

令和元年6月19日現在

機関番号：12608
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2015～2018
 課題番号：15K20988
 研究課題名(和文) 多波長レーザー照射と基板ナノ構造制御による紫外発光型単結晶性酸化物薄膜の室温成長

研究課題名(英文) Development of wide-bandgap oxide epitaxial thin films by multi-wavelength excimer laser processing and substrates modification

研究代表者
 松田 晃史 (Matsuda, Akifumi)
 東京工業大学・物質理工学院・講師

研究者番号：80621698
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では深紫外域のワイドギャップ酸化物半導体である酸化ガリウムについて、複合的な紫外レーザープロセスを用いることにより、光学的バンドギャップ4.9eVを示す $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201)エピタキシャル薄膜の室温合成を得た。基板表面の原子ステップが核形成サイトとして機能する結晶化様式を実験的に明らかにし、面内対称性および格子定数に加えて一様な面間隔をもつ岩塩型結晶(111)面のバッファ層効果を示す結果が得られた。ワイドギャップ単結晶性酸化物薄膜の室温成長における、基板モフォロジーやバッファ層材料・結晶面などの設計要素を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 バンドギャップ3～5eVの酸化物薄膜合成において、紫外レーザーによる結晶化エネルギー吸収と配向性結晶成長、面内秩序形成に与えるバッファ層の構造因子を見出し、基板モフォロジーによる核形成サイト制御と初期結晶化過程を実験的に明らかにした。ワイドギャップ酸化物半導体エピタキシャル薄膜の室温合成プロセスに関する基盤的知見を得た。
 深紫外の光電子光学や電力工学において重要性を益す高結晶配向性の酸化物半導体薄膜について室温合成を達成し、高温合成と同等の光学特性を得た。透明・大面積・フレキシブルなど新たな付加価値をもつデバイスの将来的実現に貢献する要素技術を創成した。

研究成果の概要(英文)：Epitaxial thin films of $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201) with optical bandgap of 4.9eV was obtained on a NiO(111)-buffered $\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) substrate at room-temperature by following approaches; (1) modification of crystal nucleation sites and growth direction on atomically stepped surface of the substrates, (2) reduction of planar lattice mismatch by introduction of a buffer layer, and (3) non-equilibrium solid-phase crystallization by excimer laser processing. The characteristic nucleation at step-edges was experimentally observed, and (111)-planes of rock-salt type crystals were demonstrated as good buffer layers owing to their homogeneous distance of anion and cation planes as well as their planar symmetry and lattice parameter. The morphology of substrates, and the structure of buffer layers were revealed to have impact on epitaxial formation of wide-bandgap oxide semiconductor thin films by excimer laser processing at room-temperature.

研究分野：無機材料・物性

キーワード：室温エピタキシー ワイドギャップ酸化物半導体 エピタキシャル薄膜 エキシマレーザープロセス
 固相結晶化 酸化ガリウム 結晶核形成制御 バッファ層

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ワイドギャップ酸化物半導体セラミックスは、オプトエレクトロニクス、また電界効果型トランジスタ FET などパワーエレクトロニクスにおいて重大な関心を集めており、深紫外領域の発光・吸収デバイスや高耐圧・大電力デバイスへの応用の期待が大きい。たとえば、窒化ガリウム GaN が青色・白色 LED にも用いられているように酸化亜鉛 ZnO や酸化ガリウム Ga₂O₃ なども光電子工学における応用が検討されており、 $E_g \sim 3.4\text{eV}$ 以上の半導体においては可視光透過性などの付加価値を生むため、透明集積回路などの新たな応用創出につながる。また電力工学においても、Ga₂O₃ は炭化ケイ素 SiC や GaN 以上に広いバンドギャップをもち、ダイヤモンドに次ぐ高破壊電界と低オン抵抗など大電流・低損失なデバイスに貢献する[1]。さらに、光応答の点において環境・エネルギー分野においてもその応用が検討されている。例えば紫外光を吸収したキャリア励起による太陽光発電や、太陽光水分解による水素生成などが挙げられる[2]。

ワイドギャップ半導体を用いた薄膜デバイス形成においては、不純物ドーピングなどによる特性制御とならび結晶性・配向性が特性制御とならび重要であり、トランジスタ形成においても高度な三次元の結晶配向性を示す単結晶性のエピタキシャル薄膜が、キャリア散乱を抑制した伝導パスの形成や粒界リーク電流の抑制などに貢献する。また、磁性体や強誘電体など構造異方性に基づく物性を示す材料とのアセンブリにおいてもワイドギャップ酸化物半導体のエピタキシーは重要となる。

しかし、これら機能性セラミックスは一般に高融点であり、高品質な薄膜も単結晶基板を高温に加熱しながら作製される、など課題が残されている。例えば ZnO や Ga₂O₃ などは通常 300~500°C 以上の温度で作製されてきた[3][4]。高温合成では熱平衡に近い条件での結晶成長により良好な結晶性が得られる一方、室温近傍の低温における合成プロセスによる貢献も薄膜デバイスにおいては大きい。図 1 のように低温合成プロセスは、デバイスに必須な積層薄膜化において、過度な粒成長や界面拡散を抑制して表面平坦性および界面急峻性を改善し、ドーパントの再蒸発や分離析出を抑制し良好な組成再現性を得る。また、非平衡状態下の結晶化では熱平衡下とは異なる結晶相が得られ、ナノ結晶化により量子効果などに起因する新物性の発現を誘起する。さらに、機能性セラミックス薄膜の低温合成は、工業的に用いられるガラスやポリマーなどのガラス転移温度 T_g 以下となるため、将来的なフレキシブルデバイスの合成への応用展開と貢献も描くことができる。

低温エピタキシャル成長は、例えばシリサイドや NiO など格子ミスマッチの小さい系について他グループが[5][6]、我々のグループでもバッファ層の導入や電子線照射などの工夫を行ってきた[7]。しかし、高融点セラミックス材料の報告例は少ない。低温合成の一つ目の鍵は単結晶基板表面の超平坦化処理である。図 2 に示すように原子ステップが核形成サイトとして機能する一方、原子レベルで平坦なテラス上にはファセットが無く結晶成長方位を制御することができる。二つ目の鍵はレーザープロセスである。高エネルギー前駆体を生じるレーザーアブレーションにより室温で高融点ワイドギャップセラミックスの薄膜を得る。さらに光混合や多光子過程など非線形光学効果を利用した極短時間の紫外レーザーアニリングにより、基板界面から原子配列を引き継いだ結晶化、つまりエピタキシーが誘起される(図 3)。レーザーアニリングによる配向結晶化は、酸化物では SnO₂[8]や VO₂[9]など低融点材料について行われているが、Ga₂O₃ など高融点セラミックスについてエピタキシャル薄膜を得た報告は見られない。

2. 研究の目的

本研究では、深紫外オプトエレクトロニクスやパワーエレクトロニクスにおいて期待される高融点ワイドギャップ半導体セラミックス(3.5~5eV)の低温合成における結晶性および配向性制御を行い室温における単結晶性薄膜成長をめざす。

基板表面の超平坦化や核形成サイトの制御と、パルスレーザー堆積およびレーザーアニリングとを複合した室温エキシマレーザープロセスによる新しい低温エピタキシャル薄膜作製技術を創成し、配向結晶化の影響因子やメカニズムを明らかにして、Ga₂O₃ などのワイドギャップ半導体薄膜の室温エピタキシーを目的とする。単結晶基板表面を修飾し薄膜基板間の格子不整合を緩和するバッファ層などが薄膜配向結晶化に与える効果を構造の観点から明らかにし、と

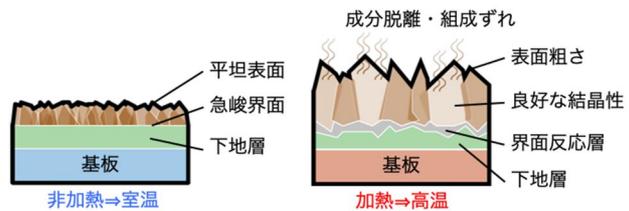


図 1 低温および高温における薄膜成長のモデル。

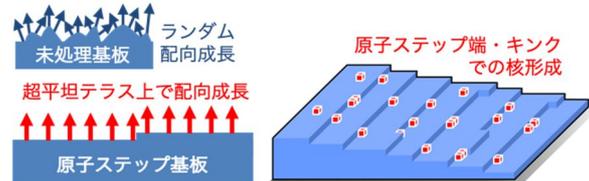


図 2 原子ステップを用いた結晶成長。

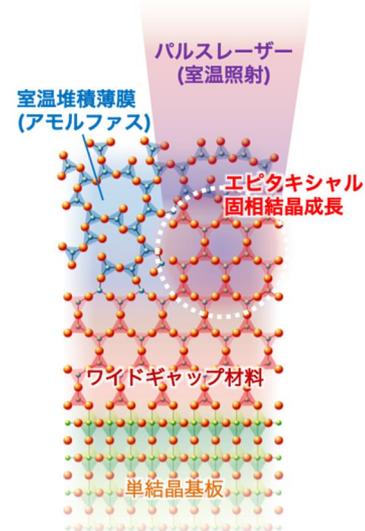


図 3 レーザー結晶化モデル。

くに低温かつ非平衡状態下の結晶核形成や初期成長過程の構造解析を経て、ワイドギャップ半導体薄膜の室温エピタキシーを追究する。

3. 研究の方法

本研究では以下 3 つのアプローチを融合したプロセスを創成し、室温レーザープロセスによるワイドギャップ半導体の単結晶性エピタキシャル薄膜合成を実施した；(1) 基板表面の原子ステップ形状による結晶核形成・成長方位制御、(2) 緩衝層による基板-薄膜間面内格子不整合の抑制、(3) エキシマレーザープロセスによる非平衡結晶化誘起。

KrF エキシマレーザーおよび焼結体ターゲットを用いた PLD 法により原子ステップ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 単結晶基板上に非加熱の室温において薄膜を作製した。本研究の PLD 装置概略を図 4 に示す。

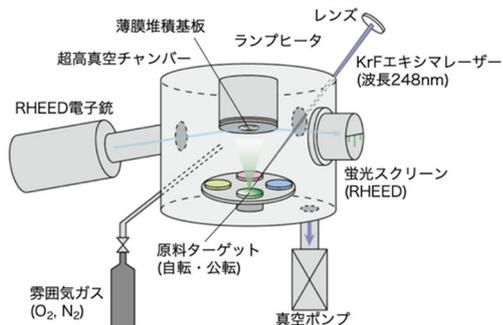


図 4 PLD 装置概略。

PLD 室温合成で得られたアモルファス前駆体薄膜においては、光吸収端波長の測定に基づく基づき、対応する波長のレーザーを用い固相結晶化を誘起するエキシマレーザーアニーリング(ELA)を実施した。ELA に用いた光学系を図 5 に示す。

薄膜結晶性・配向性については PLD が附帯する RHEED と XRD により実施し、結晶化初期過程についてはレーザーパルス数制御と湿式エッチング後の表面 AFM 観察により核形成挙動を評価した。

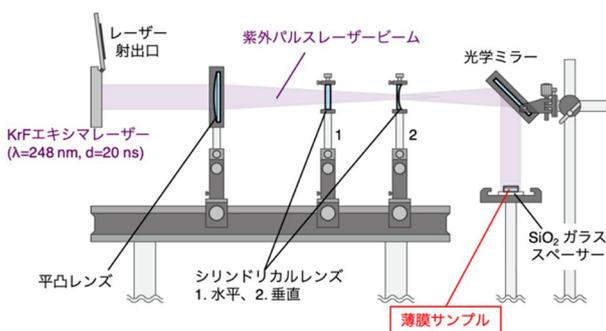


図 5 ELA プロセスの光学系。

4. 研究成果

(1) 酸化コバルト薄膜の室温エピタキシャル合成

酸化コバルト CoO 焼結体をターゲットとした PLD により $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001)基板上に室温で薄膜合成を行った。

図 6 は超真空中および $\sim 10^{-3}\text{Pa}$ の希薄 O_2 気流中で合成した場合の XRD 結果を示している。図 6(a)と(c)は超真空中中および O_2 気流中で合成した薄膜の $2\theta\text{-}\omega$ 測定結果であるが、超真空中中では Co^{2+} が、 O_2 気流中では Co^{2+} と Co^{3+} が共存する Co_3O_4 が、ともに(111)配向成長した。また、図 6(b)と(d)は超真空中中および O_2 中で作製した薄膜の面内異方性を ϕ スキャンで評価した結果であり、いずれも 6 回対称性を示していた。これらの結果から、原子ステップ超平坦 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001)基板上に CoO (111)あるいは Co_3O_4 (111)薄膜がエピタキシャル成長し、かつ成膜 O_2 圧力により相選択的な合成が可能であることが示された。

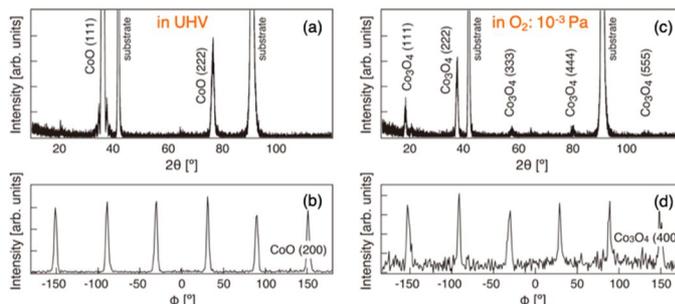


図 6 室温 PLD 合成した酸化コバルト薄膜 XRD 結果。UHV 中で作製した薄膜の(a) $2\theta\text{-}\omega$ と(b) ϕ スキャン、 O_2 中で作製した薄膜の(c) $2\theta\text{-}\omega$ と(d) ϕ スキャン。

図 7 は超真空中において(a)700°Cあるいは(b)室温(基板非加熱)でエピタキシャル成長させた CoO (111)薄膜の表面形状を観察した AFM 像である。その結果、高温で合成された場合は結晶粒成長が進行した比較的大きな RMS 粗さの大きい表面がみられた。一方で室温で合成された薄膜では、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001)基板の表面に自己組織化した原子ステップをよく反映した超平坦なモフォロジーが観察され、室温における結晶合成により核形成が支配的な成長様式となった。観察された超平坦表面は積層デバイス等の構築において次層のエピタキシーや界面反応層の抑制への貢献を示唆する成果である。

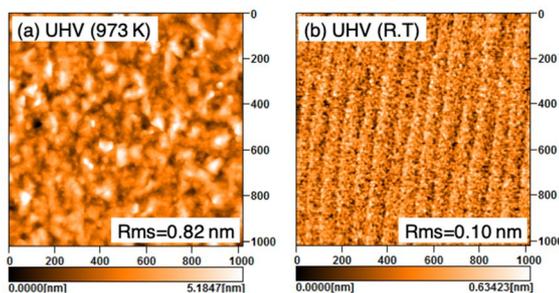


図 7 UHV 中(a)高温で、および(b)室温で合成した酸化コバルト CoO 薄膜の AFM 観察像。

(2) 酸化ガリウム薄膜の室温エピタキシャル合成

酸化ガリウム $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 焼結体をターゲットと PLD および ELA を融合した室温エキシマレーザープロセスにより $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001)基板上に薄膜合成を行った。酸素原子配置に基づき計算され

る α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板と β - Ga_2O_3 薄膜の面内格子不整合は $\sim 6.7\%$ であるが、本研究では $\text{NiO}(111)$ エピタキシャル極薄膜($\sim 2\text{nm}$)をバッファ層として用いることにより、これを $\sim 0.6\%$ 程度に抑制した。図 8 は α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板、室温 PLD 合成直後、および ELA プロセスを実施した薄膜の XRD 結果を示している。その結果、PLD 堆積後では極薄 $\text{NiO}(111)$ バッファ層に帰属されるブロードな回折が 37° 近傍にみられたが、 Ga_2O_3 薄膜からの回折はみられず、また RHEED もハロ像が観察されたことからアモルファスであった。これを前駆体薄膜とし、そのバンドギャップに相当する波長 $\lambda=248\text{nm}$ の KrF エキシマレーザーを用いたアニーリングを行った結果、 β - $\text{Ga}_2\text{O}_3(-201)$ に帰属される明瞭な回折が観測された。XRD ピーク強度比や異相による回折がみられないことから、単相で配向結晶化したことが判明した。また、図 8 の挿入部に示した ELA 後の薄膜表面 RHEED 観察像においても明瞭な回折ストリークがみられ、かつ 30° おきにパターンが変化する 6 回対称性の面内異方性も示した結果から、エピタキシャル成長が確かめられた。

図 9 は薄膜の XRD 測定によって示された β - $\text{Ga}_2\text{O}_3(-201)$ 薄膜の対称性を示す構造模式図を示している。図中左は $\text{NiO}(111)$ バッファ層上における β - $\text{Ga}_2\text{O}_3(-201)$ のドメイン構成であり、図中右は α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上的 $\text{NiO}(111)$ バッファ層のドメイン構成である。

単斜晶系の結晶構造をとる β - Ga_2O_3 の (-201) 面は長方形をしている。正三角形の酸素原子配置をもつ $\text{NiO}(111)$ 上に 3 回対称のドメインを形成することが分かる。また、本研究では原子ステップ超平坦化した α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板を用いており、その原子ステップ高さ $\sim 0.2\text{nm}$ は酸素面間隔に等しく、すなわち原子ステップを挟み隣接する「テラス」上において鏡面对照の酸素原子配置をもつのである。その結果 $\text{NiO}(111)$ は 2 回対称のドメインを形成する。以上の結果として本研究の β - $\text{Ga}_2\text{O}_3(-201)$ 薄膜が 6 回対称性を示したと考えられた。同様の結果は NiO の岩塩型結晶構造をとる他の酸化物あるいは窒化物バッファ層を用いた場合にも得られた一方で、ウルツ鉱型結晶をバッファ層とした場合には配向結晶化が得られなかった。

図 10 は原子ステップ超平坦 α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上への (a) 前駆体 Ga_2O_3 アモルファス薄膜堆積、(b) 室温 ELA 実施 ($250\text{mJ}/\text{cm}^2 \cdot 500$ パルス) による固相エピタキシャル結晶化後の AFM 観察像を示している。図 10 (c) は条件を $250\text{mJ}/\text{cm}^2 \cdot 100$ パルスとして ELA 後に、残留アモルファス領域をリン酸 H_3PO_4 水溶液でウェットエッチングした薄膜の表面観察を行った結果である。

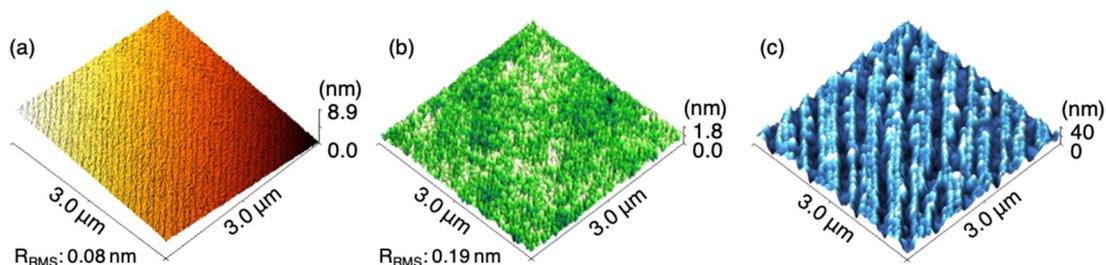


図 10 ELA に伴う Ga_2O_3 薄膜表面形状変化の AFM 観察像。(a) 室温 PLD 堆積直後、(b) ELA 固相エピタキシャル後、および (c) リン酸水溶液エッチング後。

その結果、アモルファス状に堆積された前駆体薄膜では α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板のモフォロジーをよく反映した超平坦表面がみられ、これは室温 ELA プロセスによるエピタキシャル結晶化後においても粗大粒成長などがみられない平坦表面を維持していることが観察された。また、エキシマレーザーの照射パルス数を減らした ELA を行い不完全な固相エピタキシャル薄膜を得た後に、残留アモルファス領域をエッチングにより除去した結果、 α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板の原子ステップと平行かつ直線上に結晶粒が配列している様子が観察された。原子ステップエッジが結晶核形成サイトとして機能したことを示唆する結果であり、ファセットによる表面エネルギー差と、その直上における $\text{NiO}(111)$ バッファ層中への転位・欠陥導入との相関が考えられた[10]。

図 11 は本研究における室温 PLD によるアモルファス前駆体薄膜堆積直後、および室温 ELA による固相エピタキシャル後の薄膜について測定した UV-Vis 吸収スペクトルである。また挿入図はそれぞれの薄膜について直接遷移型半導体の T_{auc} プロット $(\text{ah}\nu)^2$ を示している。

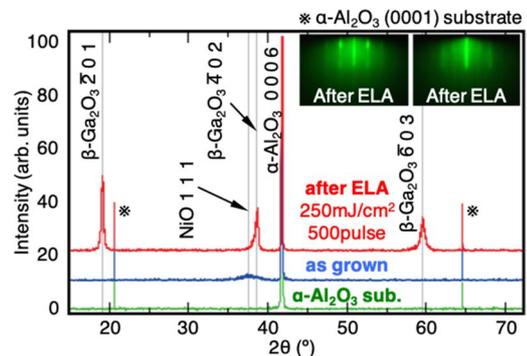


図 8 薄膜合成の α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板、室温 PLD 直後、および ELA による固相結晶化後の Ga_2O_3 薄膜の XRD 2θ - ω パターン。挿入図は ELA 後の RHEED パターン。

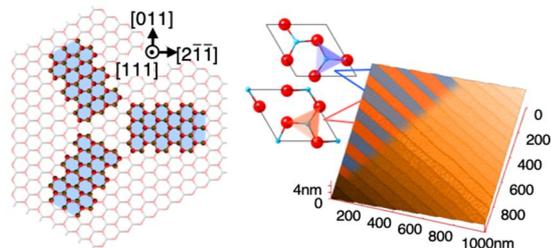


図 9 (左) NiO バッファ層上 β - $\text{Ga}_2\text{O}_3(-201)$ のドメイン構成、および (右) α - $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 原子ステップ基板上的 $\text{NiO}(111)$ のドメイン構成。

アモルファス前駆体薄膜について Tauc プロットにより求めた光学的バンドギャップは 4.3eV であり、KrF エキシマレーザーの $\lambda=248\text{nm}$ (5eV 相当) を吸収している。一方で ELA プロセスにより固相エピタキシャル結晶化した $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(-201)$ 薄膜では、4.9eV の光学的バンドギャップが得られており、これは単結晶 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ および 500°C などで高温合成されたエピタキシャル薄膜と同等の値である。以上の結果から本研究では、ワイドギャップ酸化物半導体において、(1)原子ステップなど基板モフォロジーによる結晶核形成制御、(2)パuffa層による格子不整合低減と薄膜面内秩序形成、バンドギャップに相当する紫外レーザーを用いた効率的な結晶化エネルギー吸収による固相配向結晶化により、パuffa層や高温合成と同等のバンドギャップをもつ薄膜の室温エピタキシャル合成が得られた。

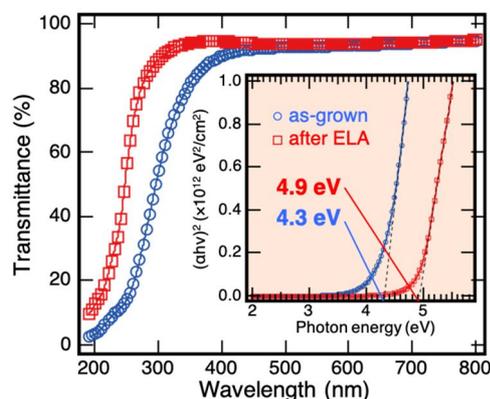


図 11 室温レーザープロセスにより合成された Ga_2O_3 薄膜の UV-Vis スペクトルと直接遷移型の Tauc プロット。

< 引用文献 >

- [1] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 013504.
- [2] L. Liao, Q. Zhang, Z. Su, Z. Zhao, Y. Wang, Y. Li, X. Lu, D. Wei, G. Feng, Q. Yu, X. Cai, J. Zhao, Z. Ren, H. Fang, F. Robles-Hernandez, S. Baldelli, and J. Bao, *Nature Nanotech.* 9 (2014) 69–74.
- [3] D. Sato, Y. Kashiwaba, K. Haga, H. Watanabe, B.P. Zhang, and Y. Segawa, *Vacuum* 74 (2004) 601–605.
- [4] F.B. Zhang, K. Saito, T. Tanaka, M. Nishio, Q.X. Guo, *J. Cryst. Growth* 387 (2014) 96–100.
- [5] R. Shimokawa, M. Yamanaka, and I. Sakata, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46 (2007) 7612–7618.
- [6] Y. Kakehi, S. Nakao, K. Satoh, and T. Kusaka, *J. Cryst. Growth* 237–239 (2002) 592–595.
- [7] M. Yoshimoto, R. Yamauchi, D. Shiojiri, G. Tan, S. Kaneko, and A. Matsuda, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 121 (2013) 1–9.
- [8] T. Tsuchiya, K. Daoudi, A. Watanabe, T. Kumagai, and S. Mizuta, *J. Phys.: Conf. Ser.* 59 (2007) 224–229.
- [9] M. Nishikawa, T. Nakajima, T. manabe, T. Okutani, and T. Tsuchiya, *Matter. Lett.* 64 (2010) 1921–1924.
- [10] R. Yamauchi, Y. Hamasaki, T. Shibuya, A. Saito, N. Tsuchimine, K. Koyama, A. Matsuda, and M. Yoshimoto, *Sci. Rep.* 5 (2015) 14385.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

- (1) Akifumi Matsuda, Ryosuke Yamauchi, Daishi Shiojiri, Geng Tan, Satoru Kaneko, and Mamoru Yoshimoto, “Room-temperature Selective Epitaxial Growth of CoO (111) and Co_3O_4 (111) Thin Films with Atomic Steps by Pulsed Laser Deposition”, *Appl. Surf. Sci.* 349 (2015) 78-82. 査読有. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.04.205
- (2) Daishi Shiojiri, Ryosuke Yamauchi, Daiji Fukuda, Nobuo Tsuchimine, Satoru Kaneko, Akifumi Matsuda, and Mamoru Yoshimoto, “Room-temperature fabrication of highly oriented $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films by excimer laser annealing”, *J. Cryst. Growth* 424 (2015) 38-41. 査読有. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.04.026
- (3) Daishi Shiojiri, Daiji Fukuda, Ryosuke Yamauchi, Nobuo Tsuchimine, Koji Koyama, Satoru Kaneko, Akifumi Matsuda and Mamoru Yoshimoto, “Room-temperature laser annealing for solid-phase epitaxial crystallization of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films”, *Appl. Phys. Exp.* 9 (2016) 105502. 査読有. DOI: 10.7567/APEX.9.105502
- (4) Okkyun Seo, Akhil Tayal, Jaemyung Kim, Chulho Song, Yanna Chen, Satoshi Hiroi, Yoshio Katsuya, Toshiaki Ina, Osami Sakata, Yuki Ikeya, Shiori Takano, Akifumi Matsuda, Mamoru Yoshimoto, “Tuning of structural, optical band gap, and electrical properties of room-temperature-grown epitaxial thin films through the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:NiO}$ ratio”, *Sci. Rep.* 9 (2019) 4304. 査読有. DOI: 10.1038/s41598-019-41049-9

[学会発表](計 22 件)

- (1) 塩尻 大士, 福田 大二, 内田 啓貴, 高野 詩織, 土嶺 信男, 小山 浩司, 金子 智, 松田 晃史, 吉本 護, 「KrF エキシマレーザーアニールによる $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ エピタキシャル薄膜の室温作製と光学特性評価」, 第 76 回 応用物理学会 秋季学術講演会, 名古屋・名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 13 日~9 月 16 日.

- (2) 塩尻 大士, 福田 大二, 内田 啓貴, 土嶺 信男, 小山 浩司, 金子 智, 松田 晃史, 吉本 護, 「紫外エキシマレーザー照射によるワイドギャップ Ga₂O₃ 薄膜の室温固相配向成長」, 日本セラミックス協会 第 28 回 秋季シンポジウム, 富山大, 2015 年 9 月 16 日~9 月 18 日.
- (3) Akifumi Matsuda and Mamoru Yoshimoto, “Room-temperature epitaxial synthesis and advanced nano-scale functionalization of widegap ceramic-based thin films”, 14th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2015), Jeju, South Korea, Oct.25–Oct.29, 2015. (Invited)
- (4) Daishi Shiojiri, Daiji Fukuda, Nobuo Tsuchimine, Koji Koyama, Satoru Kaneko, Akifumi Matsuda, and Mamoru Yoshimoto, “Solid-phase epitaxial crystallization of Ga₂O₃ thin films by pulsed KrF excimer laser annealing towards low-temperature device fabrication”, 2015 MRS Fall Meeting, Boston, USA, Nov.29–Dec.4, 2015.
- (5) 松田 晃史, 塩尻 大士, 福田 大二, 内田 啓貴, 土嶺 信男, 金子 智, 吉本 護, 「レーザープロセスによるワイドギャップ β-Ga₂O₃ 薄膜の低温エピタキシー」, 日本セラミックス協会 2016 年年会, 早稲田大, 2016 年 3 月 14 日~3 月 16 日.
- (6) 中村 稀星, 内田 啓貴, 土嶺 信男, 小山 浩司, 金子 智, 松田 晃史, 吉本 護, 「室温レーザーアニールによる β-Ga₂O₃ 薄膜の固相エピタキシーに与える NiO バッファ層の影響」, 第 77 回 応用物理学会 秋季学術講演会, 新潟朱鷺メッセ, 2016 年 9 月 13 日~9 月 16 日.
- (7) Akifumi Matsuda, Daishi Shiojiri, Hiroki Uchida, Kisho Nakamura, Yanna Chen, Osami Sakata, Nobuo Tsuchimine, Satoru Kaneko and Mamoru Yoshimoto, “Buffer-Layer Enhanced Heteroepitaxy of β-Ga₂O₃:(Sn, Si) Thin Films by Room-Temperature Excimer Laser Annealing”, 2016 MRS Fall Meeting, Boston, USA, Nov.27–Dec.2, 2016.
- (8) Akifumi Matsuda, Satoru Kaneko and Mamoru Yoshimoto, “Low-temperature heteroepitaxy of wide-gap oxide semiconductor thin films”, 3rd International Conference on Young Researchers on Advanced Materials (IUMRS-ICYRAM 2016), Bangalore, India, Dec.11–Dec.15, 2016. (Invited)
- (9) Akifumi Matsuda, Daishi Shiojiri, Hiroki Uchida, Kisho Nakamura, Nobuo Tsuchimine, Satoru Kaneko and Mamoru Yoshimoto, “Buffer-induced room-temperature epitaxy of β-Ga₂O₃ thin films by excimer laser annealing”, 第 26 回日本 MRS 年次大会, 横浜・横浜市開港記念館, 2016 年 12 月 19 日~12 月 22 日.
- (10) 中村 稀星, 森田 公之, 土嶺 信男, 金子 智, 松田 晃史, 吉本 護, 「β-Ga₂O₃ 薄膜のレーザー励起室温固相エピタキシーに与えるサファイア基板上バッファ層の効果」, 第 78 回 応用物理学会 秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日~9 月 8 日.
- (11) 森田 公之, 中村 稀星, 土嶺 信男, 金子 智, 松田 晃史, 吉本 護, 「周期的 NiO ナノ構造バッファ上における β-Ga₂O₃ 薄膜のレーザー励起室温固相エピタキシー」, 第 78 回 応用物理学会 秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日~9 月 8 日.
- (12) Akifumi Matsuda and Mamoru Yoshimoto, “Laser-induced room-temperature epitaxy of wide-bandgap semiconductor thin films”, The 4th International Symposium on Hybrid Materials and Processing, Haeunde, South Korea, Nov.5–8, 2017. (Invited)
- (13) Akifumi Matsuda, Kisho Nakamura, Hiroyuki Morita, Nobuo Tsuchimine, Satoru Kaneko and Mamoru Yoshimoto, “Solid-Phase Heteroepitaxy and Property Modification of β-Ga₂O₃ Thin Films by Room-Temperature Excimer Laser Annealing”, 2017 MRS Fall Meeting, Boston, USA, Nov.26–Dec.1, 2017.
- (14) 森田 公之, 中村 稀星, 土嶺 信男, 金子 智, 松田 晃史, 吉本 護, 「Ga₂O₃ 薄膜の室温下レーザー照射固相エピタキシーにおける膜厚や緩衝層の影響」, 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 早稲田大, 2018 年 3 月 17 日~3 月 20 日.

など他 8 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等：<http://www.matsuda.iem.titech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：