形状(Mg 濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、300 nm)に対して超高压アニール(1400°C/5min/1GPa)後は、平均 Mg 濃度 $2.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、約 1 μm で再分布していることが明らかになった。(拡散現象の詳細は 5 章で議論。)さらにこれらのプロセスを経たサンプルについてホール効果測定用素子を作製、評価したところ、Mg 濃度 $2.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に対してアクセプタ密度 $(2.6 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ が得られ、注入 Mg のアクセプタ活性化率は少なくとも 78%以上であることを明らかにした。ただし、アクセプタ密度の 10~30%の補償ドナーが存在していることも明らかになった。得られた p 型層の正孔移動度は $24.1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ であり、エピタキシャル成長 Mg ドープ p 型 GaN に迫る値が得られた。さらに、ホール効果測定で示された p 型伝導特性の超高压アニール温度依存性について調査を行い、少なくとも 1400°C 以上のアニール温度では再現性を持って明確な p 型伝導特性を示すことを確認した。Mg イオン注入後の活性化手法として超高压アニールを用いる事によって、熱分解を抑制するとともに、注入した Mg のアクセプタとしての活性化を光学的・電氣的に実証することに成功した。特に、ホール効果の温度特性評価、活性化率、補償率の解析が可能な良好な p 型 GaN を実現したのは本研究が世界初である。

第 4 章では、3 章で得た p 型特性のさらなる向上を目的として、 V_N 関連欠陥を窒素イオンを追加で注入することで回復(補償)する効果を狙って Mg-N シーケンシャルイオン注入に取り組んだ。Mg イオン注入は、3 章と同じく Mg 密度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の 300nm のボックスプロファイルとし、N イオン注入量を 0(N イオン注入なし)~ $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と変化させた

試料を作製した。N は Mg とほぼ同じプロファイルとなる注入条件とし、注入は Mg、N の順で行った。活性化手法は RTA と超高压アニールの両方を行い比較した。

RTA を行ったサンプルについて、低温 CL による発光スペクトルを確認したところ、N の注入によって GL 発光強度が減少することを確認した。GL 発光の起源は V_N 関連である言われているが、本研究はそれを実験的に示した結果である。N 注入量には適正領域が存在し、Mg と N の注入量がほぼ同量、つまり Mg 濃度 = N 濃度 $= 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の時に最も GL 強度が抑制されることがわかった。

上記の Mg-N シーケンシャルイオン注入の最適条件を用い、活性化処理に超高压アニールを実施した。低温 CL 結果では、RTA における結果と同様に N イオン注入により GL 発光強度の抑制が確認された。また NBE および DAP 発光強度については、3 章の結果同様、従来の RTA よりも著しく高い値を示した。また SIMS 分析では、超高压アニール後に Mg 熱拡散現象が確認されたが、Mg-N を注入したサンプルは、Mg のみの注入サンプルに比べて Mg 熱拡散が抑制され、表面近傍の Mg 濃度は $\sim 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と高いままとすることが分かった。このプロセスを経たホール素子を作製し、 I - V 特性確認をしたところコンタクト特性が改善する結果を得た。コンタクト特性改善は、表面の高濃度の Mg による効果と考えられる。ホール効果測定による温度特性評価では、コンタクト特性改善により広い温度領域 160~620 K のホール効果測定ができ、より精度の高い解析が可能となった。SIMS 分析結果から再分布後の Mg 濃度は、平均濃度 $2.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、深さ約 $1 \mu\text{m}$ 、これに対してホール効果測定では $N_A = (1.9 \pm 0.02) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ が得られ、アクセプタ活性化率は少なくとも 90% 以上であると見積もられた。ただし補償ドナーが 25 % 程度存在し、また正孔移動度は $19.3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、Mg のみの注入に比べるとやや悪い値で、残留欠陥の存在が示唆された。

第 5 章では、超高压アニールの GaN パワーデバイス作製プロセスを想定して、Mg 熱拡散現象の詳細な解明に取り組んだ。まずは超高压アニールによる Mg の拡散現象のみを切り分けて評価するために、イオン注入ではなくエピタキシャル成長により作製した Mg ドープ GaN サンプルを準備した。イオン注入では注入により多数の欠陥が導入されており、それに起因する拡散の可能性もあるからである。エピタキシャル成長 Mg ドープ GaN においても超高压アニールによって Mg 熱拡散が見られた。ただし、拡散の度合いはイオン注入サンプルに対して小さかった。解析の結果、単純な熱拡散、フィックの法則では Mg 拡散プロファイル（特に拡散フロント領域）を説明できないことが分かった。SIMS 分析によって Mg と H の同時拡散が起こっていることが判明し、Mg-H の拡散は空乏層電界による効果を考慮したモデルを適用することによって拡散プロファイルを再現することに成功した。

同様のモデルを Mg イオン注入 GaN の超高压アニール後の Mg プロファイルの解析に適用した。イオン注入サンプルではエピタキシャル成長 Mg ドープ GaN サンプルよりも深く拡散しており、得られた拡散係数は、エピタキシャル成長 Mg ドープサンプルは $7.0 \times 10^{-14} \sim 1.4 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ に対して、Mg イオン注入サンプルは $2.5 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と

析違いに大きかった。Mg イオン注入サンプルではイオン注入により生成された多数の点欠陥による拡散支援が起こっていることを示唆している。

イオン注入試料の超高压アニール後の拡張欠陥について詳しく調べることも重要であるので TEM 解析を行った。超高压アニール 1300℃で形成される欠陥は、主として、(0001) 面上に GaN 1 分子層が割り込んだ extrinsic 欠陥と Mg 層が偏析したナノスケール極性反転領域である。また、Mg 偏析欠陥に偏析した Mg 原子は電氣的に不活性である。これに対し、1480℃アニールでは Mg 偏析欠陥は観察されず、{11-20}面上に形成された intrinsic な転位ループであった。intrinsic な転位ループは、空孔の凝集により形成されるため、転位ループの形成は結晶中の空孔型欠陥濃度の低下を示している。また 1480℃アニールで、反転領域欠陥が消失する事は、電氣的に不活性な Mg が減少した可能性を示している。従って、高温アニールによる空孔型欠陥濃度の低下と電氣的に不活性な Mg の減少は、高温アニールによる活性化率向上の要因であると考えられる。

デバイス作製においてはマスクパターンを介したイオン注入による選択的ドーピングが必要である。これまで深さ方向の分布について議論したが、横方向の Mg 分布についても調べる必要がある。選択領域への Mg イオン注入を行い、超高压アニールによる活性化処理後の二次元的な Mg 分布(アクセプタ分布)について複数の方法で評価を行った。平面 SEM 観察において、p-n コントラストが観察され、選択領域への p 型領域形成を確認した。また、このテストサンプルについて Mg イオン注入断面が出るように切断加工し、Time-of-Flight(ToF)-SIMS 分析による Mg 濃度分布、低温 CL 測定による DAP 強度分布、Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy (SNDM)分析による電気極性分布、Scanning Microwave Microscopy(SMM)分析によるホールキャリア濃度分布の調査を行い、Mg 濃度分布とほぼ同じ分布形状を持った DAP 強度分布、p 型極性分布、ホールキャリア濃度分布を確認した。Mg 濃度分布をはじめ、いずれの特性分布も異方性を持ち、横方向よりも深さ方向に広がる。これは、深さ方向の拡散は前述の欠陥支援拡散が支配的に効いているためと考えられる。横方向に異常な拡散が起こらなかったことは将来、デバイス構造を微細化する上で問題がないことを示す、良い結果と言える。

6 章は結論として、本研究の成果についてまとめ、今後の課題について述べている。結論は次の通りである。

本研究では縦型 GaN パワーデバイス実現に向けた Mg イオン注入・活性化に関する研究を行った。超高压アニール(UHPA)による活性化を提案し、アニールの挙動を様々な観点から詳細に調べた。従来の活性化手法である RTA の課題を解決し、イオン注入した Mg のアクセプタとしての高い活性化に成功した。Mg、N イオンのシーケンシャル注入の効果、またデバイス作製プロセスの設計の基礎データとなる Mg 熱拡散現象の評価、解析や、選択領域への p ドーピングの実証を行い、本研究で提案した手法が将来の縦型 GaN パワーデバイスに利用可能な有用な技術であることを明らかにした。