



Ge による赤外光の位相リターダー

孫 東松・南 京達・劉 兆岩

ハルピン工業大学応用物理学部 〒150006 中国ハルピン市南崗区西大直街 169 号

(1991年2月5日受付, 1991年9月26日受理)

Ge Infrared Optical Retarder

Dongsong SUN, Jingda NAN and Zhaoyan LIU

Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China 150006

(Received February 5, 1991; Accepted September 26, 1991)

The retarder made of Ge multicrystal material can yield a phase change of $\pi/2$ on each internal reflection of infrared light over 2~20 μm range, and the error of phase shift is no more than 0.25° for the variation of incidence angle. Fresnel rhombs 90° phase retarder based on the internal reflection of Ge is produced and measured. The result shows that the Fresnel rhombs give a $\pi/2$ phase difference between two components of the linearly polarized CO₂ laser. The transmission efficiency of the rhombs with AR coating is more than 93%.

1. はじめに

赤外光の応用、例えば、赤外のコヒーレント・レーダーなどの場合、直線偏光を円偏光に変えたり、円偏光を直線偏光に変えたり、また直線偏光を互いに垂直な二つの成分に分けたりすることが必要になる。この場合一般に複屈折性を持っている単結晶材料による波長板で変換をする。レーザーが多波長で同時発振していたり、あるいは波長を変化させる必要が生じる場合には使えない。具体例をあげると、差分吸収レーザーレーダー(DIAL)の場合や円偏光によりレーザー加工の品質を高める場合、円偏光をポンプ光として位相共役波の効率を高める場合等である。これらの場合には、波長板を使わずに、広い波長範囲にわたって使える、内部全反射を利用した位相リターダー(フレネル・ロム)を使う。本論文はフレネル・ロムの位相リターデーションに影響を与える要素について検討し、解析を行い、よく使っている多結晶 Ge によるフレネル・ロムについて検討した。Ge は屈折率が高い ($n=4.00$) ので、一回の内部全反射によって $\pi/2$ の位相差ができる。また、その時の入射角度も 43° ぐらいなので、ロムの設計も経済的にできる。2~20 μm の波長範囲では Ge の屈折率の分散は比

較的小さいので、位相リターデーションの誤差も小さい(0.25° 以下)。また、位相リターデーションは赤外光の入射角の変化にも入射光と入射面との垂直さにも敏感ではない。

われわれは Ge のフレネル・ロムを作成するとともに反射防止膜をつけた場合とつけない場合について、位相リターデーションを測定した。

2. 位相リターデーションについての解析

光が光学的に密な媒質から粗な媒質に入射する場合、入射角が臨界角より大きければ(全反射の場合)、反射光のエネルギーの損失はなく、二つの偏光成分の位相の飛びの差しか変化しない。電磁波の一般法則によれば¹⁾、互いに垂直な偏光の二つの成分の位相変化 δ_p および δ_s は各々

$$\tan \frac{\delta_s}{2} = - \left(\frac{\sin^2 \theta_i - 1/n^2}{\cos \theta_i} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\tan \frac{\delta_p}{2} = - \frac{n^2(\sin^2 \theta_i - 1/n^2)^{1/2}}{\cos \theta_i} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 n は空気に対する媒質の相対屈折率、 θ_i は入射角である。(1)および(2)式から、反射光の S および P 成分間の位相差は

$$\tan \frac{\delta}{2} = \tan \frac{\delta_s - \delta_p}{2} = \frac{\cos \theta_i (\sin^2 \theta_i - 1/n^2)^{1/2}}{\sin^2 \theta_i} \quad (3)$$

になる。 (3)式は一回の内部反射でできた位相リターデーションを与える。もし内部反射を何回かすれば、その位相リターデーションは毎回の反射でできる位相リターデーションの総和である。

位相リターデーションは入射角によって変化するので、Ge ($n=4.00$) および ZnSe ($n=2.40$) を例にとった場合、(3)式から Fig. 1 に示すような曲線が得られた。Fig. 1 に示した θ_b および θ_c は各々ブリュースター角および全反射する場合の入射角である。入射角が θ_b より小さければ、位相差は π になり、入射角が θ_b より大きく、 θ_c より小さければ、位相差はゼロになり、入射角が θ_c より大きければ、位相差は段階式の変化ではなく、曲線式の変化になると同時に、ある程度の位相リターデーションができる。Fig. 1 から ZnSe では一回の内部の反射で得られる位相差の最大値は 89.5° であるため、二回の内部反射をしなければ、 $\pi/2$ の位相差はできない（毎回 $\pi/4$ の位相差ができる）。Ge の場合には一回の内部の反射で十分である。一回の反射で $\pi/4$ または $\pi/2$ の位相差はどちらができるても、普通二つの入射角がそれに対応するが、入射角の大きい方を選ぶ。なぜなら、入射角が小さい場合には、位相差の勾配が高いので、ロムを製作したり、使ったりする条件が激しく、それに、広い波長で使えなくなるからである。

定められたある位相差 δ に対応する入射角は、(3)式から

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{n^2 + 1 \pm [(n^2 + 1)^2 - 4n^2(1 + \tan^2 \delta/2)]^{1/2}}{2n^2(1 + \tan^2 \delta/2)} \right)^{1/2} \quad (4)$$

で与えられる。(4)式で計算してみると、Ge では、 $\pi/2$ の位相差に対応する入射角の大きい方は $\theta_i = 42.93^\circ$ で

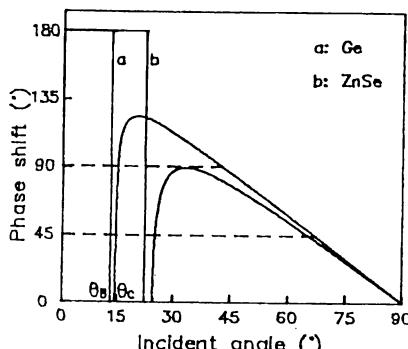


Fig. 1 Phase shift on each internal reflection.

あり、ZnSe の $\pi/4$ の位相差に対応するのは $\theta_i = 65^\circ$ であるため屈折率の大きい材料でロムを作成したほうがよい。また、(4)式からわかるように、一回の内部反射で $\pi/2$ と $\pi/4$ の位相差を得る最小屈折率は $(n_{\pi/2})_{\min} = 2.414$ と $(n_{\pi/4})_{\min} = 1.5$ である。

ロムが広い波長範囲で使えることを確認するために、波長 $2 \sim 20 \mu\text{m}$ での屈折率の分散データ^{2,3)}を(3)式に代入すると Fig. 2 に示すような曲線が得られた。ただし、 $\theta_i = 10 \mu\text{m}$ に対応する入射角である。 $2 \sim 20 \mu\text{m}$ 範囲では、Ge の位相リターデーションの偏差が 0.25° を越えることがなく、波長が $5 \mu\text{m}$ より長いと、位相差はほとんど変化しない。ZnSe の分散が Ge より大きいので、最大偏差は 1° に近い。

ロムの表面に対して光の入射角度が垂直入射から Δ だけずれておれば、それに対応した内部入射角の偏差 Δ/n が存在し、それを(3)に代入すると、Fig. 3 に示したような曲線が得られる。角度の偏差が $\pm 5^\circ$ の範囲

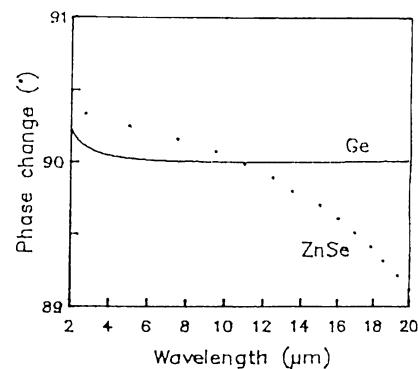


Fig. 2 Chromatic dispersion curves for the Fresnel rhombs 90° phase retarder made of Ge and ZnSe.

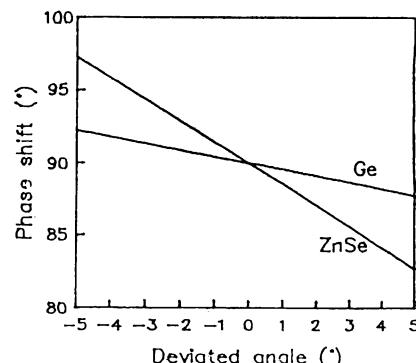


Fig. 3 Phase shift vs the variation of incidence angle in 90° retarders.

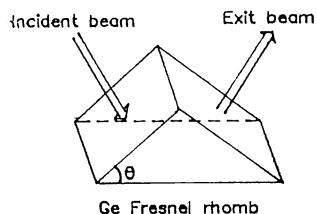


Fig. 4 Configuration of a Ge Fresnel rhomb $\pi/2$ phase retarder.

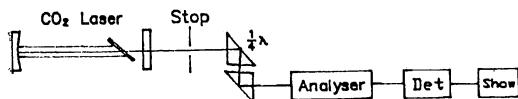


Fig. 5 A schematic of the phase retardation measurements.

では、Ge の位相リターダーの偏差は 2° より小さく、ZnSe は約 7.5° まで達する。

3. Ge による位相リターダーの作成および実験研究

多結晶 Ge を使ったフレネル・ロム型位相リターダーを作成し (Fig. 4, $\theta = 42.93^\circ$)、実験を行った。Fig. 5 に示したのは実験装置の構成である。装置の中に、二つの $1/4$ 波長の位相リターダーを重ねて、 180° の位相リターダーを作り、それを透過した偏光の長軸と短軸の方向および減衰比 (extinction ratio) を測定して、Ge フレネル・ロムが入射光に対して生じる位相リターダーションを測った。使用した光源は CO_2 レーザーの $10.591 \mu\text{m}$, P (20) である。検光子は 4 枚の Ge 板で構成した透過型のプリュスター検光子であり、回転角を測ることができる装置に検光子を組立てた。レーザー光の振動方向をロム内部の入射面と 45° の角になるように調整し

てから、光を入射し、検光子と検出器で透過した光の減衰比を測った。測定結果によれば、Ge のフレネル・ロムの位相リターダーションは $90^\circ \pm 2.5^\circ$ である。

われわれは ZnSe の反射防止膜を単層だけつけた Ge のロムと反射防止膜をつけていない Ge のロムの透過率を測った。後者の透過率は 40% しかないが、前者は 93 %にも達するとともに位相リターダーションも変化しなかった。

4. 結論

解析によると、Ge を使った 90° 位相リターダーは赤外の広い波長にわたって使える有効なデバイスで、波長 $2\sim20 \mu\text{m}$ の範囲で、位相偏差は 0.25° より小さく、Ge の屈折率が高いので、ただ一回の内部反射で $\pi/2$ の位相差ができる。そして、その時の入射角は 42.93° で、その値が 45° に近いので、内部減衰も小さく、作成もしやすい。ロムの表面に対して入射角の偏差があっても、位相リターダーションは 2.5° しか変化しない。測定した結果、自作した Ge の 90° 位相リターダーは直線偏光の S および P 成分の間に $\pi/2$ の位相差リターダーションがうまくでき、単層の反射防止膜をついた場合の透過率は 93% と高くなり、もし、反射防止膜の構造を細かく設計すれば、透過率はさらに高くなるものと思われる。

文獻

- 1) M. Born and E. Wolf : *Principles of Optics*, 5th ed (Pergamon Press, New York, 1975).
- 2) J. Li : *Optical Handbook*, 1st ed. (Shanxi Science and Technology Press, Xian, China, 1986) p. 1309.
- 3) Eastman Kodak Pam. v-17 November (1968).