

## 紫外線イメージングセンサーの開発

### [1] 組織

代表者：中野 貴之

(静岡大学工学部電気電子工学科)

対応者：青木 徹

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

山川 俊貴(静岡大学工学部電気電子工学科)

立蔵 洋介(静岡大学工学部電気電子工学科)

### [2] 研究経過

紫外線イメージングセンサーの研究開発は不可視光の可視化技術として需要が高まっており、近年ますますその重要性を増している。本プロジェクトでは、紫外線イメージングセンサーデバイスとして期待される GaN 光電面デバイスのプロセス開発として、GaN 結晶成長技術における極性反転結晶成長技術の開発および結晶成長メカニズムの解析を目的として行った。

本プロジェクトは、本年度が初年度であった。これまでの我々の研究では、紫外線イメージングセンサーの開発において GaN 光電面が十分な量子効率を持ち、透過型光電面としても用いることが可能であり、イメージングセンサーへの活用が可能であることを示してきた。しかしながら、GaN 光電面の作製プロセスにおいては UV ガラス基板との張り合わせ後に裏面からのエッチング工程による極薄膜の作製プロセスが必要であり、この工程によって作製される光電面の膜厚や均一性によって量子効果が大きく異なってくる。GaN 光電面の膜厚における制御性や均一性を得るためにウェットエッチングによるエッチストップ層の導入が望まれている。GaN はウルツ鉱型結晶構造を持つため、c 軸方向に非対称であり、化学的な安定な Ga 極性面と KOH 溶液によるウェットエッチングが可能な N 極性面が存在する。我々はこの極性構造に着目し、極性を結晶成長中に反転させ Ga 極性 GaN 上に N 極性 GaN を結晶成長させた極性反転構造を作製することによって、極性が反転した領域で KOH 溶液によるエッチストップを行い GaN 光電面プロセスに利用することを考えた。GaN 結晶成長中において極性を反転させる技術は分子線エピタキシー(MBE)法において Mg 原子の表面吸着層を形成することによって極性反転構造の作製を実現されている。しかしながら、有機金属

気相エピタキシー(MOVPE)法においては極性反転結晶成長技術については報告例がなく、我々の研究により高 Mg ドープ層を 100nm 程度積層することによって極性反転構造を作製することを実現している。

本プロジェクトでは、現在の極性反転結晶成長技術では極性反転領域が 100nm と非常に厚くデバイス応用が困難であるため、極性反転領域の薄膜化に取り組み紫外線イメージングセンサーとなる GaN 透過型光電面作製プロセスの開発を行った。

以下に研究活動状況の概要を記す。

研究打ち合わせ：随時(共同研究者が同一キャンパスに在籍しているため)

研究討論会：4回(7/2、10/14、11/24、2/9)

### [3] 成果

#### (3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

最初に、これまでの研究において実現してきた極性反転構造の定量的評価を行った。高 Mg ドープによる極性反転結晶成長では、有機金属原料である Cp2Mg のバブリング温度を高温にすることによって飽和蒸気圧を上げて Mg 供給量を通常のドーピング濃度の数十倍にすることによって極性反転を実現している。極性反転を実現した試料の実際のドーピング濃度を測定することによって極性反転結晶成長に必要な Mg ドープ量および極性反転における Mg ドープの変化を調べた。図 1 に代表的な試料の SIMS 測定結果を示す。

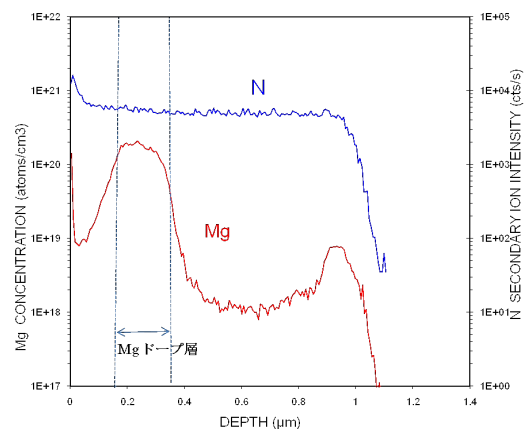


図1、Mg ドープによる極性反転を行った GaN 薄膜の SIMS 測定結果 (Mg ドープ量： $2 \times 10^{20}$  [cm<sup>-3</sup>])

SIMS 測定を行うことによって Mg ドープ濃度を定量的に評価した結果、 $5 \times 10^{19}$  [cm<sup>-3</sup>]以上の Mg ドーピング濃度での結晶成長の際に、GaN 結晶成長中において+c 面 GaN 成長が極性反転を起こし-c 面 GaN に変化することが確認できた。また、Mg ドープ量を上げると通常では結晶性や表面平坦性が悪くなるが、ドープ量が  $1 \times 10^{19}$  [cm<sup>-3</sup>]以上から表面平坦性や結晶性が回復していることが確認できた。このことから極性反転を起こすだけのドープ量に近くなると、結晶成長における表面反応状態が変化していると考えられる。更に極性反転を実現した場合においても、Mg ドープ量の変化は見られないため、極性反転前後における Mg 原子の薄膜への取り込みに変化はないと考えられる。

次に、通常では Mg 供給原料として Cp2Mg を用いているが、更に Mg 供給量を増やすために飽和蒸気圧の高い EtCp2Mg を用いて極性反転の実験を行った。成長温度領域においては供給律速段階であるため全ての原料が分解して反応していると考えられるため、EtCp2Mg を用いることによってドーピング濃度を  $4 \times 10^{20}$ [cm<sup>-3</sup>]まで増加させることが可能となる。図 2 に EtCp2Mg による Mg ドープ GaN 層が 100nm と 20nm の表面光学顕微鏡像を示す。

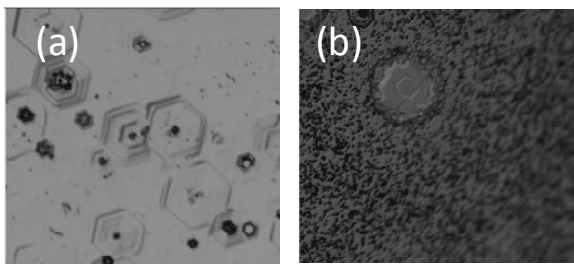


図2、EtCp2Mgドープによる極性反転結晶成長後の表面顕微鏡像：Mgドープ層膜厚(a) 100nm、(b)20nm

100nm においては全面に N 極性面の特徴である六角錐台のファセットが形成されており、EtCp2Mg によっても極性反転構造の作製が可能であることが確認できた。また、20nm のサンプルにおいては部分的に六角錐台のファセットが形成されており部分的な極性反転を実現したことを示している。更にこの実験結果を確認するために KOH 溶液によるエッチングを用いて極性の判別を行っており、100nm の Mg ドープ GaN の作製においては全面極性反転を実現しており、20nm では部分的な極性反転の実現を確認している。また、従来の Mg 原料である Cp2Mg では極性反転に必要な膜厚が 100nm 程度であったがより高ドープが可能で EtCp2Mg では、膜厚 20nm で部分的な極性反転を実現した。更に、極性反転の際の成長温度を 1060°C から 1040°C へと変化させることによって、Mg 原子の蒸発を抑

制し、膜厚 20nm で全面極性反転を実現することが可能となった。

更に、極性反転結晶成長における Mg ドープ時間依存性を調べたところ、ドープ量が多くなると極性反転に必要な時間が短くなることがわかった。また時間が不十分な場合においては極性反転が起こっていないことも確認できた。CVD プロセスにおいて拡散律速段階であるため、通常の結晶成長モデルでは時間経過により極性反転が起こる説明がつかない。供給量の増加により、極性反転が起こる時間が短くなることから Mg の表面偏析が起きておりサーファクタントなどが形成されて、あるしきい値を越した場合に極性反転が起こるのではないかと考えた。このモデルで考察を行うとこれまでの実験結果が全て説明可能であることから、表面偏析における解析が今後の課題となり、Mg ドープメカニズムにおいても重要な成長モデルの提案となると考えられる。

### (3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトは、紫外線イメージングセンサーの開発として、GaN 透過型光電面作製における極性反転結晶成長技術の開発を行ってきた。EtCp2Mg という新規原料を用いて極性反転を実現し、更には極性反転に必要な Mg ドープ層の膜厚を 20nm と非常に薄膜化したことにより、GaN 光電面作製プロセスにおいて極性反転構造をエッチストップ層として用いた場合においても十分な均一性が保てることを示した。今後、紫外線透過型イメージングセンサーへの応用が期待され、更なる発展が望まれている。

本研究結果は GaN などのⅢ族窒化物半導体結晶成長技術における新しい試みであり、Ⅲ族窒化物を用いた新規光機能デバイスへの発展が期待される成果を得た。また、Ⅲ族窒化物におけるサーファクタントの概念などは結晶成長技術への応用展開が幅広く考えられるため、本プロジェクトで得た知見から様々なⅢ族窒化物を用いた研究分野への展開が期待される。

本プロジェクトにおいて、多様な分野の研究者との交流が実現し、アウトソーシングを見据えた研究開発に展開している。また、技術的な交流を深めることにより他の研究プロジェクトへも展開がなされており極限画像技術の一つである中性子検出器に関する研究を開始しており、本プロジェクトを発端とした別プロジェクトの発足にも至っている。

### [4] 成果資料

学会発表

- (1) T. Nakano, *et al.*, ICNS-9, submitted
- (2) T. Tachi, *et al.*, EMS-30, 投稿予定