

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600090

研究課題名(和文) InGaNの非混和性を積極的に利用したDERI法による転位の不活性化

研究課題名(英文) Dislocation passivation in InGaN by intentionally using immiscible nature during MBE growth by DERI method

研究代表者

名西 やす之(NANISHI, YASUSHI)

立命館大学・理工学部・授業担当講師

研究者番号：40268157

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：InGaNは青色発光ダイオードの活性層として利用されているが、In組成を増やし緑、赤、さらに赤外領域の発光、受光デバイスに利用しようとする、転位などの影響が顕著となり、特性が著しく劣化する。本研究では、研究代表者が中心になって独自に開発した高品質InN結晶成長技術(DERI法)を利用して、InGaNの非混和性を積極的に利用し、転位近傍にバンドギャップの広い極微ナノ構造を作成し、転位の影響を抑制して、InNおよび全混晶組成のInGaNをデバイスとして利用するための検討を行った。コンダクティブAFMを用いてナノ領域のリーク電流を測定する手法により、リーク電流の抑制を確認する成果を得た。

研究成果の概要(英文)：InGaN alloys are currently widely used as active layers of blue LEDs. Optical and electronic characteristics are degraded dramatically, however, when we increase In composition to fabricate green, red and infra-red LEDs due to generation of dislocations. In this study, we tried to suppress this dislocation effect by using DERI method, newly developed RF-MBE growth method by us, for high quality InN growth. Intentionally utilizing immiscible nature of InGaN alloys, we grew Ga-rich InGaN surrounding dislocations with wider bandgap. It was found that leakage current due to dislocation was suppressed as expected by conductive AFM measurements.

研究分野：化合物半導体結晶成長およびデバイス

キーワード：InN InGaN 窒化物半導体 混晶組成 極微領域評価 MBE 転位 リーク電流

1.研究開始当初の背景

(1) InGaN は青色発光ダイオードの活性層として利用されているが、In 組成を増やし緑、赤、さらに赤外領域の発光、受光デバイスや電子デバイスに利用しようとする、転位などの影響が顕著となり、発光特性が著しく劣化しリーク電流も増加する。

(2) InGaN は非混和性の強い混晶で、組成不均一領域が形成されやすい。

(3) 研究代表者らが開発した DERI 法(Droplet Elimination by Radical Beam Irradiation) においては、メタルリッチ成長プロセスで熱平衡に近い成長が起こり、InGaN は組成分離しやすく、最初に結合の強い GaN や Ga リッチ GaN が成長し In は表面に掃きだされる傾向がある。

(4) 赤坂らは、MOCVD 法において成長条件を適当に選ぶと、転位のある領域は、ない領域に比べ 30 倍も成長速度が速くなる実験結果を見出し、転位が成長の核発生点となっていることを明確に示した。

2.研究の目的

InGaN の非混和性を積極的に利用し、成長初期段階の窒素ラジカルビーム強度を小さく抑制することにより、成長核の発生点としての役割を果たす転位の周辺に Ga リッチ InGaN を成長させる。このことにより、転位をバンドギャップの大きな混晶からなる極微ナノ構造で取り囲むように作成し、転位による非発光再結合やリーク電流を抑制し、電気的、光学的特性を改善しようとするのが本研究の目的である。

3.研究の方法

(1) NTT 赤坂氏の協力により、バルク GaN 上に SiO₂ マスクを用いた MOCVD 法で GaN 選択成長を過飽和度を精密に制御した状況下で行い、転位やステップの全くない GaN、1 本のみのらせん転位を含む GaN をまず準備する。これにより転位やステップの影響を明確に検討することが可能となる。

(2) (1)で用意した GaN を用いて、コンダクティブ AFM により、転位やステップなど原子レベルの表面構造とリーク電流の相関を検討する手法の有効性をまず検討する。

(3)引き続き(1)で用意した GaN 上に、独自に開発した DERI 法を用いて InGaN の成長を行う。この際 窒素リッチ条件、メタルリッチ条件 成長初期をさらにメタルリッチとした 2 段階 DERI 成長の 3 条件で成長を行う。

(4) InGaN 混晶の微小領域組成評価手法として、ラマン分光法、ケルビンプローブ法につ

いて比較検討し、その有効性を検討する。

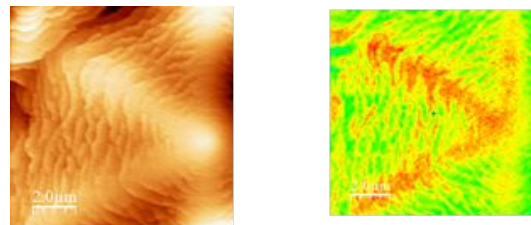
(5)山口氏の協力を得て、Spring8 の微小領域強力 X 線ビームを用いて InGaN 成長中の組成と歪の成長方向での変動をその場観察する。その際、GaN 基板上と InN 基板上に InGaN 混晶の成長を行い、その違いにつき比較検討する。

(6) (3)で準備した InGaN 混晶に対し、(2)で検討したコンダクティブ AFM により、リーク電流分布を測定し、成長条件により転位の影響を抑制することができるかどうか、その効果につき検討する。

4.研究成果

(1) MOCVD 成長した GaN の原子レベルの形状とリーク電流の関係

GaN(0001)フリースタンディングバルク結晶上に 15 μm から 100 μm の開口部を有する SiO₂ マスクを用いて、MOCVD 法により、GaN の選択成長を行った。基板温度 905 で過飽和度を厳密に制御することにより、選択成長領域に 1 本のらせん転位とらせん状のステップのみが存在する試料を作成した。このようにして準備した GaN の原子レベルの表面形状とリーク電流の関係を、Pt コートした導電性カンチレバーを使用したコンダクティブ AFM 法を用いて詳細に調べた。得られた表面形状像と 9V 印加時のリーク電流像を以下の図に示す。



GaN 表面形状像 9V 印加時のリーク電流像

らせん転位と原子レベルの表面凹凸に対応したリーク電流像が明確に得られている。このことから、原子レベルの表面凹凸が GaN のリーク電流の主な原因となっていることを明らかにすることができた。

(2)DERI 法による InGaN の成長

(1)で準備した 1 本のらせん転位のみを有する選択成長 GaN テンプレート上に 5 3 0 で以下に示す異なった 3 つの成長条件下で DERI 法による InGaN の成長を 3 分間行った。

N リッチ条件(RF500W)

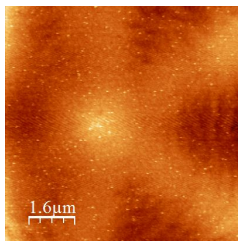
メタルリッチ条件(RF200W)

2 段階成長(強いメタルリッチ条件(RF100W)で成長後、200W の条件で引き続

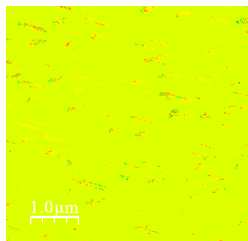
き成長)

成長後 KFM を用いて微小領域の組成分析を行うとともに、C-AFM を用いてリーク電流分布の評価を行った。2段階成長した試料の C-AFM 測定により得られた表面形状像とリーク電流の関係を示す。

また上記3条件に対応して成長した各試料のリーク電流の平均値を表に示す。2段階成長することにより、リーク電流分布が均一化し平均リーク電流値を小さく抑制できることを確認した。しかし一方で転位周辺に Ga リッチ領域が積極的に形成できたかどうかについての明確な確証を得るには至らなかった。



InGaN 上の形状像



InGaN のリーク電流像

表 3つの異なった条件で成長した InGaN の平均リーク電流

RF power [W]	平均電流 [nA]
500	1.060
200	0.100
100 + 200	0.039

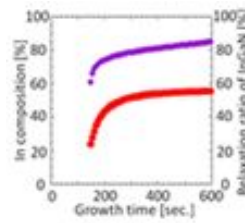
(3) スプリング 8 の強力 X 線ビームを用いた InGaN 成長時の組成及び歪みのその場観察結果

GaN 上と InN 上に InGaN を成長した場合の組成および歪の成長方向の変化の様子を以下に比較して示す。

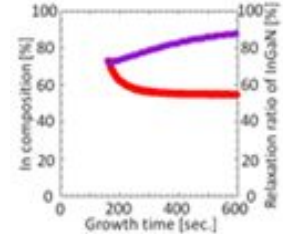
同じ条件で成長しても組成の成長方向の変化が逆になっており、基板に組成を合わせて歪が小さくなるように成長が起こっている。組成引き込み効果として知られている現象が明確に観察された。

(4) 以上示してきたように、本課題の研究を進めてきた結果、GaN と InN の強い非混和性を積極的に利用して、平均的なリーク電流を抑制できることを実証することができた。一方 In-N と Ga-N の結合力の違いだけでなく、

基板との格子整合性による組成引き込み効果によっても初期の In 組成が決定されることがあきらかになった。



GaN 上に成長した InGaN の In 組成と歪



InN 上に成長した InGaN の In 組成と歪

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- (1) M. Imura, S. Tsuda, T. Nagata, R. G. Banal, H. Yoshikawa, A. Yang, Y. Yamashita, K. Kobayashi, Y. Koide, T. Yamaguchi, M. Kaneko, N. Uematsu, K. Wang, T. Araki, and Y. Nanishi, "Surface and Bulk Electronic Structures of Heavily Mg-doped InN Epilayer by Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy", J. Appl. Phys., 査読有, Vol.121, 2017, pp.095703/1-5, DOI: 10.1063/1.4977201
- (2) D. Dobrovolskas, J. Mickevicius, S. Nargelas, A. Vaitkevicius, Y. Nanishi, T. Araki, G. Tamulaitis, "Influence of Defects and Indium Distribution on Emission Properties of Thick In-Rich InGaN Layers Grown by the DERI Technique", Semiconductor Science and Technology, 査読有, Vol.32, 2017, pp.025012/1-6, DOI: 10.1088/1361-6641/32/2/025012
- (3) K. Wang, T. Araki, T. Yamaguchi, Y.T. Chen, E. Yoon, Y. Nanishi, "InN NanoColumns Grown by Molecular Beam Epitaxy and Their Luminescence Properties", Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.430, 2015, pp.93-97, DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.07.027
- (4) T. Onuma, K. Narutani, S. Fujioka, T. Yamaguchi, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi, L. Sang, M. Sumiya and T. Honda, "Optical Properties of Ga_{0.82}In_{0.18}N P-N Homo Junction Blue-Green Light-Emitting-Diode Grown by Radio-Frequency Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy", Trans. Mat. Res. Soc. Japan, 査読有, Vol.40, No.2, 2015, pp.149-152, DOI: 10.14723/tmrsj.40.149
- (5) R. Oliva, A. Segura, J. Ibanez, T. Yamaguchi, Y. Nanishi, and L. Artus,

- “ Pressure Dependence of the Refractive Index in Wurtzite and Rocksalt Indium Nitride ”, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol.105, No.23, 2014, pp.232111/1-5, DOI: 10.1063/1.4903860
- (6) S. Schoche, T. Hofmann, V. Darakchieva, X. Wang, A. Yoshikawa, K. Wang, Y. Nanishi, M. Schubert, “ Free-Charge Carrier Parameters of N-Type, P-Type and Compensated InN:Mg Determined by Infrared Spectroscopic Ellipsometry ”, Thin Solid Films, 査読有, Vol.571, 2014, pp.384-388, DOI: 10.1016/j.tsf.2014.01.051
- (7) S. Park, J. Jung, C. Seok, K. Shin, S. Park, Y. Nanishi, Y. Park, E. Yoon, “ Effects of TMSb Overpressure on InSb Surface Morphology for InSb Epitaxial Growth Using Low Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition ”, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.401, 2014, pp.518-522, DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.10.062
- (8) T. Araki, S. Uchimura, J. Sakaguchi, Y. Nanishi, T. Fujishima, A. Hsu, K. Kim, T. Palacios, A. Pesquera, A. Centeno and A. Zurutuza, “ Radio-Frequency Plasma-Excited Molecular Beam Epitaxy Growth of GaN on Graphene/Si(100) Substrates ”, Applied Physics Express, 査読有, Vol.7, 2014, pp.071001/1-3, DOI: 10.7567/APEX.7.071001
- (9) M. E. Zvanut, W. R. Willoughby, U. R. Sunay, D. D. Koleske, A. A. Allerman, K. Wang, T. Araki, and Y. Nanishi, “ The Effect of Growth Parameters on the Mg Acceptor in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Mg}$ and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Mg}$ ”, phys. stat. sol. (c), 査読有, Vol.11, No.3-4, pp.594-597, 2014, DOI: 10.1002/pssc.201300515
- (10) M.-Y. Xie, N. Ben Sedrine, S. Schoche, T. Hofmann, M. Schubert, L. Hong, B. Monemar, X. Wang, A. Yoshikawa, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi, and V. Darakchieva, “ Effect of Mg Doping on the Structural and Free-Charge Carrier Properties of InN Thin Films ”, J. Appl. Phys., 査読有, Vol.115, No.16, 2014, pp.163504/1-10, DOI: 10.1063/1.4871975
- [学会発表](計 81 件)
- (1) T. Araki, K. Tachi, K. Morino, S. Asagami, T. Fujii, Y. Nanishi, T. Nagashima, T. Iwamoto, Y. Sato, N. Morita, R. Sugie, S. Kamiyama, “ Evaluation of Nitride Semiconductors Using Terahertz Time-Domain Spectroscopic Ellipsometry ”, The 5th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA '17), 2017 年 4 月 20 日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市) invited
- (2) T. Yamaguchi, T. Sasaki, M. Takahashi, T. Araki, T. Onuma, T. Honda, Y. Nanishi, “ In-Situ Monitoring in RF-MBE Growth of In-Based Nitrides ”, 15th International Symposium on Advanced Technology, Southern Taiwan University of Science and Technology, 2016 年 11 月 10 日, Tainan City (Taiwan) invited
- (3) K. Tachi, S. Asagami, T. Fujii, T. Nagashima, T. Iwamoto, Y. Sato, N. Morita, R. Sugie, S. Kamiyama, T. Araki and Y. Nanishi, “ Characterization of Electrical Properties of n-type GaN Layer Using Terahertz Time-Domain Spectroscopic Ellipsometry ”, International Workshop on Nitride Semiconductor 2016 (IWN2016), 2016 年 10 月 5 日, Orlando (USA)
- (4) M. Imura, S. Tsuda, T. Nagata, A. Yang, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, Y. Koide, K. Kobayashi, T. Yamaguchi, M. Kaneko, N. Uematsu, K. Wang, T. Araki, and Y. Nanishi, “ Surface and Bulk Electronic Structures of Heavily Mg-doped InN Epilayer by Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy ”, International Workshop on Nitride Semiconductor 2016 (IWN2016), 2016 年 10 月 4 日, Orlando (USA)
- (5) K. Komura, T. Araki, Y. Nanishi, T. Akasaka, “ Atomic Level C-AFM Characterization of GaN Grown Under Spiral Mode ”, International Workshop on Nitride Semiconductor 2016 (IWN2016), 2016 年 10 月 4 日, Orlando (USA)
- (6) A. Buma, N. Masuda, T. Araki, Y. Nanishi, M. Oda, T. Hitora, “ Study on Microstructure and Thermal Stability of Rf-Plasma Nitridated -(AlGa)_{203} Grown by Mist-CVD ”, International Workshop on Nitride Semiconductor 2016 (IWN2016), 2016 年 10 月 3 日, Orlando (USA)
- (7) T. Yamaguchi, T. Sasaki, M. Takahashi, T. Araki, T. Onuma, T. Honda and Y. Nanishi, “ RF-MBE Growth of GaInN Ternary Alloys Using in-situ Monitoring Techniques ”, 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2016 年 9 月 28 日, つくば国際会議場(茨城県つくば市) invited

- (8) Y. Nanishi, T. Yamaguchi and T. Araki, "Recent Advancements and Challenges of Growth of InN and In-rich InGaN by DERI Method", EMN Meeting on Epitaxy, 2016年9月7日, Budapest (Hungary) invited
- (9) T. Yamaguchi, T. Sasaki, M. Takahashi, T. Onuma, T. Honda, Y. Nanishi, "Strain Relaxation Analysis Using In-situ X-ray Reciprocal Space Mapping Measurements in RF-MBE Growth of GaInN", The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), 2016年8月9日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- (10) K. Tachi, S. Asagami, T. Fujii, T. Nagashima, T. Iwamoto, Y. Sato, N. Morita, R. Sugie, S. Kamiyama, T. Araki and Y. Nanishi, "Characterization of GaN Layer Using THz Ellipsometry and Its Verification by Cross-Sectional Observation", The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), 2016年8月9日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- (11) A. Buma, N. Masuda, T. Araki, Y. Nanishi, M. Oda, T. Hitora, "Study on Nitridation of -(AlGa)2O3 Using Rf Plasma for AlGaIn Growth", The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), 2016年8月9日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- (12) Y. Nanishi, T. Yamaguchi and T. Araki, "Recent Advancement of Growth of InN and In-rich InGaN by RF-MBE", 45th International School on the Physics of Semiconducting Compounds "Jaszowiec 2016", 2016年6月21日, Szczyrk (Poland) invited
- (13) T. Araki, A. Buma, N. Masuda, M. Oda, T. Hitora, and Y. Nanishi, "Characterization of RF Plasma Nitridated -(AlGa)2O3 for AlGaIn Growth", The 4th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA '16), 2016年5月19日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
- (14) Y. Nanishi, T. Yamaguchi and T. Araki, "Dislocation Passivation by Positive Usage of Phase Separation During InGaIn Growth by DERI Method", Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), 2015年12月15日, Hong Kong (China) invited
- (15) Y. Nanishi, T. Yamaguchi, and T. Araki, "Dislocation Passivation by Positive Usage of Phase Separation During RF-MBE Growth of InGaIn", The 3rd International Conference on Advanced Electromaterials (ICAE2015), 2015年11月18日, Jeju (Korea) invited
- (16) A. Usuda, K. Komura, M. Aranami, T. Araki, and Y. Nanishi, "Growth and Characterization of Thin InN Films Grown by RF-MBE", The 6th International Symposium on Growth of -nitrides , 2015年11月11日, アクトシティ浜松(静岡県・浜松市)
- (17) A. Buma, N. Masuda, T. Araki, Y. Nanishi, M. Oda, and T. Hitora, "RF-MBE Growth and Structural Characterization of InN on Mist-CVD-grown -In2O3/Sapphire ", The 6th International Symposium on Growth of -nitrides , 2015年11月11日, アクトシティ浜松(静岡県・浜松市)
- (18) T. Yamaguchi, T. Sasaki, K. Narutani, M. Sawada, R. Deki, T. Onuma, T. Honda, M. Takahashi, Y. Nanishi, "In-situ X-ray Reciprocal Space Mapping Measurements in GaInN Growth on GaN by RF-MBE", The 31st North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2015), 2015年10月7日, Playa Paraiso (Mexico)
- (19) K. Narutani, T. Yamaguchi, T. Araki, Y. Nanishi, T. Onuma and T. Honda, "Comprehensive Study on Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching of GaN and InN", The 31st North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2015), 2015年10月7日, Playa Paraiso (Mexico)
- (20) Y. Nanishi, T. Yamaguchi, and T. Araki, "Idea to Passivate Dislocations by Positive Usage of Phase Separation in InGaIn", Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, 2015年7月14日, 京都大学(京都府・京都市) invited
- (21) N. Domenech-Amador, R. Cusco, R. Calarco, T. Yamaguchi, Y. Nanishi, L. Artus, "The Role of Impurities in Raman Scattering of InN: from Thin Films to Nanowires", Compound Semiconductor Week 2015, 2015年6月29日, Santa Barbara (USA)
- (22) N. Masuda, A. Buma, T. Araki, Y. Nanishi, M. Oda, and T. Hitora, "Growth and Characterization of InN on -In2O3/Sapphire by RF-MBE", The 7th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS 2015), 2015年5月19日, Seoul (Korea)
- (23) T. Yamaguchi, T. Araki, T. Onuma, T.

- Honda and Y. Nanishi, " Growth Mechanisms of InN and Its Alloys Using Droplet Elimination by Radical Beam Irradiation ", 2015 EMN Meeting on Droplets, 2015 年 5 月 9 日, Phuket (Thailand) invited
- (24) T. Araki, N. Masuda, A. Buma, Y. Nanishi, M. Oda and T. Hitora, " RF-MBE Growth of InN on Mist-CVD Grown -In₂O₃/Sapphire " , The 3rd International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA '15), 2015 年 4 月 23 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)
- (25) T. Yamaguchi, T. Araki, T. Onuma, T. Honda, Y. Nanishi, " Progress in GaInN Growth by RF-MBE and Development to Optical Device Fabrication ", SPIE Photonics West 2015, 2015 年 2 月 9 日, San Francisco (USA) invited
- (26) Y. Nanishi, T. Yamaguchi and T. Araki, " New Approach to Fabricate Green, Red and IR Light Sources Based on Nitride Semiconductors by DERI Method ", 31st International Korea-Japan Seminar on Ceramics, 2014 年 11 月 27 日, Changwon (Korea) invited
- (27) K. Narutani, T. Yamaguchi, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi, L. Sang, M. Sumiya, S. Fujioka, T. Onuma, and T. Honda, " Growth of Pn-GaInN Structures by RF-MBE and Fabrication of Homojunction-Type Light Emitting Diodes ", 18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2014), 2014 年 9 月 11 日, Flagstaff (USA)
- (28) R. Oliva, J. Ibanez, A. Segura, T. Yamaguchi, Y. Nanishi, L. Artus, " Pressure Dependence of the Refractive Index in Wurtzite and Rocksalt InN ", 52th European High Pressure Research Group International Meeting, 2014 年 9 月 9 日, Lyon (France)
- (29) T. Araki, T. Yamaguchi and Y. Nanishi, " RF-MBE Growth of InN and InGaN Ternary Alloys ", 19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-19), 2014 年 9 月 5 日, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市) invited
- (30) T. Onuma, K. Narutani, S. Fujioka, T. Yamaguchi, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi, L. Sang, M. Sumiya and T. Honda, " Optical Properties of GaInN P-N Homojunction Blue-Green Light-Emitting-Diodes ", 15th International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), 2014 年 8 月 25 日, 福岡大学(福岡県・福岡市) invited
- (31) N. Masuda, T. Kobayashi, T. Araki, Y. Nanishi, M. Oda, T. Hitora, " RF-MBE Growth of Nitride Semiconductors on -In₂O₃/Sapphire " , International Workshop on Nitride Semiconductor 2014, 2014 年 8 月 25 日, Wroclaw (Poland)
- (32) T. Yamaguchi, K. Narutani, T. Onuma, T. Araki, T. Honda, Y. Nanishi, " RF-MBE Growth of GaInN Films Using DERI Method and Fabrication of Homojunction - Type LED Structures ", 6th International Symposium on Functional Materials (ISFM 2014), 2014 年 8 月 7 日, Singapore (Singapore) invited
- (33) Y. Nanishi, T. Yamaguchi, T. Araki, A. Uedono and T. Palacios, " Plasma Induced Point Defects in InN During RF-MBE Growth and Those Reduction by DERI Method " , Defects in Semiconductors Gordon Research Conference, 2014 年 8 月 5 日, Massachusetts (USA)

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・授業担当講師
研究者番号：40268157

(2) 研究分担者

荒木 努 (ARAKI Tsutomu)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：20312126

(3) 連携研究者

須田 淳 (SUDA Jun)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号:00293887

赤坂 哲也 (AKASAKA Tetsuya)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主任研究員
研究者番号: 90393735

山口 智広 (YAMAGUCHI Tomohiro)
工学院大学・先進工学部・准教授
研究者番号:50454517