



# 高出力炭酸ガスレーザー用の透過型ZnSe製波長板 (リターダ)

Transparent ZnSe Waveplate (Retarder) for High Power CO<sub>2</sub> Laser

西 寛仁\*  
Hirohito Nishi

岩本 博実  
Hiromi Iwamoto

矢島 國光  
Kunimitsu Yajima

切断、溶接、穴あけ等の様々な用途で活用されているレーザー加工機では、加工特性の改善や加工対象物からの反射光の除去のために、 $\lambda/4$ 波長板 (リターダ) が用いられる。従来は反射型のリターダ (円偏光ミラー) が用いられてきたが、レーザー光の伝送系設計を行う上で、入射光の偏光方位や入射角に制約があった。ZnSe製のプリズム型基板の採用と光学薄膜設計の適正化で、前述の制約のない透過型波長板を開発した。製作したZnSe製波長板の光学特性として、波長9.6 $\mu$ m光に対する透過率及び位相差は、それぞれ 98.0%、87.6°であり、400Wの連続発振型CO<sub>2</sub>レーザーに利用できることを確認した。開発した波長板は、放射性元素であるTh (トリウム) や、RoHS規制対象元素であるCd (カドニウム) を含まないため、様々な分野での活用が期待できる。

Laser processing machines are used in various industrial applications such as cutting, welding, and drilling. To improve their performance and avoid unstable processing caused by reflected laser beam from processed work, a  $\lambda/4$  waveplate (phase retarder) is required. The phase retardation mirrors (circularly-polarized mirrors) have been used conventionally, but there are severe constraints such as a polarization azimuth angle and an angle of incidence of linearly polarized beam in designing beam delivery systems. We have developed a new transparent ZnSe  $\lambda/4$  waveplate by adopting prism shaped substrates and optimized optical coating films free from above constraints. The developed waveplate for 9.6- $\mu$ m laser has a transmittance of 98.0% and phase shift of 87.6 degrees, and the practicability of the 400-W continuous wave CO<sub>2</sub> lasers are confirmed. Moreover, it contains no thorium or cadmium, It is exempt from regulations for radioactivity and RoHS. Our newly developed waveplate is expected to be utilized in various fields.

キーワード：炭酸ガスレーザー、ZnSe、波長板、リターダ

## 1. 緒 言

レーザー加工は、金属やセラミックス等の種々の材料に対する切断、溶接、穴あけといった多様な加工を高精度で行えるので、様々な分野で実用化されている。近年、レーザー加工機に用いられる発振器の高出力化と、ビーム品質の向上に伴い、光学部品によるレーザー光の高精度な制御が求められるようになってきている。

当社は、CO<sub>2</sub>レーザーの高出力化に対し、Thフリーコート低吸収率レンズを開発・市場投入を行い、多くの加工機メーカーやユーザーから高評価を得ている<sup>(1),(2)</sup>。

今回、低吸収率を維持しながら、レーザー光伝送系の小型化が可能な、ZnSe (セレン化亜鉛) 基板を用いたCO<sub>2</sub>レーザー用透過型位相遅延素子 (波長板) を開発した<sup>(3)</sup>。

透過型波長板は、従来の反射型の円偏光ミラー<sup>(4)</sup>では不可欠な入射光の偏光方位や折り返し角度の調整が不要となり、ビーム伝送系を簡略化できる特長がある。また、CdS (硫化カドニウム) 等の赤外透明結晶を用いた従来の透過型波長板に比べ、吸収率が低いZnSe基板を用いる本件波長板は、高出力レーザーへの適用も可能である。更に、放射性物質であるThやRohs規制対象となるCdを含まないため、関連規制の対象外となる利点がある。

## 2. 偏光制御の必要性と従来技術

### 2-1 偏光と加工特性

一般的にレーザー発振器からの出力光は直線偏光状態となっている。

加工対象物 (ワーク) にレーザー光を照射して切断等の加工を行う際には、必ず図1に示すように、対象物の表面に凹形状の溶融池が生じる。その斜面に対し照射光は斜入射となるため、開口部周辺の位置に応じてs偏光、p偏光の照射部位が生じる。この時、図2に例示するように偏光の方向によって反射率に差異が生じる。そのため、図3に示すように切断

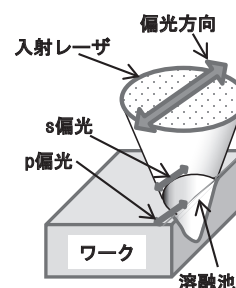


図1 入射レーザー光と偏光状態

加工の方向による加工幅の変化が生じたり、穴あけ加工では楕円穴となったりして加工精度を劣化させる。これを防ぐため、発振器から出た直線偏光レーザー光を円偏光に変換する円偏光ミラーや波長板を、発振器のレーザー射出口の近傍に挿入する。

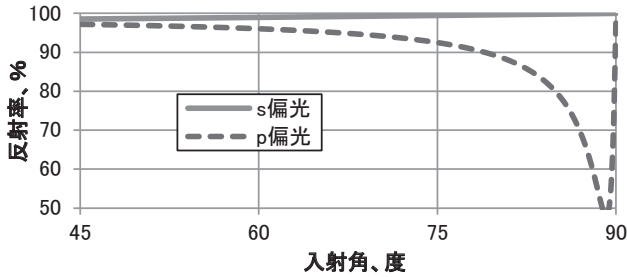


図2 Al表面でのs、p偏光反射率の入射角依存性

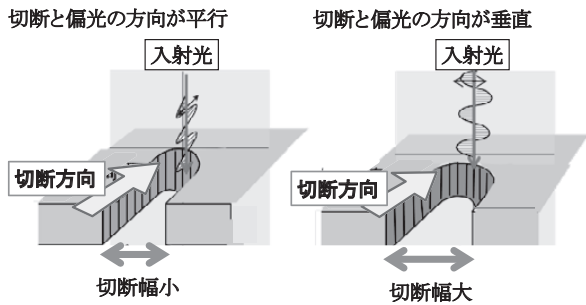


図3 切断加工特性へのレーザー偏光方位の影響

## 2-2 加工対象物からの戻り光の除去

レーザー光に対し反射率が高いワークを加工する場合には、ワークから反射した戻り光が発生する。戻り光がレーザービームの伝送系を逆行して発振器に至ると発振器の破損や発振出力の不安定化に繋がる。そこで、下記及び図4に例示する手順で戻り光の除去が行われる。

①p偏光を透過させs偏光を反射するポラライザにp偏光のレーザー光が入射し透過する。②ポラライザを透過したp偏光は、λ/4位相素子(λ/4波長板または円偏光ミラー)により、90度の位相差が与えられ、円偏光状態に変換されてワークに入射する。③ワークに入射した円偏光の一部は反射して位相差が180°変化した円偏光(逆回り)の戻り光となる。④戻り光は再びλ/4位相素子を通るので、90°の位相差が付与され、s偏光状態となってポラライザに入射する。⑤ポラライザはs偏光を反射するので、ワークからの戻り光は発振器側に戻らず除去される。

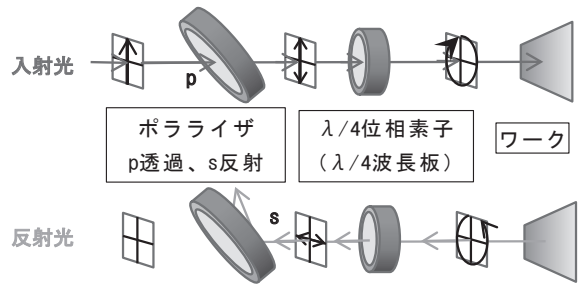


図4 戻り光の除去手段

## 2-3 従来のλ/4位相素子

従来の高出力CO<sub>2</sub>レーザー加工機では、反射型の円偏光ミラーが用いられてきた。円偏光ミラーでは、図5に示すように入射光の偏光方位角θ及び入射角ψを共に45°にする必要がある<sup>(4)</sup>。そのため、発振器からワークまでレーザー光を導く伝送光学系の設計に制約が生じると共に、光学系の光軸調整が煩雑になるという難点があった。

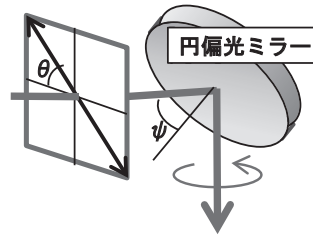


図5 円偏光ミラーと入射光の偏光方位

一方、透過型の波長板では、入射光の偏光方位角θの調整は波長板を光軸回りに回転するだけで行うことができ、伝送光学系の設計や光軸調整が容易になる。透過型波長板では、CdS等の複屈折結晶が用いられてきた。複屈折結晶に直線偏光を入射させると、透過位相差Δは、遅相軸屈折率n<sub>s</sub>、進相軸屈折率n<sub>f</sub>、結晶厚d、及び入射光波長λを用いて、

$$\Delta = 2\pi \cdot (n_s - n_f) \cdot d / \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表され、結晶厚dを制御することで、位相差Δを任意に調節することができる。波長板には0 ≤ Δ < 2π (= 360°) のゼロ次波長板と2π ≤ Δの高次波長板がある。ゼロ次波長板は、波長依存性が低い理想的な波長板だが、結晶厚を数十μm以下にする必要があり製造が困難である。そのため、2枚の複屈折材料を結晶軸が直交するように重ね合わせ、それらの厚み差で位相差を制御する方法が一般的である<sup>(5)</sup>。

既存の透過型CO<sub>2</sub>レーザ用波長板として、CdS等の複屈折結晶を利用したものが知られているが、これらはCO<sub>2</sub>レーザ光の吸収が大きく高出力レーザには使用できないこと、大型の結晶が得られないこと、といった難点がある。

### 3. 透過型波長板の設計と製作

従来技術に対し、伝送光学系を簡略化できる透過型であること、高出力レーザに使用できると共にその一般的なビーム径である30mmφ程度のレーザ光が照射できることを前提条件として波長板の設計、製作を行った。その概要を以下に述べる。

高出力CO<sub>2</sub>レーザ用光学部品に用いられるZnSeは、吸収率が低く理想的な材料であるが、複屈折材料ではないので、そのまま波長板には使用できない。これを解決するため、その表面に光学薄膜を形成して位相差を与えることとした。光学薄膜で位相差を制御するためには、それぞれの偏光状態に応じた光学薄膜透過後の位相差を与えられるように斜入射にしなければならないことが知られている<sup>(6)</sup>。そこで、**図6**に示すような傾斜角 $\alpha$ を持つプリズム形状基板(ウェッジ板)を用いることとした。

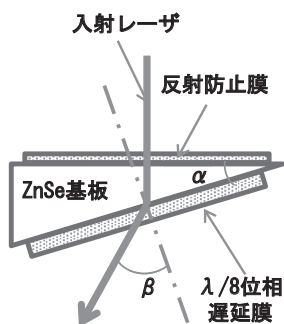


図6 プリズム形状基本素子構造

ZnSe基板の傾斜角 $\alpha$ と出射角 $\beta$ は、基板の屈折率 $n$ を用いたスネルの屈折則から**下式**で求めることができる。

$$n \cdot \sin \alpha = \sin \beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

照射するレーザ光のビーム径、必要なZnSe素材の厚さ、光学薄膜の設計難度を考慮し、出射角 $\beta$ を45°として設計に着手した。

**式(2)**に、9.6 $\mu$ m光に対するZnSeの屈折率 $n=2.409$ 、出射角 $\beta=45^\circ$ を代入すると、傾斜角 $\alpha=17.1^\circ$ が得られる。

この結果に基づき、ピッチ研磨法により、傾斜角17.1°を持つ直径45mmのZnSeウェッジ板2枚を製作した。

ウェッジ板の垂直入射面には低吸収率レンズ<sup>(1)</sup>と同様に

高屈折率膜材料としてZnSeを、低屈折率膜材料としてフッ化物を用いた反射防止膜をイオンアシスト法によって成膜した。傾斜面側へは、反射防止膜と同じ膜材料と方法で、基板内の入射角17.1°、出射角45°で透過位相差45°(= $\lambda/8$ )を与え、かつ反射防止特性を保持するように、市販ソフト(Software Spectra Inc ; TFCalc)を用いて設計した多層膜(14層)を成膜した。

1枚のウェッジ板を透過した時、レーザ光は**図6**に示すように、 $\beta=45^\circ$ で出射する。そこで、同じ光学膜を形成した2枚のウェッジ板を、**図7**に示すようにステンレス製スペーサで形成されるエアギャップを挟んで逆方向に重ねあわせ、外径65mm、厚18mmのアルミニウム製マウントで固定した。マウントの開口部直径は40mmとした。

入射光はエアギャップ厚による僅かな軸ズレを生じるが、ほぼ入射光と同軸に出射できる。また、1枚のウェッジ板を透過する際に、光学薄膜の効果により45°の位相差が与えられるため、2枚のウェッジ板を透過することで、透過位相差は90°となる。

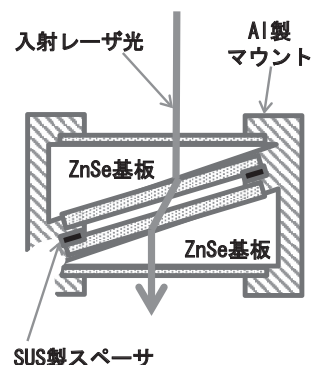


図7 波長板の概略構造

### 4. 製作結果

#### 4-1 赤外透過率及び吸収率

**図7**に示した波長板につき、赤外分光光度計(日本分光株式会社; IR-700)で測定した透過スペクトルを**図8**に示す。対象波長9.6 $\mu$ mでの透過率として98.0%が得られた。対象波長近傍では、スペクトルの設計値と実測値が一致しており、設計値通りの光学膜が形成されたと推定できる。長波長側で設計値と実測値の乖離が大きくなっているのは、エアギャップ部分での出射、入射角を一定の45°として設計していること、ZnSe基板が厚いことによる吸収増加の2点が原因であると推定される。

9.6 $\mu$ mでの透過率が98.0%であること、4面ある光学薄膜面での膜設計に基づく反射率設計値の合計が1.3%であることを考え合わせると、波長板としての吸収率は1%以下と推算される。

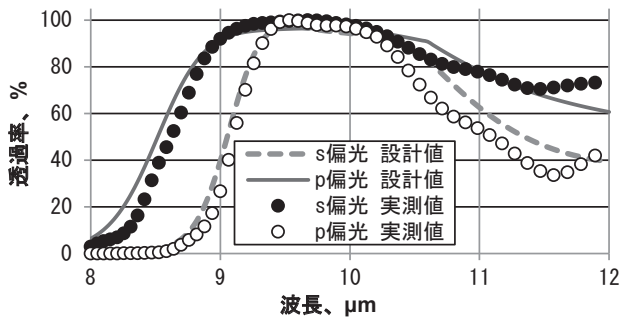


図8 製作した波長板の透過スペクトル

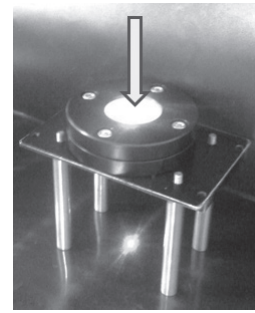


写真1 波長板の可視光透過状況

#### 4-2 透過位相差

上述のユニットの透過位相差スペクトルを赤外エリプソメータ (J. A. Woollam Co.; IR-VASE) で測定した結果を図9に示す。対象波長9.6μmでの透過位相差として87.6°が得られた。透過位相差においても、実測スペクトルは設計値をよく再現している。

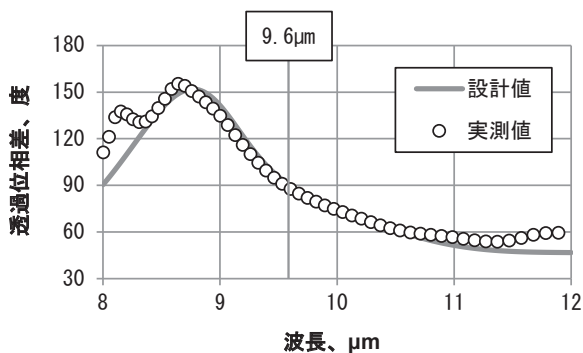


図9 作製した波長板の透過位相差スペクトル

#### 4-3 その他特性

製作した波長板について、出力400Wの連続発振型CO<sub>2</sub>レーザ(波長10.6μm)光を照射した。温度上昇は生じたが、波長板には損傷などの問題が生じないことを確認した。

波長板を構成する光学薄膜は可視光透過率の制御を設計に織り込んでいないが、写真1に示すように波長535nmの可視光を約40%透過している。これは、実使用時に可視ガイド光を用いた光学系の調整を容易にできる利点がある。

製作した波長板は実際のレーザ加工機に組み込んで実装評価され、継続して所要の特性を発揮することを確認している。

## 5. 結 言

ZnSe基板を用いた高出力レーザ用波長板を製作した。その特性を表1にまとめる。いずれの特性も実用に耐えるレベルであることを確認できた。

表1 製作したλ/4波長板の性能及び寸法

項目	目標値	実測値
透過率	96%以上	98.0%
透過位相差	90±10°	87.6°
照射可能レーザ出力	400W	400W以上
マウント寸法	—	直径 65mm 厚 18mm (開口径 40mm)

本報告では9.6μm光用のλ/4波長板について述べたが、光学多層膜の設計を見直すことで、10.6μmや9.4μmといったCO<sub>2</sub>レーザの他の発振波長への対応や、λ/2波長板やλ/8波長板の製作も可能である。今後のレーザ加工機の応用分野の拡大や加工性能の向上に貢献できるように、位相制御用光学部品の品種拡大や、更なる性能の向上に努める。

#### 参 考 文 献

- (1) 楠 他、[Thフリーコートレンズの開発]、SEIテクニカルレビュー第177号(2010年7月)
- (2) 岩本 他、[低吸収率ZnSe耐圧レンズの開発]、SEIテクニカルレビュー第159号(2001年9月)
- (3) 特開 2014-98756号公報
- (4) 岩本 他、[CO<sub>2</sub>レーザ用円偏光ミラーおよびゼロシフトミラーの開発]、住友電気第142号(1993年3月)
- (5) E. Hecht、[ヘクト光学II]、尾崎義治 他(訳)、丸善(2003)
- (6) M. A. Macleod、[光学薄膜]、小倉繁太郎 他(訳)、日刊工業新聞社(1989)

執 筆 者

---

西 寛仁\* : 住友電気ハードメタル(株)  
光学部品開発室



岩本 博実 : 研究企画業務部 主席  
理学博士



矢島 國光 : 住友電気ハードメタル(株)  
光学部品開発室 主幹  
工学博士



---

\*主執筆者