# 法政大学学術機関リポジトリ

### HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-10-31

## 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

#### 法政大学

## 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<sup>[1]</sup>、マイクロ粒子<sup>[2]</sup>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<sup>[3]</sup>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<sup>[4]</sup>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<sup>[5]</sup>。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)

	c面	a面
面方位	$<\!0001\!>$ $\pm$ 0.25°	$<\!\!1120\!>\pm0.25^{\circ}$
純度	ZnO 99.99%	
サイズ	$10 \times 10(\pm 0.2) \text{mm}$	
厚み	$0.5(\pm 0.05)\text{mm}$	
面仕上げ	両面研磨	Ra < 1nm

#### 表1 酸化亜鉛単結晶基板の仕様

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。



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 0µmとした.次に、Z 軸を 122µm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-122µm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-122µm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。



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 0µmとした.次に、Z 軸を0µm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+10µm 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-2.0~2.0µm 移動した範囲で行った。



X axis

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 59µW 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-2.0~2.0µm 移動した範囲で行った。



X axis

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85µW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 59µW、 c 面では発振しきい値強度が約 85µW 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 1~2µm 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 面のほうでより凹凸がはっきりしているように見えた。 っまり、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。



X axis

図 14 30s で作製した構造の顕微鏡写真(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-2.0~2.0µm 移動した範囲で行った。



- 7386 - 7386 - 7386 - 7386 - 6899 - 6693 - 6699 - 6152 - 5658 - 5658 - 5658 - 5658 - 5658 - 5611 - 5164 - 4918 - 4918 - 4918 - 4918 - 4671 - 4424 - 4177 - 4671 - 4424 - 4177 - 3930 - 3683 - 3436 - 3436 - 2696 - 2449 - 2202 - 2696 - 2449 - 2202 - 1708 - 1708 - 1708 - 1718 - 1718 - 1718 - 2696 - 2449 - 2202 - 1718 - 2696 - 2449 - 2202 - 1718 - 1718 - 2696 - 2449 - 2202 - 1718 - 2696 - 2449 - 2202 - 1718 - 2696 - 2449 - 2202 - 1718 - 2696 - 2449 - 2202 - 1718 - 2696 - 2718 - 2.0-1.5 1.0-(mu) axis( اسل م -1.0--1.5--2.0 -2.0 -1.5 -1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0 1.5 2.0  $x \operatorname{axis}(\mu m)$ 図18 図17の□に対する





図 19 しきい値 23µW 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 23µW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~ 2µm 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 17 30s で作製した構造の顕微鏡写真(c面)

X axis



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。っまり、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).
- 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).