



Title	レーザー核融合炉用Nd : ガラスレーザードライバーの開発に関する研究
Author(s)	松井, 宏記
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/41439">https://hdl.handle.net/11094/41439</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> 大阪大学の博士論文について

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	まつ い ひろ 記
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	第 1 4 6 4 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 11 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当
	工学研究科電子情報エネルギー工学専攻
学 位 論 文 名	レーザー核融合炉用 Nd : ガラスレーザードライバーの開発に関する研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 中井 貞雄
	(副査) 教 授 権田 俊一 教 授 井澤 靖和 教 授 西川 雅弘 教 授 堀池 寛 教 授 飯田 敏行 教 授 三間 圭興 教 授 西原 功修

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、レーザー核融合炉用 Nd : ガラスレーザードライバーの開発に向けて、全く新しいコンセプトである半導体レーザー (LD) 励起ジグザグスラブ型水冷方式によるレーザードライバーについて、技術的可能性の検討、実現に向けての研究課題の抽出、それらの研究課題に対する要素的研究を行った結果についてまとめたものであり、7 章より構成されている。

第 1 章は緒論であり、レーザー核融合炉の実現へ向け炉用レーザードライバー開発の重要性について述べ、本研究の意義と目的を明らかにしている。

第 2 章では、レーザー核融合炉用 LD 励起固体レーザードライバーの実現へ向け、冷却能力の観点からスラブ型水冷却方式が炉用ドライバーとして適したコンセプトであることを定量的に示している。また、レーザー核融合炉「光陽」の仕様 (出力 4 MJ, 繰り返し率 12 Hz, 波長 351 nm, 総合効率 10% 以上) に基づき、LD 励起 Nd : ガラス (HAP-4) スラブ水冷型レーザードライバーの概念設計を新たに行い、技術的実現性を十分に有することを明らかにするとともに、実現へ向けガラスの耐水性 (第 5 章)、熱解析 (第 6 章) の研究開発課題を明らかにしている。

第 3 章では、レーザードライバーの概念設計において設定される技術仕様の妥当性を明らかにするため、出力 10 J、繰り返し率 10 Hz の LD 励起固体レーザーの工学設計を完成させ、LD 開発 (第 4 章)、レーザーガラス評価 (第 5 章) の主要課題を示している。

第 4 章では、LD 励起固体レーザードライバーに必要な高出力 LD の開発を行い、その動作特性について測定を行っている。励起強度、波長幅がレーザードライバーの概念設計の仕様 (励起強度: 2.5 kW/cm<sup>2</sup> 以上、中心波長: 803 ± 1 nm、波長幅: 3 nm 以下 (半値全幅)) を満たしていることを実証し、0.2 J/cm<sup>2</sup> 以上の蓄積エネルギー密度と 96% 以上の吸収効率の達成が可能であることを明らかにしている。

第 5 章では、Nd : ガラスの性能評価を行い、ガラスを保持・固定する際の応力による波面歪みは波長 1053 nm で 1/6 波長以下に抑えられることを実測し、耐水性については純水中では 2 カ月間全くヤケ (Stain) が発生しないことを散乱光測定で明らかにしている。

第 6 章では、高繰り返し時に問題となるレーザー媒質内での熱効果について新たに開発した熱効果解析コードで解析を行っている。スラブの励起長を最適化することでスラブ厚み方向の熱収差を波長 1053 nm で 1/10 波長程度にできることを明らかにしている。

## 論文審査の結果の要旨

最近レーザー核融合研究は著しく進展し、1986年に大阪大学において1億度の高温と10兆個の中性子発生を達成し、1989年には固体密度の1000倍の爆縮に成功した。大阪大学におけるこれらの成果に基づき、米国ローレンスリバモア国立研究所におけるレーザー出力1.8MJのNational Ignition Facility (NIF) の建設設計画（2003年完成）をはじめ、各国で核融合点火、燃焼を目標とする動きが活発になった。このような状況の中、レーザー核融合研究は炉の実現に向けて具体的構想に取り掛かるべき段階に達したと考えられる。炉を構想する上での最重要課題は炉用レーザードライバーの開発の見通しである。半導体レーザー (Laser Diode, LD) 励起技術を導入したLD励起固体レーザードライバーは炉用レーザードライバーとして必要な10%以上の総合効率、10Hz以上の高繰り返し動作が可能であり、将来的炉用ドライバーとして期待されている。

本論文は、産業への応用も視点に入れ、且つ将来のレーザー核融合炉用ドライバーの基礎的データーを取得するために行なった、レーザー核融合炉用のLD励起 Nd : ガラスレーザードライバーの開発研究をまとめたものであり、主な成果を要約すると次の通りである。

- (1) LD励起 Nd : ガラス (HAP-4) スラブ水冷却方式による核融合用レーザードライバーの概念設計を行い、技術的実現性を評価し、更に今後の研究課題について明らかにしている。
  - (a) 従来から設計がなされているディスク型ガス冷却とは全く異なる、ジグザグスラブ型水冷却方式を新たに採用した核融合用レーザードライバーの概念設計を行っている。この方式により冷却能力が大幅に向上する（熱伝達率で約10倍、波面歪みで約1/35）ことを定量的に示し、炉用ドライバーとして適したコンセプトであることを明らかにしている。
  - (b) レーザー材料の選択では、Nd系、Yb系のレーザー材料18種類の中から、適当な誘導放出断面積 ( $2.0 \sim 6.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) を持ち、熱ショックパラメータの高い HAP-4 が最適なレーザー材料であることを明らかにしている。
  - (c) 概念設計の結果、レーザー核融合炉用ドライバーは、10kJ (351nm)  $\times$  12Hz のドライバーモジュール400台で構成され、総合効率9.0～12.4%となることを示している。以上から、LD励起 Nd : ガラス (HAP-4) スラブ水冷却方式による核融合用レーザードライバーが設計可能で技術的実現性が十分に高いことを示している。
  - (d) 概念設計による検討結果を基に、LD励起 Nd : ガラス (HAP-4) スラブ水冷却方式による核融合用レーザードライバーの実現へ向けての研究開発課題は (i) 水冷却によるレーザーガラスの耐水性、(ii) ジグザグスラブ固体レーザーにおける熱効果解析、(iii) ビーム整形技術であることを明らかにしている。
- (2) 炉用レーザードライバー開発の第一歩である、(1)の概念設計 (ジグザグスラブ型水冷方式の Nd : レーザーガラス (HAP-4) を增幅媒質とする LD励起固体レーザー) の妥当性を実証するため、LD励起10Jx10Hz ジグザグスラブガラスレーザーシステムの工学設計を行い、以下の結果を得ている。
  - (a) 10J (1053nm)  $\times$  10Hz レーザーシステムについて LDの励起強度 ( $2.5 \text{ kW/cm}^2$ )  $\cdot$  Nd : ガラススラブの厚み (20mm)  $\cdot$  Nd : ガラススラブの長さ (523mm) を保存することによって、10kJ (351nm)  $\times$  10Hz ドライバーモジュールに対し、効率・熱収支・熱効果・熱耐力・システム性能を実証することができることを示している。
  - (b) 動作特性として、LDの励起時間  $340 \mu \text{ s}$  のときに、蓄積エネルギー密度  $0.28 \text{ J/cm}^2$ 、小信号利得11が達成され、出力エネルギー10Jが達成可能であると予測される。また10Jx10Hz動作時での効率の予測を行った結果、現状では電気-光変換効率5-6%，光-光変換効率で12-16%が、将来的には電気-光変換効率10-12%，光-光変換効率で19%が期待できることを示している。
- (3) レーザー核融合用の高出力半導体レーザーとしてピークパワー密度、デューティーサイクル、発振波長に対する仕様を満たすパルス駆動高出力2次元LDを新たに開発し、その動作特性と熱解析、発熱による発光効率の低減を中心に検討を行っている。

- (a) レーザー核融合炉用レーザードライバーに用いる励起用高出力100 kWLDを開発し、その動作特性の測定を行った。結果を表1にまとめている。

表1 高出力100kWLDの動作特性測定結果

		ドライバー仕様	測定値
ピークパワー強度		2.5kW/cm <sup>2</sup>	2.75kW/cm <sup>2</sup>
デューティサイクル		0.2%	0.2%
波長	中心波長	803±1nm	803nm
	波長幅（半値全幅）	3nm以下	3nm
効率		55%以上	42%

ピークパワー密度、デューティーサイクル、波長特性に対しては十分仕様を満たしていることを実証している。この結果、0.2 J/cm<sup>2</sup>以上の蓄積エネルギー密度と96%以上の吸収効率が達成可能であることを示している。

- (b) 100kWLDの表面温度をサーモビューアー測定した結果、LD表面温度はおよそ25°Cとなり、簡易計算の結果や熱流体コードによる計算結果と良く一致したことから正常な冷却が成されているものと考えられる。
- (c) LD内の温度と発光効率との関係について検討を行い、効率の改善について考察を行っている。発振閾値電流  $I_{th}$  の改善、LDの等価抵抗Rの改善によりLDの電気・光変換効率として55%以上が達成可能であることを示している。
- (4) 10Jx10Hz レーザーシステムで用いる523 x 120 x 20mmの大きさのHAP-4ガラスを新たに製作し、レーザーガラスの (i) 特性評価、(ii) 透過波面評価を行い、また (iii) レーザーガラスの耐水性評価を行うことで、Nd:ガラス (HAP-4ガラス) を用いたジグザグスラブ型水冷却方式によるレーザー核融合炉用ドライバーの技術的可能性について検討を行っている。
- (a) 特性評価
- 523 x 120 x 20mmもの大型のHAP-4ガラスの分析と評価によりレーザーグレードとしての仕様（白金のインクルージョン、泡、不純物、脈理）を十分満たしており、レーザー核融合炉用HAP-4ガラスが技術的に製作可能であることを実証している。
- (b) 透過波面評価
- 大型ガラススラブ (523 x 120 x 20mm) HAP-4ガラスを保持・固定した状態でガラススラブの表面研磨精度と保持、固定の際発生する応力による波面歪みを評価し波長  $\lambda = 1053\text{nm}$  で波面歪み量は  $\lambda/6$  以下であり、可変形鏡を導入することにより補正が可能な量であることを定量的に明らかにしている。
- (c) 耐水性評価
- HAP-4ガラスの耐水性を評価するため、表面の散乱光測定と表面の顕微鏡観測を行った結果、2カ月間では全くヤケ (stain) は生じないことを実験的に示している。
- (5) 高出力・高繰り返しLD励起ジグザグスラブ固体レーザーにおける熱効果の理論的解析を行う為、3次元熱効果解析コードの開発を行い、熱効果の予測とその制御に関して検討を行っている。得られた結果は以下の通りである。
- (a) 高出力・高繰り返しLD励起ジグザグスラブ固体レーザーにおける熱効果、特にジグザグスラブ内で発生する熱収差に着目し、その解析を行うため「3次元構造解析プログラム (MARC)」と「ジグザグレイトレースコード」による熱収差計算コードを新たに開発している。

(b) ジグザグスラブ内での熱複屈折効果を解析するために、解析式を使ってデポラリゼーション比（入射した直線偏光の強度とそれに垂直な方向の直線偏光の強度との比）の予測を行っている。デポラリゼーション比のビーム入出射面全面で平均した値は5%程度にも達することを明らかにしている。しかし、デポラリゼーションの大部分がスラブエッジ部分で発生し、実質ビームが通過するサンプナン領域においては1%以下となることを示している。これはスラブ内サンプナン領域において、発生する応力の軸方向がスラブの長さ・幅方向にあり、入射する直線偏光の軸と一致するため、複屈折が生じないことに起因するものであることを明らかにしている。また概念設計でのレーザーシステムでは、レーザー光が45°のファラデーローテータを往復することで90°旋回されることにより、この複屈折による損失は補償されると考えられる。

以上により、LD励起Nd:ガラス(HAP-4)スラブ水冷型レーザードライバーは技術的実現性を十分有しております、その研究開発課題に対して要素的に実証を行った結果、レーザー核融合炉の実現へ向けての十分な見通しが得られている。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。