

## 深紫外エキシマ光を用いたポリマー基板上における 超ワイドギャップ半導体の高結晶性薄膜創製

東京科学大学 物質理工学院 松田晃史

Fabrication of Highly Crystalline Thin Films of Ultra-Wide-Bandgap Semiconductors  
on Polymer Substrates Using Deep-Ultraviolet Excimer Light

Akifumi Matsuda

School of Materials and Chemical Technology, Institute of Science Tokyo

長距離秩序をもたないアモルファスな cyclo-olefin polymer 基板上における、深紫外エキシマレーザーを用いたワイドギャップ半導体酸化ガリウム結晶薄膜の合成および結晶性と配向性の制御について検討した。Cyclo-olefin polymer 基板上に室温堆積されたアモルファス酸化ガリウム薄膜に対する KrF パルスエキシマレーザー照射、すなわち深紫外エキシマレーザーアニールによる急速固相結晶化を誘起した。その結果、基板—薄膜界面に熱バリア層として比熱容量の大きいアモルファス酸化アルミニウム層を導入することにより、ポリマー基板の紫外線・熱損傷を抑制した結晶化が得られることを見出した。さらに、秩序構造の基点となるシード層として酸化亜鉛層を導入することにより基板面直方に優先配向した結晶成長が誘起されることを明らかにした。

The synthesis of wide-bandgap  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films and the control of their crystallinity and orientation on flexible and amorphous cyclo-olefin polymer substrates lacking long-range order using a deep-ultraviolet excimer laser were investigated. The rapid solid-state crystallization was induced by irradiating KrF excimer laser beam, i.e., deep-ultraviolet excimer laser annealing, on amorphous  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films formed on cyclo-olefin polymer substrates by pulsed laser deposition at room temperature. As a result,  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  thin films was found to crystallize after irradiating 300 pulses by introducing approximately 1  $\mu\text{m}$ -thick amorphous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layers with high specific heat capacity at the substrate-thin film interfaces as barrier layers suppressing ultraviolet and thermal damage to the polymer substrates. Furthermore, it was demonstrated that introducing an ultra-thin self-oriented ZnO (0001) layer under the  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films serves as a seed layer for the ordered structure, thereby inducing the oriented crystal growth of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  ( $\bar{2}01$ ) crystals.

### 1. はじめに

ワイドバンドギャップ半導体セラミックスは、深紫外波長域の発光・光吸収や可視光透過型デバイスなどオプトエレクトロニクス<sup>1)~3)</sup>、また低ロス・小型・軽量・高オンオフ比のスイッチングデバイスなどパワーエレクトロニクス<sup>4)</sup>、高 S/N 比センサーなど<sup>5)</sup>、幅広い分野において高価値の応用をもたらすことが期待される。例えば酸化ガリウム  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  や酸化亜鉛 ZnO などワイドギャップ半導体の薄膜デバイス応用に際し、その導電性やリーク電流など電気特性や光学特性といった物性制御に加え、強誘電体・強磁性体との積層によるデバイス形成、層状構造材料との複合化が重要である。そのため、エピタキシャル薄膜など高い結晶性と配向性をもつ薄膜が、耐熱性が高く硬いサファイア  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ <sup>6)</sup> やシリコン Si<sup>7)</sup> など単結晶基板あるいはガラス基板上<sup>8)</sup> において、約 500°C 以上の高温で作製されてきた。

一方、これらワイドバンドギャップ半導体の結晶性・配向性薄膜と、大面積かつ柔軟性・成形性・可視光透過性に富むポリマー基板との融合は、flexibility や wearability など

新たな付加価値をもつ電子光学デバイス創製も期待される<sup>9),10)</sup>。しかし、一般に 500°C 程度以上のセラミックス薄膜合成温度では、ポリマーは熱分解や熱酸化を生じ、より低温でも熱可塑性を示し粘性流動してしまう。また、アモルファスなポリマー基板は、単結晶基板とは異なり薄膜結晶の構造秩序を誘起するテンプレート効果を得ることが困難である。これらの理由から、熱特性が著しく異なるワイドギャップ半導体結晶とフレキシブルなポリマー基板とを融合した薄膜デバイス形成には、基板の熱劣化を抑制する薄膜合成プロセスと、さらに界面における長距離秩序の形成と結晶配向性の制御に係わる知見を得ることが重要である。

本研究では、薄膜合成と結晶成長の過程を分離し、それぞれに深紫外域のエキシマ光を用いるプロセス、とくにエキシマレーザーアニール(ELA)によるアモルファス薄膜の固相結晶化に着目した。ELA はガラス基板上の多結晶 Si トランジスタ<sup>11)</sup>や、単結晶基板上の LaMnO<sub>3</sub> 薄膜や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜エピタキシーについて研究例があり<sup>12),13)</sup>、短時間で固相結晶化などの熱非平衡反応を誘起可能な、長時間の高温曝露を伴わないプロセスである。ここでポリマー基板について、紫外線照射により生じる光化学課程を介した分子結合の切断や分解・熱酸化など光劣化<sup>14),15)</sup>の抑制に関する知見も、ポリマー基板上にワイドバンドギャップ半導体結晶を用いた光電子デバイスを形成する上では重大な意義をもつ。

以上のことから本研究では、深紫外エキシマレーザーアニリングを用いた熱可塑性ポリマーシートを基板としたワイドギャップ半導体 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の高結晶薄膜合成、および熱・光劣化の抑制と配向性の制御法を見出すことを目的とした。

## 2. 実験方法

### 2.1 熱可塑性ポリマー基板

本研究では、アモルファスな熱可塑性ポリマー基板として、ガラス転移温度( $T_g \sim 163^\circ\text{C}$ )をもつシクロオレフィンポリマー(COP)シート(ZF16-188, Zeon Corp.,  $t \sim 188 \mu\text{m}$ )を用いた。COP 基板は薄膜堆積に先立ち、Xe<sup>\*</sup>エキシマランプ (Flat Excimer EX-mini, Hamamatsu Photonics K.K.)が放射する真空紫外光( $\lambda = 172 \text{ nm}$ ,  $H_e \sim 55.8 \text{ mW/cm}^2$ )を 5 分間、大気中にて照射した。真空紫外光、および光化学的に生成されるオゾン O<sub>3</sub> や原子状酸素 O(<sup>1</sup>D)・O(<sup>3</sup>P) などにより、有機コンタミネーションの除去ならびに光エッチングが生じ、表面の清浄化、平坦化、また親水基修飾による表面エネルギー増大などの表面処理効果が得られる<sup>16)</sup>。

### 2.2 前駆体アモルファス薄膜堆積

COP 基板上におけるワイドバンドギャップ半導体の前駆体アモルファス Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜は、KrF エキシマレーザー( $\lambda = 248 \text{ nm}$ , CompexPro, Coherent Inc.)と  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 焼結体ターゲットを用いたパルスレーザー堆積法(PLD)により O<sub>2</sub> 気流中( $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ )で合成した。本研究では Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の固相結晶化と結晶性向上の観点から、(1) アモルファス Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 層、(2) c 軸配向 ZnO 配向結晶(c-ZnO)層をバッファとして基板—薄膜間に導入した。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層と ZnO (0001)層の厚さをそれぞれ $\sim 100 \text{ nm}$  と $\sim 50 \text{ nm}$  に固定して、amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の厚さは 0 nm、 $\sim 1 \times 10^2 \text{ nm}$ 、 $\sim 5 \times 10^2 \text{ nm}$  および $\sim 1 \times 10^3 \text{ nm}$  とした。c-ZnO 層は焼結体ターゲットを用いて O<sub>2</sub> 中( $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ )で、また amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層は 0.3% Cr-doped  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶ターゲットを用いて超高真空中( $\sim 5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ )で成膜した。また、すべての成膜について集光したレーザービームのフルエンス、ターゲット—基板間距離、基板温度はそれぞれ  $E_{\text{PLD}} \sim 1.2 \text{ J/cm}^2$ 、 $d \sim 50 \text{ nm}$ 、室温( $\sim 20^\circ\text{C}$ , 非加熱)とした。

### 2.3 深紫外エキシマレーザーを用いた薄膜急速固相結晶化

PLD により室温合成した amo-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜は続いて、KrF 紫外エキシマレーザー( $\lambda = 248 \text{ nm}$ ,  $d \sim 20 \text{ ns}$ ; CompexPro, Coherent Inc.)を用いた ELA プロセスにより固相結晶化を誘

起した。ELA に用いたエキシマレーザービームは非集光とし、レーザー光路上のレンズ群を用いて長方形(7 mm × 15 mm)に成形した。パルスレーザービームのフルエンスは  $E_{\text{ELA}} \approx 150 \text{ mJ/cm}^2$  であり、大気中および室温において、10–1000 パルス(1 Hz)を薄膜表面に照射した。

## 2.4 薄膜評価

薄膜結晶構造は、PLD 装置が附帯する反射型高速電子線回折(RHEED)、CuK $\alpha$  線を用いた X 線回折(XRD; SmartLab, Rigaku Corp.)、および加速電圧 200 kV とした電子ビームを用いた透過型電子顕微鏡(TEM; JEM-2100F, JEOL Ltd.)により解析した。また、欠陥など薄膜構造について、カソードルミネッセンス(CL; iHR-320, Horiba, Ltd.)により、入射電子ビーム条件を 50  $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 、0.64 nA、3 keV として測定解析した。

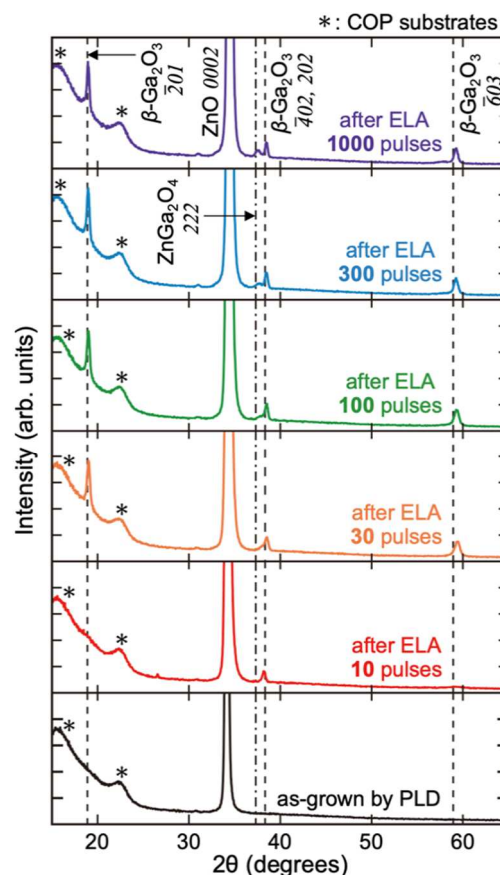
## 3. 結果と考察

### 3.1 深紫外 ELA プロセスによるワイドバンドギャップ $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の固相結晶化

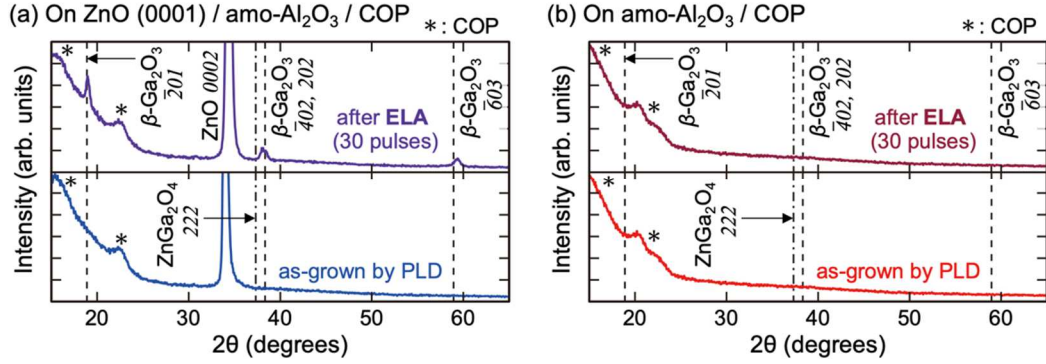
Fig. 1 は、PLD 成膜直後、およびエキシマレーザーを用いた ELA プロセス(10–1000 pulses)後の  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  積層薄膜について、XRD 2 $\theta$ / $\theta$  測定を行った結果である。ここでは amo- $\text{Al}_2\text{O}_3$  層厚は  $\sim 1 \times 10^3 \text{ nm}$  とした。PLD 直後の薄膜では COP 基板のブロードな回折と c 軸配向した ZnO (0001)結晶に帰属されるピークのみがみられ、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  層はアモルファスであると確認された。ELA プロセス後は、30 pulses 以上のレーザー照射により、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  結晶の  $\bar{2}01$  回折、 $\bar{4}02$  回折  $\bar{6}03$  回折が明瞭に現れ、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  ( $\bar{2}01$ )薄膜の配向結晶化を得た。RHEED 観察により面内の異方性をもたない一軸配向薄膜であると判明した。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  ( $\bar{2}01$ )面は、ウルツ鉱型構造 ZnO 結晶の(0001)面と同様の擬似的な六方最密型の酸素配列をもつ。これは、レーザー光吸収から熱過程を介し、界面からエピタキシャル結晶化を得た単結晶サファイア基板上的現象と合致する<sup>13)</sup>。一方、薄膜の固相結晶化は 10 pulses の ELA プロセスにおいても得られたが、 $2\theta \approx 38^\circ$  のピークは  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  結晶の  $\bar{4}02$  回折より  $202$  回折に帰属すると考えられた。ヘテロ界面における核形成の段階において、格子不整合を緩和するためにエネルギー的に最安定な酸素副格子面が連続する(101)配向ドメインが形成され、結晶成長の進行に伴って( $\bar{2}01$ )配向結晶のラテラル成長に遷移することが知られている<sup>17)</sup>。また、300 pulses 以上の ELA プロセスでは、Spinel 型結晶構造をとる  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$   $111$  回折もみられた。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 、ZnO 混合粉体の 1200°C 熱処理により  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  結晶を得た報告もある<sup>18)</sup>。本研究では結晶化させた  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  積層薄膜において、連続したレーザー光吸収により薄膜温度が上昇した結果、 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  界面において層間拡散と複酸化物の形成が生じたと示唆された。ELA プロセスのレーザー条件による結晶相制御の可能性も示された。

### 3.2 COP 基板上 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の ELA 結晶化における ZnO 層のシード効果

ここでは、ELA プロセスによる COP 基板上の  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜の固相結晶化における c-



**Fig. 1** XRD 2 $\theta$ / $\theta$  patterns of  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  thin films as-grown by PLD and after ELA process irradiated with 10, 30, 100, 300, 1000 pulses of KrF excimer laser beam.

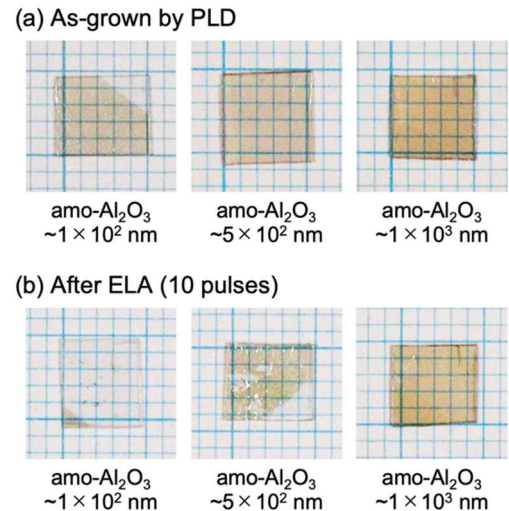


**Fig. 2** XRD  $2\theta/\theta$  patterns of (a)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  and (b)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  thin films as grown by PLD and after ELA process irradiated with 30 pulses of KrF excimer laser beam, as a comparison of with and without a c-ZnO layer.

ZnO 層の効果について検証した。Fig. 2 は、c-ZnO 層を含む(a)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  積層薄膜、および c-ZnO 層を含まない(b)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  積層薄膜について、ELA プロセス(30 pulses)前後の XRD  $2\theta/\theta$  測定結果である。ここでは  $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$  層厚は $\sim 1 \times 10^3 \text{ nm}$ とした。(a)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  積層薄膜では、室温 PLD 成膜直後に COP 基板に由来するブロードな回折と c 軸配向した ZnO (0001)結晶に帰属されるピークのみがみられた。ELA プロセス後には、一軸配向結晶化した  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  ( $\bar{2}01$ )結晶に起因する回折が現れた。一方で、(b)  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  積層薄膜では、PLD 成膜直後において COP 基板のブロード回折のみがみられ、固相結晶化を試みた ELA プロセス後においても  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  および  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  など酸化物結晶からの回折は検出されなかった。以上のことから、本研究の c-ZnO 層は、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  結晶の固相結晶化における結晶核形成すなわち秩序構造形成の基点となり、かつ面直方位の結晶配向成長を誘起するシード層として機能したと理解できる。

### 3.3 COP 基板上 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の ELA 結晶化における $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$ 層の熱バリア効果

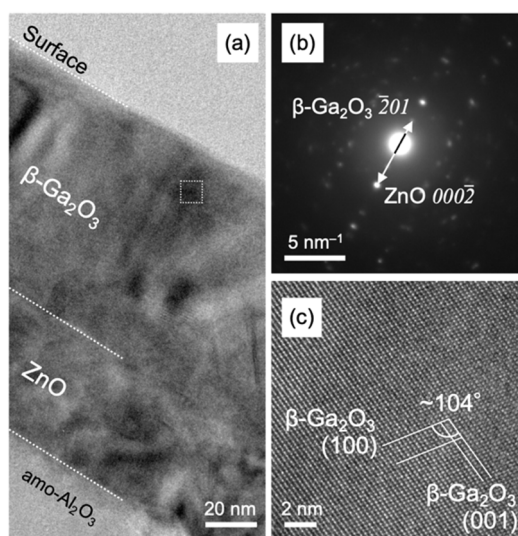
ここでは、ELA プロセスによる COP 基板上の  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜固相結晶化における  $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$  層の効果について検証した。Fig. 3 は、COP 基板—c-ZnO 層間に導入した  $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$  層について、層厚を $\sim 1 \times 10^2 \text{ nm}$ 、 $\sim 5 \times 10^2 \text{ nm}$ 、 $\sim 1 \times 10^3 \text{ nm}$ としたときの(a) PLD 成膜後、(b) ELA プロセス(10 pulses)後の写真である。 $\sim 1 \times 10^3 \text{ nm}$ 以上の  $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$ を導入した場合では、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶化が生じた ELA プロセス後も薄膜の形状は維持された。その一方、 $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$ 層厚 $\sim 1 \times 10^2 \text{ nm}$ では 10 pulses のエキシマレーザー照射により薄膜の全体が剥落し、 $\sim 5 \times 10^2 \text{ nm}$ においてもクラックや一部剥離がみられた。レーザー吸収した薄膜表面では、ナノ秒領域の急熱・急冷、深さ方位の熱拡散が生じることが研究されている<sup>19)</sup>。本研究の  $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$ 層は、周期構造の欠如によるフォノン散乱を誘起し熱拡散率を低減することにより、COP 基板界面において熱膨張係数差から生じる熱応力を緩和、また COP 基板への熱損傷を抑制する熱バリア層として機能したと理解できる。



**Fig. 3** Photographs of the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-ZnO}/\text{amo-Al}_2\text{O}_3//\text{COP}$  thin films with  $\sim 1 \times 10^2 \text{ nm}$ -thick,  $\sim 5 \times 10^2 \text{ nm}$ -thick, and  $\sim 1 \times 10^3 \text{ nm}$ -thick  $\text{amo-Al}_2\text{O}_3$  layer (a) as-grown by PLD, and (b) after ELA process (10 pulses).

### 3.4 COP 基板上に配向結晶化した $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の断面構造解析

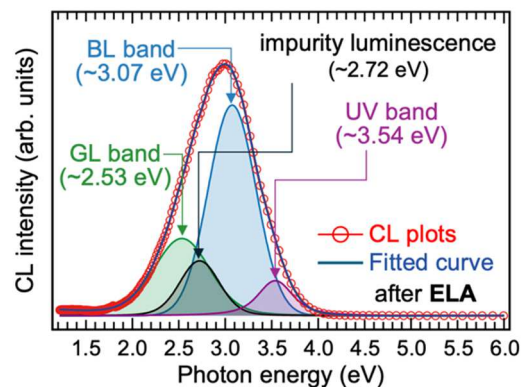
Fig. 4 は、ELA プロセス(300 pulses)後における Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/c-ZnO/amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//COP 薄膜の (a) 断面 TEM 観察像、(b) 観察領域の選択領域電子線回折(SAED)像、および(c) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の高分解能 TEM 像(白破線領域)である。c-ZnO/amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 積層バッファ上に、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜層(~90 nm)が固相結晶化したことが観察された。結晶化した  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜では、低密度かつ高比体積であるアモルファスからの相転移、および結晶成長に伴う薄膜内部の空隙収縮に起因すると推察される、10%程度の膜厚減少がみられた。SAED パターンでは、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\bar{2}01$ )および ZnO (0002)の面間距離に相当する、透過波からそれぞれ 0.47 nm および 0.26 nm 周期にスポットが観察された。 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\bar{2}01$ および ZnO 0002の回折は同じ方位にあることから、薄膜の XRD 解析で示された配向関係も確認された。高分解能 TEM では  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶が b 軸から観察されており、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶の(100)面および(001)面が~104°で交差した周期構造が明瞭に観察された。



**Fig. 4** The cross-sectional (a) TEM image of the  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/c-ZnO/amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//COP thin film after 300 pulses of ELA, (b) SAED pattern obtained from the same area, and (c) a high-resolution TEM image of the dotted square area.

### 3.5 COP 基板上に配向結晶化した $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜のカソードルミネッセンス

図 5 は、ELA プロセス(300 pulses)により固相結晶化させた  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/c-ZnO/amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//COP 薄膜について室温で測定した CL スペクトルである。ここでは amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層厚は~1 × 10<sup>3</sup> nm とした。緑色—紫外範囲の CL スペクトルは、(1) 緑色帯発光(~2.53 eV)、(2) 青色帯発光(~3.07 eV)、またワイドバンドギャップ半導体である  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶に特徴的な(3) UV バンド発光(~3.54 eV)、および(4)~2.72 eV にピークをもつ弱い発光、4 つのバンド発光で精度良くフィッティングされた。3.5 eV 近傍の UV 発光は、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶のバンドギャップ  $E_g$  ≈ 4.9 eV に対して低エネルギーであるが、これまで研究されてきた結晶本来の自己束縛ホール(STH)、およびそれに電子が捕獲された自己束縛励起子の再結合とよく一致する<sup>20)</sup>。3.0 eV 近傍の青色発光は、主に浅いV<sub>O</sub> donor 準位と価電子帯あるいはV<sub>Ga</sub>系の acceptor 準位間の再結合に起因すると理解することができる<sup>21)</sup>。2.7 eV 近傍の発光は、Zn の拡散によりZn<sub>Ga</sub> (acceptor)が形成され、V<sub>O</sub>の浅い donor 準位とZn<sub>Ga</sub>が形成する acceptor 準位間の donor-acceptor 再結合に起因する発光の増大と理解できる<sup>22),23)</sup>。2.5 eV 近傍の緑色発光は、主に深いV<sub>Ga</sub> acceptor 準位に帰属し、さらに欠陥密度やZn<sub>Ga</sub>の深い acceptor 準位形成による donor-acceptor 対発光により増大することが知られている<sup>23),24)</sup>。



**Fig.5** CL spectrum of the  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/c-ZnO/amo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//COP thin films after 300 pulses of ELA measured at room temperature. The spectrum was fitted with Gaussian peaks.

## 4. 結論

本研究では、深紫外パルスエキシマレーザーを用いたプロセスにより、ポリマー基板上

に超ワイドギャップ半導体を一軸配向結晶成長させた  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>( $\bar{2}01$ )/ZnO(0001)/amorphous-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//COP 積層薄膜を創製した。本研究では、アモルファス Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 前駆体薄膜の室温 PLD、および大気中の ELA により半導体薄膜の急速配向固相結晶成長を得た。ここで自己配向性をもつ ZnO(0001)層が、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜における結晶としての長距離秩序を誘起し、一軸配向成長を促進するテンプレート、すなわち結晶化のシード層として機能することを見出した。また、アモルファス Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層が、薄膜による深紫外レーザー光吸収により生じた温度上昇と熱拡散を低減・制御し、熱可塑性ポリマーの熱損傷・熱劣化を抑制する熱バリアとして機能していることも見出した。深紫外エキシマ光プロセスにより創製した一軸配向性の  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶薄膜は、高温合成された結晶薄膜と同等の光学物性を示した。以上のことから、本研究から超ワイドギャップ酸化物半導体をフレキシブルポリマー基板上に融合する基盤的知見が得られており、将来的な電子光学デバイス技術に貢献することが期待される。

## 5. 謝辞

本研究は、公益財団法人日本板硝子材料工学助成会の令和 5 年度研究助成を受けて実施されたものであり、同助成会に深く感謝いたします。

## 6. 参考文献

- 1) X. Hou, Y. Zou, M. Ding, Y. Qin, Z. Zhang, X. Ma, P. Tan, S. Yu, X. Zhou, X. Zhao, G. Xu, H. Sun, S. Long, *J. Phys. D*, **54**, 043001 (2021).
- 2) C.-H. Lin, C.-T. Lee, *J. Lumin.*, **224**, 117326 (2020).
- 3) K. Matsuzaki, H. Hiramatsu, K. Nomura, H. Yanagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, *Thin Solid Films*, **496**, 37–41 (2006).
- 4) M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, A. Kuramata, T. Masui, Shigenobu Yamakoshi, *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 034001 (2016).
- 5) M. Ogita, K. Higo, Y. Nakanishi, Y. Hatanaka, *Appl. Surf. Sci.*, **175–176**, 721–725 (2001).
- 6) S. Khartsev, N. Nordell, M. Hammar, J. Purans, A. Hallén, *Phys. Status Solidi B*, **258**, 2000362 (2021).
- 7) S. Vura, U. U. Muazzam, V. Kumar, S. C. Vanjari, R. Muralidharan, N. Digbijoy, P. Nukala, S. Raghavan, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **4**, 1619–1625 (2022).
- 8) R. Tu, X. Li, Q. Xu, T. Gao, X. Zhang, B.-W. Li, S. Zhang, T. Goto, L. Zhang, *Small*, **19**, 2300154 (2023).
- 9) L. Petti, N. Münzenrieder, C. Vogt, H. Faber, L. Büthe, G. Cantarella, F. Bottacchi, T.D. Anthopoulos, G. Tröster, *Appl. Phys. Rev.*, **3**, 021303 (2016).
- 10) J.W. Park, B.H. Kang, H.J. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1904632 (2019).
- 11) T. Sameshima, S. Usui, M. Sekiya, *IEEE Electron Device Lett.*, **7**, 276–278 (1986).
- 12) T. Nakajima, K. Shinoda, T. Tsuchiya, *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 2027–2041 (2014).
- 13) H. Morita, T. Matsushima, K. Nakamura, K. Kaneko, S. Kaneko, A. Matsuda, M. Yoshimoto, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **39**, 043414 (2021).
- 14) E. Yousif, R. Haddad, *SpringerPlus*, **2**, 398 (2013).
- 15) M.C. Celina, *Polym. Degrad. Stab.*, **98**, 2419–2429 (2013).
- 16) Y.-J. Kim, H. Sugimura, *Appl. Phys. Express*, **12**, 101002 (2019).
- 17) G. Sfuncia, C. Bongiorno, G. Nicotra, N. Licciardello, D. Sanfilippo, D. Patti, M. Bosi, L. Seravalli, F. Mezzadri, A. Parisini, R. Fornari, *Appl. Surf. Sci.*, **720**, 165208 (2026).
- 18) M.M. Can, G.H. Jaffari, S. Aksoy, S.I. Shah, T. Firat, *J. Alloys Compd.*, **549**, 303–307 (2013).
- 19) J. Neises, L. Kühnel, N. Benson, *Opt. Laser Technol.*, **164**, 109516 (2023).
- 20) T.T. Huynh, L.L.C. Lem, A. Kuramata, M.R. Phillips, C. Ton-That, *Phys. Rev. Mater.*, **2**, 105203 (2018).

- 21) L. Binet, D. Gourier, *J. Phys. Chem. Solids*, **59**, 1241–1249 (1998).
- 22) X.H. Wang, F.B. Zhang, K. Saito, T. Tanaka, M. Nishio, Q.X. Guo, *J. Phys. Chem. Solids*, **75**, 1201–1204 (2014).
- 23) E.B. Yakimov, E.E. Yakimov, A.Y. Polyakov, A.A. Vasilev, I.V. Schemerov, A. Kuznetsov, S.J. Pearton, *APL Mater.*, **13**, 041126 (2025).
- 24) E.G. Villora, T. Atou, T. Sekiguchi, T. Sugawara, M. Kikuchi, T. Fukuda, *Solid State Commun.*, **120**, 455–458 (2001).