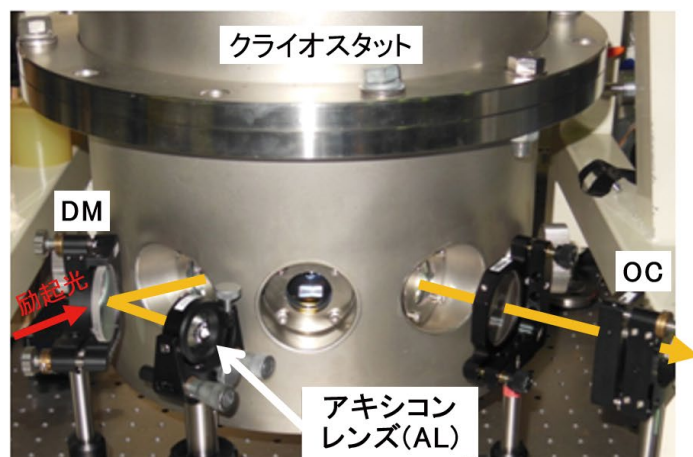
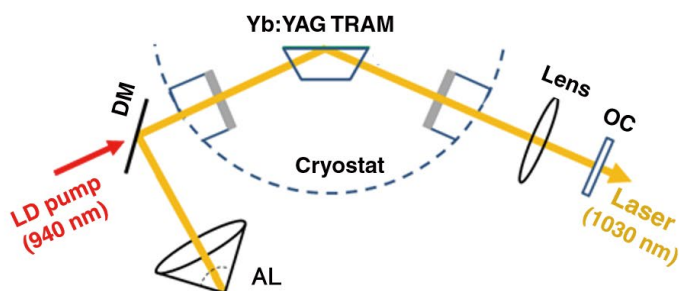


CONTENTS

- アキシコンレトロリフレクター共振器のレーザー特性
- レーザー学会学術講演会
- 第39回年次大会 参加報告
- 主な学会等報告予定

LASER CROSS

ISSN 0914-9805



【表紙図】(左)アキシコンレトロリフレクター共振器の光学配置図、(右)実験時の写真

アキシコンレトロリフレクター共振器のレーザー特性

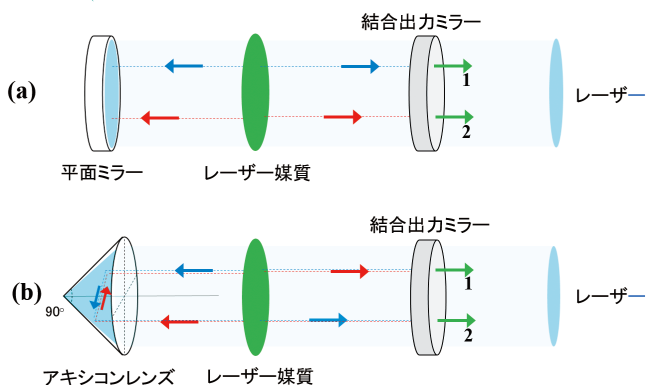
レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン

■はじめに

標準的なレーザー共振器は平面ミラーと球面ミラーとの組み合わせにより構成されるが、ラゲールガウスモードやラジアル/タンジェンシャル偏光のような特定のモードや偏光を必要とする用途や、固体レーザーにおける熱誘起波面歪みを低減する目的においては、これとは異なる構成の共振器が用いられる。例えばコーナーキューブや金属製のW型反射アキシコン(Waxicons)は、それぞれ固体レーザー [1]、ガスレーザー [2]の反射ミラーに用いられている。

コーナーキューブレトロリフレクター(再起反射器)(CCR)およびアキシコン(円錐)レンズ(AL)は共通した興味深い反射・偏光特性を持つ光学素子である。その一つは、素子へ入射するコリメート光が入射方向と逆平行に反射される、という特性である(CCRでは入

射ビームの方向は任意、ALでは頂角が 90° で入射方向は円錐の底面に対して垂直であることが条件)。もう一つは反射ビームがコヒーレントな性質を保持する、という特性である。図1に、平面ミラーおよびALを共振器に用いた場合のレーザー発振の概略図を示す。励起スポットが大きく、マルチモードで発振すると仮定すると、図1(a)の平面ミラーで構成された基本的な共振器(ファブリーペロー共振器)の場合、例えば図中の1および2の領域ではそれぞれで発振し出力の位相は同期しない。一方、ALを反射ミラーに用いた場合(図1(b))、AL内で再帰反射が起こることから、相互注入(mutual injection)により1および2での発振は位相同期し、共振器内で受動的(passive)なコヒーレントビーム結合(CBC)が起こる可能性がある。CCRを用いた場合に同様の過程が起こることはすでに予測されており、



【図1】(a) ファブリーペロー共振器、(b) アキシコンレトロリフレクター共振器でのレーザー発振

■アキシコンレトロリフレクター

ALは多くの場合、石英やBK-7などのガラス材料から製造される。ALにおいて入射ビームを再帰反射させるには大きく二つの方法がある。一つ目は反射面を金属または誘電体基板でコートする方法であるが、高出力レーザーへの応用に際しては励起の増大による熱劣化やコーティングの破損などが懸念される。もう一つは全反射(Total Internal Reflection)過程を利用する手法であり、この場合反射面の研磨によりコーティングのない状態でもALをレトロリフレクター(Axicon Retroreflector, AR)として利用することが可能になる。本研究では、コーティングのない頂角90°の熔融石英製AL(図2)を用いた。底面に対して垂直入射したビームのAL内反射面に対する入射角は45°となり、熔融石英の臨界角は43.6°であるため全反射が起こる。さらに、AL内で2回全反射したビームはALの底面に対し垂直に出射するため、再帰反射も可能となる(図1(b))。

■AR共振器のレーザー特性

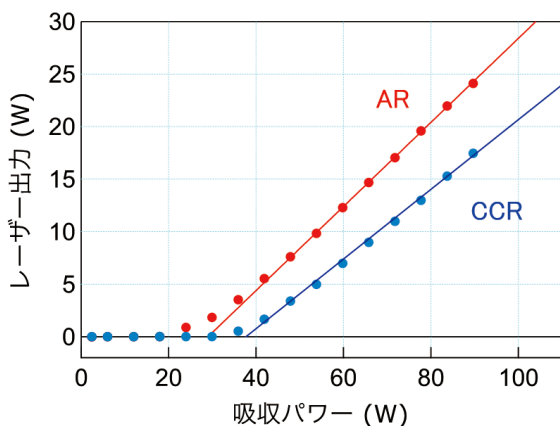
表紙図に実験配置図および実験時の写真を示す。レーザー媒質には9.8 at%、層厚0.2 mmのYb:YAG TRAM(Total Reflection Active Mirror)を用い、発振特性を向上させるためクライオスタットで液体窒素温度(-196 °C)まで冷却した。励起LD(<200 W)をTRAMに入射するため、励起光の光路に励起波長(940 nm)を透過、レーザー波長(1030 nm)を反射するダイクロミックミラー(DM)を配置して共振器を構成した。TRAM上での励起ビーム径は約1.8 mmφとした。結合出力ミラー(OC)は反射率80%のものを使用した。図3に、AR共振器の吸収パワーに対するレーザー出力

CCRの光学特性に関する理論研究[3]や、CCRを用いた光共振器のレーザー特性の研究[4,5]も報告されている。

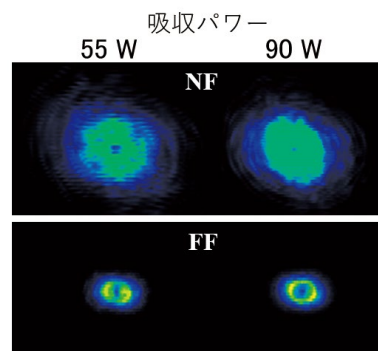
この観点から当研究所では、CCRおよびALを光共振器に用いた新たな高品質レーザーの開発を目標に研究を進めてきた。ALの利用により、ラジアル偏光またはタンジェンシャル偏光を有するビームを生成することも可能であると考えられる。これまでに、CCRおよびALにおける再帰反射ビームのp-、s-偏光成分の強度分布の計測や、フレネル方程式に基づくケース計算を行ってきた(Laser Cross No.353, 2017 Aug.)。また、CCRを用いた光共振器を構成してレーザー特性の観測を行い、計算結果との比較から出力レーザーに高い受動的CBC効果が見られることを明らかにした(Laser Cross No.365, 2018 Aug.)。本稿では、ALをレトロリフレクターとして用いた光共振器を構成し、発振しきい値、スロープ効率、近視野(NF)および遠視野(FF)の光強度分布(ビームプロファイル)の計測により、そのレーザー特性について検討した結果を報告する。



【図2】アキシコンレンズ



【図3】AR(赤)、CCR(青)共振器の出力特性



【図4】吸収パワー 55W、90W時のAR共振器出力の近視野(NF)、遠視野(FF)像

(図中赤点)を示す。比較のため、前回報告したCCR共振器の出力(図中青点)も併せて示した。AR共振器出力の発振しきい値およびスロープ効率はそれぞれ約1.15 kW/cm²、0.4であり、CCR共振器(しきい値1.5 kW/cm²、スロープ効率0.33)出力と比べ高い特性が得られた。特性変化の要因は明確ではないが、それぞれの光学素子の非反射部(ALの先端部、CCRの3つの反射面が交差する稜線部)での光学損失が異なるためであると考えられる。図4に、吸収パワー 55 Wおよび90 Wでのレーザー出力の近視野(NF)および遠視野(FF)のビームプロファイルを示す。ALの頂点が非反射であるため中心部は発振せず出力はドーナツ状となる。NF像とFF像を比較すると、CCR共振器で見られたような顕著なプロファイルの変化は見られなかった。この結果は以前報告した、AR共振器の固有モードがラジアル偏光成分を有するという計算予測と合致するが、より詳細な議論を行うためにはビームの位相やビーム品質(M²)などの計測が必要である。また吸収パワーの増加によるNF、FF像の変化も顕著には観測されていない。この結果は、AR共振器では発振モード選択が起こり、レーザー媒質の熱的効果によるモード

変化(マルチモード動作)を抑制できる可能性を示唆するものである。今回の実験は吸収パワーが小さく、また低温条件であるため効果は明確ではないが、今後励起(吸収パワー)の増加、熱効果がより顕著な室温条件での発振実験などによりこの効果についてさらに検証する予定である。

謝辞：

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号JP16K04986)の支援の下行われた。

参考文献

- [1] J. Wu, Y.-L. Ju, T.-Yu. Dai, W. Liu, B.-Q. Yao, and Y.-Z. Wang: Chin. Phys. Lett., **32** (7), 074207: 1–3 (2015).
- [2] B. Singh, V. V. Subramanyam, S. L. Daultabad, and A. Chakraborty: Rev. of Sci. Instr., **81**, 073110: 1–4 (2010).
- [3] W. He, Y. Fu, Y. Zheng, L. Zhang, J. Wang, Z. Liu, and J. Zheng: Applied Optics, **52** (19), 4527–4535 (2013).
- [4] V. K. Orlov, Ya. Z. Virnik, S. P. Vorotilin, V. B. Gerasimov, Yu. A. Kalinin, and A. Ya. Sagalovich: Sov. J. Quantum Electron., **8**, 799–800 (1978).
- [5] Y. Cheng, X. Liu, C. Tan, X. Chen, M. Zhu, C. Mi, and B. Sun: Applied Optics, **53** (15), 3267–3272 (2014).

REPORT

レーザー学会学術講演会 第39回年次大会 参加報告

■レーザー学会年次大会が東海大学で開催

2019年1月12日～14日、東海大学高輪キャンパス(東京都港区)において、レーザー学会学術講演会第39回年次大会(主催：一般社団法人レーザー学会、共催：東海大学)が開催された。レーザー学会は「レーザー」に特化した日本で唯一かつ世界的にもユニークな学会である。毎年開催されている学術講演会年次大会では、レーザー物理・化学、高強度・高エネルギーレーザー応用、レーザー計測など9部門に分かれた一般講演のほか、一般にも公開される特別講演、主に産業応用を睨んで展開されている最新の光技術について議論するシンポジウムが設置されており、近年ではポスター発

レーザー計測研究チーム 倉橋慎理

表も行われている。本稿では、報告者が参加したレーザー計測部門での講演の中から、二つの招待講演の内容を報告する。

■自己遅延検波に基づく

高速・高分解能ブリルアンOTDR

沖電気工業株式会社の小泉氏より、光ファイバーセンサーを用いた歪み、温度測定の高速度化、高分解能化に関する講演が行われた。一般的に測定の高速度化と高分解能化を両立させることは難しいとされているが、小泉氏らは自己遅延技術を用いたBOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)方式によりこれらを同時に達成した。BOTDR方式において、被測定

ファイバーのひずみや温度の測定はブリルアン散乱光の周波数シフト量をスペクトルアナライザにより算出することで行われる。通常の測定では周波数掃引を行う必要があり、これが測定時間を決定する要因の一つとなる。小泉氏らは、ブリルアン散乱光をヘテロダイン型自己遅延検波することで、測定に必要なブリルアン周波数シフトがビート信号中の位相シフトとして与えられることを明らかとした。この位相シフトは、参照信号と位相比較することで強度信号として抽出可能であることから、周波数掃引が不要となり、測定時間の大幅な短縮を達成した。

BOTDR方式では、空間分解能はパルス幅に依存しており、高分解能化には短パルス化が最も単純である。通常の測定では、パルス幅の狭窄(きょうさく)化に伴いスペクトル幅が増大するため、参照光とブリルアン散乱光とのヘテロダイン検波によって取得したスペクトルのピーク値の判断が困難になり、測定精度の劣化を招いた。提案手法では、ブリルアン散乱光自身を2分岐して干渉させるため、干渉計の遅延時間がブリルアン散乱光のコヒーレンス時間より十分短い場合、ブリルアン散乱光の位相情報は、パルス幅によらず正確に復元されることから、短パルス化による高分解能化が達成された。

自己遅延検波を用いたBOTDRの実験系を構築し、被測定ファイバーに温度変化を与え、それを測定する実験を行った結果、測定時間16 msec相当、空間分解能0.2 mを達成したとのことであった。

■KTN結晶によるレーザー高速走査と応用計測

日本電信電話株式会社の今井氏より、非線形結晶であるKTN結晶を用いたレーザー光の高速走査技術に関する講演が行われた。KTN結晶は $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ を材料としており、組成(TaとNbの比率)と温度によって、強誘電体とも常誘電体ともなり得る特性を有する。強誘電体の相境界温度付近では、巨大な2次の電気光学効果(カー効果)が発現することが確認されており、これと結晶の持つ高い誘電率から光線は屈曲される。この効果を利用することにより、光偏向器としての構造

を単純にすることが可能である。KTN単結晶のブロックの対向する2平面に電極膜を付けたものを基本構造とし、これに電圧を印加することで、内部を伝搬するレーザービームは曲がっていく。結晶表面での屈折の効果しか得られなかった従来のEO光偏向器と比べ、累積効果があるため、結晶を長くすることによって偏向角を増やすことが可能である。偏向角は全角で250 mradまでが観測されており、速度は400 kHzと共振型のガルバノミラーよりも一桁以上高速である。速度は駆動電源の性能と、KTN結晶自体の発熱によって制限される。

彼らは最近、浜松ホトニクス株式会社ら3社の共同でKTN光偏向器と回折格子・半導体光増幅器を組み合わせた波長掃引光源を開発した。連続的な波長掃引を高速に行うことができ、可動部がないため振動に強く、位相安定性が高いという特長がある。講演では、この波長掃引光源の応用として光干渉断層撮像法、高精度厚さ計、測量システムが紹介された。

光干渉断層撮像装置は眼科を中心に医療現場への普及が進んでいる。眼球の動きへの追従など高速動作への要求に対し、KTN光偏向器の高速性が対応する形となっている。厚さ測定では、KTN波長掃引光源の出力を2本のビームに分け、測定対象と参照板に照射し、測定対象の表裏面の干渉信号から光路長差を得て、参照板との比較で厚さを算出する。ミリメートルオーダー厚のシリコンウェハにおいて、精度が $0.1 \mu\text{m}$ での測定が可能であるとのことであった。測量システムはユニット数台で構成され、各ユニットには角度掃引のための回折格子が備えられている。前方のユニットに設置されたレトロリフレクターの方位角とユニットまでの距離を計測し、測量を行う。水道管などの小口径トンネルの平面図の測量が可能で、測量のシフト精度は $\pm 19 \text{ mm}$ であると報告された。

■次回開催予定

今回は2020年1月20日～22日、仙台国際センター(仙台市)での開催が予定されている。

主な学会等報告予定

4月22日(月)～26日(金) OPTICS & PHOTONICS International Congress 2019 (横浜パシフィコ)

ハイク コスロービアン 「Development of kW-class Yb:YAG TRAM CW Laser Oscillator with Direct Jet Impingement Cooling」