

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18069012

研究課題名（和文）RF-MBE 法による InN および関連混晶の成長と量子ナノ構造の形成

研究課題名（英文）RF-MBE Growth of InN and Related Alloys and Fabrication of Quantum Nanostructure

研究代表者

名西 やす之（NANISHI YASUSHI）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40268157

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：InN、RF-MBE、窒化物半導体、ナノ構造

1. 研究計画の概要

InN のバンドギャップエネルギーが 0.65 eV 程度であることが明らかになり、本材料およびその混晶を利用した新しい窒化物半導体ナノエレクトロニクス応用への期待が一挙に強まっている。本研究では、分解温度が低いために低温成長が要求されるこれらの材料に対し、低温成長とナノレベルの薄膜制御性に優位性をもち、現在までもっとも高い実績を有する RF-MBE 法によるアプローチを行い、その過程で、RF-MBE 成長におけるこれらの材料に固有の課題を重点的に検討し、デバイス品質の材料とナノ構造を実現するための科学的・技術的知見を得ることを目的とする。

2. 研究の進捗状況

(1) DERI 法を用いた高品質 InN 結晶成長

InN 系結晶成長における固有の重点課題を解決し、InN 系材料をベースとした光デバイス実現のためには、革新的な結晶成長手法の開発が求められる。本研究では、結晶成長のその場観察手法を駆使した高品質 InN 結晶成長手法開発を目指して新規に導入した RF-MBE 装置を活用し、新しい InN 結晶成長手法として、DERI (droplet elimination by radical beam irradiation) 法を見出した。

本成長方法は、(1) In リッチ条件下における InN 成長と (2) 窒素ラジカルビーム照射の 2 つのプロセスから成るものである。RHEED その場観察により、In ドロップレットの形成、除去の過程をモニタリングでき、InN のストイキオメトリを簡便かつ再現性よく制御できることを示した。また DERI 法を繰り返すことにより厚膜 InN 結晶を作製した

結果、結晶性、表面平坦性に優れ、良好な電気的特性 ($10^{18}/\text{cm}^3$ 台前半の低キャリア濃度、 $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の高電子移動度) を有する InN が再現性よく得られることがわかった。DERI 法の利用により、再現性のある高品質厚膜 InN 結晶成長が可能となり、InN 系結晶成長における重点課題解決に向けて画期的な進展が今後期待されよう。

(2) 配列制御 InN ナノコラム成長

FIB を用いて GaN テンプレート上に作製したホールパターンの形状および InN 結晶成長条件を最適化することにより、InN ナノコラムの配列制御が可能であることを見出した。断面 TEM 観察を行なった結果、ほとんどの InN ナノコラムにおいて貫通転位が発生しておらず、ナノコラム成長が InN 結晶の低転位化技術として有効であることを示した。

(3) 各種結晶面 InN への Mg ドーピング

本検討では、N 極性 C 面、無極性 A 面、M 面 InN への Mg ドーピングを行い、InN 結晶への Mg ドーピングに対する結晶極性の影響を系統的に調べた。その結果、結晶面の違いによって InN への Mg ドーピングの結晶学的特性への影響が大きく異なることが明らかとなった。

(4) GaN/InN ヘテロ構造の作製および界面相互拡散制御に関する検討

本検討では、InN 上に GaN を成長し、GaN/InN 界面における In と Ga のインターミキシングについて検討を行った。GaN の堆積温度が高くなると、GaN/InN 界面でインターミキシングが活発に起こり、InN 上に形成される InGaIn の In 組成が高くなることがわかった。この結果から、GaN を低温で InN 上に堆積させることによりインターミキシング

を抑制できることがわかった。

3. 現在までの達成度

当初の計画以上に進展している。

(理由)

InN の結晶成長において、解決すべき本質的課題として取り組んだ以下の5つのテーマについては、おのおの検討を進め、世界に先駆けて重要な科学的、技術的知見を明らかにするなど十分な成果が得られている。

(1) 貫通転位密度の低減化

・凹凸 InN テンプレート上 InN 再成長による貫通転位密度低減

・配列制御 InN ナノコラム成長による貫通転位密度低減

(2) 残留キャリア濃度の低減化

・DERI 法を用いた高品質 InN 結晶成長技術開発

(3) 表面電荷蓄積層の除去

・無極性面 InN 結晶成長技術開発

(4) p 型ドーピングの実現

・Mg を用いた p 型ドーピングの実現

(5) 高品質ヘテロ界面の実現

・InN/GaN ヘテロ界面混晶化機構の解明

これらの成果は、それぞれ学術論文で発表されるとともに、国際会議で招待講演の依頼を受けるなど世界的にも高い評価を得てきている。

4. 今後の研究の推進方策

本研究課題の中で開発した「その場観察手法を用いた実効的 V/III 比制御による高品質 InN 結晶成長技術」は、熱平衡で液相成長に近い過程で起こるため、点欠陥密度も制御された非常に高品質な結晶が得られる。またこのプロセスを繰り返すことにより、成長中の In ドロップレット発生の影響を回避しながら高品質な厚膜結晶を成長することも可能である。今後はこの成長技術を基盤として、成長メカニズムの解明を図りながら、InN 系混晶やナノ構造形成への応用を検討する。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 29 件)

T. Yamaguchi and Y. Nanishi, Indium droplet elimination by radical beam irradiation for reproducible and high-quality growth of InN by RF molecular beam epitaxy, Applied Physics Express 2, 051001/1-3 (2009) (査読有)

T. Araki, D. Fukuoka, H. Tamiya, S. Harui, T. Yamaguchi, H. Miyake, K. Hiramatsu, Y. Nanishi, Fabrication of Position-Controlled InN Nanocolumns by ECR-MBE, Proc. of SPIE 7216, 72160N/1-8 (2009) (査読有)

S. Harui, H. Tamiya, T. Akagi, H. Miyake, K. Hiramatsu, T. Araki and Y. Nanishi Transmission Electron Microscopy Characterization of Position-Controlled InN Nanocolumns, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 5330-5332 (2008) (査読有)

T. Akagi, K. Kosaka, S. Harui, D. Muto, H. Naoi, T. Araki, Y. Nanishi, Correlation Between Threading Dislocations and Nonradiative Recombination Centers in InN Observed by IR Cathodoluminescence, J. Electronic Materials 37, 603-606 (2008) (査読有)

Mg-doped N-polar InN Grown by RF-MBE; D. Muto, H. Naoi, S. Takado, H. Na, T. Araki, and Y. Nanishi, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 955, 0955-108-01 (2007) (査読有)

[学会発表](計 51 件)

Y. Nanishi, T. Araki, T. Yamaguchi, D. Muto, Recent Progress of InN and InGa_N Growth for Device Applications, International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2008) (2008.10, Montreux, Switzerland) (招待講演)

Y. Nanishi, D. Muto, M. Noda, S. Harui, T. Yamaguchi, T. Araki, Potential, Achievements and Issues of InN and Related Alloys for Device Applications, International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials Applications 2008 (ICOOPMA08) (2008.7, Edmonton, Canada) (招待講演)

D. Muto, H. Naoi, S. Fukumoto, K. M. Yu, N. Miller, R. E. Jones, J. W. Ager III, E. E. Haller, T. Araki, Y. Nanishi, and W. Walukiewicz, Electrical Properties of P-type N-polar InN Grown by RF-MBE, 7th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-7) (2007. 9, Las Vegas, USA) (招待講演)

Y. Nanishi, H. Naoi, D. Muto, T. Hioka, Y. Hayakawa, Y. Kumagai, M. Noda, and T. Araki, Polar and Non-polar Growth of InN and InGa_N, The 3rd Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS 2007) (2007.3, Jeonju, Korea) (招待講演)

[図書](計 1 件)

Y. Nanishi, T. Araki and T. Yamaguchi, Chapter: 1 - Molecular-beam epitaxy of InN in Indium Nitride and Related Alloys (Editors: T. D. Veal, C. F. McConville, and W. J. Schaff) (2009)

[産業財産権]

出願準備中(計 1 件)