ダイレクトダイオードレーザー加工に向けた 高出力GaN系半導体レーザーの開発

中村 亘志¹, 持田 篤範¹, 萩野 裕幸¹, 能崎 信一郎¹, 川口 真生¹,
大森 弘治², 吉田 隆幸², 瀧川 信一¹, 片山 琢磨¹, 田中 毅¹

¹パナソニック(株)(〒617-8520 京都府長岡京市神足焼町1番地)

²パナソニックスマートファクトリーソリューションズ(株)(〒561-0854 大阪府豊中市稲津町3丁目1番1号)

High-Power InGaN Lasers for Direct Diode Laser Processing

Koshi NAKAMURA,¹ Atsunori MOCHIDA,¹ Hiroyuki HAGINO,¹ Shinichiro NOZAKI,¹
Masao KAWAGUCHI,¹ Kouji OOMORI,² Takayuki YOSHIDA,² Shinichi TAKIGAWA,¹
Takuma KATAYAMA,¹ and Tsuyoshi TANAKA¹

¹Panasonic Corporation, 1 kotariyakimachi, Nagaokakyo, Kyoto 617-8520

²Panasonic Smart Factory Solutions Co. Ltd., 3-1-1 Inazu-machi, Toyonaka, Osaka 561-0854

(Received November 19, 2018)

We achieved 129 W continuous-wave operation of a single-chip InGaN laser in the 400-nm wavelength range. Novel wall-plug-efficiency approximation clarifies the relations between the thermal saturation power and laser parameters, which enable high-power device designs. With the direct diode laser scheme, this short-wavelength light source shows more efficient copper processing than that operating in the 900-nm range.

Key Words: Direct diode laser, GaN, Laser array

1. はじめに

レーザー加工は従来の機械加工と比較して、金型レスプロセスが可能であり、安定性、速度に優れている¹⁾。このため、近年レーザー加工技術は、溶接、切断、クラディング、微細加工などの材料加工分野において幅広く用いられている。その光源として、CO₂レーザー、固体レーザー、ディスクレーザー、ファイバーレーザー、半導体レーザー(Laser Diode: LD)がある。特にLDの光を直接加工に用いる方式はダイレクトダイオードレーザー(Direct Diode Laser: DDL)^{2,5)}加工と呼ばれる。

DDL加工の特徴は、CO₂レーザーや固体レーザーを用いる場合に比べ省電力であることに加え、ダイオード発光層(活性層とも呼ぶ)の材料選択によって発振波長を変えられることが挙げられる。光源の発振波長は、レーザー加工の効率や速度を大いに左右する。主要な加工対象金属の光吸収率の波長依存性をFig. 1を示すが、一般に短波長な光ほど吸収率が高くなる傾向にあるからである⁶⁾。

窒化ガリウム(Gallium Nitride: GaN)化合物は、3.0 eV近傍の比較的大きなバンドギャップを有する直接遷移型

半導体で、400 nm帯の近紫外～青色発光材として知られている。従ってGaN系LDは、従来より短波長の光源を用いた次世代DDL加工への応用が検討されている⁷⁻¹²⁾。例えば銅の場合、波長900～1000 nm帯の光吸収率が約7%と低いのに比べて400 nm帯では約70%と10倍高くなるので、銅製品の加工で従来は出力1 kW以上の近赤外光源を要しているのに対し¹³⁾、GaN系DDLでは大幅な出力抑制や生産性の向上が期待できる。

Fig. 1 Wavelength dependence of optical absorbance of various materials⁶⁾.

これまでGaN系LDの光出力は、パルス動作でkW出力が報告¹⁴⁾されているが、連続波(Continuous Wave: CW)動作では数W程度^{15,16)}に留まっている。入熱量が小さい微細加工などではパルス光源で十分であるが、より大きな入熱量を必要とする溶接やクラディング、あるいは厚板加工や高速加工に対しては、CW動作可能なGa系LDの出力向上が求められてきている。さらに、レーザー発振器の小型化や光学系調整の簡素化、低コスト化などの産業応用的な観点から、単一素子で高出力が得られるLDの開発が強く求められている。

今回我々は、単一素子で最大出力129 WのCW動作を実現するGa系半導体レーザーを初めて開発したので報告する。DDLの波長合成技術が進展し、ビーム品質を損なわずに高輝度が得られつつあることを鑑み^{17,18)}、我々は複数発光点を有するマルチエミッタ構造を採用することでワンチップでの高出力化に成功した。本論文では、熱飽和現象の定式化に基くLD設計と作製結果、および400 nm帯DDL加工の優位性検証の結果について述べる。

2. 高出力化の設計

2.1 設計課題

LDはn型クラッド層、活性層、p型クラッド層が積層されたダブルヘテロ接合構造を有し、積層直交方向に伸びる屈折率差閉じ込めの光導波路と前端・後端の2劈開鏡面より成る共振器が集積されている。電流供給によって注入された電子・正孔キャリアが活性層で結合して発光し、ある閾値電流を超えると共振器内で共振・増幅が起こってレーザー発振に至る。レーザー光は前端劈開面より外部に伝搬し、共振器前端面が発光点(エミッタ)となる。

高出力CW動作LDの電流光出力特性を模式的にFig. 2に示す。低出力領域では電流に比例して出力が増加するが、高出力領域では自己発熱によって出力は飽和点に達する。この現象を熱飽和と呼び、CW動作で得られる出力を制限する。

熱飽和は活性層近傍の温度(接合部温度) T_j に強く依存する一方、 T_j 自体も光出力とともに帰還的に上昇する。接合部温度 T_j と光出力 P の関係は、LD熱抵抗 R_{th} 、LD電力変換効率 η 、LDパッケージの温度(ケース温度) T_c を用

いて、

$$T_j = T_c + R_{th} P \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (1)$$

で表すことができる。なお電力変換効率とは、LD投入電力と光出力の比を意味している。

高出力領域で注入電流が大きくなると、光電変換されずに活性層から溢れ出るキャリアが発生し始める。この状態をキャリアオーバーフローと呼ぶが、溢れ出たキャリアは非発光再結合で消費され、発光に寄与しない無効電力に帰するため η が低下する。式(1)においては、 P の増加のみならず、この η の低下が同時に起きるによって T_j が非線形的に上昇する。 T_j 上昇はオーバーフローを更に増やし η 低下を加速させる。この正帰還が強くなると、もはや注入電流を増やしても光出力が増えない状態に達する。これが熱飽和現象のメカニズムであり、Fig. 2に示すように光出力は最大値 P_{max} で頭打ちとなる。

式(1)において、 R_{th} を小さくすれば T_j 上昇を抑え、熱飽和を抑制できることは自明である。 R_{th} をどの程度まで下げれば必要な出力が得られるかを計算するためには、式(1)を P について解く必要がある。ところが η は T_j 依存性を有するため、式(1)を直接計算することは困難である。このため目標性能を達成するための熱抵抗が決まらず、高出力化設計を困難にしていた。

2.2 熱飽和の定式化

我々は、これまで多くのGa系LDにおいて電力変換効率 η と接合部温度 T_j の関係を解析してきた。その結果、典型的な両者の関係はFig. 3に示すような特性曲線で表されることを実験的に見出した。

そこでその挙動を、 T_j に依存せず η が一定となる低温領域と、 T_j の上昇とともに η が線形的に低下する高温領域に区分し、線形関数で近似することを試みた。低温領域で一定となる電力変換効率の値を η_0 と定義し、低温領域と高温領域の境界となる T_j を T_0 。高温領域で η が線形的に低下する部分の傾きの絶対値を η_0 で規格化した値を α とすると、電力変換効率 η は、

$$\eta \doteq \begin{cases} \eta_0 & (T_j < T_0) \\ \eta_0 [1 - \alpha(T_j - T_0)] & (T_j \geq T_0) \end{cases} \quad (2)$$

Fig. 2 Schematic diagram of optical output-current characteristics of high-power CW operation LD.

Fig. 3 Junction temperature dependence of wall plug efficiency of a GaN LD.

とおける。

式(2)を式(1)に代入し P について解くと、 $T_j \geq T_0$ において

$$P = \frac{\frac{1}{\eta_0 \alpha} + T_c + \beta - A[2 + F(T_j)]}{R_{th}} \quad (3)$$

が得られる。ここで、

$$\beta = \frac{1 - \eta_0}{\eta_0 \alpha} T_0, \quad (4)$$

$$A = \sqrt{\frac{\beta + T_c}{\eta_0 \alpha}}, \quad (5)$$

$$F(T_j) = \left(\sqrt{\frac{A}{T_j + \beta}} - \sqrt{\frac{T_j + \beta}{A}} \right)^2 \quad (6)$$

である。任意の T_j に対して $F(T_j) \geq 0$ に注意すれば、式(6)は $T_j + \beta = A$ で極小値ゼロをとるため、式(3)は極大値を取ることがわかる。この振る舞いがFig. 2に示す熱飽和点に相当する。

式(3)において $F(T_j) = 0$ のとき、光出力の最大値 P_{max} は次のように表される。

$$P_{max} = \frac{\frac{1}{\eta_0 \alpha} + T_c + \beta - 2A}{R_{th}} \quad (7)$$

熱飽和における最大光出力が定式化され、式(4)、(5)、(7)から、 η_0 、 α 、 T_0 、 T_c の4値が与えられれば、 P_{max} と R_{th} の関係が定量的にわかり、所望の P_{max} を得るのに必要な R_{th} が計算可能となる。

2.3 100 W級動作の設計

上記のモデルに則り、最大光出力の熱抵抗依存性を計算した結果をFig. 4に示す。式(4)、(5)、(7)では、実験的に求めた $T_0 = 60^\circ\text{C}$ 、 $\alpha = 0.003 / \text{K}$ を用いた。また $T_c = 25^\circ\text{C}$ としている。 η_0 はパラメータとして計算した。

目標出力は、前述の銅レーザー加工用途を想定して、100 W以上とした。今回用いるLDの η_0 が34~38%であることを考慮すると、この100 W以上の動作を実現するためには、少なくとも熱抵抗は0.45~0.57 K/Wより小さくすることが必要であると、Fig. 4より読み取れる。我々は熱抵抗 $R_{th} = 0.45 \text{ K/W}$ を目標に定めて、マルチエミッタ構造と高放熱実装技術の開発に取り組んだ。

(A) マルチエミッタ構造

半導体レーザーは、単一の共振器、発光点より成るシングルエミッタ構造と、複数の共振器がアレイ状に配置され発光点を複数持つマルチエミッタ構造(あるいはレーザーアレイ構造)に大別される。Fig. 5にシングルエミッタ構造とマルチエミッタの構造の概念図を示す。

シングルエミッタLDとマルチエミッタLDで同じトータル光出力を目指した場合、シングルエミッタでは発熱源が共振器近傍に集中して熱密度が高くなる一方、放熱経路が不十分で結果的に熱抵抗が大きくなる。それに対して、マルチエミッタでは発熱源が分散される上に、放

Fig. 4 Calculated maximum optical power as a function of thermal resistance with a parameter of low-power wall plug efficiency.

Fig. 5 Schematic structures of single-emitter LD and multi-emitter LD.

熱経路を広く確保することができるためで、熱抵抗を下げるができる。このような利点を考慮し、本開発ではマルチエミッタ構造を採用した。なおDDL加工において、マルチエミッタ光源でも波長合成法の併用などによって高いビーム品質が実現し得ることは前述のとおりである^{17,18)}。

マルチエミッタ構造では、共振器長やエミッタ幅、エミッタ間隔、エミッタ数が主要な設計パラメータとなる。それらの代表的な値については後述する。

(B) 金属両面放熱実装¹⁹⁾

半導体レーザーのパッケージには、CAN型やバタフライ型などいくつかの実装形態が実用化されているが、小型で封止が容易なCAN型が最も広く普及している。CAN型パッケージのLD実装部分の断面構造はFig. 6(a)のようになっている。LDで発せられた熱はサブマウントを経由してパッケージのベース部分に放熱される。しかしこのような構造では、素子の片面からしか排熱できないため、熱抵抗の観点で高出力LD用として十分とは言えない。この課題を克服するため、我々はFig. 6(b)に示すような両面放熱実装のレーザーモジュールを新たに開発した。GaN系LD素子を熱伝導性の高い金属で挟み込むことで放熱経路を上下に形成し、LD素子両面から排熱を促すことで低熱抵抗化を図った。

両面放熱レーザーモジュールでは、熱伝導率や熱膨張率などを考慮した素材の選定が重要である。ここでは銅ダイヤモンド系のサブマウントと銅の両面ブロックを組

Fig. 6 Schematic diagrams of (a) CAN-type LD package and (b) novel double-heat-flow structure LD module.

み合わせることで、熱抵抗設計値として0.45 K/Wを得た。

3. 作製と評価

3.1 LD素子/モジュールの作製

LD素子の作製にあたっては、まず有機金属気相成長法により2インチのc面GaNウェハ上に、n型AlGaInクラッド層、InGaIn活性層、p型AlGaInクラッド層を結晶成長させた。次にp型AlGaInクラッド層の一部を除去して複数の導波路構造を形成、その周辺部をSiO₂絶縁膜で被覆して電流狭窄し、端面劈開などの工程を経てマルチエミッタ構造のLD素子を得た。そのLD素子を金属両面放熱構造に実装して、所望のレーザーモジュールを完成させた。LDやLDモジュールの熱抵抗は波長法という手法を用いて測定できることが知られている²⁰⁾。本レーザーモジュールの熱抵抗を波長法を用いて実測した結果は0.46 K/Wであり、概ね上記の設計通りの値であった。

3.2 レーザーモジュールの特性

レーザーモジュールは水冷式ヒートシンク上に設置して $T_c=25^\circ\text{C}$ に制御し、CW駆動での光出力特性の測定を行った。最大光出力129 Wが得られたレーザーモジュールの電流-光出力特性をFig. 7に示す。目論見通り100 W以上まで直線性よく出力が伸びていることがわかる。ここで用いたLDの低出力時電力変換効率は $\eta_o=38\%$ であり、熱抵抗0.46 K/Wにおける最大出力計算値126 W (Fig. 4参照)と最大光出力実測値129 Wはほぼ一致する。なお、このマルチエミッタLDの共振器長は2000 μm 、エミッタ間隔は225 μm 、エミッタ幅は16 μm 、エミッタ数は38であった。

また、Fig. 8には分光器を用いて発振波長スペクトルの測定を行った結果を示す。光出力80 Wにおける中心発振波長は408 nm、スペクトル半値幅は1.6 nmで、単峰

Fig. 7 Optical output-current characteristics of an LD module with a maximum output as high as 129 W. (Inset: photo of the module under laser operation).

Fig. 8 Emission spectrum of a LD module under 80 W laser operation.

性のスペクトルが得られた。

4. 400 nm帯DDL加工の優位性検証

本開発品の400 nm帯LDモジュール(中心発振波長408 nm)と、既存の900 nm帯LDモジュール(中心発振波長915 nm)を用いて、銅に対するDDL加工を試行し、光吸収率の違いによる加工優位性の検証を行った。簡易な実験としてレーザー光をレンズで集光し、集光点に銅箔を置いて貫通孔が形成される様子を観測した。加工対象として10 μm 厚の銅箔を3枚重ねたものを使用した。加工条件はともにCW動作光出力80 W、集光スポット直径は2 mmに統一した。

照射時間2秒後の銅箔表面の写真をFig. 9に示す。400 nm帯光源を用いた場合は2秒以内に完全な貫通孔が形成されたが、900 nm帯光源を用いた場合には表面の変形は見られるものの貫通孔の形成には至っておらず、両者の明瞭な差が観測された。900 nm帯では貫通まで約5秒を要した。

加工後のサンプルは、非照射領域の銅表面が酸化し貫通孔周縁に熔融痕が見られる一方、顕著な粒子状飛散物は発生していない。このことから本加工では、熱による熔融を伴う反応プロセスが支配的で、原子間結合の切断を伴うアブレーション過程は副次的であると推察でき

Fig. 9 Comparison of laser drilling examination of Cu foils using LD modules with wavelengths around (a) 400 nm and (b) 900 nm.

る。従って、光源波長の違いによる光子エネルギーの大小の影響は小さく、銅に有効に吸収された入熱量の大小が結果を左右したと考えられる。

文献21は、レーザー照射による熱加工プロセスをモデリングした古典的な研究例の一つである。この文献に従って、今回の実験結果の妥当性を検証した。

Fig. 10に示す座標系を考え、銅表面($z=0$)の原点($r=0$)にスポット直径 $2a$ のレーザー光が照射された場合に、銅表面温度が融点に達するまでの時間を計算する。このモデルでは、加工物は半無限体とし、照射スポットは円形一様、熱定数は温度によらず一定、加工表面からの輻射はなく、光入力は時間に対しステップ関数で与えられる。このとき深さ方向 z における t 秒後の温度 $v(0, z, t)$ は、銅に吸収されるエネルギー Q 、ビームスポット半径 a 、熱伝導率 K 、温度拡散係数 κ 、銅の初期温度 θ_c 、銅の融点 θ_m を用いて、次式で与えられる²¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} v(0, z, t) &= \frac{2Q\sqrt{\kappa t}}{\pi a^2 K} \left(\operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) - \operatorname{ierfc}\left(\frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right) + \theta_c \\ \operatorname{ierfc}(x) &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x) \\ \operatorname{erfc}(x) &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)において $z=0$ とすると

$$v(0, 0, t) = \frac{2Q\sqrt{\kappa t}}{\pi a^2 K} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc}\left(\frac{a}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right) + \theta_c \quad (9)$$

と導かれる。式(9)が銅の融点を θ_m と一致するとき、銅が融解する。そこで $v(0, 0, t) = \theta_m$ とし、 Q について解くと、

Fig. 10 Laser beam irradiation model on copper surface $z=0$.

$$Q = \frac{(\theta_m - \theta_c) \pi a^2 K}{2\sqrt{\kappa t} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc}\left(\frac{a}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right)} \quad (10)$$

今回の実験における貫通孔の形成時間から、式(10)に基いて銅に吸収された400 nm帯エネルギー Q_{blue} 、および900 nm帯エネルギー Q_{infrared} を見積もることができる。貫通孔の形成時間が各々2秒、5秒であったことから、 Q_{blue} 、 Q_{infrared} はそれぞれ45 Wと28 Wと試算できる。なお、 $\theta_c = 25^\circ\text{C}$ 、 $a = 1 \text{ mm}$ とし、銅の物性値として $K = 3.93 \text{ J/cm/s}^\circ\text{C}$ 、 $\kappa = 1.14 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $\theta_m = 1083^\circ\text{C}$ を用いた。

400 nm帯、900 nm帯の光吸収率⁶⁾より理論上求まる吸熱量は56 Wと6 Wとなり、特に赤外で乖離が大きい。その原因としてスポット直径や計測時間に誤差が含まれていること、銅の物性値が温度依存性を持つことが挙げられるが、それ以外に、レーザ加工プロセス中に銅の酸化が進行し、過渡的に光吸収率が変化していることが大きいと考えられる。CO₂レーザーによる銅加工では、意図的な酸化層形成で表面を黒化し光吸収率を増強する前処理手法が知られているが²²⁾、本実験でも同様な酸化黒化現象が自然に起こり、赤外光の吸収が加速度的に促進されて有効吸熱エネルギーが増した推察できる。なお、熱シミュレーションの精度を向上するには、対象物の有限な大きさや空気・マウント・ボンディング材などの熱定数を考慮した適切な境界条件を付与することが望ましく、今後の課題とする。

5. 結 論

短波長光源を用いた次世代DDL加工に向けて、400 nm帯高出力GaN系半導体レーザーを開発し、単一素子のCW動作で最大光出力129 Wを初めて実現した。高出力化設計にあたって、電力変換効率のLD接合部温度依存性を線形近似し、熱飽和における最大光出力の定式化を果たした。その結果、100 W出力の達成に必要な熱抵抗の値として0.45 K/Wを導出した。この低い熱抵抗を実現するため、マルチエミッタ構造LDと金属両面放熱実装モジュールを独自に開発した。

また、400 nm帯LDモジュールと900 nm帯LDモジュールを用いて、銅箔の直接開孔実験を試み、波長の違いによる加工速度の比較検証を行った。400 nm帯で加工が有意に速い結果となり、短波長光による効率的な光吸収が優れた加工生産性に寄与することを示唆した。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の結果得られた成果に基づく。

参考文献

- 1) H. Wang, Y. Kawahito, R. Yoshida, Y. Nakashima, and K. Shiokawa: Opt. Lett. **42** (2017) 2251.

- 2) R. K. Huang, B. Chann, J. Burgess, M. Kaiman, R. Overman, J. D. Glenn, and P. Tayebati: *Proc. SPIE* **8241** (2012) 824102.
- 3) S. Strohmaier, C. Tillkorn, P. Olschowsky, and J. Hostettler: *Opti. Photon. News* **21** (2010) 25.
- 4) S. Ried, S. Rauch, L. Irmeler, J. Rikels, A. Killi, E. Papastathopoulos, E. Sarailou, and H. Zimer: *Proc. SPIE* **10514** (2018) 105140G-1.
- 5) D. Crawford, P. Thiagarajan, J. Goings, B. Caliva, S. Smith, and R. Walker: *Proc. SPIE* **10514** (2018) 105140H-1.
- 6) E. W. Spisz, A. J. Weigand, R. L. Bowman, and J. R. Jack: *NASA TN D-5353* (1969).
- 7) K. Yamanaka, R. Kato, M. Oya, K. Morimoto, K. Samonji, and K. Okuyama: *Panasonic Technical Journal* **61** (2015) 41.
- 8) K. Morimoto, N. Suzuki, D. Ueda, M. Yuri, K. Yamanaka, J. Milliez, and X. Liu: *IEICE Trans. Electron.* **94** (2011) 1733.
- 9) H. König, A. Lell, B. Stojetz, M. Ali, C. Eichler, M. Peter, A. Löffler, U. Strauss, M. Baumann, A. Balck, *et al.*: *Proc. SPIE* **10514** (2018) 1051402.
- 10) A. Balck, M. Baumann, J. Malchus, R. V. Chacko, S. Marfels, U. Witte, D. Dinakaran, S. Ocylok, M. Weinbach, C. Bachert, *et al.*: *Proc. SPIE* **10514** (2018) 1051403.
- 11) M. Silva Sa, M. Finuf, R. Fritz, J. Tucker, J.-M. Pelaprat, and M. S. Zediker: *Proc. SPIE* **10514** (2018) 1051407.
- 12) B. Köhler, S. Drows, M. Stoiber, S. Dürsch, H. Kissel, T. Könnig, J. Biesenbach, H. König, A. Lell, and B. Stojetz, *et al.*: *Proc. SPIE* **10514** (2018) 1051408.
- 13) A. Moalem, P. von Witzendorff, U. Stute, and L. Overmeyer: *CIRP* **3** (2012) 459.
- 14) S. Kono, R. Koda, H. Kawanishi, and H. Narui: *Opt. Express* **25** (2017) 14926.
- 15) M. Kawaguchi, O. Imafuji, S. Nozaki, H. Hagino, S. Takigawa, T. Katayama, and T. Tanaka: *Proc. SPIE* **9748** (2016) 974818.
- 16) S. Nozaki, S. Yoshida, K. Yamanaka, O. Imafuji, S. Takigawa, T. Katayama, and T. Tanaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** (2016) 04EF05.
- 17) R. K. Huang, B. Chann, L. J. Missaggia, J. P. Donnelly, C. T. Harris, G. W. Turner, A. K. Goyal, T. Y. Fan, and A. Sanchez-Rubio: *IEEE Photon. Tech. Lett.* **19** (2007) 4.
- 18) T. Y. FAN: *IEEE J. Quantum Electron* **11** (2005) 3.
- 19) A. Mochida, M. Kawaguchi, S. Nozaki, H. Hagino, K. Nakamura, S. Takigawa, K. Oomori, T. Yoshida, T. Katayama, and T. Tanaka: *The 7th Advanced Lasers and Photon Sources 2018* (2018) ALPS9-G1.
- 20) X. Liu, W. Zhao, L. Xiong, and H. Liu: *Packaging of High Power Semiconductor Lasers* (Springer, USA, 2015) 260.
- 21) T. Miyazaki and N. Taniguchi: *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.* **36** (1970) 21.
- 22) 廣垣 俊樹, 青山 栄一, 小林 圭二, 松谷 章吾, 鮎澤 司: *日本機械学会論文集* **74** (2008) 747.