

Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミック thin-disk レーザーの開発

白川晃 研究室 稲垣達也

1. 序論

近年、高出力、高効率な超短パルスレーザー光源として、thin-disk レーザーが注目されている。従来、機械的、光学的特性に優れた Yb³⁺ 添加 Y₃Al₂O₁₂(YAG)が一般的なレーザー媒質として用いられてきたが、利得帯域幅が狭く短パルス化が難しかった。我々はこれまでに、利得帯域幅が広い Yb³⁺添加 RE₂O₃(RE=Y, Lu, Sc)セラミックを用いて、サブ 100 fs のカーレンズモード同期動作[1]、Yb 添加 Y₂O₃ セラミック thin-disk レーザーを報告してきた[2]。

表 1-1 に Yb³⁺イオン添加材料の熱伝導率を示す。本研究で使用する 3at.%Yb³⁺:Lu₂O₃の熱伝導率は、今回我々が新たに測定した値である。測定法やセラミックが異なるため、Yb³⁺イオン添加 Lu₂O₃の方が熱伝導率が高くなっている。一般的に、Lu₂O₃は Yb³⁺イオン添加しても高い熱伝導率を維持できる。よって、高出力動作に適していると期待される。そのため、本研究では Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミックを使用した thin-disk レーザーの開発を行なった。

表 1-1 Yb³⁺イオン添加材料の熱伝導率

	Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	YAG
Thermal conductivity non-doped [W/m · K]	12.5	12.6	10.9	9.9
Thermal conductivity Yb ³⁺ doped [W/m · K]	6.8 (1.8%Yb) [3]	7.9 (2% Yb)	13.9 (3% Yb)	6.8 (1.8%) [3]

2. 原理

2.1. thin-disk レーザー

レーザー動作中に発生する熱の影響を小さくするため、厚さの薄い利得媒質を使用する thin-disk レーザーを用いる。thin-disk レーザーでは、厚さ数百 μm 以下の利得媒質をヒートシンクに接合し背面冷却することで、高い冷却効率を得ることができる。また、レーザー発振方向と、熱の伝わる方向を同軸にすることにより、固体レーザーの問題であった熱レンズ効果などの低減が可能である。そのため高効率、高出力、高ビーム品質を同時に達成するレーザーが実現可能である。

thin-disk レーザーは利得媒質の薄さのため、励起光を 1 回通過させただけでは十分な吸収が得られない。この問題を解決するために、励起光を利得媒質に複数回入射させるマルチパス励起を行う。

本研究では、自作のマルチパス励起モジュールを使用した。励起光を中心に集めるための放物面鏡と、光路を反転させるための 2 枚 1 組のプリズムミラー 4 組で構成されており、片道で 8 パス、折返しミラーで反射し、合計 16 パスの構成となっている。Yb³⁺:Lu₂O₃の吸収係数から励起光吸収量を計算すると、16 パスで十分な設計となっている。

図 2-1 にその構成を示す。中心部の水色部分が thin-disk セラミックである。励起光の光路は、赤線が 1 回目の通過、黄線が 2 回目の通過、

緑線が3回目の通過、青線が4回目の通過となっている。灰色の折返しミラーで反射し、進んできた光路を廻り8回 thin-disk セラミックを通過させ、正味16パスとなっている。図2-2が実際に製作したマルチパス励起モジュールである。

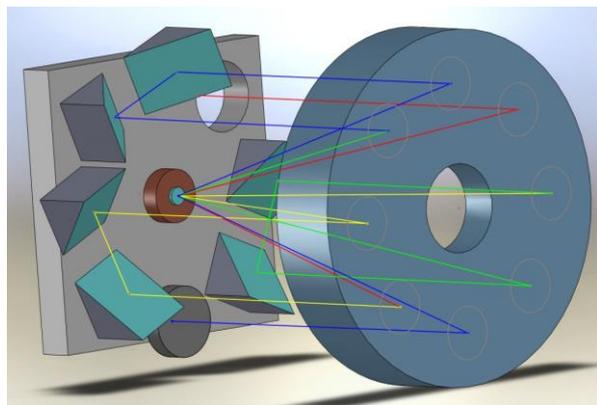


図 2-1 自作マルチパス励起モジュール

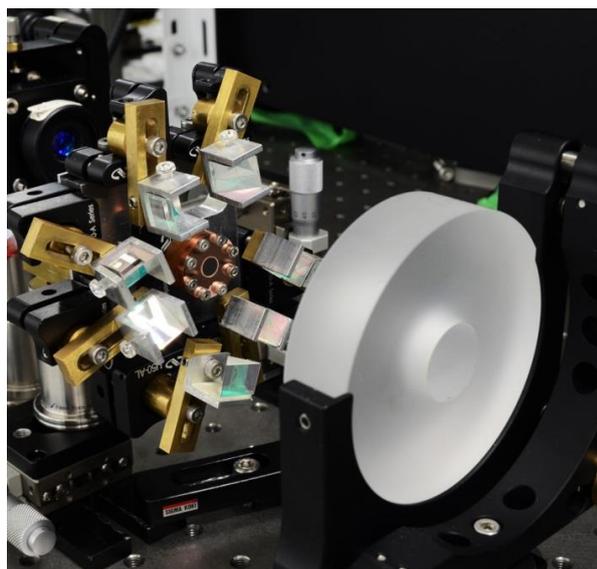


図 2-2 製作したマルチパス励起モジュール写真

2.2. ハンダ付け接合法

利得媒質とヒートシンクの接合に関して、ハンダ付け接合法の確立を行った。図2-3に示すように、接合する thin-disk セラミック表面には誘電体多層膜による無反射コーティング、裏面に励起光を反射させるための高反射コーティングを施してある。その下にコーティングの

保護層として Chromel、ハンダと合金化させるため Au を蒸着した。使用するハンダはコーティング層への熱によるダメージを防ぐため、低融点である必要があり、In-Sn ハンダ(融点約120°C)を使用した。

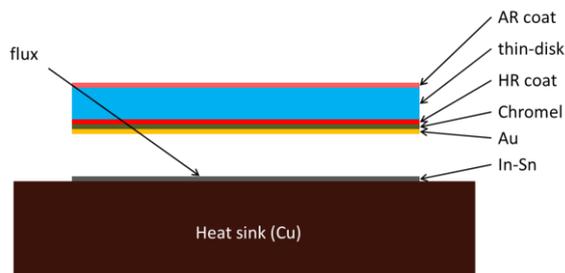


図 2-3 接合前の thin-disk セラミック

図2-4 (a)がハンダ付け接合した thin-disk セラミック写真である。ハンダ層の厚さをマイクロメータで測ると約30 μmであった。

2.3. 接着剤接合法

利得媒質とヒートシンクの接合に関して、接着剤接合法の確立を行った。使用する接着剤は、低粘度、低温で硬化するものを選択している。また、発熱を防ぐため使用波長での吸収がないことも考慮している。thin-disk セラミックはハンダ付け接合に用意したものを使用したため、同じコーティングが施されている。

図2-4 (b)は接着剤接合した thin-disk セラミックの写真である。接着剤層の厚さはマイクロメータでは測れなかったが、滴下量から計算で求めたところ約300 nmであった。

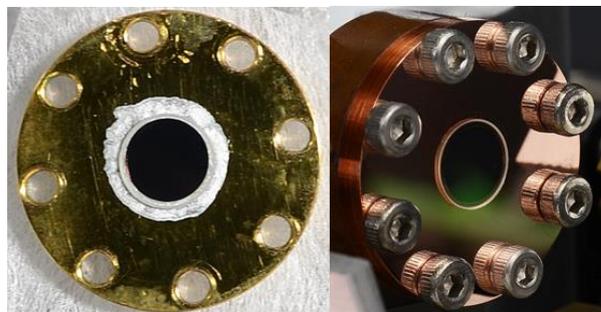


図 2-4 (a) ハンダ付け接合 (b) 接着剤接合

3. 実験

3.1. CW 発振実験

図 3-1 に実験配置図を示す。利得媒質には直径 $6.3\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、厚さ $300\text{ }\mu\text{m} \pm 10\text{ }\mu\text{m}$ (接着剤接合は $250\text{ }\mu\text{m} \pm 10\text{ }\mu\text{m}$)、3 at.% $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを使用した。In-Sn ハンダまたは接着剤で無酸素銅製ヒートシンクに接合し、16 パスマルチパス励起モジュールに取り付けた。励起光源には、波長 976 nm 、コア径 $200\text{ }\mu\text{m}$ のファイバー結合型の VBG ロックレーザーダイオード(以下、LD)を用い、 $f=10\text{ mm}$ のレンズと $f=75\text{ mm}$ の放物面鏡で、ディスク上においてビーム径 1.5 mm に集光した。曲率 500 mm 、透過率の異なる 2 つの凹面出力透過鏡(OC)を用いて、直線共振器を構築した。

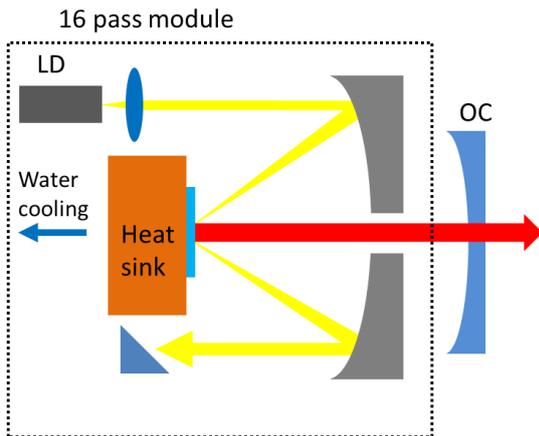


図 3-1 実験配置図

3.2. thin-disk セラミックの温度上昇評価

ハンダ付け接合、接着剤接合した thin-disk セラミックを励起した時の、励起スポットの温度変化をサーモグラフィカメラで測定した。使用したサーモグラフィカメラは FLIR SC655® (FLIR 社)である。

実験配置図を図 3-2 に示す。マルチパス励起モジュールの斜め方向約 20 cm の距離にサーモグラフィカメラを設置して測定した。

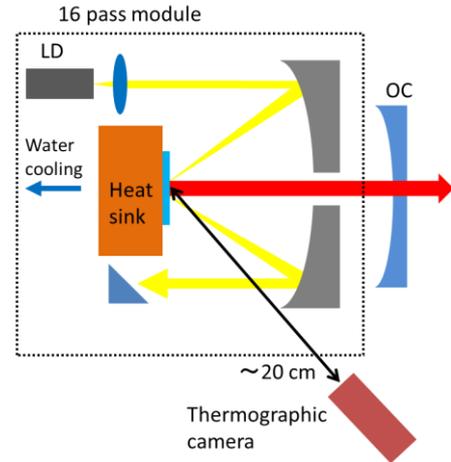


図 3-2 温度上昇測定の実験配置図

4. 結果

4.1. ハンダ付け接合 thin-disk セラミックの CW 発振実験

図 4-1 に CW 発振実験の結果を示す。出力透過鏡の透過率 3%、5% の 2 つについて示している。出力透過鏡の透過率 3% のとき、最大出力 45.1 W 、スロープ効率 53%、光・光変換効率 45.1%、 $M^2=6.2$ である。出力透過鏡の透過率 5% のとき、最大出力 42.3 W 、スロープ効率 49%、光・光変換効率 42.3%、 $M^2=4.3$ である。

2 つの出力透過鏡を比べて透過率 3% のときの方が高出力であった要因として M^2 の違いが考えられる。 M^2 が大きいほうがマルチモード発振となり、励起しているスポットを十分に使えたため、出力も大きかったと考えられる。励起密度は 4.4 kW/cm^2 であるが、thin-disk の破壊は起こっていない。

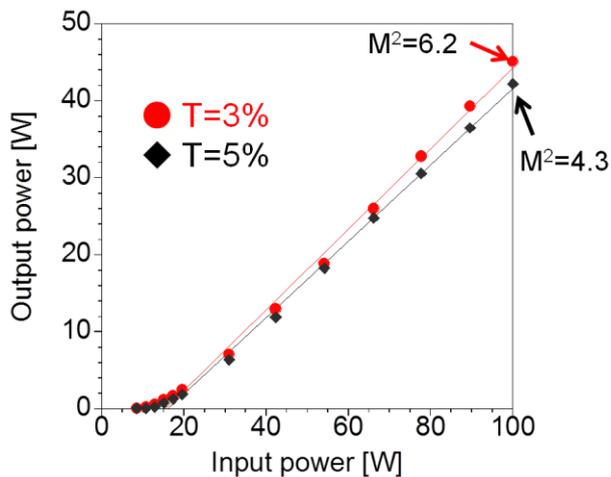


図 4-1 入出力特性

図 4-2 は出力透過鏡の透過率 3%の時の、共振器長依存性である。共振器長 250 mm のとき、最大出力 34.3 W、 $M^2=3.2$ 。共振器長 350 mm のとき、最大出力 45.1 W、 $M^2=7.6$ 。共振器長 450 mm のとき、最大出力 44.4 W、 $M^2=6.2$ である。このときの M^2 を比べると、共振器長 250 mm の時が最小で、共振器長 350 mm のときが最大である。 M^2 が大きいということは、最も多くのモードが発振しているため共振器長 350 mm が出力最大であったと考えられる。

図 4-3 に共振器長 350 mm の時の、レーザー光のビームプロファイルを示す。 M^2 が大きいため、多くのモードが重なり合っていると考えられる。周りの青枠は検出素子によるものである。

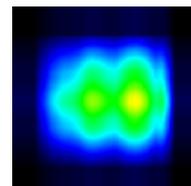


図 4-3 ビームプロファイル

4.2. 接着剤接合 thin-disk セラミックの CW 発振実験

接着剤接合した thin-disk セラミックで CW レーザー発振を行う際に、励起光源とした LD の出力が低下する問題が発生した。

図 4-4 に出力の変化を示す。以前は最大出力 120 W であったのに対し、出力低下後は最大 80 W にまで落ちている。この出力低下の原因として、LD 内部のオプティクス調整が悪くなってしまったことが考えられる。実験中、諸事情により、LD を設置している光学定盤を移動させる必要があった。その際の振動で LD 内部のオプティクスがずれてしまったのではないかとと思われる。

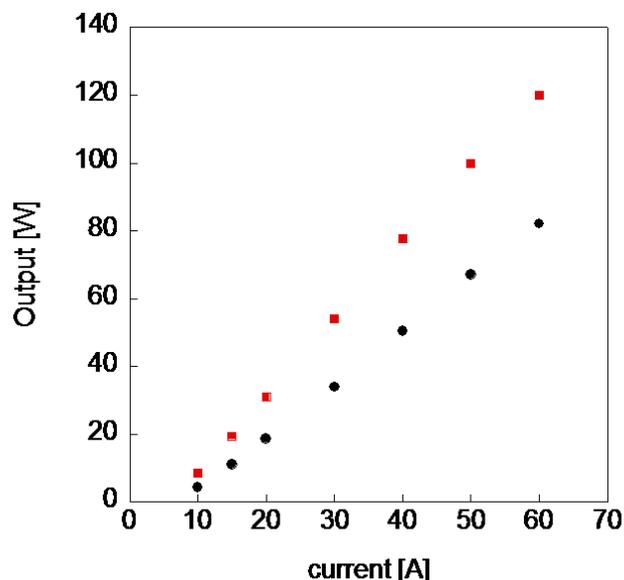


図 4-4 VBG ロック LD の出力低下

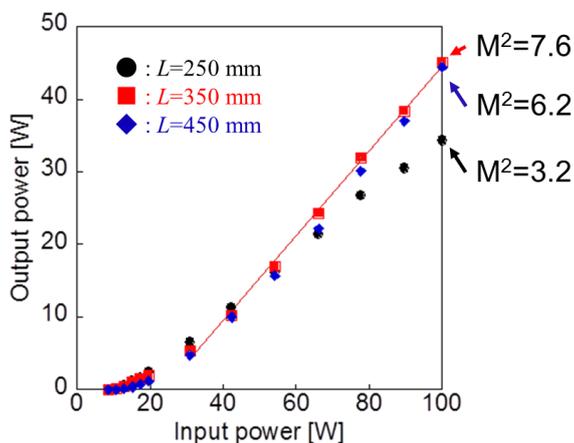


図 4-2 入出力特性

図 4-5 に入出力特性を示す。共振器長を変えて測定したが、出力はほぼ同じであった。共振器長 250 mm の時、最大出力 34.5 W、スロープ

効率 57.1%、光-光変換効率 42.1%、 $M^2=8.7$ を達成した。励起密度は 3.6 kW/cm^2 にもなるが、出力の不安定性は見られないため、現在は励起光の出力でレーザー出力が制限されている。この時のレーザー光のビームプロファイルが図 4-6 である。 M^2 が大きいため多くのモードが重なり合っている。周りの青枠は検出器素子の影響で見えている。

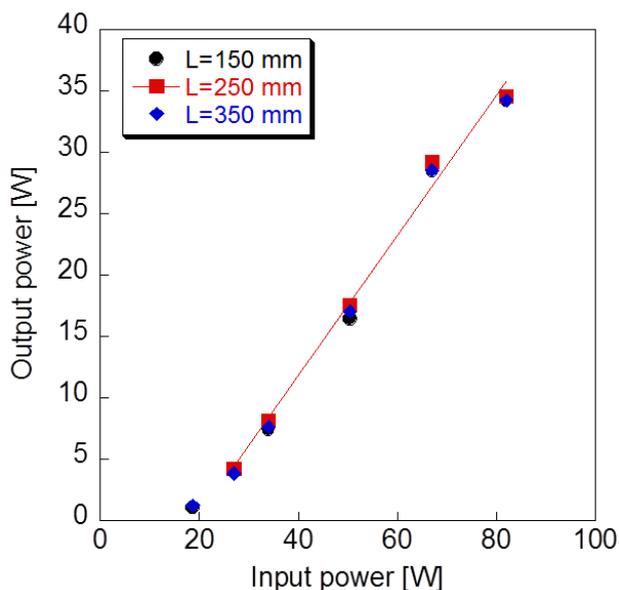


図 4-5 入出力特性

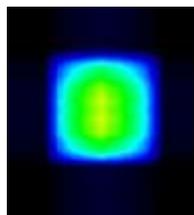


図 4-6 ビームプロファイル

4.3. thin-disk セラミックの温度上昇評価

図 4-7 にサーモグラフィカメラで取得した、励起中の thin-disk セラミックの画像である。thin-disk セラミック中心部が温度上昇している様子がわかる。

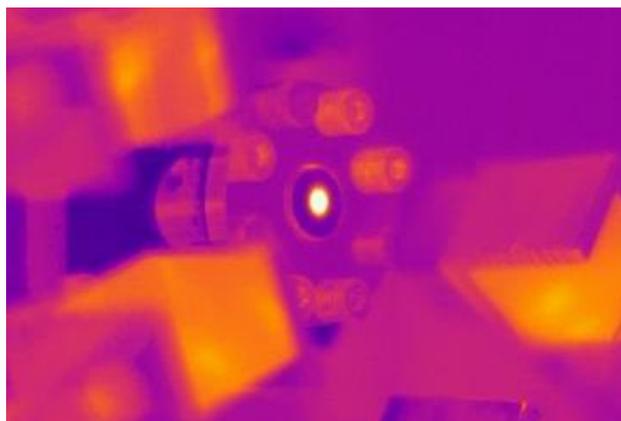


図 4-7 thin-disk セラミックのサーモグラフィ画像

図 4-8 に LD の出力に対する温度変化を示す。ただし、LD の出力がさらに低下したため、最大 64 W 励起となっている。ハンダ付け接合した thin-disk セラミックは 64 W 励起時に 62.3°C まで温度が上昇した。接着剤接合した thin-disk セラミックは 54.8°C まで温度が上昇した。

thin-disk セラミックの厚さや接合層の厚さが違うため、それぞれの熱抵抗で考えることにする。熱抵抗 R は材料の厚み d [m] と熱伝導率 κ [W/mK] から、

$$R = \frac{d}{\kappa} \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$$

で求めることができる。

ハンダ付け接合の場合、thin-disk セラミックと In-Sn ハンダの熱伝導率から熱抵抗を求めると、 $2.2 \times 10^{-5} [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ となる。

接着剤接合の場合、接着剤の熱伝導率がわからないため、熱伝導接着剤の熱伝導率を参考に、それらよりも小さいと仮定し 1 W/mK とする。そこから thin-disk セラミックと接着剤の熱抵抗を求めると、 $1.8 \times 10^{-5} [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ となる。

これらの計算は、接合層の厚さが正確に求められていないため、おおよその値であると捉えている。熱抵抗を比べると、接着剤接合の方が小さいため温度上昇が緩やかであったと考える

ことも可能かもしれない。しかし、接着剤の熱伝導率や接合層の厚さなど不確定なパラメータが多く、断定することはできていない。この測定に関してはまだ検証を始めたばかりであるため、これから詳細な評価を行っていく。

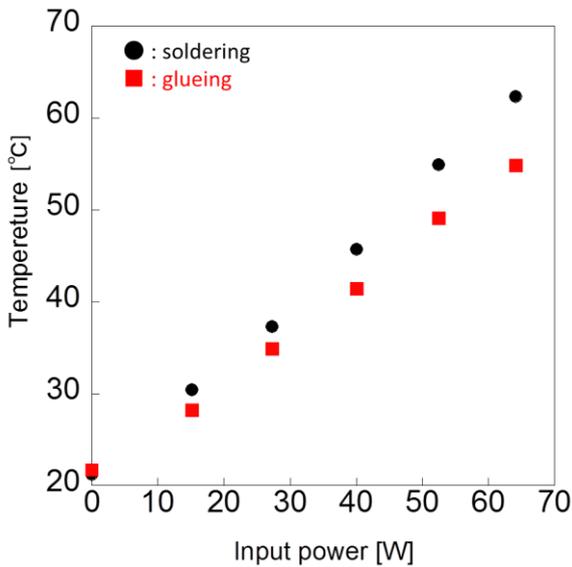


図 4-8 励起スポット上での thin-disk セラミックの温度変化

5. まとめ

本研究では、利得媒質に Yb³⁺ 添加 Lu₂O₃ セラミックを用い、熱伝導率測定、接合方法の確立、CW レーザー発振を行った。

フラッシュ法を用いて、3 at.%Yb³⁺:Lu₂O₃ thin-disk セラミックの熱伝導率を測定した。熱伝導率 14 W/mK と Yb³⁺ イオン添加時にも高い値を維持していた。これは単結晶のそれよりも高い値となっている。

thin-disk の接合に関して、我々独自の 2 種類の接合方法の確立を行った。ハンダ付け接合では接合層の厚さ約 30 μm の薄さで thin-disk セラミックの接合を行うことができた。接着剤接合では接合層の厚さ約 1 μm 以下の薄さで接合することができた。

CW レーザー発振では 2 種類の接合方法で接合した試料について行った。

ハンダ付け接合の場合、出力透過鏡の透過率

3%、100 W 励起で出力 45.1 W、スロープ効率 58.6%、光・光変換効率 45.1%、M²=7.6 のレーザー発振を得た。

接着剤接合の場合、出力透過率 3%、82 W 励起で出力 34.5 W、スロープ効率 57.1%、光・光変換効率 42.1%、M²=8.7 のレーザー発振を得た。

どちらの接合法の場合でも thin-disk の破壊や、出力の不安定性などは一切確認されなかった。そのため、この独自の接合法は十分に有効な方法であると考えられる。

今後は、新たな高出力 LD を使用し、CW レーザー発振を行う予定である。また、thin-disk セラミックにエタロン防止の角度をつけて、超短パルス発振を行っていく。

本研究では 300 μm、250 μm の thin-disk セラミックを用いたが、より薄い厚さ 200 μm 以下のセラミックもいくつか準備している。これらのセラミックに関しては、16 パスの自作モジュールでは十分な吸収が得られないため、24 パスの励起モジュールの光学系を設計、開発を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Tokurakawa, et. al., "Diode-pumped sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb³⁺:Sc₂O₃ ceramic laser," *Optics Letters*, **32**, 3382 (2007).
- [2] M. Tokurakawa, et. al., "Continuous wave and mode-locked Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic thin disk laser," *Optics Express*, **20**, 10847 (2012).
- [3] V. Peters, et. al., "Growth of high-melting sesquioxides by the heat exchanger method," *Journal of Crystal Growth*, **237-239**, 879 (2002).