

酸化亜鉛基板上に形成したレーザー誘起ラフネス構造からのランダムレーザー発振

鎌倉, 悠暉 / Kamakura, Yuki

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030693>

酸化亜鉛基板上に形成した レーザー誘起ラフネス構造からのランダムレーザー発振

Random lasing from laser-induced roughness structures on ZnO single crystal

鎌倉悠暉

Yuki Kamakura

指導教員 中村俊博

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A random laser is a light source composed of a scatterer and an optical gain medium, and ZnO, which can easily grow high-quality crystals, is often used. Various shapes of random lasers have been reported, but in recent years, a proposal has been made to form a roughness structure by laser irradiation on a GaN substrate and operate it as a random laser. In our laboratory, we have also developed a roughness induced random laser on a ZnO single crystal. It is known that the shape and size of the laser-induced surface structure depend on the crystal properties of the substrate. In this study, we formed a laser-induced structure on a ZnO single crystal substrate with different crystal orientations and evaluated its random laser characteristics.

Key Words : ZnO, Random lasing, laser-induced roughness structures

1. 研究背景

ランダムレーザーは散乱体と光利得媒質で構成されるレーザー源であり、簡易に良質な結晶が成長可能である ZnO がよく用いられる。ZnO ランダムレーザーには、ナノ粒子^[1]、マイクロ粒子^[2]など様々な形状の報告があるが、近年、GaN 基板上へのレーザー照射によりラフネス構造を形成し、ランダムレーザーとして動作させる提案^[3]がなされ、当研究室でも ZnO 単結晶基板上のレーザー誘起構造からのレーザー発振を報告^[4]している。ところで、レーザー誘起表面構造の形状やサイズは基板結晶特性に依存することが知られている^[5]。そこで今回、異なる結晶方位を持つ ZnO 単結晶基板上にレーザー誘起構造を形成し、そのランダムレーザー特性の評価を行った。

2. 実験方法

本研究では、オルベ・パイオニア社から購入した図 1 のような酸化亜鉛単結晶基板の a 面・c 面タイプを試料として使用した。使用した酸化亜鉛単結晶基板の仕様を表 1 に示す。



図 1 酸化亜鉛単結晶基板(a 面・c 面)

表 1 酸化亜鉛単結晶基板の仕様

	c面	a面
面方位	$\langle 0001 \rangle \pm 0.25^\circ$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle \pm 0.25^\circ$
純度	ZnO 99.99%	
サイズ	10×10(±0.2)mm	
厚み	0.5(±0.05)mm	
面仕上げ	両面研磨 Ra < 1nm	

表 1 の酸化亜鉛単結晶基板表面に半導体レーザーである Nd:YAG パルスレーザー (355nm、2kHz、1570μW) を照射してラフネス構造を作製することで、ランダムレーザー発振の特性評価を行った。

2.1 Z 軸方向スキャン照射による評価方法

図 2 のように、Z 軸方向スキャン照射によって、酸化亜鉛単結晶基板の表面上にラフネス構造を作製した。

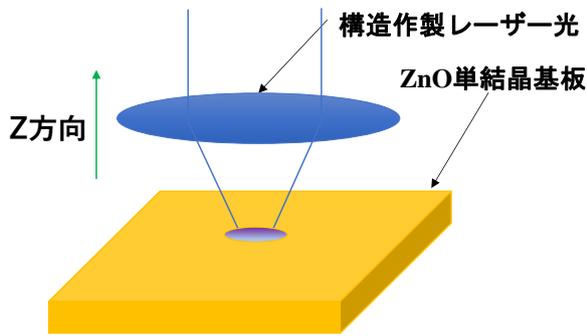


図2 Z軸方向スキャン照射によるラフネス構造の作製

構造作製の準備として、酸化亜鉛単結晶基板を試料台に設置し、顕微鏡の像がはっきり見えるようにZ軸を調整し、焦点を合わせた。このZ軸の焦点位置を $0\mu\text{m}$ とした。次に、Z軸を $122\mu\text{m}$ に移動してからレーザーをONにして照射し、構造作製を開始した。条件の照射時間が経過した瞬間に、レーザーを照射した状態でZ軸を $-122\mu\text{m}$ に移動し始め、40s照射してからレーザーをOFFにした。最後に、Z軸を $-122\mu\text{m}$ に移動し、励起レーザー光を照射することで発振スペクトルを測定した。

2.2 XY平面スキャン照射による評価方法

図3のように、Z軸方向スキャン照射によって、酸化亜鉛単結晶基板の表面上にラフネス構造を作製した。

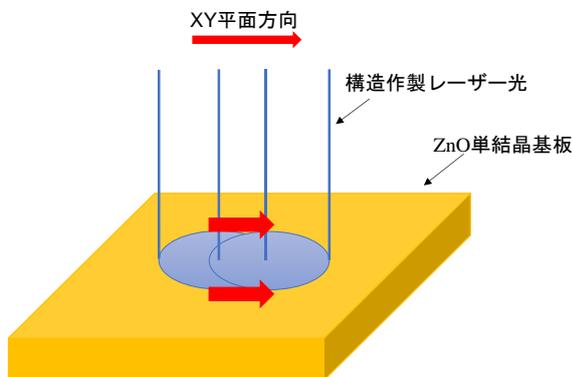


図3 XY平面スキャン照射によるラフネス構造の作製

構造作製の準備として、酸化亜鉛単結晶基板を試料台に設置し、顕微鏡の像がはっきり見えるようにZ軸を調整し、焦点を合わせた。このZ軸の焦点位置を $0\mu\text{m}$ とした。次に、Z軸を $0\mu\text{m}$ にした状態で、レーザーをONにして照射すると同時にX(P2X)軸を $+10\mu\text{m}$ 移動し、構造作製を開始した。そして、条件の照射時間が経過した瞬間にレーザーをOFFにした。最後に、励起レーザー光を照射することで発振スペクトルを測定した。

3. 実験結果および考察

(1) Z軸方向スキャン照射

a面において、照射時間30sで作製したラフネス構造

の顕微鏡写真を図4、顕微鏡写真の□に対するレーザーマッピング結果を図5、発振スペクトルを図6に示す。レーザーマッピング条件は、レーザー発振位置を中心にx軸とy軸を $-2.0\sim 2.0\mu\text{m}$ 移動した範囲で行った。

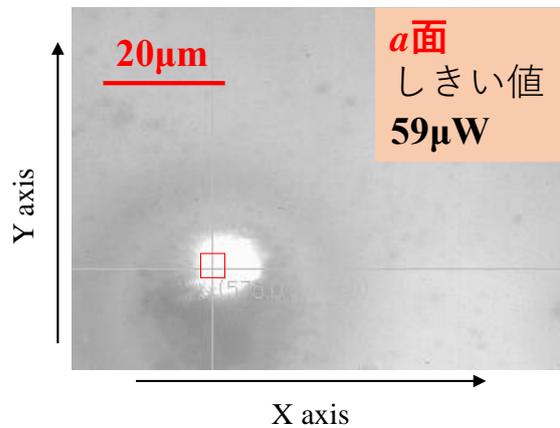


図4 30sで作製した構造の顕微鏡写真(a面)

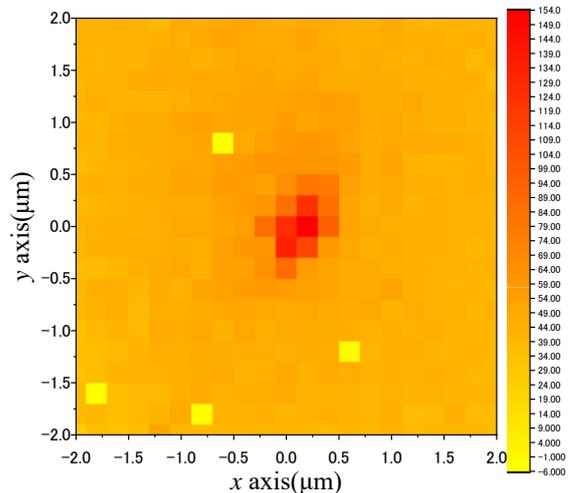


図5 図4の□に対するレーザーマッピング結果(a面)

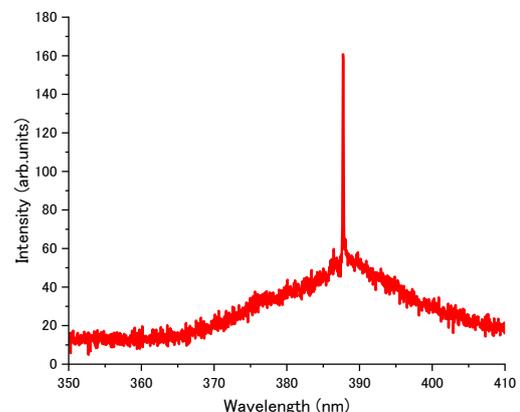


図6 しきい値 $59\mu\text{W}$ の発振スペクトル(a面)

c面において、照射時間30sで作製したラフネス構造

の顕微鏡写真を図 7、顕微鏡写真の□に対するレーザーマッピング結果を図8、発振スペクトルを図9に示す。レーザーマッピング条件は、レーザー発振位置を中心に x 軸と y 軸を-2.0~2.0 μm 移動した範囲で行った。

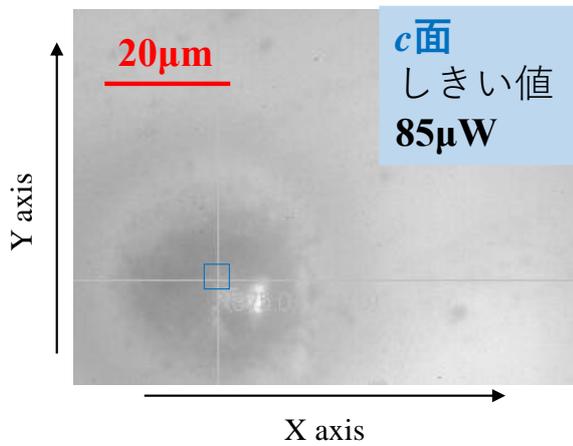


図 7 30s で作製した構造の顕微鏡写真(c 面)

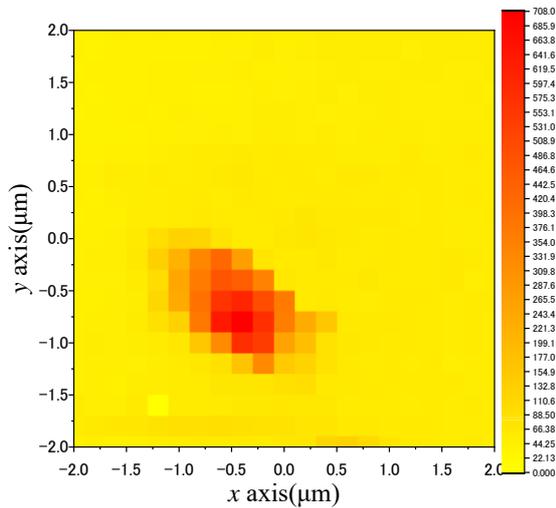


図 8 図 7 の□に対するレーザーマッピング結果(c 面)

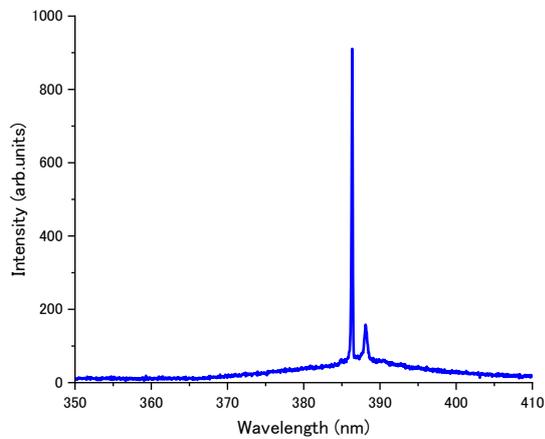


図 9 しきい値 85 μW の発振スペクトル(c 面)

図 6、9 より、a 面では発振しきい値強度が約 59 μW 、c 面では発振しきい値強度が約 85 μW となり、a 面のほうが低いことが分かった。図 4、7 より、両者とも円形に近いラフネス構造が形成され、図 5、8 より、ラフネス構造の全体ではなく、一部に局在してランダムレーザー発振が生じており、この共振器サイズは 1~2 μm 程度であることが分かった。

次に、Z 軸方向を基準に角度 50°で SEM 表面形状分析を行い、マッピング測定結果と照合し、どのような形状がレーザー発振に適しているのか観察した。図 10~13 に a 面・c 面の SEM 測定結果をそれぞれ示す。図中の赤丸はおおよそのレーザー発振位置を示している。

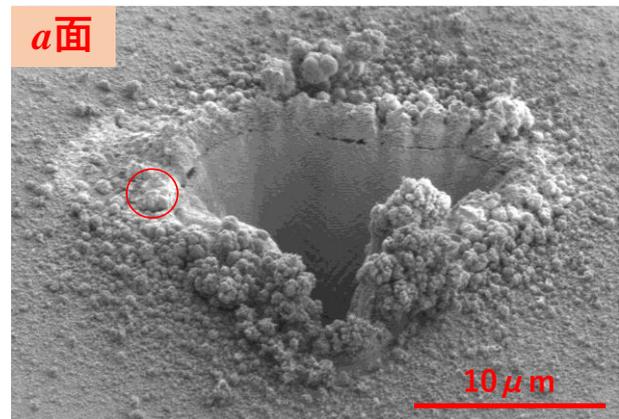


図 10 ラフネス構造の SEM 画像(a 面)

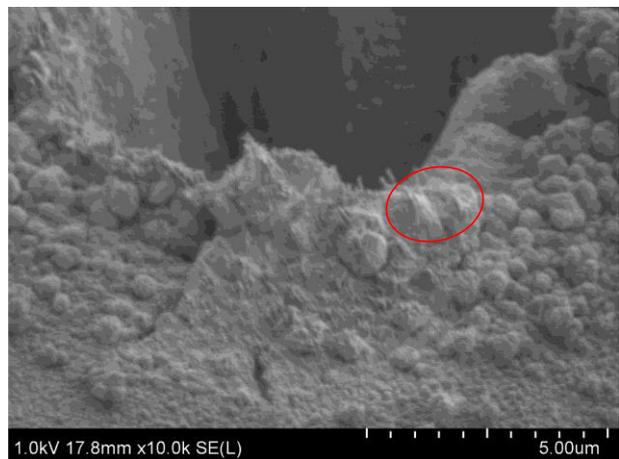


図 11 図 10 で倍率を上げた SEM 画像(a 面)

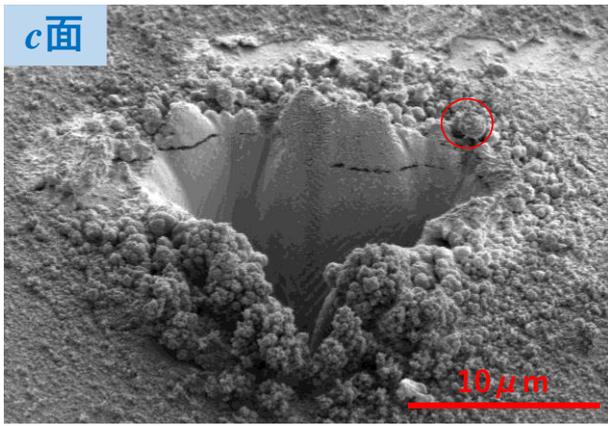


図 12 ラフネス構造の SEM 画像(c 面)

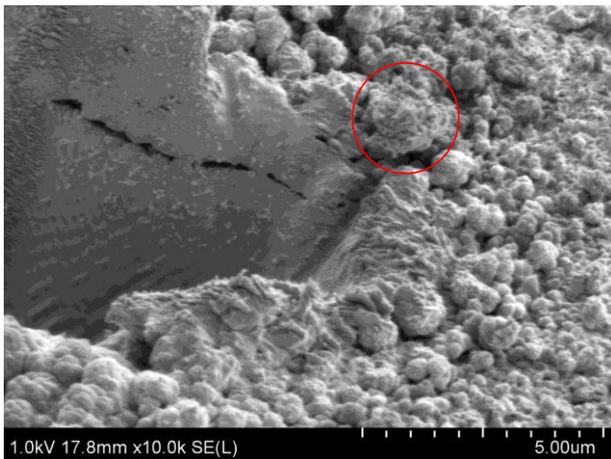


図 13 図 12 で倍率を上げた SEM 画像(c 面)

図 10～13 より、どちらの結晶面においても、レーザー発振する構造は粒子が凝集した形状となっているが、a 面のほうがより凹凸がはっきりしているように見えた。つまり、しきい値の低い a 面において形成されるラフネス構造のアスペクト比が大きく、ランダムレーザー発振に有利な散乱体構造が a 面で形成されていることが確認できた。以上より、Z 軸方向スキャン照射において、レーザー誘起構造の形状は結晶方位依存性に起因しており、レーザー誘起ラフネス構造ランダムレーザー発振に a 面のほうが適した結晶面であると考えられる。

(1) XY 平面方向スキャン照射

a 面において、照射時間 30s で作製したラフネス構造の顕微鏡写真を図 14、顕微鏡写真の□に対するレーザーマッピング結果を図 15、発振スペクトルを図 16 に示す。レーザーマッピング条件は、レーザー発振位置を中心に x 軸と y 軸を-2.0～2.0μm 移動した範囲で行った。

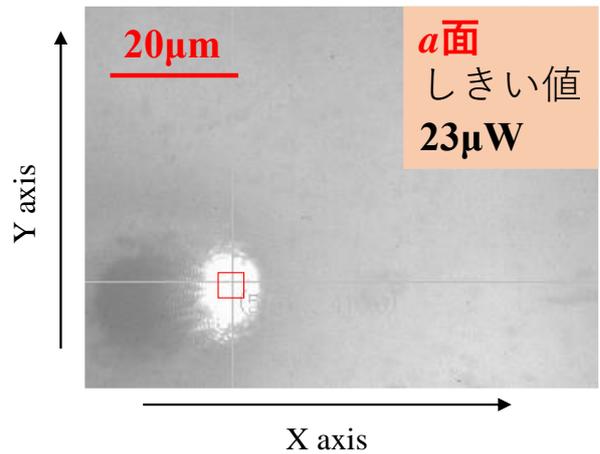


図 14 30s で作製した構造の顕微鏡写真(a 面)

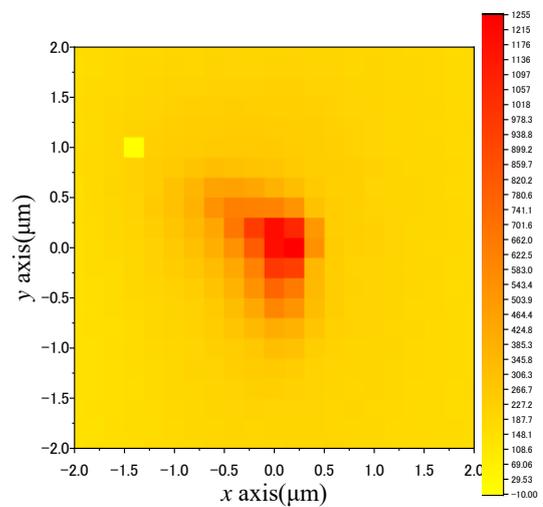


図 15 図 14 の□に対するレーザーマッピング結果(a 面)

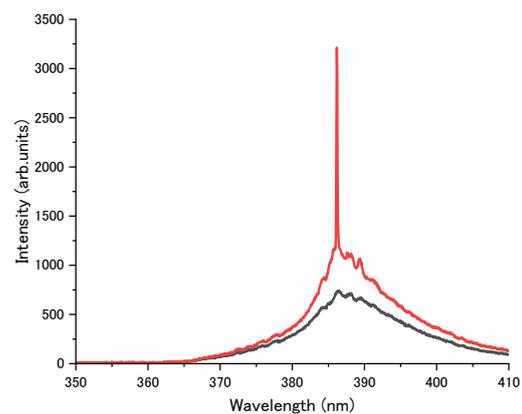


図 16 しきい値 23μW の発振スペクトル(a 面)

c 面において、照射時間 30s で作製したラフネス構造の顕微鏡写真を図 17、顕微鏡写真の□に対するレーザーマッピング結果を図 18、発振スペクトルを図 19 に示す。レーザーマッピング条件は、レーザー発振位置を

中心に x 軸と y 軸を-2.0~2.0 μm 移動した範囲で行った。

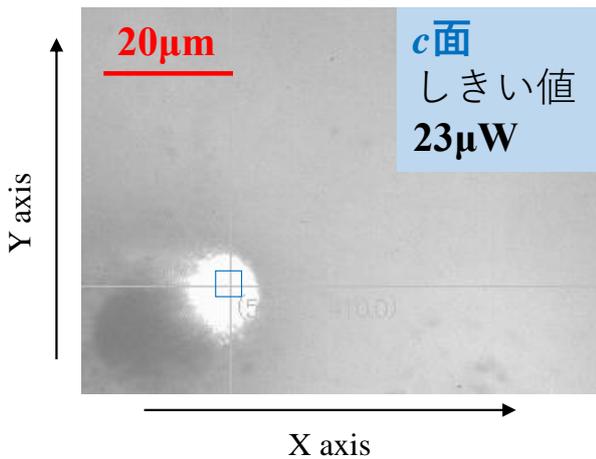


図 17 30s で作製した構造の顕微鏡写真(c 面)

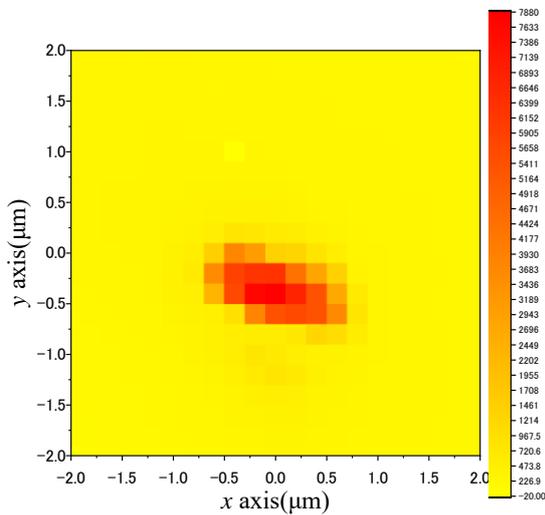


図 18 図 17 の□に対する
レーザーマッピング結果(c 面)

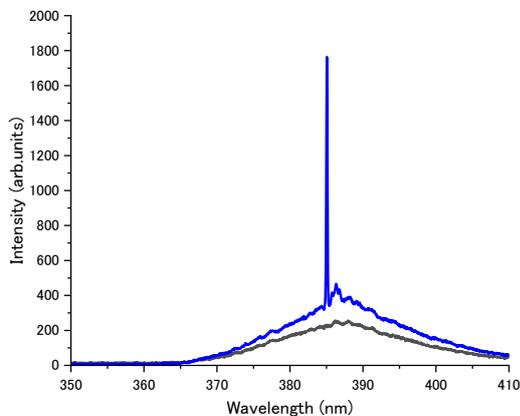


図 19 しきい値 23 μW の発振スペクトル(c 面)

図 16、19 より、両者とも発振しきい値強度が約 23 μW と近い値となり、ほぼ変化がなかった。図 14、17 より、両者とも横長のラフネス構造が形成され、図 15、18 より、ラフネス構造の全体ではなく、一部に局在してランダムレーザー発振が生じており、この共振器サイズは 1~2 μm 程度であることが分かった。

次に、Z 軸方向を基準に角度 50°で SEM 表面形状分析を行い、マッピング測定結果と照合し、どのような形状がレーザー発振に適しているのか観察した。図 20~23 に a 面・c 面の SEM 測定結果をそれぞれ示す。図中の赤丸はおおよそのレーザー発振位置を示している。

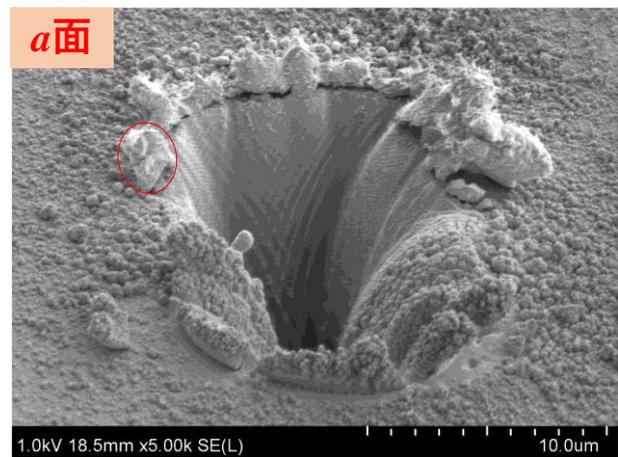


図 20 ラフネス構造の SEM 画像(a 面)

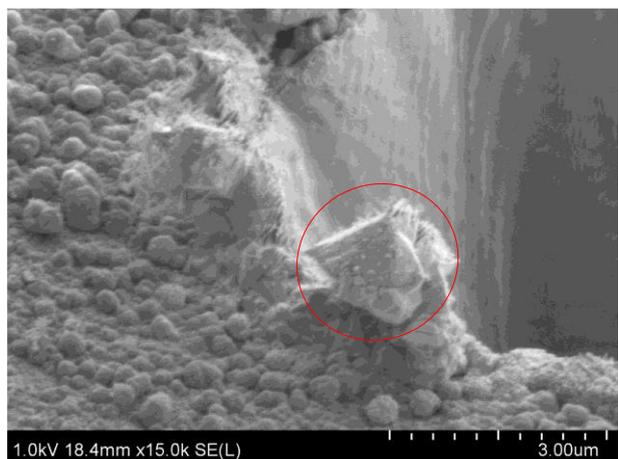


図 21 図 20 で倍率を上げた SEM 画像(a 面)

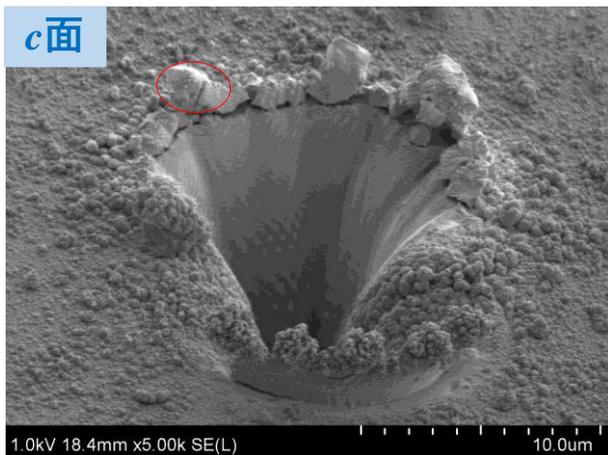


図 22 ラフネス構造の SEM 画像(c 面)



図 23 図 22 で倍率を上げた SEM 画像(c 面)

図 20～23 より、レーザー発振する構造はどちらも縞状構造となっていることが確認できた。このような構造も粒子状構造と同様に、ランダムレーザー発振に適していると言える。また、それぞれの結晶面で形成された発振構造を比較すると、c 面でより粒子が凝集して縞状構造となっていることが分かった。つまり、c 面で形成される発振構造でより光吸収が強いと考えられる。

4. 結論

今回、2通りの照射パターンでランダムレーザー発振特性を評価したが、共振器サイズと発振しきい値強度の優劣はほぼ変化がなかった。

Z 軸方向スキャン照射では、a 面でより発振しきい値強度が低く、レーザー発振する構造はどちらも粒子が集合した形状となっており、a 面のほうで凹凸がはっきりしているように見えた。つまり、a 面において形成されるラフネス構造のアスペクト比が大きく、ランダムレーザー発振に有利な散乱体構造が a 面で形成されていることが確認できた。したがって、Z 軸方向スキャン照射で形成されるレーザー誘起構造の形状は結晶方位依存性に起因しており、最適な結晶方位選択が重要であると考えられる。

XY 平面スキャン照射では、結晶面の違いで発振しきい値強度はほぼ変わらず、レーザー発振する構造は縞状構造となっており、c 面でより粒子が凝集した構造となっていることが分かった。つまり、c 面で形成される発振構造でより光吸収が強いと考えられる。このような発振構造は、今回、発振検出した箇所以外にも現れているため、他の箇所でもレーザー発振する可能性があり、XY 平面スキャン照射では発振構造が多く形成される傾向にあると考えられる。また、発振位置はレーザースポットの端、すなわち、レーザー強度が比較的弱い位置で発振構造が形成されていることが分かった。したがって、XY 平面スキャン照射で形成されるレーザー誘起構造の形状は結晶方位依存性に起因していない可能性があり、照射パターンの影響がランダムレーザー発振特性に強く現れていると言える。

今後は、基板表面に低強度レーザーを照射し、ラフネス構造の中央で発振構造が形成される照射条件・照射パターンを模索し、より広範囲に発振構造を作製する方法を見つけることで、ランダムレーザーデバイスへの実現に近づくと考えられる。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり、終始丁寧な助言と指導をして下さった、指導教官の中村俊博教授に深く感謝いたします。最後に、ランダムレーザーに関する研究テーマを進めた、吉野颯汰を始め、同研究室の仲間には、研究・ゼミを始め、様々な場面でお世話になりました。誠にありがとうございました。

参考文献

- 1) H. Kalt et al., Phys. Stat. Solidi B 247, 1448 (2010).
- 2) T. Nakamura et al., Opt. Lett. 40, 2661 (2015).
- 3) H. Fujiwara, K. Sasaki, Appl. Phys. Lett. 113, 171606 (2018).
- 4) 鈴木涼太 他、第 156 回応物学会秋期講演会予稿集(2021).
- 5) R. Miyagawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58, SCCB01 (2019).