エピタキシャル成長を利用した固体レーザー冷却用高品質 Yb:Y-Al-O 厚膜の作製 Epitaxially Grown High Quality Yb:Y-Al-O Thick Film for Optical Refrigeration 神戸大院工 °中山雄太, 薩井篤, 松尾祐治, 原田幸弘, 喜多隆

Kobe University, °Yuta Nakayama, Atsushi Satsui, Yuji Matsuo, Yukihiro Harada, and Takashi Kita E-mail: 179t250t@stu.kobe-u.ac.jp

【はじめに】マルチフォノン吸収を介した anti-Stokes 発光(Photoluminescence: PL)は、固体レーザー冷却器や自己 冷却レーザー(Radiation Balanced Laser: RBL)の要となる [1,2]。これまで我々は、Yb 添加 yttrium aluminum garnet [(Yb:Y)AG]や Yb 添加 yttrium aluminum perovskite [(Yb:Y)AP]の結晶粉末及びセラミックスにおける高温での anti-Stokes PL 増強と(Yb:Y)AP の優れた RBL 利得を明らかにし、可視域で良好な透明性を示す Yb:Y-Al-O 薄膜を 作製してその特性を調べてきた [3–6]。C-sapphire 基板上に作製された Yb:Y-Al-O 薄膜 (膜厚: ~2 µm) は、(Yb:Y)AG と Yb 添加 yttrium aluminum monoclinic [(Yb:Y)AM]に相分離した、剥離やクラックのない高品質膜であり、その anti-Stokes 発光取り出し効率は極めて高い [7]。より厚い高品質膜を実現できれば、レーザー冷却応用に向けた研 究プラットフォームが拓かれると期待される。しかしながら、結晶膜では膜厚の増加に伴って格子不整合に起因 する面内歪みが強くなるため、5.0 µm 以上の膜厚では剥離が顕著となってしまう。本研究では、c-sapphire 基板上 に種結晶層(SL)を挿入することによって、高品質な Yb:Y-Al-O 厚膜を作製することを目的とした。

【実験方法】合計膜厚 3.2、5.0 および 6.9 µm の Yb:Y-Al-O/SL/c-sapphire および Yb:Y-Al-O/c-sapphire を高周波マグネトロンスパッタリング法により作製した。Yb 添加 YAlO3をターゲットに用いて c-sapphire 基板上に原料を堆積後、1000℃の 電気炉にて 10 時間焼成して SL(Yb:Y-Al-O、膜厚: 1.4 µm) および Yb:Y-Al-O 厚膜を得た。Yb:Y-Al-O/SL/c-sapphire では SL 上に Yb:Y-Al-O 膜を堆積し、焼成した。焼成した試料を X-ray diffraction (XRD)測定と光学顕微鏡像観察で評価した。

【結果と考察】図1に合計膜厚 6.9 µm の Yb:Y-Al-O/SL/c-sapphire および Yb:Y-Al-O/c-sapphire の XRD パターンを示 した。図中の矢印とアルファベット"M"および"G"はそれぞれ、Monoclinic および Garnet 構造に由来する XRD ピークを表 す。挿入図はそれらの試料構造である。XRD パターンより、SL の有無に関わらず Yb:Y-Al-O 厚膜は Monoclinic 相と Garnet 相から構成され、膜厚 6.9 µm では両試料構造で Garnet 相が支配的となる。合計膜厚 3.2、5.0 および 6.9 µm の Yb:Y-Al-O/c-sapphire および Yb:Y-Al-O/SL/c-sapphire の光学顕微鏡像を図 2 にまとめた。Yb:Y-Al-O/c-sapphire では膜厚 5.0 µm で~500 mm⁻²程度の亀裂が現れ、膜厚 6.9 µm では直径数十~数百 µm の円形剥離と干渉縞が試料表面全域で観 測された。一方、Yb:Y-Al-O/SL/c-sapphire では膜厚 5.0 µm でも亀裂は観測されず、6.9 µm では数百 µm の亀裂のみが現 れた。すなわち、c-sapphire 基板上に作製された Yb:Y-Al-O 厚膜では、c-sapphire との格子不整合歪みに起因して、膜厚 5.0 µm でクラックが生じ、膜厚 6.9 µm では円形の剥離が生じたと考えられる。干渉縞は、歪み応力による Yb:Y-Al-O 厚膜 での光弾性効果の発現を示唆している。Yb:Y-Al-O/SL/c-sapphire では、SLとYb:Y-Al-Oが格子整合してエピタキシャル成 長するため、高品質 Yb:Y-Al-O 厚膜が得られたと考えられる。





Figure 1. XRD pattern of Yb:Y-Al-O films grown on c-sapphire w/ and w/o SL. The total film thickness is fixed at 6.9 µm. Arrows indicate diffraction peaks originated by garnet, G, and monoclinic, M.

Figure 2. Optical microscope image of Yb:Y-Al-O films grown on c-sapphire w/ and w/o SL with different film thicknesses.

[1]M. P. Hehlen *et al.*, Light Sci. Appl. **7**, 1 (2018). [2]Z. Yang *et al.*, Opt. Express **27**, 1392 (2019). [3]Y. Nakayama *et al.*, J. Soc. Mater. Sci. Japan **68**, 762 (2019). [4]Y. Nakayama, Y. Harada, and T. Kita, Appl. Phys. Lett. **117**, 041104 (2020). [5]Y. Nakayama, Y. Harada, and T. Kita, Proc. SPIE **11298**, 112980B (2020). [6]Y. Nakayama, Y. Harada, and T. KIta, Proc. SPIE **11702**, 117020K (2021). [7]Y. Nakayama *et al.*, J. Soc. Mater. Sci. Japan **69**, 727 (2020).