

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206003
 研究課題名（和文）InN および関連混晶の高度化 RF-MBE 成長技術の開発と
 電子・光物性制御の研究
 研究課題名（英文）Development of advanced RF-MBE growth for InN and related alloys and
 control of their optoelectronic properties
 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

研究成果の概要：RF-MBE 法を用いた InN とその関連混晶の成長に特有な本質的課題（結晶高品質化と p 型の実現、接合の形成、ヘテロ・ナノ構造制御等）に取り組み、デバイス応用へ向けた光・電子物性制御の基本検討を実施した。高 In 組成 InGaN への Mg ドーピングによる p 型伝導制御、InN MIS ダイオードおよびオーミック電極特性、GaN/InN、AlN/InN ヘテロ界面におけるインターミキシングに関する知見を得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	27,600,000	8,280,000	35,880,000
2007年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2008年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
総計	39,000,000	11,700,000	50,700,000

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：エピタキシャル成長、窒化インジウム、分子線エピタキシー

1. 研究開始当初の背景

InN は窒化物半導体の中で最もバンドギャップエネルギーが小さく、小さな有効質量、大きな移動度、高い電子最高速度を有することから、高速電子デバイス用材料として期待されていたが、結晶成長が困難であり、高品質結晶を得ることができなかった。本研究代表者らは InN の成長に対し、RF プラズマ励起 MBE 法が適していることを 1998 年頃よりいち早く提唱し、2000 年には当時世界最高値である $760 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の移動度をもつ InN 結晶を報告した。また InN のバンドギャップエネルギーは 30 年間にわたって 1.9 eV と信じられてきたが、2002 年には、本研究代表者らを含む国内外の研究機関から InN のバ

ンドギャップが、0.7~0.8 eV にあるとの報告が相次いだ。その後、真のバンドギャップエネルギーの値に世界中の研究者の関心が集まり、活発議論が繰り広げられたが、2004 年頃には InN のバンドギャップエネルギーが 0.65 eV 程度であることが国際的にも認められるようになった。

このことにより、InN およびその混晶の特異で優れた物性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た。この間我々は、

InN 関係

- ・真のバンドギャップエネルギー解明
- ・RF プラズマ励起 MBE 法の提案と成長基本条件確立

- ・原子レベルの結晶構造、欠陥の解明
- ・極性制御と成長条件の相関解明

InGaN 関係

- ・全組成領域の混晶成長と組成制御
- ・テンプレートの効果と高品質化実現

InN/InGaN 量子井戸関係

- ・単一量子井戸、多重量子井戸の作製
- ・臨界膜厚の見積もり
- ・発光と量子サイズ効果の観測

などの数多くの基礎物性に関わる知見を明らかにし、InN および関連混晶のデバイス応用へ向けた研究を展開する地盤が整った。

2. 研究の目的

InN およびその関連混晶材料の真のデバイス応用実現の可否は、さらなる結晶の高品質化と、ヘテロ、ナノ構造の実現、その電子・光物性の制御にかかっている。そのためにボトルネックとなっている最大の技術課題は、

- ・キャリア濃度の低減化と p 型の実現
- ・接合の形成 (ショットキー、p-n、MIS)
- ・ヘテロ・ナノ構造の高品質化

が挙げられよう。

本研究の目的は、低温成長とナノレベルの薄膜制御性に優位性を持ち、我々が研究の当初から提案・採用し、高い実績を有する RF プラズマ励起 MBE 法について、InN とその関連混晶の成長に固有の課題を装置レベルの改造まで立ち戻って重点的に検討し、デバイス品質の材料とナノ構造を実現し、電子・光物性を制御するための科学的、技術的新しい知見を得ることにある。

3. 研究の方法

(1) InN および関連混晶の結晶成長に対し、固有の本質的問題を明確にするとともに、その解決手法を追求し、成長装置の改造にまで立ち返って、結晶の高品質化、伝導性制御、p 型伝導の実現、ナノ・ヘテロ構造の形成と制御に関する研究を実施した。まず、さらなる結晶の高品質化を目指し、InN 結晶成長に特化した新規 MBE 成長装置の導入を図った。また成長温度の高温化を目的として、従来よりも高濃度の窒素ラジカルを供給可能な大型窒素ラジカルセルを導入した。

(2) InN および関連混晶材料のデバイス応用には、p 型伝導制御を実現することが必須の課題である。本研究課題では、InN の p 型伝導制御において実績の得られた Mg ドーピングを用いて、高 In 組成 InGa_{0.9}N 混晶材料への p 型伝導制御を試みた。

(3) InN の電子デバイス応用を実現するためには、InN 上へのショットキー接合、オーミック接合の形成が不可欠である。本研究課題では、ショットキー接合形成へ向けた MIS

構造ダイオードの作製や、オーミック電極形成に関する検討を行った。

(4) InN 系デバイスの実現には、InN、Ga_{0.9}N、AlN および InGa_{0.9}N、InAlN など形成するヘテロ界面が急峻であることが求められる。そこで GaN/InN 界面における In と Ga のインターミキシングおよび AlN/InN 界面における In と Al のインターミキシングについて検討を行った。

4. 研究成果

(1) 大型窒素ラジカルセルを導入した新規 RF-MBE 装置を用いての InN 結晶成長実験を進めた。サファイア基板上および GaN テンプレート基板上への InN 結晶成長において、成長温度、V/III 比などの条件の最適化を行った。図 1 に InN 成長後の表面 SEM 像および RHEED パターンを示す。凹凸のない平坦な表面が得られ、RHEED パターンにおいて再構成パターンが確認されるなど、表面の優れた平坦性を示す結果が得られている。さらに平坦な表面モフォロジー (AFM RMS 値 0.5 nm)、良好な結晶性 (X 線ロッキングカーブ FWHM (0002) 面で約 8 min.、(10-12) 面で約 25 min.)、電気的特性 (キャリア濃度 $10^{18}/\text{cm}^3$ 台前半、移動度 $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上) を有する世界最高品質レベルの InN 結晶が再現性よく得られることを確認した。また透過電子顕微鏡を用いた極微構造評価、フォトルミネッセンス法を用いた光学的評価においても、貫通転位密度の低減や発光強度の増大など従来得られていた結晶をしのぐ特性が得られることを明らかにした。またラジカル供給量の増加による成長速度の増加についても、大型窒素ラジカルセル導入の効果が得られた。

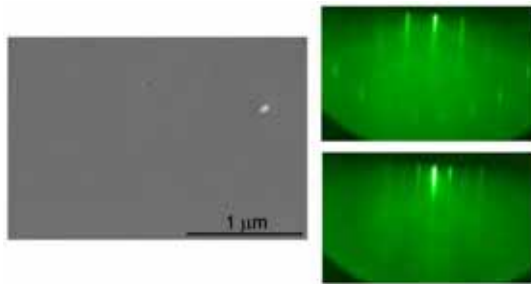


図 1 InN 結晶の表面 SEM 像および RHEED パターン

(2) InN 系デバイスの実現には、高 In 組成 InGa_{0.9}N 混晶の p 型伝導を実現する必要がある。そこで、RF-MBE 法を用いた、Mg ドープ InGa_{0.9}N の結晶成長とその特性評価を行った。本研究課題では In モル分率約 0.9 の N 極性 Mg ドープ In_{0.9}Ga_{0.1}N を作製し、評価を行った。

Mg ドープ InGa_{0.9}N は、RF-MBE 法を用い

て C 面(0001)サファイア基板上に作製した。サンプルの構造を図 2 に示す。C 面サファイア基板を 250°C で 2 時間窒化後、低温 InN バッファ層を 10 分間堆積し、520°C でアンドープ InGa_N を 20 分間堆積させた。その後同温度で Mg ドープ InGa_N を 1 時間堆積させた。ドーピング量は Mg のセル温度(T_{Mg})を 130~150°C まで変化させ制御した。結晶の評価はホール効果測定、XRD 測定などを用いて行った。

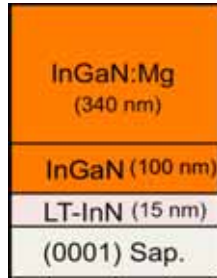


図 2 Mg ドープ InGa_N の構造

まずホール効果測定によって求めたアンドープ及び Mg ドープ N 極性 InGa_N のキャリア濃度を図 3 に示す。アンドープに比べドーピングを行ったサンプルのキャリア濃度は大幅に減少した。これは Mg が残留キャリアである電子を補償していることを示している。また、Mg を適度にドーピングすることにより InGa_N 結晶内部では p 型伝導性を示す兆候が ECV 測定より確認された。

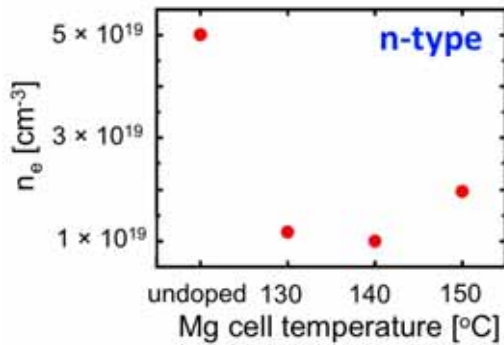


図 3 InGa_N 中キャリア濃度の Mg セル温度依存性

一方、過剰に Mg をドーピングすると、再びキャリア濃度の増加が確認された。図 4 に XRD 測定結果の Mg セル温度依存性を示す。Mg のドーピング量が増えるに従って、六方晶 InGa_N のピークの左側に新たなピークが確認できる。これは Mg ドープ量を増やすにつれて六方晶 InGa_N 内に立方晶 InGa_N が混在し始めることを示している。ホール効果測定、XRD 測定の結果より、過剰にドーピングされた Mg 原子が表面の In、Ga 原子のマイグレーションを抑制しているためにキャリア濃度の増加、立方晶の混在を引き起こしたのだと考えられる。

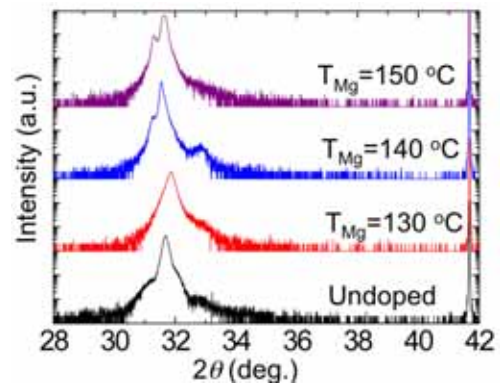


図 4 InGa_N XRD 結果の Mg セル温度依存性

今回の結果より、Mg は InN で報告されている結果と同様に、高 In 組成 N 極性 InGa_N においても有効なアクセプタであることが、そして Mg ドーピングは立方晶 InGa_N の混在を引き起こすことも示された。この結果よりこれ以上の高濃度 Mg ドーピングは悪影響を与えると推測でき、高濃度の Mg ドーピングを避けるためにも残留キャリアの低減が p 型伝導性実現に向けて最も効果的だと思われる。残留キャリア濃度を下げる事で、少量の Mg ドープ量でも十分な補償効果を期待でき、同時に立方晶 InGa_N 混在の抑制に繋がると考えられる。

(3) InN の電子・光物性制御へ向けた基本検討として、InN の MIS ダイオードを作製し、その電気的特性評価を行った。試料はサファイア基板上に RF-MBE 法で成長させた N 極性 InN を用いて、Al/Au オーミック電極、SiO₂ 絶縁膜、Ni/Au ゲート電極をパターニングし、MIS ダイオードを作製した。また Si ドープ n-GaN にも同様のプロセスを行い、InN との比較を行った。図 5 に I-V 測定の結果を示す。順方向において n-GaN は印加電圧 1.0 V 以下で電流が流れ出したのに対し、InN は印加電圧 24.0 V 程度で電流が流れ始めた。このことは InN の伝導帯下端がフェルミレベルよりも下にあり、InN は GaN に比べて SiO₂ の障壁層効果が大きくなることに

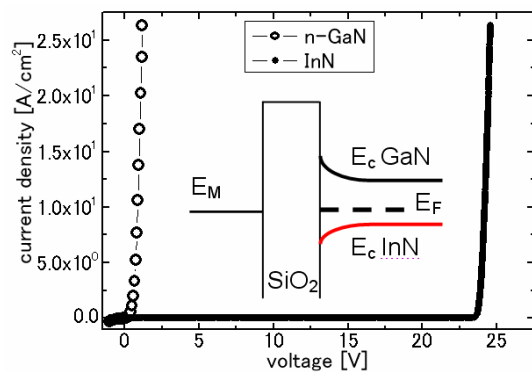


図 5 InN MIS ダイオードの I-V 特性

起因すると考えることができる。このことから InN を用いると順方向で超高耐圧な電子デバイスを実現することが可能であることが示唆された。

続いて、InN 上に堆積した各種金属のコンタクト抵抗に関する評価を行った。試料として GaN テンプレート上に RF-MBE 法にて成長した In 極性 InN を用いた。キャリア密度は $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (InN:700 nm) のもので、電極構造を Al/Au, Ti/Au, Ni/Au の 3 種類とする CTLM (Circular Transmission Line Model) パターンを作製し、ノンアロイ電極に対するコンタクト抵抗の評価を行った。CTLM パターンの電極直径は $400 \mu\text{m}$ とした。

CTLM の測定結果を図 6 に示す。3 種類のコンタクト材料全てで良好なオーミック特性が得られた。この結果から固有接触抵抗を求めると Al/Au 電極では $2.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、Ti/Au では $3.9 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、Ni/Au では $2.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ となり、各種金属電極の固有接触抵抗値は、金属間の仕事関数の違いによらず、 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 台でほぼ同じ低い値を示した。以上の結果は、InN 系デバイスに対するこれら金属材料のノンアロイ電極材料としての有用性を示された。

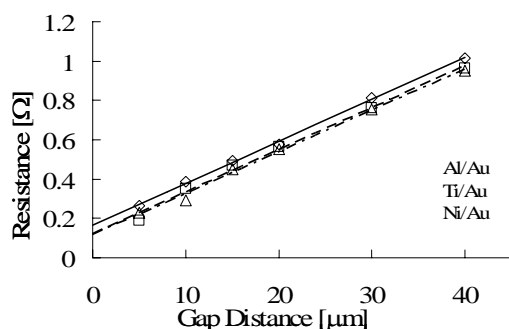


図 6 InN 上オーミック電極の CTLM 測定結果

(4) InN 系デバイスの実現には、InN、GaN 及び InGaN など形成するヘテロ界面が急峻であることが求められる。そこで 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。

InN 上 GaN の堆積温度依存性

RF-MBE 法を用いて、N 極性 InN 上に GaN を成長させた。はじめに、(0001) サファイア基板を 330°C で 120 分間窒化した。その後、低温 InN バッファ層を 330°C で 10 分間堆積させ、続いて InN エピ層を 530°C で 60 分間成長させた。N ラジカル照射を $430\sim 530^\circ\text{C}$ で 1 分間行った後に、GaN を N ラジカル照射と同じ温度で 5 分間 15 nm 堆積させた。作製した試料は XRD などを用いて評価した。

2θ - ω 測定の結果、すべての試料からサファイアのピークと InN のピークに加え、GaN

のピーク位置よりも低角部にピークを観測した。このことは GaN/InN 界面でインターミキシングが起こり、InGaN 混晶が形成されていることを示している。この現象は、下地の N 極性 InN の最適成長温度から約 100°C 低い 430°C で堆積させた GaN においても確認された。次に逆格子マッピング測定を行い、形成された InGaN の歪を考慮して各試料の InGaN 混晶組成を決定した。逆格子マッピング測定の結果、すべての試料はほぼ緩和していることがわかった。形成された InGaN の組成と GaN の堆積温度の関係を図 7 に示す。GaN の堆積温度が高くなると共に In 組成が高くなることがわかった。この結果から、GaN の堆積温度が高くなるに従い、In と Ga のインターミキシングが強くなることがわかった。すなわち、InN 上に GaN を堆積させる場合、GaN の堆積温度を低くす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。

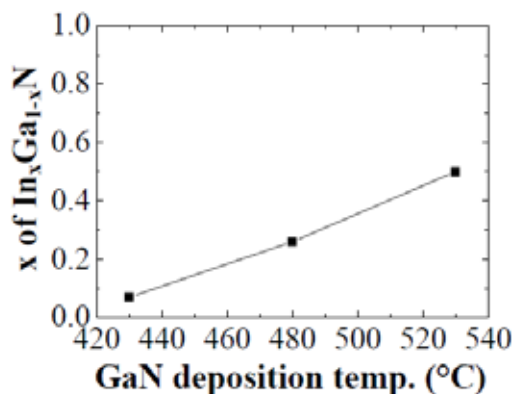


図 7 InGaN の組成と GaN の堆積温度の関係

InN 上 GaN の堆積速度依存性

の実験方法と同様に、RF-MBE 法を用いて、N 極性 InN 上に GaN を成長させた。まずサファイア上に N 極性 InN を成長させ、その後、N ラジカル照射を 510°C で 1 分間行い、 510°C で GaN を試料 A は $\sim 3 \text{ nm/min}$ 、試料 B は $\sim 6 \text{ nm/min}$ で 15 nm 堆積させた。作製した試料は XRD などを用いて評価した。

2θ - ω 測定の結果を図 8 に示す。試料 A と試料 B を比較した結果、GaN を 2 倍のレートで堆積させた試料 B は、形成された InGaN の In 組成が試料 A に比べて約半分になることがわかった。この結果は、In と Ga の拡散速度が堆積温度に依存しており、GaN の堆積時間を短くすることにより、GaN/InN 界面で拡散する In と Ga の量が少なくなったことに起因していると考えている。このように、GaN の堆積温度が高い場合においても、堆積レートを上げ堆積時間を短くすることにより GaN/InN 界面でのインターミキシングを抑制できることがわかった。

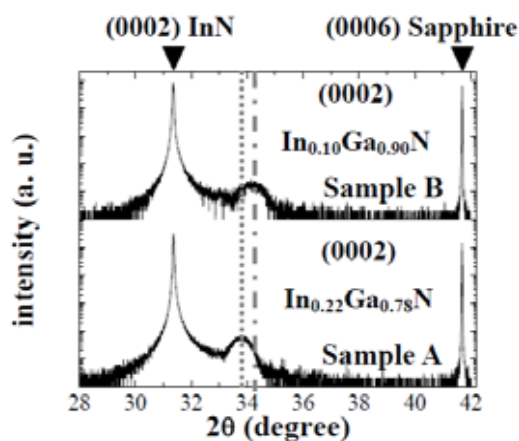


図8 GaN/InN ヘテロ界面のXRD測定結果

さらに AlN/InN 界面における In と Al のインターミキシングについて検討を行った。XRD 測定の結果、GaN/InN ヘテロ界面と同様に、AlN/InN 界面においてもインターミキシングによる InAlN の形成が確認され、AlN の堆積温度が高くなるにしたがって、InAlN の In 組成が高 In 側へシフトすることがわかった。一方で、GaN/InN ヘテロ界面の場合とは異なり、AlN の堆積温度が InN の成長温度より低い場合でも InN の分解が起こり、AlN 堆積時の V/III 比をより Al リッチにすると、さらに低い堆積温度でも InN の分解が生じることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(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 20 件)

- T. Yamaguchi and Y. Nanishi, Appl. Phys. Express. 2, 051001/1-3 (2009). (査読有)
- T. Yamaguchi, D. Muto, T. Araki, N. Maeda, and Y. Nanishi, Novel InN growth method under In-rich condition on GaN/Al₂O₃ (0001) templates, phys. stat. sol. (c) 6, S360-S363 (2009). (査読有)
- Y. Takagi, D. Muto, T. Yamaguchi, T. Araki, Y. Nanishi, Growth of M-plane(10-10) InN on LiAlO₂(100) Substrate, phys. stat. sol. (c) 6, S425-S428 (2009). (査読有)
- H. Nozawa, Y. Takagi, S. Harui, D. Muto, T. Yamaguchi, T. Araki, Y. Nanishi, TEM Characterization of M-plane InN Grown on (100) LiAlO₂ Substrate by RF-MBE, phys. stat. sol. (c) 6, S429-S432 (2009). (査読有)
- T. Yamaguchi, D. Muto, T. Araki, and Y. Nanishi, Growth and characterization of N-polar and In-polar InN films by RF-MBE, J. Cryst. Growth 311, 2780-2782 (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, SPIE Photonics West 2009 Proceedings 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, Journal of Electronic Materials 37, 603-606 (2008). (査読有)
- H. Naoi, D. Muto, T. Hioka, Y. Hayakawa, A. Suzuki, T. Araki, and Y. Nanishi, Thermal and Chemical Stabilities of In- and N-Polar InN Surfaces, phys. stat. sol. (b) 244, 1834-1838 (2007). (査読有)
- D. Muto, H. Naoi, S. Takado, H. Na, T. Araki, and Y. Nanishi, Mg-doped N-polar InN Grown by RF-MBE, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 955, 0955-I08-01 (2007). (査読有)
- T. Yamaguchi, H. Naoi, T. Araki, and Y. Nanishi, Position-Controlled InN Nano-dot Growth on Patterned Substrates by ECR-MBE, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 955, 0955-I07-40 (2007). (査読有)
- S. Watanabe, Y. Kumagai, A. Tsuyuguchi, H. Naoi, T. Araki, Y. Nanishi, Microstructure of A-plane InN grown on R-plane Sapphire by ECR-MBE, phys. stat. sol. (c) 4, 2556-2559 (2007). (査読有)
- M. Noda, Y. Kumagai, S. Takado, D. Muto, H. Na, H. Naoi, T. Araki, Y. Nanishi, Growth of A-plane(11-20) In-rich InGaIn on r-plane(10-12) sapphire by RF-MBE, phys. stat. sol. (c) 4, 2560-2563 (2007). (査読有)
- H. Naoi, K. Fujishima, S. Takado, M. Kurouchi, D. Muto, T. Araki, H. Na, and Y. Nanishi, Growth of In-rich InAlN films on(0001) sapphire by RF-MBE and their properties, Journal of Electronic Materials 36, 1313-1319 (2007). (査読有)
- H. Na, S. Takado, S. Sawada, M. Kurouchi, T. Akagi, H. Naoi, T. Araki, and Y. Nanishi, Effect of low temperature InGaIn interlayers on structural and optical properties of In-rich InGaIn, J. Cryst. Growth 300, 177-181 (2007). (査読有)

S. Nishikawa, Y. Nakao, H. Naoi, T. Araki, H. Na, and Y. Nanishi, Growth of InN nanocolumns by RF-MBE, J. Cryst. Growth 301-302, 490-495 (2007). (査読有)

[学会発表](計 81 件)

菊池将悟、前田就彦、山口智広、名西やす之、CTLM 法による Al,Ti,Ni の InN へのコンタクト抵抗評価、2009 年(平成 21 年) 春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 3 月 31 日、筑波大学 奥村昌平、山口智広、武藤大祐、荒木努、名西やす之、AlN/InN ヘテロ構造の作製と評価、2009 年(平成 21 年) 春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 3 月 30 日、筑波大学

福本英太、澤田慎也、武藤大祐、山口智広、荒木努、名西やす之、RF-MBE 法を用いた高 In 組成 InGa_N に対する Mg doping の検討、第 38 回結晶成長国内会議(NCCG-38) 2008 年 11 月 5 日、仙台市戦災復興記念館

Y. Nanishi, T. Araki, T. Yamaguchi, D. Muto, Recent Progress of InN and InGa_N Growth for Device Applications (Invited), International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2008), 2008 年 10 月 9 日, Montreux, Switzerland

武藤大祐、山口智広、荒木努、名西やす之、Ga_N/In_N ヘテロ構造の成長と評価、2008 年(平成 20 年) 秋季 第 69 回応用物理学学会学術講演会、2008 年 9 月 4 日、中部大学

菊池将悟、佐藤丈、檜木啓宏、山口智広、前田就彦、荒木努、名西やす之、CTLM 法による In_N オーミックコンタクト抵抗の評価、2008 年(平成 20 年) 秋季 第 69 回応用物理学学会学術講演会、2008 年 9 月 3 日、中部大学

S. Kikuchi, T. Sato, A. Hinoki, D. Muto, N. Maeda, T. Araki, and Y. Nanishi, Fabrication and Electrical Characterization of InN MES and MIS Diode Structures, 27th Electronic Materials Symposium (EMS27), 2008 年 7 月 10 日, ラフォーレ 修善寺

Y. Nanishi, D. Muto, M. Noda, S. Harui, T. Yamaguchi, T. Araki, Potential, Achievements and Issues of InN and Related Alloys for Device Applications (Invited), International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials Applications 2008 (ICOOPMA 08), 2008 年 7 月 23 日, Edmonton, Canada

武藤大祐、山口智広、澤田慎也、荒木努、名西やす之、Ga_N/In_N 界面における In と Ga のインターミキシング、2008 年(平

成 20 年) 春季 第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月 27 日、日本大学理工学部

佐藤丈、檜木啓宏、武藤大祐、前田就彦、荒木努、名西やす之、InN MIS ダイオードの順方向電気的特性、2008 年(平成 20 年) 春季 第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月 27 日、日本大学理工学部

Y. Nanishi, RF-MBE Growth and Properties of Mg-doped Polar and Non-polar InN and In-rich InGa_N (Invited), Topical Workshop on achieving p-type InN, 2008 年 3 月 4 日, Hakone, Japan

[図書](計 1 件)

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

6 . 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

直井 弘之 (NAOI HIROYUKI)

立命館大学・COE 推進機構・研究員

研究者番号 : 10373101

Na Hyunseok (NA HYUNSEOK)

立命館大学・COE 推進機構・研究員

研究者番号 : 80411239

荒木 努 (ARAKI TSUTOMU)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 20312126

青柳 克信 (AOYAGI YOSHINOBU)

立命館大学・COE 推進機構・教授

研究者番号 : 70087469

山口 智広 (YAMAGUCHI TOMOHIRO)

立命館大学・総合理工学研究機構・研究員

研究者番号 : 50454517

(3)連携研究者

金子 昌充 (KANEKO MASAMITSU)

立命館大学・総合理工学研究機構・ポスドク研究員

研究者番号 : 70374709

Wang Ke (WANG KE)

立命館大学・総合理工学研究機構・ポスドク研究員

研究者番号 : 60532223