

ワイドギャップ半導体の光学特性評価

[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、省エネルギーのためのパワーデバイスの実用化に貢献している。しかし、基板となるべきバルク結晶の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材料を使っている。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、GaN と ZnO について、機械的研磨による表面近傍に導入される歪みを光学特性の変化を通して検証した。その結果、(1)PL ピーク波長と LO フォノンエネルギーにブルーシフトがあること、(2)PL ピーク強度は顕著に減衰すること、(3)LO フォノンピークのブルーシフト量は PL ピーク強度の対数に比例することが分かった。LO フォノンエネルギーの機械研磨によるブルーシフトの最大値は、GaN エピ膜では 15cm^{-1} 、バルク GaN では 20cm^{-1} であるのに対し、ZnO では 5.5cm^{-1} と小さくモース硬度の相違に対応していることが分かった。

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

ワイドギャップ半導体 GaN は光素子の他、電子デバイスにも適用され、該デバイスの高機能化と省エネルギーシステムへの応用技術の開拓が行われている。SiC と ZnO が GaN と類似の物性を有することから、最近ではこれら材料への期待がふくらみ、世界的にもその研究の輪が広がっている。

これらワイドギャップ半導体材料の利用では、物理的、化学的処理を伴う様々な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ある。切断はバルク材料からウエハを得る工程で、レーザあるいはダイヤモンドソー等による熱機械的手法が主流である。その表面には極めて高密度の欠陥と大きな格子歪みが導入されるため、その後、物理的・化学的に表面研磨されデバイス作製工程に転送される。このため、デバイス作製前に行われる機械的・化学的研磨がデバイスの特性を左右する最も重要な工程となり、「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。

2. 研究の目的

本研究は、ワイドギャップ半導体材料のうち、GaN と ZnO について、機械的研磨に代表される表面加工によって材料特性がどの様に変化するかを検証することを内容としている。半導体の特性は光学的性質で端的に表現される。格子歪みの大きさはホトルミネッセンス (PL) あるいはラマン散乱スペクトルの特性エネルギーの変化として検出できる。また、格子欠陥導入の程度は、これら特性ピークの強度または半値半幅の変化に反映される。今年度の研究では、エピレディとして提供される試料表面をアルミナまたは炭化珪素研磨シートを用いて水中研磨し、加工歪みを与えることで、機械的研磨の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では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、室温における光学特性を評価した。

(1) GaN の研磨特性評価

前年度の研究で、アルミナシート#8000 を用いると、PL ピークエネルギーにブルーシフトが見られ、0.5GPa 程度の圧縮歪みが発生することが明らかになった。また、

共鳴ラマン散乱の実験では、一桁大きな圧縮歪みが加えられていることが示唆された。評価方法による相違については未解明で、今年度の最初の課題とした。

(2)ZnO の研磨特性評価

前年度の研究では、GaN と同様の研磨特性を評価したところ、歪みによるとされる PL ピークエネルギーシフトは検出されなかった。また、共鳴ラマン散乱の実験でも格子振動モードの変化が見られなかった。この理由を明らかにするため、詳細を検討した。

4. 研究成果

(1) GaN の研磨特性評価結果

PL スペクトルとラマン散乱スペクトル双方に研磨による特性エネルギーのブルーシフトが見られたが、前者から見積もられる圧縮歪みの値は後者より小さかった。測定には 325nm のレーザ光を使っておりその侵入深さは 80nm と推定される。光励起キャリアの拡散長は 200nm 程度と推定されるため、ラマン散乱（後方散乱配置）の測定深さは 40nm であるのに対し、PL には 200~300nm までの歪みが反映されると予想される。上記実験結果は、機械加工による歪みが 40nm 程度の深さにあることを示唆している。他方、PL 発光強度は研磨により著しく減衰することが分かった。ラマン散乱による LO フォノンのブルーシフト量と PL ピーク強度との関係をプロットすると半対数の関係にあることが判明した（図 1）。即ち、PL 強度が格子歪みに対して指数関数的変化をしていることになる。機械研磨により導入される歪みはラマンシフトと比例関係にあると予想されることから、表面近傍で光励起キャリアに対するポテンシャルか dead-layer が変化していることを示唆している。

フォノンエネルギーのブルーシフト量の最大値はサファイヤ上のエピタキシャル膜で 15cm^{-1} 、バルク結晶では 20cm^{-1} であり、PL 強度に対する変化割合はバルクの方がやや大きかった（図 1 参照）。エピタキシャル膜上での加工歪み圧力の大きさは変形ポテンシャルから 3.4GPa 程度と推定された。

(2)ZnO の研磨特性評価結果

前年度の実験では、ZnO への機械加工による LO フォノンの変化が見えなかったため、今年度はその詳細を評価したところ、加工初期に大きな変化があり、比較的弱

い研磨で変化量が飽和することが判明した。飽和シフト量は 5.5cm^{-1} で、変形ポテンシャルから推定される圧力は 1.2GPa 程度であった。この値は GaN で推定された値の約 1/3 である。ZnO では比較的小さな圧力で歪みが飽和しており ZnO の方が剪断歪に対して脆いことを示唆している。このことはモース硬度に違いがあること（GaN は 9、ZnO は 7）と一致している。

(3)歪みの性状評価

機械的研磨により導入される加工歪みが表面近傍に限定されると予想されるものの、その歪みが 2 次元的であるか 3 次元的であるかは曖昧さがある。GaN と ZnO は共にイオン性材料で C 軸に対して 6 回対称性を有するため、LO フォノンと TO フォノンは基から分離している。他方、立方晶 Si では、LO フォノンと TO フォノンは三重縮退している。(111)面内あるいは<111>軸方向に歪みをかけると、対称性が破れ、シングレット LO とダブルレット TO に分離すると予想される。実際、一軸性圧力を印加した実験でこのことが確認されている。本実験では Si(111)ウエハに#1000 の研磨シートで研磨を施しラマンシフトを測定した。その結果、最大で 9cm^{-1} のブルーシフトが見られたが、この範囲でピーク分離は見られなかった。さらに強い研磨ではアモルファス化を示すスペクトルとなった。この結果は研磨歪みが 3 次元的であることを強く示唆した。

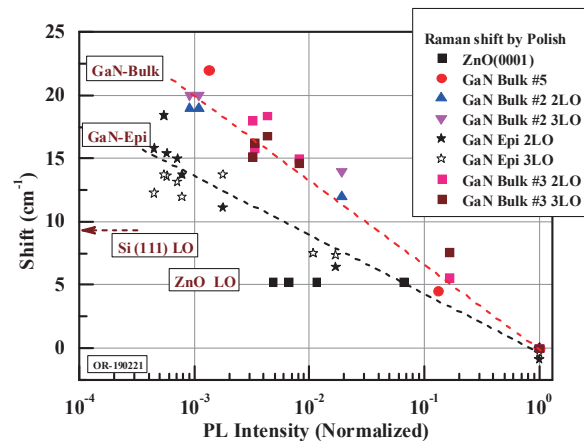


図 1. ラマンシフトの変化量と PL 発光強度との関係

5. 本研究に関する発表

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