

ワイドギャップ半導体の光学的特性評価

[研究代表者] 澤木宣彦 (工学部電気学科)

[共同研究者] 岩田博之、出町雅彦、刑部建太郎 (工学部電気学科)

研究成果の概要

ワイドギャップ半導体 GaN はすでに白色 LED 照明に広く利用されているが、最近では紫外線 LED による殺菌装置やパワーデバイスの実用化が図られ、安心安全・低炭素社会の実現に貢献している。しかし、基板とすべきバルク結晶育成技術は開発途上で、殆どのデバイスは異種基板上へのエピタキシャル成長技術を援用している。デバイス作製時には結晶表面の機械的・化学的研磨による平坦化が施されるため、結晶欠陥と歪みの導入が避けられず、その改善が喫緊の課題となっている。本研究では、GaN への機械的研磨により結晶表面近傍に導入される欠陥と光学特性との関係を PL スペクトルと TEM 像との比較により評価した。その結果、導入された欠陥は主として転位であり、(0001) 面となす角度から、滑り面が(0001)、(11-22)、または(1-101)面であることが示唆された。以上の結果、研磨により誘導される PL ピーク強度の顕著な減衰は表面近傍に転位が導入されることに起因していることが実証された。

研究分野：半導体材料

キーワード：ワイドギャップ半導体、GaN、機械研磨、加工損傷、転位、PL、ラマン散乱、TEM

1. 研究開始当初の背景

ワイドギャップ半導体 GaN は SiC と共に電力用電子デバイス (パワーデバイス) の研究開発が進み、携帯基地局や新幹線などの省エネルギー化に貢献している。さらに最近では、AlN、ZnO や Ga₂O₃ など新材料の開拓が進められ、適用範囲の拡大が図られている。これらワイドギャップ半導体材料のパワーデバイス応用では、厚膜材料が用いられることが多く、様々な物理的、化学的加工プロセスを経てデバイスが作製される。最も基本的な工程は切断と研磨で、その結果試料表面には高密度の格子欠陥と大きな格子歪みが導入されるため、デバイス特性向上を阻害する最も重要な工程とされ、「ダメージレス表面加工」を目指す技術開拓が渴望されている。

我々は、平成 29 年度以降、機械研磨による GaN エピタキシャル膜の光学特性変化を評価してきたが、同年度には、共鳴ラマン散乱法により表面に大きな格子歪みが導入されることを明らかにし[1]、翌 30 年度には格子歪みの導入と共にバンド端発光強度が著しく減衰すること、さらにそれらは熱アニール処理により緩和されることを明らかにした[2]。これまでの研究で、格子歪みの

大きさと発光強度には一定の関係があることが見出されたが、その原因・機構については不明のままであった。

2. 研究の目的

半導体材料では機械研磨により試料表面にクラックやスクラッチが導入されることはよく知られているが、Si についての研究が多く、GaN についての報告は少ない。前年度までの研究で、GaN と ZnO ならびに Si について機械研磨と格子歪み、光学的性質との関係を精査した結果、直接遷移型半導体におけるバンド端発光強度が、格子歪みに対して指数関数的に変化することが明らかになった。その原因が試料表面に導入される格子欠陥にあることは予想できたが、その機構として、表面ポテンシャルの変化や欠陥密度の増加等が考えられた。今年度は機械研磨された試料の断面 TEM 像を評価することで、表面近傍に導入される格子欠陥の種類と深さを評価し、光学特性との関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) GaN エピタキシャル膜の機械研磨

試料には(0001)サファイヤ基板上にMOVPE成長されたエピレディ GaN (膜厚約 4 ミクロン)を用いた。試料表面を、アルミナ研磨シートを用いて水中研磨した。この手法により試料表面には、3.4GPa にも及ぶ加工歪みが与えられること、その歪みは 3 次元的であることを LO フォノンのシフト量等から評価してきた。今年度は研磨紙の粒度を 1 ミクロン(#8000)と 3 ミクロン(#4000)の 2 種類として、研磨深さの違いを見ることとした。

(2) PL スペクトルの評価

総合技術研究所に設置された紫外可視赤外分光光度計を用いて、研磨後試料のラマン散乱・PL 特性を室温で評価した。研磨が進むにつれ、PL 強度の減衰、LO フォノンのブルーシフトが確認された。その変化の様子は前年度結果とほぼ同じであった。

(3) TEM 法による格子欠陥の観察と評価

総合技術研究所に設置された透過型電子顕微鏡を用いて、上記試料の断面 TEM 像を観察した。低倍率像から研磨後のエピタキシャル層の厚さを評価したところ、エピタキシャル膜は研磨によって薄くなり、研磨程度によるが最大 2 ミクロン程度の研磨が行われていた。また、高倍率 TEM 像では、表面に暗いコントラスト模様が観察され、高密度の格子欠陥が導入されたことが確認された。晶帯軸と回折スポットを選択することにより格子欠陥の種類の同定を試みた。

4. 研究成果

高倍率 TEM 像によると、いずれの試料でも試料表面数百ナノメートルの深さまで転位が導入されていることが分かった。回折像の選択則から a+c-type の貫通転位と同等のバグーズベクトルを示す転位線が観測されたが、その角度は試料表面(0001)面に対して 32 度、57 度、62 度、73 度と傾いていた。表面に垂直 (90 度) の転位線もあった。また、試料表面近くの 100 ナノメートル以下の領域には、c 面に平行な転位線が高密度に観測され、そのバグーズベクトルは c 面に平行であった。

傾いた転位線は、(0001)GaN 表面へのナノインデンテーション実験でも観察された例があり、滑り面が(1-101)または (11-22)面の転位であることが示唆されている。

これらは共に a+c type の貫通転位と同等のバグーズベクトルを有し、前者では 62 度、後者では 57 度の傾き角が予想され本実験結果と類似である。C 面に平行な転位線は滑り面が(0001)面と考えられた[3]。

#8000 研磨と#4000 研磨との相違は研磨により削られた量が異なるという期待どおりの結果であった。転位線の侵入深さは、#8000 で 2~300 ナノメートルであったのに対して#4000 では 400 ナノメートルと後者の方が深くまで転位が侵入していたが、#8000 研磨でも、長時間研磨 (最終試料厚さが薄い) により転位線がより深くまで到達していることが認められたため精査が必要である。

ラマンスペクトルならびに PL スペクトルは、325 ナノメートルの紫外光励起による結果であるから、光の侵入深さからそれらの特性は試料最表面 100 ナノメートル以下のところの物性を反映していると思われる。即ち、光学特性は深くまで侵入した転位線ではなく、最表面に導入された C 面に平行な転位線が大きく利いていると予想される。この密度の算定は現状では困難であるが、研磨が進むと深くなったことから転位密度の増加がバンド端発光強度減衰に寄与していると予想される。

GaN のバンド端発光強度が貫通転位密度増加によって減衰することは多くの研究者によって報告されているが、転位の種類との相関関係は不明である。本実験では、研磨によって転位が導入され、それによって格子歪みが増加すると共にバンド端発光が減衰したことを明らかにできた。これは従来の予想を裏付けるものであるが、今後、研磨程度によって転位導入の程度を変化させ、光学特性との対応関係を定量化することが求められる。

5. 関連する発表

[1] "Photoluminescence and resonant Raman scattering from polished GaN surface," S.Ohtake, H.Iwata, and N.Sawaki, ISPlasma2018, Nagoya, March 2018, 06aE010.

[2] "Resonant Raman scattering analyses of the bi-axial strain on the surface of GaN and ZnO generated by mechanical polish," S.Suzuki, S.Otake, H.Iwata, and N.Sawaki, ISPlasma2019, Nagoya, March 2019, 20aF03O.

[3] 「機械的研磨により GaN 結晶に導入された格子欠陥の評価」、出町雅彦、刑部建太郎、2019 年度卒業論文 (愛知工業大学工学部電気学科、2020 年 2 月)