

青緑色半導体レーザー励起チタンサファイアレーザーの開発

西岡研究室 戸崎隆道

1. はじめに

チタンサファイアレーザーは利得帯域幅が広い[1]ため、波長可変レーザー、超短パルスレーザーとして使われている。また、上準位寿命がおよそ $3.2 \mu\text{s}$ であり、これは Nd 系の $1/100$ 、Yb 系の $1/1000$ に相当し短いので、発振するためには強い励起を行う必要がある。チタンサファイアレーザーには緑色の励起光が必要[2]であり、一般には Nd 系のレーザーの第 2 高調波を用いて励起されているが、これでは効率が上がらず、コストもかかるため半導体レーザーで直接励起する方法が検討されている[3]。吸収帯がおよそ $400\sim 600 \text{ nm}$ にあるのでこの範囲内の半導体レーザーで励起することが可能である。そこで本研究では、半導体レーザーで直接励起するチタンサファイアレーザーの開発を目指した。

2. 半導体レーザー励起チタンサファイアレーザー

半導体レーザーで励起するため、日亜化学の資料を全て集め、そのレーザーの出力や効率を調べた。GaN 半導体レーザーは青色波長で最も高い効率が得られ、緑色波長では低下する。製品では波長 395 nm の効率は 26% で、波長 512 nm の効率は 6% である。一方、チタンサファイアレーザーの効率は、緑色励起で高く、青色励起では低くなる[4]。総合効率を評価するとその中間の波長である青緑色領域で最も高い効率が得られる可能性があり、実際に設計をして評価を行った。

3. レーザーシステムの構成

実際の構成図を次の図及び写真に示す。

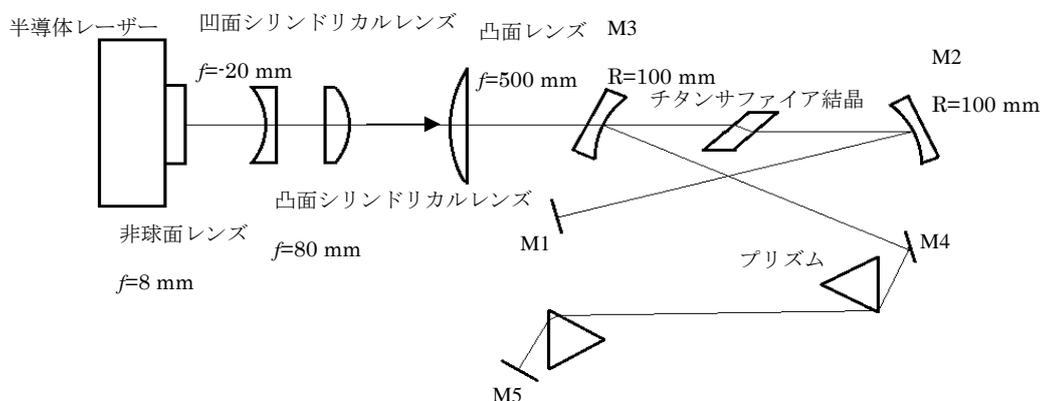


図 1. レーザーシステムの構成

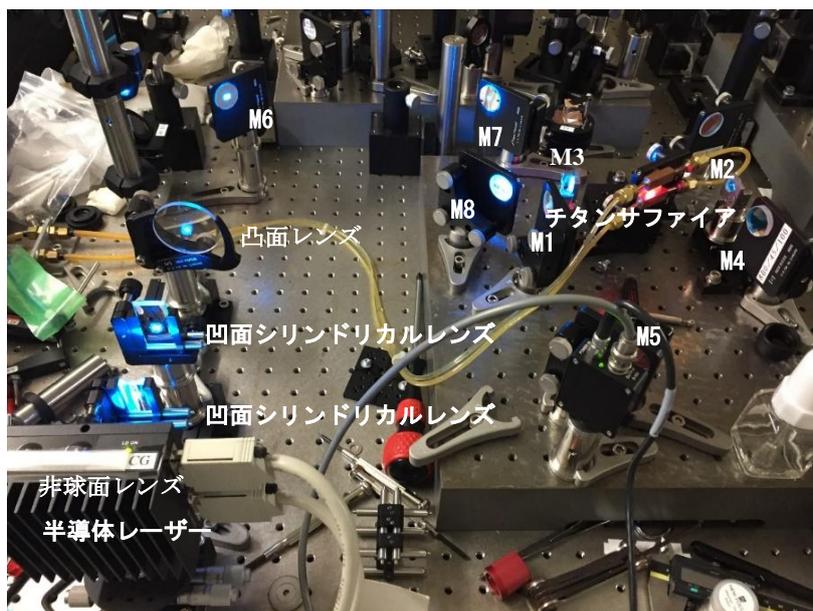


図 2. 実際のレーザーシステムの構成

チタンサファイアレーザーはこのような X 型の共振器構成をしている。このときここでは非点収差が生じるためビームは結晶の中で横方向が広がる。一方、使用したブロードエリア半導体レーザーはスクリーン縦方向は回折限界で光が出てくるから光が十分結晶中で絞れるが、横方向はマルチモードで回折限界の倍数で言うと 7 倍くらいの光が出てくる。光が結晶の中に十分集光出来るように横方向に対しては円筒レンズを用いてビーム径を広げて結晶中では集光径ができるだけ小さくなるように工夫をした光学系になっている。

まず、半導体レーザーの詳しい集光径の様子を図に示す。

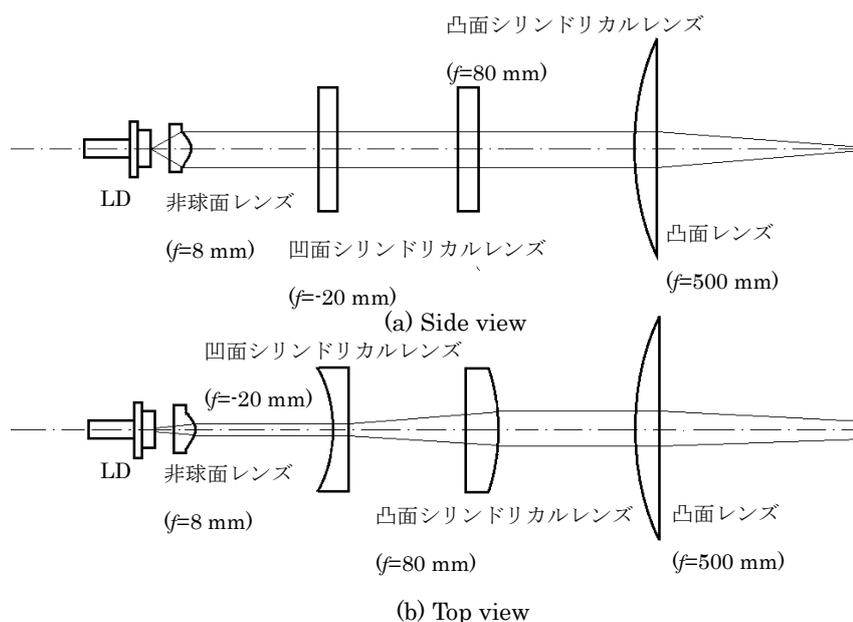


図 3. 半導体レーザーの集光レンズの配置

半導体レーザーから見ると上図は回折限界の光で $1\ \mu\text{m}$ から出てくる光で、すぐに広がってシリンドリカルレンズをそのまま通過して集光される。一方、下図はブロードエリアなので光が広がらなくて上図に比べると細い光が出てくるので、この凹レンズで広げて、凸レンズで平行にして集光する。凸レンズを通過した後のビーム径がほぼ縦横等しくなるような集光光学系を作製した。

次に設計した共振器の図及び共振器内での位置に対するビーム径を示す。また、ビームが細くなり過ぎると結晶の中で光は狭くなるが、実際には励起光とのモード整合が取れなくなるので、結晶の中心と端面でほぼ同じくらいコンフォーカル長 $\sqrt{2}$ 倍くらいになるような位置を計算し共振器長を設計した。

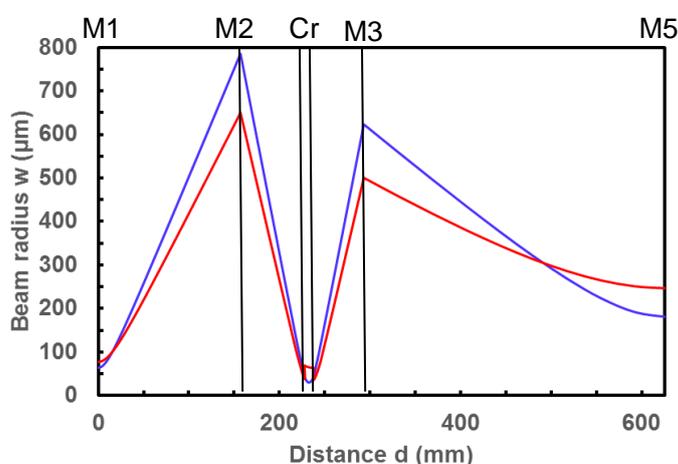


図 4. 共振器内のビーム径の変化

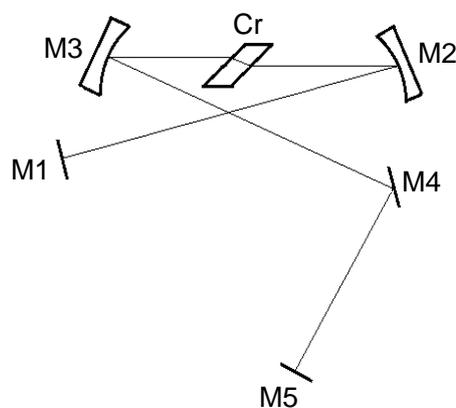


図 5. レーザー共振器構成

共振器は真ん中に結晶がありそれを挟んで凹面鏡があり、両端にエンドミラーが配置されている。また、サジタル側は共振器の縦方向を示しており、タンジェンシャル側は横方向のビーム径を示している。実際には結晶で非点収差が生じている[5]から、横方向のビーム径が大きくなり、今回はおよそ 2:1 の比率になっているが、半導体レーザーの横方向の集光径も大きいのでその方向を合わせる形でモード整合を取るようにした。

4. まとめ

GaN 半導体レーザーは青色波長で効率が最も高くなる。一方、チタンサファイアレーザーの効率は、緑色励起で高く、青色励起では低くなる。その総合効率を評価するとその中間の波長である青緑色領域で最も高い効率が得られる可能性があるのでこの波長を用いたチタンサファイアレーザーを目指した。結晶中での集光径と集光ミラー面上でのモード径が励起光と一致するようにパラメータを最適化し、その設計を基に実際に波長 $473\ \text{nm}$ 、出力 $1\ \text{W}$ のブロードエリア GaN 半導体レーザー励起のチタンサファイアレーザーを構築した。

参考文献

1. P. F. Moulton: “Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃” , J. Opt. Soc. Am. B 3, 125 (1986).
2. A. J. Alfrey: “Modeling of Longitudinally Pumped CW Ti:Sapphire Laser Oscillators” , IEEE J. Quantum Electron. 25, pp.760-766 (1989).
3. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto: “InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes” , Jpn. J. Appl. Phys. 35, pp.L74-L76 (1996).
4. Peter W. Roth, Alexander J. Maclean, David Burns, and Alan J. Kemp: “Directly diode-laser-pumped Ti:sapphire laser” , Opt. Lett. 34, 21, pp.3334-3336 (2009).
5. 平等拓範, 鈴木剛, 小林喬郎: “M² 因子を用いた LD 端面励起効率固体レーザーの設計法” , レーザー研究, **24**, pp.360-366 (1996).