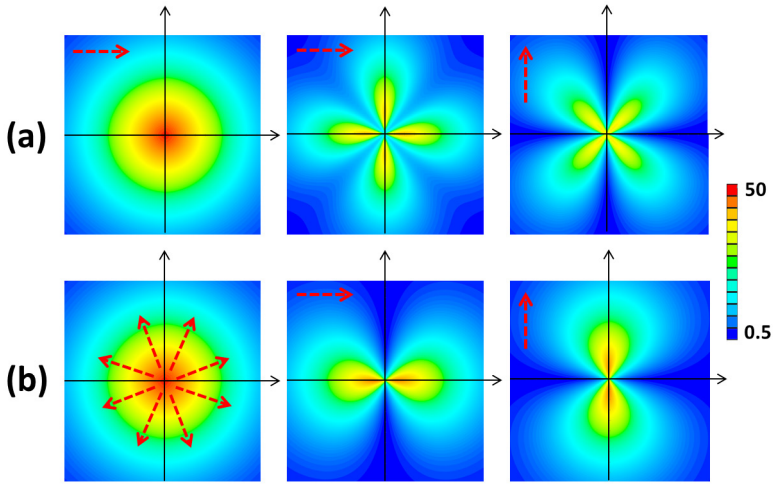
2017, Aug.
No. 353
LASER CROSS
ISSN 0914-9805

CONTENTS

レーザー共振器開発に向けた
アキシコンレンズの反射・偏光特性の研究
研究所創立30周年記念行事を開催
主な学会等報告予定



【表紙図】(a)(左から)アキシコンレンズへの入射光(p-偏光)、反射光のp-およびs-偏光成分、(b)入射光(ラジアル偏光)、反射光のp-およびs-偏光成分の各強度分布の計算結果。図中赤矢印はそれぞれの偏光方向を示す

レーザー共振器開発に向けた アキシコンレンズの反射・偏光特性の研究

レーザープロセス研究チーム　ハイク コスロービアン

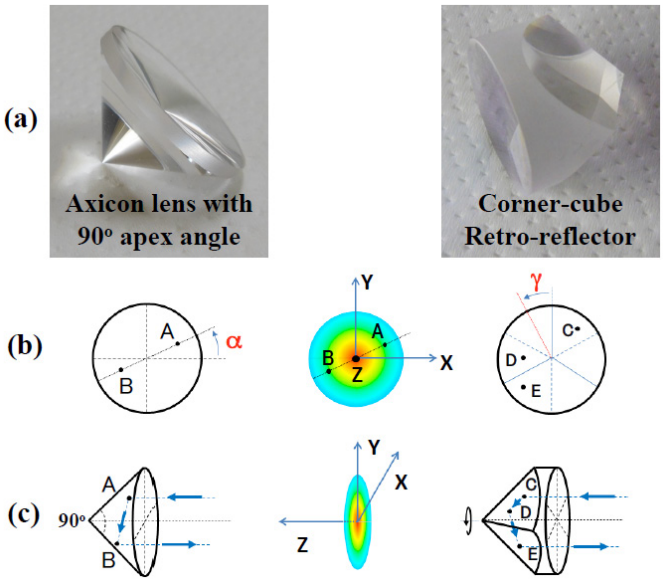
■はじめに

標準的なレーザー共振器のキャビティは平面ミラーと球面ミラーとの組み合わせにより設計、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レーザーモードや偏光を必要とする応用や、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。コーナーキューブレトロリフレクター(再帰反射器)(CCR)とアキシコン(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、反射光が入射光と逆方向へ戻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度で、入射方向は円錐の底面に対して垂直であることが条件)。もう一つの特性は反射ビームがコヒーレントな性質を保持する、というものであり、この特性は共振器内での受動的コヒーレントビーム結合技術にも応用可能である。CCRを用いた共振器に関する研究はすでに行われており、CCRの共振器(全反射ミラー)への利用や、熱誘起によるビーム非点収差のCCRの回転による補償などに関する報告例がある[1)]。これらの光学素子の基本的な偏光・反射特性について検討するため、再帰反射ビームのp-偏光およびs-偏光成分の強度分布の計測実験や、フレネル方程式に基づくケース計算を行ってきた。CCRの特性については理論的な研究も多く報告されていることから、本報告では主にALを用いた研究結果について述べる。

■CCRおよびALにおける全反射過程

N-BK7ガラス製CCR(n=1.507(1030 nm)、臨界角41.57°)および溶融シリカ製AL(n=1.45(1030 nm)、臨界角43.6°)(図1(a))を用いて、計算と実験の両面より、それらの全反射過程について検討した。ガラスなどと大気の境界面におけるp-偏光およびs-偏光の反射はフレネル方程式によって表され、両媒質が透明であ

次ページへつづく▶



【図1】(a)(左)AL、(右)CCRの写真、(b)(左から)AL、入射ガウシアンビーム、CCRのXY-断面図、(c)(b)の3次元表示図と全反射時の光路例

る場合、位相シフトはπまたは0である。一方、全反射の場合、位相シフトは以下の式により与えられる[2)]。

$$\tan(\delta_p/2) = N\sqrt{N^2\sin^2\theta - 1}/\cos\theta \quad (1)$$

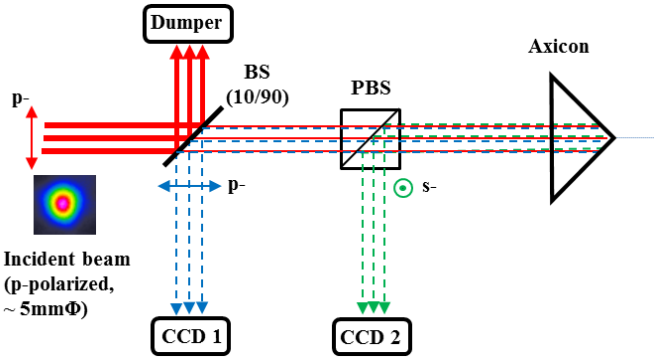
$$\tan(\delta_s/2) = N\sqrt{N^2\sin^2\theta - 1}/(N\cos\theta) \quad (2)$$

δ_p、δ_sはそれぞれの偏光の反射に伴う位相シフト、θは入射角、$N = n_1/n_2$ (>1)は入射および屈折(エバネッセント)媒体の屈折率の比である。

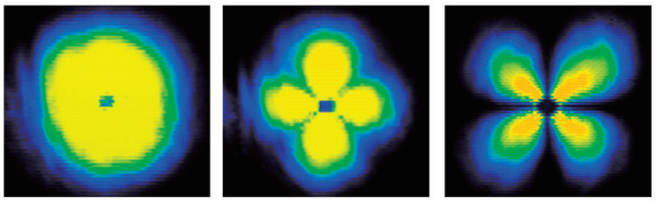
図1(b)、(c)に示すように、CCR、ALとも入射ビームが反射防止コーティングされたベース面に対して垂直に入射した場合、ALの反射(2点)での軸線に対する全反射角は45°となり、CCRの場合には三つの反射面での全反射角はそれぞれ54.74°となる。式(1)、(2)から、CCRではp-偏光およびs-偏光の反射に対し、一回の反射ごとにそれぞれδ_p = 123.78、δ_s = 78.986の位相シフトが生じる。一方溶融シリカ製のALでは、反射ごとにそれぞれδ_p = 49.8、δ_s = 24.9の位相シフトが生じる。興味深いことに、Abelès条件とも呼ばれる$\delta_p = 2\delta_s$の関係は、常にNとは無関係に成立する[3)]。留意すべきは、CCR、ALとも、素子を通過するビームの光学距離はp-、s-偏光電場間の位相シフトに寄与しないという点である。つまり位相シフトは全反射過程のみから生じる。

■反射ビームの強度および位相差分布

種々の偏光を持つビームを入射した際のALからの反射の強度および位相差分布について多くの計算を行ったが、ここでは入射光をp-偏光およびラジアル偏光とした場合の結果について述べる。入射ビームがp-偏光の場合、まずガウス強度分布を持つp-偏光(X軸方向の偏光)がALに向かって(+Z方向)伝播するものと仮定した(図2(c))。入射光は損失なしでALにより反射され、逆方向(-Z方向)に伝播する。反射の偏光による強度変化、および方位角αに対する位相差分布を決定するため、入射ビームの電場を$E_p^{in} = E_0\cos(kz - \omega t + \varphi)$として反射ビームのp-およびs-偏光成分の各電場を計算した。ここでE_0は光電場の振幅、kは波数、ωは角周波数、φは初期位相であり、計算には位相シフト(δ_p、δ_s)および方位角(α)を取り入れた。詳細は割愛するが(ILT2017年報 pp.14-19を参照)、計算は、(1)再帰反射は二つの接線表面上(点A、B)での連続的な全反射により起こる(図2 (b),(c))、(2)直交座標系のユークリッド回転/鏡映変換、(3)Abelès条件($\delta_p = 2\delta_s$)の適用、の三つの条件下で行った。表紙図(a)に、反射ビームのp-偏光、s-偏光成分の強度分布プロファイルの計算結果を示す。同様の手法により、ラジアル偏光を持つ入射ビームに対する反射の偏光による強度変化、方位角αに対する位相差分布の計算も可能である(表紙図(b))。これらの計算から、ALを用いた共振器では、直線偏光ビームは再帰反射後非偏光化(局所的に楕円偏光となる)し、不変ではない(偏光を維持できない)ことがわかった。この結果は、反射時に偏光を維持する(δ_s=0)金属被覆反射面を有するALに対しても有効である。実際にδ_s=0とした条件での計算では、直線偏光は不変ではなく、反射を繰り返すとビームはラジアル偏光に変化する傾向がある。一方ラジアル偏光ビームでは、再帰反射後の偏光は不変(p-、s-偏光成分間の位相差が0)である。つまり、AL共振器の固有モードはラジアル偏光成分を有することを示している。



【図2】反射ビームプロファイル計測実験配置



【図3】反射ビームの各強度分布の観測例（(左)偏光解消時、(中)p-偏光成分、(右)s-偏光成分）

■実験による検証

再帰反射後のビームのp-およびs-偏光成分の強度分布を実験的に計測し、計算値と比較した。実験配置を図2に示す。入射光にはp-偏光、TEM_{00} modeのLDレーザー(直径約5 mm)を用いた。レーザー光は透過率10%のビームスプリッタ(BS)および偏光ビームスプリッタ(PBS)を通過し、再帰反射素子(AL)により反射される。反射光のs-偏光成分はCCD2により観測され、p-偏光成分はBSによりその90%がCCD1で観測される。偏光解消時の反射ビームの強度分布はPBSを光路から除去した後CCD1により観測した。観測例を図3に示す。画像の中央に観測される特異点は、ALの頂点先端での回折によるもので、計算では考慮していない。この点を除くと表紙図(a)と図3は高い類似性を示しており、計算結果が実測値をよく再現することがわかる。このことから、前項で述べた結論は妥当性の高いものであると考えられる。

■まとめと今後

本研究では、新規の全反射素子のレーザー共振器への応用を目指し、コーナーキューブ(CCR)およびアキシコンレンズ(AL)の全反射における偏光特性について理論的、実験的に検討した。その結果、直線偏光の入射ビームは再帰反射後非偏光化し、偏光が保持されないことが明らかとなった。この結果は、CCRおよびALを共振器に応用するためには、再帰反射の偏光特性を十分に考慮することが必要であることを示している。今後、偏光特性に関する理論的研究を行うとともに、実際に全反射素子を用いたYb:YAGレーザー発振実験を行い、実験的な検証をさらに進めていく予定である。

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) V. K. Orlov, Ya. Z. Virnik, Sov. *et al.*, *J. Quantum Electron.*, **8**, 799 (1978).
2) M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics, 7th Edition*, 952 (1999).
3) F. Abelès, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **230**, 1942 (1950).

REPORT

研究所創立30周年記念行事を開催

1987年に創立された当研究所は本年10月に創立30周年を迎えることとなりました。これを記念し、7月21日、平成28年度成果報告会、記念講演会(以上、於千里ライフサイエンスセンター)、ならびに記念祝賀会(於千里阪急ホテル)を開催しました。

【写真1】研究成果報告会の様子

■平成28年度成果報告会

当研究所では、レーザー技術の普及啓発や産業界への広報等を目的に、毎年7月に研究成果報告会を開催しています。今年の成果報告会は創立30周年記念行事の一環として開催し、「光学素子のレーザー耐力評価」や「レーザーによるコンクリートの欠陥検査」など、最新成果の発表を行いました。当日は100名以上のご参加があり、熱心な質問や貴重なご意見を多数いただきました。

■創立30周年記念講演会

記念講演会では150名を越える皆様にご参加いただきました。井澤靖和所長の「レーザー総合技術研究所の30年」と題した、レーザー総研の研究概要や今後の方向性についての講演に続き、森詳介氏(関西経済連合会相談役)から、「関西経済の現状と課題」というテー

【写真2】関経連相談役森詳介氏による記念講演

マで記念講演を賜りました。規模の大きさ、アジアとの結びつきの強さといった関西経済の特徴やリニア中央新幹線開業時期の前倒し、万博誘致等の関西経済連合会の取組について幅広くご紹介いただき、また、技術基盤強化のために産学連携を強めていくことの重要性について示していただきました。

■「泰山賞」贈呈式

記念講演会に先立ち、今年9回目を迎えた「泰山賞」の贈呈式を行いました。以下のお二人に大石富彦理事長から表彰状ならびに副賞を贈呈しました。

【レーザー功績賞】三間圀興氏

レーザー核融合をはじめとするレーザープラズマ科学研究推進への貢献

【レーザー進歩賞】平等拓範氏

固体レーザーの小型化と非線形光学波長変換の先駆的研究

■創立30周年記念祝賀会

記念講演会終了後、記念祝賀会を開催しました。長年にわたりご支援、ご指導をいただいた、歴代の役員、

【写真3】泰山賞贈呈式（左から大石富彦理事長、三間圀興氏、平等拓範氏、井澤靖和所長）

【写真4】祝賀会の様子

【写真5】森英介衆議院議員の祝辞

賛助会員、共同研究員など、学界、産業界から、100名を越える皆様のご出席をいただきました。森英介衆議院議員、兒玉了祐大阪大学レーザー科学研究所長、近藤公伯量子科学技術研究開発機構部長から祝辞をいただきました。その後、レーザー学会加藤義章会長のご発声で乾杯し、約1時間半の歓談後、藤田雅之主席研究員の挨拶で閉会しました。出席者には30周年記念誌が贈られました。

■記念誌「レーザー総研30年の歩み」

30周年を記念して「レーザー総研30年の歩み」を刊行しました。ILTホームページ(http://www.ilt.or.jp)からダウンロードしていただけます。

【写真6】兒玉了祐大阪大学レーザー科学研究所長の祝辞

【写真7】近藤公伯量子科学技術研究開発機構部長の祝辞

【写真8】加藤義章レーザー学会会長の乾杯

主な学会報告

8月31日（木）～9月1日（金）　第35回レーザセンシングシンポジウム（情報通信機構：小金井市）
染川　智弘「海上メタンガスラマンライダーの開発」

9月5日（火）～8日（金）　第78回応用物理学会秋季学術講演会（福岡国際会議場）
ハイク コスロービアン　「コーナーキューブレトロリフレクター共振器のレーザー特性」
李　大治　「Radiation modes in a grating structure with dielectric substrate」
染川　智弘「フェムト秒ダブルパルスLIBSによる信号増強効果のフルーエンス依存性」
谷口　誠治「ゼロフォノンライン励起Yb:YAG TRAMレーザーの発振特性」

発行／公益財団法人レーザー技術総合研究所　編集者代表／谷口誠治　〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4　大阪科学技術センタービル4F TEL(06)6443-6311 FAX(06)6443-6313
掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表・谷口誠治（E-mail:taniguchi@ilt.or.jp）までお願いいたします。