

# 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 (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 は青色・白色 LED のほか、省エネルギーパワーデバイスの実用化に貢献しているが、基板となるバルク結晶の育成技術は開発途上でデバイス作製は異種基板上へのエピタキシャル成長材料を基本としている。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ない。本研究では、機械的研磨による光学特性の変化を検証した。その結果、研磨による効果として、(1)PL ピーク強度の減衰、(2)PL ピーク波長のブルーシフト、(3)共鳴ラマン散乱信号の顕在化、(4)LO フォノンエネルギーのブルーシフト、が明らかになった。PL ピーク強度の減衰は研磨により試料表面に非輻射再結合中心が導入されたことを示し、PL ピーク波長のブルーシフト量から表面には 0.5Gpa 程度の 2 軸性圧縮応力が発生していることが示唆された。ZnO では PL ピーク強度の減衰が見られたが、顕著な圧縮歪みは検出されなかった。

## 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、 加工損傷、加工歪み、PL、ラマン散乱、 光学フォノン散乱

### 1. 研究開始当初の背景

GaN に代表されるワイドギャップ半導体は、青色発光ダイオードの発明を契機として、照明分野の革新に大きく貢献している。白色 LED の市場は世界的な拡大を見せているがその価格に課題が残り、更なる材料作製プロセスの低コスト化が望まれている。また、その発光領域の拡大にむけて、GaN 系混晶半導体の他、赤色領域から深紫外領域にわたる広い範囲での高効率・低価格発光素子の開拓に関する研究が進められている。これらワイドギャップ半導体材料は種々成長方法に関する精力的な研究の結果、良質なエピタキシャル膜が得られるに至ったが、良質なバルク結晶はその成長方法も含めて開発段階にある。このため、異種材料へのエピタキシャル成長が主流となっているのが現状である。そのため、成膜方法にかかわらず、デバイスの活性層には高密度の格子欠陥(点欠陥、線欠陥、面欠陥)が導入されることに特徴があり、デバイス作製プロセスでも結晶表面やヘテロ接合界面に加工歪みや格子不整を原因とする欠陥が導入される。これらの欠陥がデバイスの性能を制限する

大きな要因となっており、その生成機構の詳細な知見がデバイス性能向上に不可欠と言われている。

他方、結晶表面の加工には機械的・化学的研磨が施される。ダメージを与えない加工方法の研究開発が進められているが、端緒についたばかりで決定的な手法は見つかっていない。現状では、研磨によってどの様な欠陥が導入されるか、その欠陥とデバイス性能との関係は如何なるものかを明らかにすることが急務である。永い半導体の研究開発で、シリコンの加工技術は精緻を極め、歪み導入過程の理解が進んでいるのと対照的に、ワイドギャップ半導体の加工歪み・欠陥導入に関わる知見は不足しており、データ集積が求められていると言える。

### 2. 研究の目的

本研究では、ワイドギャップ半導体として GaN および ZnO を取り上げている。これら材料は共に六方晶で、C 軸方向と底面方向で光学的特性(誘電率)が異なり、歪みに対する応力特性も異方性を有しているという特徴がある。本研究では、試料表面を研磨剤で物理研磨し

たときに発生する圧縮歪みが格子振動に与える影響をラマン散乱スペクトルを計測することによって評価すると共に、バンド端発光強度と深い準位によるサブバンドギャップ発光の発光強度の相対変化を計測することによって、加工プロセスによる深い準位の形成と光学的特性への影響を評価することを目的とした。

### 3. 研究の方法

GaN 系試料として、サファイア基板上ならびに Si 基板上にヘテロ成長した GaN 単結晶薄膜、HVPE 法によってヘテロ成長した後、基板から剥離したバルク単結晶を用意した。結晶成長は約 1000°C の高温で行われるため、基板との熱膨張係数差により、加工前のサファイア基板上試料は圧縮歪みを、Si 基板上試料は引っ張り歪みをそれぞれ面内に有している。他方、基板から剥離した厚膜バルク結晶は無歪みの状態にあると予想される。まず、ラマン散乱スペクトルからホノンエネルギーの値を評価したところ、予想どおりの歪みに対応するエネルギーシフトが観測された。

次いで、これら試料を粒度 8000 番(粒径 1 ミクロン)のアルミナ研磨剤埋め込みシートを使って、水中で表面研磨した。研磨は試料端を基準として斜め研磨を施すことで試料端から内部へ行くに従って研磨度が軽減されることを使い、同一試料への研磨効果を評価する手法を採用した。

PL スペクトルとラマン散乱スペクトルは、He-Cd レーザを励起光源とする紫外可視近赤外顕微分光光度計を用いて行った。試料表面上でのレーザスポットのサイズは 5 ミクロン程度で、この精度での面内分布が評価できる。いずれの場合も、励起レーザ光の侵入深さは 100nm 程度であり、最表面の特性を評価することになる。測定は全て室温で、本年度は主として(0001)面について詳細な検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) PL スペクトルの変化

GaN では 360nm 近辺に強いバンド端発光が見られた。研磨によってその強度が減少し、発光ピーク波長がブルーシフトした。このブルーシフトは結晶表面に 0.5GPa 程度の圧縮歪みが導入されていることを示唆した。また、

420nm 近辺の青色発光帯がやや強くなる傾向があったが、深い発光帯強度には大きな変化が認められなかった。機械研磨による最も大きな変化はバンド端発光の減衰であり、研磨によって歪みの導入だけで無く、非輻射再結合の確率が增强されることが分かった。

#### (2) ラマンスペクトルの変化

励起レーザ波長がバンド端発光波長に近い場合、本実験配置では GaN、ZnO ともに強い共鳴ラマン散乱信号が得られた。多フォノン過程は GaAs 等で低温 PL スペクトルに見られることがあるが、その半値幅はかなり広い。対して、本実験では室温にもかかわらず 30cm<sup>-1</sup> 程度の狭い半値幅を有する信号が見られたことから、共鳴ラマン散乱によるものであると結論した。

この共鳴ラマン信号スペクトルでは、研磨による信号強度の変化は認められなかったが、PL 強度の減衰に伴って、ラマン信号がより顕著になった。GaN では 6 次までの、ZnO では 8 次までの多フォノン散乱過程が確認された。その信号半値幅は次数によって線形に増加することが分かったが、研磨による半値幅の顕著な変化は認められなかった。GaN ではフォノンエネルギーでは研磨による顕著なブルーシフトが見られた。このブルーシフトから見積もられる 2 軸性応力は 4 ~ 5 GPa にもなった。他方、ZnO ではブルーシフトは認められなかった。

#### (3) 面内格子歪みの評価

PL ピークエネルギーのブルーシフトからは、GaN では研磨により 0.5GPa 程度の圧縮応力が発生することが予想された。ZnO では面内歪みの検出はできなかった。GaN は硬度が高い材料であり、研磨によってクラックが導入され、その周辺には圧縮歪みが導入されると思われる。他方、ZnO は脆い材料であり、研磨によるクラックが近傍に圧力を及ぼすことがないと予想される。

### 5. 本研究に関する発表

(1) Photoluminescence and resonant Raman scattering from polished GaN surface, S.Ohtake, H.Iwata, and N.Sawaki, ISPlasma2018, Meijo University, 2018, 06aE01O.