



Title	レーザー核融合炉用ドライバーに向けたキロジュール級半導体レーザー励起固体レーザーとその応用に関する研究
Author(s)	関根, 尊史
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69676
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (関根 尊史)

論文題名

レーザー核融合炉用ドライバに向けたキロジュール級半導体レーザー励起固体レーザーとその応用に関する研究

論文内容の要旨

本論文は、著者が大阪大学エネルギー学研究センターにて2003年6月から2008年9月までの約5年間に亘って行ってきた、半導体レーザー (LD: Laser diode) 励起による固体レーザー (DPSSL: Diode-pumped solid-state laser) の要素技術である波面補正技術、波長変換技術およびレーザー増幅技術に関する研究と、その研究を進展させた高出力レーザーの応用に関する研究を基に、キロジュール級のエネルギーを繰り返し出力するレーザーとその応用技術についてまとめたものである。

水素などの軽い原子核同士が融合することで発生するエネルギーを利用する核融合発電は、資源が偏在せずかつ実質的に無尽蔵であることから平和で安全な次世代のエネルギー源として期待されている。レーザー核融合は、巨大な光エネルギーを有するレーザーパルスをお小さな燃料ペレットに照射して核融合を発生させる方式であり、今後の研究進展には、LDを励起源とした繰り返し動作が可能なキロジュール級のレーザーの実現が期待される。著者は、キロジュール級のDPSSLの実現に向けた課題となる、波面補正技術、レーザー増幅技術および波長変換技術とレーザー応用の研究開発を行った。本論文は、緒論と結論を含む全7章と謝辞および業績目録から構成されている。

第1章は緒論で、将来のエネルギー源としてレーザー核融合発電の必要性を示し、レーザー核融合発電の実現において繰り返し動作可能なキロジュール級DPSSLが担う物理的および経済的な観点からの重要性を説き本研究の意義を明らかにした。

第2章では、レーザー核融合炉用ドライバの要求仕様を示し、キロジュール級DPSSLの設計に必要な技術の解説と実現のための研究課題の明示し本研究の目的を示した。

第3章では、レーザー光の波面を補正する技術として、合成石英に微小な凹凸形状を加工した位相共役板の開発についてまとめた。試作した位相共役板は、予め設計した形状に対し約60nm (RMS) の精度で形状が再現されていると評価され、実験によりレーザー結晶内部に発生した残留波面歪みを約60%に軽減することに成功した。大型の位相共役板によりキロジュール級DPSSLの波面を高い空間分解能で補正可能であることを明らかにした。

第4章では、高繰り返しかつ高エネルギーレーザーの研究として、LD励起ジグザグスラブ型Nd:ガラスレーザーシステムの開発についてまとめた。ヒーターを用いたNd:ガラスレーザー増幅器の波面制御技術および誘導ブリュアン散乱位相共役鏡を導入したシステム開発により、21.3J×10Hzの基本波出力を達成した。また、本レーザーシステムの8年間の運用状況をまとめ、励起用LDモジュールの長期的な実用性を明らかにした。

第5章では、レーザー光の波長を変換する技術として、大型のCsLiB₆O₁₀ (CLBO) 非線形結晶 (40 mm×40 mm) を用いた第2高調波発生の研究についてまとめた。実験により12.5 Jの第2高調波出力にて71.5%の波長変換効率を実証した。非線形結晶の温度分布とレーザー光の時間波形を考慮したシミュレーションコードを開発し、CLBOを用いることで10 kWレーザー (1 kJ×10Hz) の第2高調波発生にて70%以上の高い変換効率が実現可能であることを明らかにした。

第6章では、高出力LD励起Nd:ガラスレーザーを励起源とした20TW出力の全固体Ti:サファイア超高強度レーザーによるD-D核融合反応中性子の連続かつ高頻度発生についてまとめた。繰り返し率0.1-1Hzの連続100回のD-D核融合発生実験

により、98%の確率で平均 4×10^4 /ショットの中性子発生を実証し、高出力レーザーによる中性子源の実現可能性を示した。

第7章は結論で、得られた成果をまとめ、本論文の総括を行った。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (関 根 尊 史)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	(教授) 乗松孝好
	副 査	(教授) 猿倉信彦
	副 査	(准教授) 間 久直

論文審査の結果の要旨

本論文は将来のレーザー核融合用高平均出力レーザーに用いられる要素技術の開発を、パイプロダクトとしての産業応用を考慮しながらまとめた論文である。将来の炉用レーザーは出力 MJ 級で 10Hz の繰り返し、10%の電気からレーザーへの変換効率が必要とされている。必要な効率を達成するためには半導体レーザー（以下 LD）励起システムは必須で、発熱に伴う集光性能の劣化を防ぐ技術、プラズマ加熱効率を高めるための波長変換技術は重要である。最終ゴールを実現するためにはパルス当たり数 J のシステム 10J 級、100J 級のシステムを実証し、実験炉用としては kJ 級のシステムを実証する必要がある。申請者の目標は産業応用も可能な 10J/パルス、繰り返し 10Hz の堅牢なシステムを実証することである。

第 1 章、2 章は序章であって、本論文の位置づけと開発目標を述べている。

第 3 章では、申請者が独自に発案したレーザー光の波面を補正する技術について述べられている。合成石英に微小な凹凸形状を加工した位相共役板の開発についてまとめている。試作した位相共役板でレーザー結晶内部に発生した残留波面歪みを約 60%に軽減することに成功した。この手法は従来の方法の $1/10 \sim 1/100$ のコストで導入可能で、発熱による波面歪みは再現性があるため、運転モードを変えてもあらかじめ製作しておいた位相共役板を交換するだけで補正が可能であることを示している。大型化は容易であり、レーザー核融合炉に必要なキロジュール級レーザーの波面を高い空間分解能で補正可能であることを明らかにした。

第 4 章では、高繰り返しかつ高エネルギーレーザーの研究として、LD 励起ジグザグスラブ型 Nd:ガラスレーザーシステムの開発についてまとめた。ヒーターを用いた Nd:ガラスレーザー増幅器の波面制御技術および誘導ブリリュアン散乱位相共役鏡を導入したシステム開発により、21.3J×10Hz の基本波出力を達成するとともに、励起用 LD モジュールの長期的な実用性を明らかにした。この成果は、高繰り返し動作が困難であったガラスレーザーにおいて、これまで 5J×10Hz であった出力を当時の世界最高出力となる 20J×10Hz 以上に拡大した。ジグザグスラブ型レーザー増幅器のエネルギー拡大則および長期安定性を実証し、高平均出力キロジュール級レーザーシステムの実現可能性を示した。

第 5 章では、レーザー光の波長を変換する技術として大型の CsLiB₆O₁₀ (CLBO) 非線形結晶(40 mm×40 mm)を用いた第 2 高調波発生の研究についてまとめた。非線形結晶の温度分布とレーザー光の時間波形を考慮したシミュレーションコードを開発し、CLBO を用いることで 10 kW レーザー(1 kJ×10Hz)の第 2 高調波発生にて 70%以上の高い変換効率が実現可能であることを明らかにした。この成果は現在主に用いられている KH₂PO₄ (KDP: Potassium Dihydrogen Phosphate) が基本波光の吸収率が高く、高繰り返し動作のレーザーに使用した場合、発熱に伴う位相整合のミスマッチが生じ、波長変換効率が著しく低下してしまう問題を解決する成果であり、本研究により、有効非線形係数が高く、温度許容幅の広く LBO と比較し大口径化が容易という特徴を有する CLBO を用いた、高平均出力キロジュール級レ

レーザーの波長変換技術の実現可能性を明らかにした。更にスペクトル許容幅が 5.6nm と、LBO より 7 倍以上広い CLBO は、核融合点火用のレーザーとなるフェムト秒広帯域レーザーの高効率な波長変換も可能であり、レーザー核融合研究の発展に大きく貢献することが期待できる。

第 6 章では、上記技術を導入して開発された Nd:ガラスレーザーを励起源とした 20TW 出力の全固体 Ti:サファイア超高強度レーザー開発と、それを利用した D-D 核融合反応中性子の連続かつ高頻度発生についてまとめた。繰り返し率 0.1-1Hz の連続 100 回の D-D 核融合発生実験により、98%の確率で平均 4×10^4 /ショットの中性子発生を実証した。

この開発研究で得られた実験およびシミュレーション結果は、将来の電気-光変換効率 10%、平均出力 10 kW レーザーは将来のレーザー核融合炉用レーザーが十分建設可能であることを示している。また、加工やレーザー除染への応用、廃炉処置など産業界にも貢献できるものである。このレーザーを光源とした 20TW のレーザーは数十 MeV のエネルギーを持つ電子の加速、電子-陽電子対の生成、イオン加速などの学術研究に応用可能であり、安定した核融合中性子の発生は可搬式の中性子を光源とした撮像法によるコンクリートを使った社会インフラの劣化検査などにも応用可能な技術である。

以上のように、本論文は LD 励起全固体レーザーが学術のみならず産業界の発展にも貢献しうることを示している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。