

Abstract of Doctoral Thesis

Title : Indium nitride growth with in situ surface modification by RF-MBE

Doctoral Program in Advanced Electrical, Electronics and Computer Systems
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

ファイズルサリヒン ビン アバス
FAIZULSALIHIN BIN ABAS

Indium nitride (InN) has the smallest effective mass, the largest mobility, the smallest direct-band gap energy and a high Seebeck coefficient among III-nitride semiconductors. Thus, it is a very promising material for various applications including high-speed electronic, long-wavelength optoelectronic devices, high efficiency solar cells and thermoelectric devices. However, high crystalline quality InN is the most difficult to be obtained due to its low dissociation temperature and lack of lattice-matched substrate. The hetero-epitaxial InN films have an extremely high density of threading dislocations (10^{10} – 10^{11} cm⁻²). These threading dislocations contribute to non-radiative recombination centers, dominant scattering centers limiting electron mobility and probably one of the origins of residual electrons in InN. Therefore, the objective of this research is to reduce threading dislocation density in InN to clarify its material performance and pursue its applicability.

In this study, we propose a new approach which provides a simple but effective growth process for threading dislocation reduction in InN film with in situ surface modification by radio-frequency molecular beam epitaxy (RF-MBE). In this method, we apply nitrogen radical irradiation to modify surface morphology of InN template in situ in MBE growth chamber before regrowing InN film on the template.

Transmission electron microscopy (TEM) revealed that threading dislocation density in InN grown with this method reduced by a factor of 3 from 2×10^{10} cm⁻² to 6×10^9 cm⁻². We clarified that the mechanism of the threading dislocations reduction was due to the inclination, fusion, and annihilation of edge dislocations at the regrowth interface. In addition, the repeatability of this method was also investigated. TEM showed evidence that the threading dislocation density was successfully reduced step by step from $\sim 2.8 \times 10^{10}$ cm⁻² in the first irradiated layer to $\sim 2.0 \times 10^{10}$ cm⁻² in the second irradiated layer, and to $\sim 1.3 \times 10^{10}$ cm⁻² in the top regrown InN film. If this technology is established, high-quality InN with low threading dislocation density can be achieved with an easy, simple and repeatable growth process. Furthermore, this method might also be applicable for threading dislocation density reduction in other III-nitride semiconductors and contribute to the realization of future electronic and optoelectronic device applications.

博士論文要旨

論文題名：RF-MBE 法による in situ 表面改質を用いた
窒化インジウム成長立命館大学大学院理工学研究科
電子システム専攻博士課程後期課程ファイズルサリヒン ビン アバス
FAIZULSALIHIN BIN ABAS

窒化インジウム (InN) は III 族窒化物半導体の中で、最も小さな有効質量、最も大きな移動度、最も小さなバンドギャップエネルギー、そして高いゼーベック係数を有し、高速電子デバイス、長波長光デバイス、高効率太陽電池、熱電変換デバイスなど様々な用途において非常に有望な材料である。しかしながら、低い解離温度および格子整合した基板の欠如のために、高品質 InN 結晶を得ることは困難である。ヘテロエピタキシャル成長した InN 膜中には、非常に高密度の貫通転位 (10^{10} - 10^{11} cm⁻²) が存在する。この貫通転位は非発光再結合中心、電子移動度散乱中心および残留電子の起源となるため、InN のデバイス実用化を阻む最大の要因となっている。そこで本研究では、InN の貫通転位密度低減を目指した InN の結晶成長手法開発を目的とした。

InN 中の貫通転位密度低減のための新しいアプローチとして、高周波分子線エピタキシー (RF-MBE) による in-situ 表面改質を用いた InN 成長を提案した。この方法では、MBE 成長チャンバ内にて窒素ラジカル照射を適用して InN テンプレートの表面モフォロジーを改質し、そのテンプレート上に InN 膜を再成長させる。本手法は、in situ で容易に繰り返すことが可能であり、また試料全域での転位低減効果が期待できること、マスクプロセスを必要としないなどの特徴も有する。

本提案手法で成長させた InN の貫通転位密度を透過電子顕微鏡 (TEM) 観察で評価した結果、約 2×10^{10} cm⁻² から 6×10^9 cm⁻² まで 3 分の 1 に減少していることを確認した。また TEM 観察において電子線回折条件を制御することで転位観察を詳細に行い、貫通転位の種類 (刃状転位、らせん転位) を分離し、それぞれの転位の挙動を調べた。その結果、刃状転位が再成長界面で湾曲、融合、消滅の過程を経ることで転位密度低減が実現されているメカニズムを明らかにした。窒素ラジカルビーム照射による in situ 改質の繰り返し効果についても検討した。TEM 観察により、貫通転位密度が第 1 の照射層の約 2.8×10^{10} cm⁻² から第 2 の照射層の約 2.0×10^{10} cm⁻² に減少し、上部再成長 InN 膜では約 1.3×10^{10} cm⁻² まで段階的に転位密度を減少させることに成功した。この技術が確立されれば、貫通転位密度の低い高品質な InN を簡便および繰り返し可能な成長プロセスで実現することができる。さらに、この方法は、他の III 族窒化物半導体における転位密度低減にも適用可能であり、将来の電子および光デバイス用途の実現にも寄与できると期待される。