

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289093

研究課題名(和文) ワイドギャップ 族酸化物/窒化物半導体ヘテロ構造作製のための基盤技術開拓

研究課題名(英文) Pioneering development of fundamental technologies for fabrication of wide bandgap III-group oxide/nitride heterostructures

研究代表者

東脇 正高 (Higashiwaki, Masataka)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所 グリーンICTデバイス先端開発センター・センター長

研究者番号：70358927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)： 族酸化物半導体と窒化物半導体という異なる材料系で構成する、二つのタイプの酸化物/窒化物ヘテロ構造の実現に挑んだ。タイプ I は、窒化物半導体 (GaN) をチャネル層とし、酸化物 (Al₂O₃) を障壁層とする構造、タイプ II は、酸化物半導体 (Ga₂O₃) をチャネル層に、窒化物 (AlN) を障壁層とする構造である。両タイプ共に、様々なエピ成長前基板処理、バッファー層成長条件を試し、成長シーケンス、条件の最適化の結果、基本的な分子線エピタキシー成長技術を確立することに成功した。また、光学的評価から、バンドギャップエネルギーなどの未解明だったGa₂O₃の物性についても多くの新たな知見が得られた。

研究成果の概要(英文)： We challenged to realize two types of novel heterostructures composed of III-oxide and nitride semiconductors. Type-I had structures with channel and barrier layers made of a nitride (GaN) and an oxide (Al₂O₃) layers, respectively. On the other hand, Type-II structures had an oxide channel (Ga₂O₃) and a nitride barrier (AlN) layers. As a result of optimization regarding growth sequences and conditions by testing out various substrate treatment processes prior to epitaxial growth and growth conditions for buffer layers, we succeeded in establishing basic molecular beam epitaxy growth technology for both types of structures. Furthermore, from optical characterization, we obtained a lot of new knowledge about undetermined fundamental physical properties of Ga₂O₃ including its bandgap energy.

研究分野：半導体結晶工学、電子デバイス

キーワード：分子線エピタキシー 酸化物 窒化物 半導体物性 先端機能デバイス

1. 研究開始当初の背景

現在、窒化ガリウム (GaN) は 20 年に渡る世界規模の研究開発の結果、青色・白色 LED に代表される発光デバイスのみならず、高出力・高耐圧電子デバイスも市場に投入されつつある。今後も、実用上必要な信頼性の改善等の研究開発に関しては継続して進める必要があるが、大学および公的研究所等で行うべき基礎研究フェーズは既に過ぎた感がある。そのため、高周波、パワーエレクトロニクス用途の GaN トランジスタの研究開発も、企業における特定の用途、仕様に合わせた、詳細を詰める開発が主となりつつあった。

2. 研究の目的

上述の背景もあり、今後 GaN トランジスタのデバイス特性を更に改善し、高い信頼性を合わせて獲得するために、単に酸化物を窒化物半導体上にデバイスプロセス技術の一つとして成膜するだけでなく、結晶成長に近い形で界面近傍の構造、接合を制御する技術を開発することを目的とした。更に、GaN に続く新しい半導体材料の開拓も必要と考え、こちら本研究課題の開発項目に加えた。

族酸化物半導体 (Ga_2O_3 , Al_2O_3 , In_2O_3) と窒化物半導体 (GaN, AlN, InN) を構成材料とするヘテロ構造を作製し、最終的に新規半導体デバイス実現へとつなげることを大きな目的とした。そのために、二つのタイプ (タイプ I、タイプ II) の酸化物・窒化物ヘテロ構造の実現に挑んだ (図 1)。タイプ I は、窒化物半導体 (主に GaN) をチャンネル層とし、酸化物 (主に Al_2O_3) を障壁層とする構造、タイプ II は、酸化物半導体 (主に Ga_2O_3) をチャンネル層に、窒化物 (主に AlN) を障壁層とする構造になる。タイプ I では、GaN ヘテロ構造トランジスタ (HFET) のデバイス特性、信頼性の改善につなげることを主な目的とした。また、タイプ II では、窒化物障壁層内の分極を利用することで、高密度二次元電子ガスチャンネルを界面に誘起する、これまでに例を見ない窒化物/酸化物 HFET の実現を主題とした。タイプ I 研究開発では、新半導体材料である単結晶 Ga_2O_3 自体の物性に関しても、多くの未解明項目の解明に取り組むこととした。

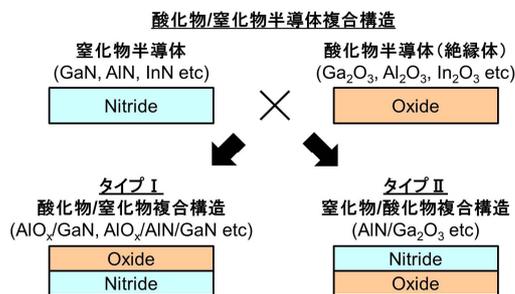


図 1 本課題にて実現を目指したヘテロ構造

3. 研究の方法

酸化物/窒化物 (タイプ I) 窒化物/酸化物 (タイプ II) ヘテロ構造の結晶成長には、図 2 に模式図を示す分子線エピタキシー (MBE) 装置を用いた。本装置は、同一超高真空成長室内に、酸素および窒素プラズマ両セルを有しており、両タイプヘテロ構造を成長する際にも、試料を一旦大気中に取り出す必要が無い。そのため、大気中での自然酸化の影響を受けずに、原子層レベルで組成・膜厚を制御して、両材料薄膜を連続的に成長することが可能となる。

酸化物/窒化物構造 (タイプ I) の場合、通常の GaN に代表される窒化物を成長した後、連続的に Al_2O_3 に代表される酸化物薄膜を成長する。また、窒化物/酸化物構造 (タイプ II) の場合、単結晶 Ga_2O_3 基板上に直接成長、もしくは MBE 成長した Ga_2O_3 エピタキシャル層を介して、AlN に代表される窒化物障壁層を成長する。

試料は、構造、光学的特性、電気的特性を評価し、結果を再度 MBE 成長、構造にフィードバックするという、作製・評価のループを回すことで、最終目標とするデバイス応用への道を探った。

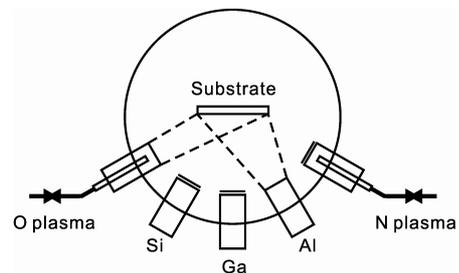


図 2 酸化物・窒化物ヘテロ構造作製用 MBE 装置の模式図

4. 研究成果

(1) タイプ I : $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造 MBE 成長、構造評価

最初に、AlN/GaN ヘテロ構造へ、できるだけ高品質な AlO_x 薄膜をコヒーレント成長するための MBE 成長条件の探索を行い、以下の手順を開発した。

- (ア) 基板温度 150°C で、Al フラックスを照射。
- (イ) 同温度で、O ラジカルを照射することで Al を酸化処理。
- (ウ) 基板を昇温し、 800°C にて 10 分間アニール処理。
- (エ) 基板温度を任意に調節後、Al と O ラジカルを同時供給することで AlO_x 膜成長。

上述のプロセスフローの (ア) ~ (ウ) までの手順で、AlN 膜上に成長した AlO_x バッファ層表面を、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて観察した。それら表面モルフォロジーの

成長膜厚依存性を、図 3 に示す。膜厚 3.0 nm 以下の場合には、平坦な AlO_x 膜が形成されているのに対し、膜厚 5.0 nm 以上では、表面平坦性が劣化した。また、Al ドロップレットの形成も認められる。そのため、膜厚 3.0 nm 以下がバッファ層として最適な条件と判断した。

続いて、膜厚 1.5 nm の AlO_x バッファ層上に、手順 (工) に従って AlO_x 膜を基板温度 400, 800°C で成長した。なお、 AlO_x バッファ層との区別を明確にするため、以下、この新たに成長した AlO_x 膜を、「 AlO_x トップ層」と呼ぶこととする。図 4, 5 に、 AlO_x トップ層の表面 AFM 像、断面透過型電子顕微鏡 (TEM) 像をそれぞれ示す。図 4 に示すように、両温度で成長した AlO_x トップ層共に、図 3 と比較して更に大きなグレインが形成されていることが分かった。このことは、 AlO_x バッファ層が、平坦性および連続性に優れた AlO_x トップ層の形成につながったことを示唆している。また、図 5 から、400°C で成長した AlO_x トップ層がアモルファスであるのに対し、800°C で成長した膜は結晶化していることが分かる。

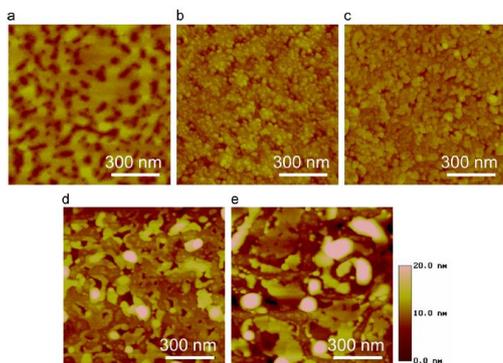


図 3 AlO_x バッファ層の表面モルフォロジーの膜厚依存性：(a) 0 nm (AlN 表面), (b) 1.5 nm, (c) 3.0 nm, (d) 5.0 nm, (e) 10 nm

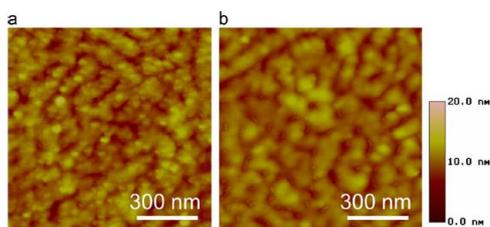


図 4 AlO_x トップ層の表面 AFM 像：基板温度 (a) 400°C, (b) 800°C

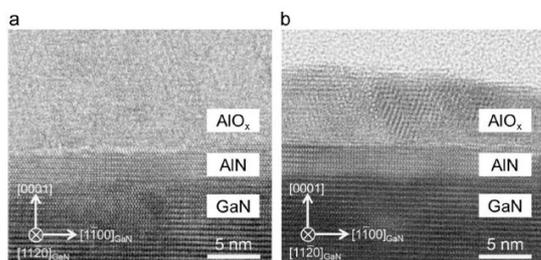


図 5 $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造の断面 TEM 像：基板温度 (a) 400°C, (b) 800°C

光学的特性評価

400°C, 800°C それぞれで MBE 成長した AlO_x トップ層を有する $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造に対して、フォトルミネッセンス (PL) および時間分解 PL 測定を行い、光学的特性を評価した。800°C で AlO_x トップ層を成膜したサンプルにおいては、AlN/GaN 界面に形成される二次元電子ガスからの PL ピークの時間分解特性において、励起立ち上がりの遅れ、および一部要素において緩和時間の増大が確認された。これらの原因は、 AlO_x トップ層 800°C 成膜サンプルにおいては、400°C 成膜および未製膜のサンプルに比べて AlN/GaN 界面における分極電界が増大していることと考えられる。そのため、これらの結果は、AlN/GaN ヘテロ構造上に形成する AlO_x 膜の結晶構造により、AlN 表面 (この場合 AlO_x/AlN 界面に相当) の表面 (界面) 準位の分布を制御できる可能性を示している。

(2) タイプ : $\text{AlN}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ヘテロ構造

MBE 成長

結晶中の自発、ピエゾ分極を利用して、電子濃度 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ を上回る二次元電子ガスを実現している AlGaIn/GaN ヘテロ構造に習い、大きな自発分極を有する AlN を Ga_2O_3 上に成長し、その界面に高密度二次元電子ガスを形成することを目的として、MBE 成長条件の最適化に取り組んだ。図 6 に、 $\text{AlN}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ヘテロ構造において、高密度二次元電子ガスが界面に生じる概念図を示す。

本研究では、 Ga_2O_3 基板には六方晶ライクな表面原子配置を有し、AlN との面内格子不整合も約 5% と比較的小さい (-201) 面を用いた。ここでは、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201) 基板上に直接 AlN 膜を成長した場合 (サンプル A) と、サファイア ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 基板上的 AlN MBE 成長において一般的に採用されている手法に習って、AlN 成長前に Ga_2O_3 基板に窒素 (N) ラジカルを照射し、その表面を窒化処理した後、AlN 膜を成長した場合 (サンプル B) の 2 種類のプロセスを試した。両サンプルともに、AlN 成長温度は 700°C とした。サンプル B の表面窒化は 300°C にて行った。AlN 膜の成長速度は 300 nm/h で、成長膜厚は 5 nm である。

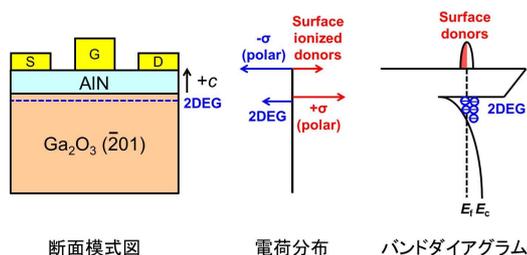


図 6 $\text{AlN}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ヘテロ界面における高密度二次元電子ガス形成の概念図

構造評価

図7に、サンプルA, BのAlN表面のAFM像を示す。両サンプルともに、三次元核成長の特徴である、多数のグレインで覆われた表面となっていることが分かる。サンプルA, B表面、それぞれのRMSラフネス値は2.7 nm, 1.0 nmであった。このように、窒化処理を行ったサンプルBの方が平坦性に優れていることが分かった。

続いて、AlN/Ga₂O₃ヘテロ構造界面近傍の結晶構造および状態を評価するために行った、断面TEM観察の結果を図8に示す。窒化処理を行わなかったサンプルAにおいては、界面は比較的平坦であるが、AlNは多結晶となっていることが分かる。一方、窒化処理を行ったサンプルBにおいては、アモルファスAlN層がまずGa₂O₃基板上に約2 nm程度形成された後に、単結晶AlN膜が積層している。しかしながら、サンプルBでは、窒化処理において生じたと思われるGa-O-N混晶領域も認められ、界面の平坦性・連続性は高くない。

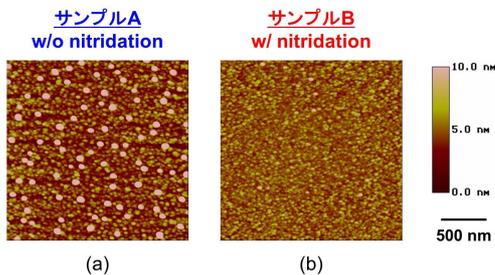


図7 AlN/Ga₂O₃ヘテロ構造の表面AFM像：(a) 窒化処理無し、(b) 窒化処理有り

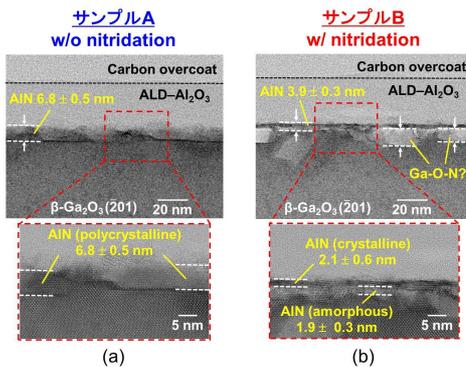


図8 AlN/Ga₂O₃ヘテロ構造の断面TEM像：(a) 窒化処理無し、(b) 窒化処理有り

電気的評価

サンプルA, BのAlN表面に、原子層堆積法(ALD)にてAl₂O₃層を膜厚20 nm成膜し、基板裏面全面にTi/Auオーミックカソード電極、Al₂O₃表面に直径200 μmのTi/Pt/Auアノード電極を蒸着することで、MOSダイオード構造を作製し、電気的特性を評価した

図9に、周波数1 MHzで測定した容量-電圧(C-V)特性と、AlN/Ga₂O₃界面にAlN分極

から予想されるレベルの濃度($\sim 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)の二次元電子ガスが形成された場合、形成されなかった場合の理想的C-V特性の計算値をプロットしたものを示す。窒化処理を行わなかったサンプルAでは、Vを変化させてもCの変化はほとんど認められなかった。一方、窒化処理有りのサンプルBでは、空乏、蓄積に伴うCの変化は認められるが、二次元電子ガスが形成された場合、されなかった場合両方の計算値とは大きく異なる結果となった。これらの結果から、サンプルA, B共に、期待していたAlN/Ga₂O₃ヘテロ界面における高密度二次元電子ガスの形成は実現しなかったと考えられる。原因としては、両サンプルともに界面品質が低かったことが挙げられる。

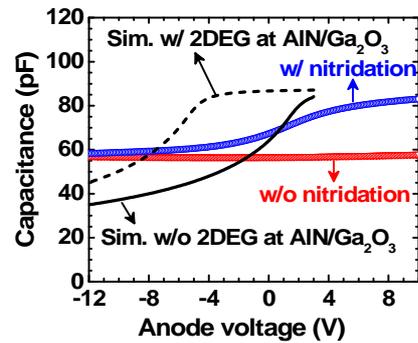


図9 Al₂O₃/AlN/Ga₂O₃ MOSダイオードのC-V特性、理想的C-V特性の計算結果

(3) 単結晶Ga₂O₃の光学的特性評価

様々な光学的特性評価から、いくつかのこれまで未解明だったβ-Ga₂O₃の物性を明らかにすることに成功した。以下に代表的な成果に相当する2例について紹介する。

- 偏光透過および反射スペクトルを元にした評価から、β-Ga₂O₃は間接遷移半導体であり、そのバンドギャップは4.43 eVであることが分かった。ただし、直接遷移に相当するバンドギャップは4.48 eVとその差は非常に小さい。また、これまでβ-Ga₂O₃のバンドギャップエネルギー値として様々な値(4.4-5.0 eV)が報告されてきた理由として、Γ点の価電子帯頂上付近の複雑なバンド構造とその光学的異方性が影響していたことを示唆する結果を得た。
- 赤外エリプソメトリー評価から、実効的な縦光学フォノンのエネルギーは、35~48 meV, 70~73 meV, 88~99 meVの3つの領域に区別できることが分かった。このように、実効的な光学フォノンの最低エネルギーは40 meV程度であり、ワイドバンドギャップ半導体としては小さな値であることが判明した。なお、この報告を受けて、米国コーネル大学のグループは、β-Ga₂O₃中の室温電子移動度の上限は、200 cm²/Vs程度に留まるとの理論的予測を出している[N. Ma *et al.*, Appl. Phys. Lett. 109, 212101 (2016)]。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, A. Kuramata, and M. Higashiwaki, "Spectroscopic ellipsometry studies on β -Ga₂O₃ films and single crystal," Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 55, pp. 1202B2-1~5 (2016), DOI: 10.7567/JJAP.55.1202B2

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, K. Goto, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, A. Kuramata, and M. Higashiwaki, "Temperature-dependent exciton resonance energies and their correlation with IR-active optical phonon modes in β -Ga₂O₃ single crystals," Applied Physics Letters, 査読有, vol. 108, pp. 101904-1~5 (2016), DOI: 10.1063/1.4943175

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Valence band ordering in β -Ga₂O₃ studied by polarized transmittance and reflectance spectroscopy," Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 54, pp. 112601-1~5 (2015), DOI: 10.7567/JJAP.54.112601

T. Onuma, Y. Sugiura, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Impacts of AlO_x formation on emission properties of AlN/GaN heterostructures," Applied Physics Express, 査読有, vol. 8, pp. 052401-1~3 (2015), DOI: 10.7567/APEX.8.052401

Y. Sugiura, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Growth of crystallized AlO_x on AlN/GaN heterostructures by *in-situ* RF-MBE," Journal of Crystal Growth, 査読有, vol. 405, pp. 64~67 (2014), DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2014.07.055

T. Onuma, S. Fujioka, T. Yamaguchi, Y. Itoh, M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Masui, and T. Honda, "Polarized Raman spectra in β -Ga₂O₃ single crystals," Journal of Crystal Growth, 査読有, vol. 401, pp. 330~333 (2014), DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.12.061

T. Onuma, S. Fujioka, T. Yamaguchi, M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Masui, and T. Honda, "Correlation between blue luminescence intensity and resistivity in β -Ga₂O₃ single crystals," Applied Physics Letters, 査読有, vol. 103, pp. 041910-1~3 (2013), DOI: 10.1063.1.4816759

他 2 件

〔学会発表〕(計 24 件)

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, K. Goto, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, A. Kuramata, and M. Higashiwaki, "Optical

properties of Ga₂O₃ films and crystals", Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin (Germany), 2017/05/16, Invited

尾沼 猛儀, 齋藤 伸吾, 佐々木 公平, 後藤 健, 増井 建和, 山口 智広, 本田 徹, 倉又 朗人, 東脇 正高: "単斜晶酸化ガリウム結晶における光学遷移過程", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会: シンポジウム「金属酸化物の結晶物性に迫る」, 横浜国際平和会議場(神奈川県横浜市) 2017/03/15、招待講演

L. Ravikiran, 中田 義昭, 倉又 朗人, 山腰 茂伸, 東脇 正高: "Effect of nitridation on properties of AlN/ β -Ga₂O₃ composite structures", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、横浜国際平和会議場(神奈川県横浜市) 2017/03/14

尾沼 猛儀, 山口 智広, 本田 徹, 佐々木 公平, 後藤 健, 増井 建和, 倉又 朗人, 齋藤 伸吾, 東脇 正高: " β -Ga₂O₃ 結晶における光学的異方性の解析", 日本学術振興会 161 委員会 第 98 回研究会「ワイドギャップ酸化物半導体 β -Ga₂O₃ 結晶成長、結晶評価、デバイス応用」, 長浜ロイヤルホテル(滋賀県長浜市) 2017/01/13、招待講演

尾沼 猛儀, 齋藤 伸吾, 佐々木 公平, 増井 建和, 山口 智広, 本田 徹, 倉又 朗人, 東脇 正高: " β -Ga₂O₃ 薄膜と単結晶の光学定数の比較", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ(新潟県新潟市) 2016/09/16

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, K. Goto, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, A. Kuramata, and M. Higashiwaki, "Observation of exciton-LO-phonon interaction in β -Ga₂O₃ single crystals," German-Japanese Gallium Oxide Technology Meeting 2016, Berlin (Germany), 2016/09/09, Invited

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, A. Kuramata, and M. Higashiwaki, "Anisotropic optical constants in β -Ga₂O₃ single crystal," 58th Electronic Materials Conference (EMC 2016), Newark, (USA), 2016/06/22

尾沼 猛儀, 齋藤 伸吾, 佐々木 公平, 後藤 健, 増井 建和, 山口 智広, 本田 徹, 倉又 朗人, 東脇 正高: " β -Ga₂O₃ 結晶における励起子-LO フォノン相互作用", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区) 2016/03/21

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Valence band structure of monoclinic gallium oxide studied by polarized optical measurements," The Collaborative Conference on Crystal Growth 2015 (3CG

2015), Kowloon (Hong Kong), 2015/12/15, Invited
T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Optical anisotropy in (010) plane of β -Ga₂O₃ single crystals," 1st International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-1), 京都大学桂キャンパス (京都府京都市) 2015/11/06
尾沼 猛儀、齋藤 伸吾、佐々木 公平、増井 建和、山口 智広、本田 徹、東脇 正高: " β -Ga₂O₃ 結晶の(010)面における光学異方性"、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市) 2015/09/15
T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Determination of direct and indirect bandgap-energies of β -Ga₂O₃ by polarized transmittance and reflectance spectroscopy," 57th Electronic Materials Conference (EMC 2015), Columbus (USA), 2015/06/24
T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Optical anisotropy in β -Ga₂O₃ crystals grown by melt-growth methods," The 3rd International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA'15), 横浜国際平和会議場(神奈川県横浜市) 2015/04/24
尾沼 猛儀、齋藤 伸吾、佐々木 公平、増井 建和、山口 智広、本田 徹、東脇 正高: " β -Ga₂O₃ 結晶の透過と反射スペクトルの偏光依存性"、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市) 2015/03/12
東脇 正高、中田 義昭、倉又 朗人、山腰 茂伸: "(-201) Ga₂O₃ 基板上への AlN 薄膜の RF-MBE 成長"、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市) 2015/03/11
尾沼 猛儀、山口 智広、伊藤 雄三、本田 徹、佐々木 公平、増井 建和、東脇 正高: " β -Ga₂O₃ 基板の光学的特性評価"、日本学術振興会第 162 委員会研究会「酸化物材料の最近の進展」、京都大学 東京オフィス (東京都品川区) 2014/09/26、招待講演
尾沼 猛儀、杉浦 洋平、山口 智広、本田 徹、東脇 正高: "AlO_x/AlN/GaN ヘテロ構造の発光特性"、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学札幌キャンパス (北海道札幌市) 2014/09/20
尾沼 猛儀、藤岡 秀平、山口 智広、東脇 正高、佐々木 公平、増井 建和、本田 徹: " β -Ga₂O₃ 結晶における青色発光強度と抵抗率の相関"、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス (京都府田辺市) 2013/09/16
Y. Sugiura, T. Honda, and M. Higashiwaki,

"Crystallized AlO_x/AlN/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy," 10th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-10), Washington, D.C. (USA), 2013/08/26

T. Onuma, S. Fujioka, T. Yamaguchi, M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Masui, and T. Honda, "Polarized Raman spectra in β -Ga₂O₃ crystals," 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17), Warsaw (Poland), 2013/08/13

他 4 件

〔図書〕(計 1 件)

東脇 正高: シーエムシー出版、次世代パワー半導体の高性能化とその産業展開、pp. 47-55 (2015)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
グリーン ICT デバイス先端開発センター
ホームページ
<http://www2.nict.go.jp/green/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東脇 正高 (HIGASHIWAKI, Masataka)
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所 グリーン ICT デバイス先端開発センター・センター長
研究者番号: 70358927

(2) 研究分担者

尾沼 猛儀 (ONUMA, Takeyoshi)
工学院大学・先進工学部・准教授
研究者番号: 10375420

本田 徹 (HONDA, Tohru)
工学院大学・先進工学部・教授
研究者番号: 20251671

(3) 連携研究者

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