

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13304 号
------	---------------

氏 名 櫻井 秀樹

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)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	須田 淳
委員	名古屋大学	教授	天野 浩
委員	名古屋大学	特任教授	加地 徹
委員	名古屋大学	特任教授	橋詰 保
委員	名古屋大学	准教授	本田 善央
委員	名古屋大学	准教授	堀田 昌宏

論文審査の結果の要旨

櫻井秀樹君提出の論文「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」は、高性能縦型GaNパワーデバイスを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り、超高压アニールという独自の手法を用いることで、高い活性化率でp型化が実現可能であることを明らかにし、さまざまな評価手法から多角的に活性化について明らかにしている。各章の概要は以下の通りである。

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。GaNを用いた縦型パワーデバイスは既存のSiパワーデバイス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。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ことを述べ、また、論文全体の構成について述べている。

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温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ことを述べている。Mg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) ホール効果測定などについても説明している。

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型伝導特性の依存性を説明した。低温CL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熱拡散現象について明らかにした(拡散の詳細は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、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り、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、熱分解を抑制することも、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の成果である。

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、窒素空孔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。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発光の起源は窒素空孔関連であると言われていたが、本研究はそれを実験的に明確な形で示した結果である。また、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の時に最もGL強度が抑制されることを明らかにした。超高压アニールにおいてもMg-Nシーケンシャルイオン注入の効果について研究を行った。SIMS分析により、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濃度は高いままとなることを見出した。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。

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。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た。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ドープサンプルに対してMgイオン注入サンプルは一桁以上大きいことを見出し、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する結果を得た。イオン注入試料の超高压アニール

論文審査の結果の要旨

ル後の拡張欠陥について詳しく調べるために透過電子顕微鏡 (TEM) 解析も行った。超高压アニール1300°C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った。これに対し、1480°CアニールではMg偏析欠陥は観察されず、{11-20} 面上に乗る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°Cアニールで、反転領域欠陥が消失する事は、電気的に不活性なMgが減少した可能性を示しており、高温アニールによる空孔型欠陥濃度の低下と電気的に不活性なMgの減少は、高温アニールによるMgの活性化率向上の要因であることを明らかにした。デバイス作製への適用を考え、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について横方向のMg拡散についても研究を行った。平面SEM観察において、パターンに応じた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、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を行った。Mgの拡散は異方性を持ち、横方向の広がりはずかであり、深さ方向に大きく拡がることを確認した。これは、深さ方向の拡散は上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、デバイス構造の微細化が可能である。

第6章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では超高压アニールによりMgイオン注入による局所的p型ドーピング技術の実現の基礎を確立した。ここで得られた結果は、将来、超低損失縦型GaNパワーデバイスを実現するための基礎となるものであり、工学の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文の提出者である櫻井秀樹君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。