

偏光性を持つガラスⅡ

偏光ガラスの光学的特性と応用

コーニング静岡テクニカルセンター

岡田 明

Polarizing Glass II

Optical Properties of Polarizing Glasses and Their Application Examples

Akira Okada

Corning Shizuoka Technical Center

Abstract

An introductory review of optical properties of the light polarizing glasses with some other properties, such as thermal properties, is explained using a silver halides-containing polarizing glass as an example. Transmittance, contrast ratio, and angular dependence of incident light are described. A recent development result of patterning of the silver halides-containing glass polarizer is also discussed. In addition, application examples of the glass polarizers are briefly discussed for optical isolator and a CD compatible Digital Video Disk (DVD) pickup application. Brief comparison of merits of the glass polarizers over other polarizing materials is given, also.

はじめに

前稿では、偏光の基礎、特に直線偏光について簡単に触れた。次いで、偏光ガラスの特性上重要なコントラスト比、または消光比と呼ばれる値 CR を、 P_{\perp} を偏光素子を透過する方向の偏光の透過パワー、そして P_{\parallel} をそれに垂直な方向の偏光の透過パワーとして、 $CR = P_{\perp} / P_{\parallel}$ で表わした。これはデシベルで表記すれば $CR = 10 \log_{10}(P_{\perp} / P_{\parallel})$ であった。更に偏光ガラスの偏光機構が、ガラス中に分散された金属微粒子のアスペクト比の違いによって生じる、伝

導電子による共鳴吸収の吸収断面積の異方性に起因する事を説明した。ガラス中に析出した銀や銅などのハロゲン化物微結晶をリドロー法やエクストルージョン法を用いて一方向に伸長配向させ、還元によって金属を析出させる方法で偏光ガラスを作成する方法についてその概要を解説した。これらの二つの方法が、高いコントラスト比を得るために工業的に重要であり、最も良く使われていることを述べた。本稿では、偏光ガラスとして最も重要な光学特性とその他の物性について、容易に入手できるハロゲン化銀を用いた偏光ガラスを中心に解説する。次いで偏波依存型光アイソレータと高密度光記録用の光ピックアップへの偏光ガラスの応用例を、他の偏光素子との比較も交えて簡単に紹介す

る。

光学的特性

一般的な偏光ガラスの分光透過光学特性を模式的に Fig. 1 に示す。図は、ハロゲン化銀を分散した中心波長が 900 nm の偏光ガラスの例である。図中の左向き矢印付きの曲線は、分散された金属微粒子の長手方向に垂直な偏光と平行な偏光（それぞれ図中の E_{\perp} と $E_{//}$ に対応）の分光透過率の例であり、左側の縦軸に対応している。図中の右向き矢印付き曲線は右側の対数軸に対応しており、伸長方向に垂直な偏光と平行な偏光の透過率の比、すなわちコントラスト比の例を示している。図中のコントラスト比が最大になる波長を、中心波長と言う。さらに、概念的ではあるが、図からコントラスト比の波長依存性がわかる。以下に述べる特性例は、主としてハロゲン化銀を分散した偏光ガラスであるコーニング社の製品、ポーラコアの特性である。この偏光ガラスでは、中心波長にも依存するが、製品におけるコントラスト比は 10 : 1 程度から 10,000 : 1 程度の範囲で任意に調節できる。

中心波長の違いによる分光透過率の変化を詳しく示したものが Fig. 2 である¹⁾。図はコントラスト比が最大になる中心波長を 800 nm, 1,300 nm, と 1,550 nm に設定したハロゲン化

銀を用いた偏光ガラス試料の、伸長方向に垂直な偏光成分 (E_{\perp} の方向) の分光透過率を示している。これらのガラスは約 1.52 の屈折率をもち、従って反射による損失が約 8 % である。この図に示した例からわかるように、偏光ガラスは光通信等に用いられる近赤外から光ピックアップ等で用いられる可視域の赤色まで、透過率 80% 以上で比較的平坦で良好な透過特性を持っている。また、図からわかるとおり、偏光の透過する方向での透過率は、波長 650 nm 以上の領域で中心波長にほとんど依存せず平坦である。

図の例は、反射防止膜を用いない状態の分光透過率であるが、この透過率の改善のためには反射防止膜が有効である。しかしながら、還元層を除くガラスの全体にわたって未還元ハロゲン化銀が析出しているために、それに起因する散乱により透過率は若干悪化する。この散乱を減少する為には、ガラスの厚みを薄くする事が有効である。また、田島等は、この未還元ハロゲン化金属の影響を減少する方法として、ハロゲン化金属を含むガラスと光の散乱が少ないガラスを重ねあわせたものを共に伸長した構造を考案した²⁾。この方法による透過損失の低減は、25% から 38% であり、ほぼ 0.3% T に相当する。

Fig. 2 に示したと同じ反射防止膜を形成して

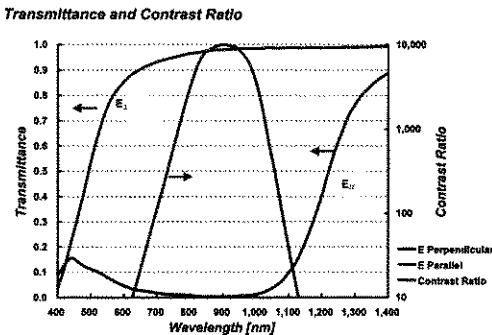


Fig. 1 Schematic spectral transmittance and contrast ratio of a typical glass polarizer

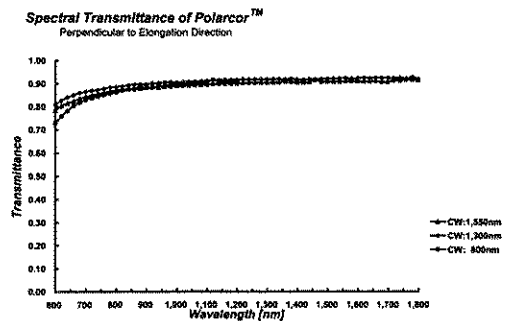


Fig. 2 Examples of center wavelengths and transmittance of light with polarization parallel to transmitting direction

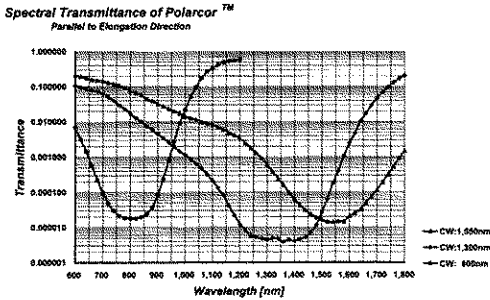


Fig. 3 Examples of center wavelength and transmittance of light with polarization normal to transmitting direction

いない試料における、伸長方向に平行な偏光 (Fig. 1 の $E_{//}$ の方向) の分光透過率の詳細を同様の中心波長について Fig. 3 に示す¹⁾。この図では、縦軸の透過率を対数軸としてある。当然の事ながら、高いコントラスト比を持つ試料では、伸長方向に平行な偏光の中心波長近傍での透過率が極めて低くなる。このような低い分光透過率を測定するためには、迷光レベル等の極めて低い、極めて安定した分光光度計を必要とする。コーニング社が用いている偏光測定用の分光光度計では波長 600 nm から 2,000 nm の範囲において、100,000 : 1 程度迄の測定が可能である³⁾。図に示したように、透過率の低い範囲はかなり広い波長域にわたっている。これは、理論的に予想されるプラズマ吸収のバンド幅よりもかなり広い。この理由は、分散されたハロゲン化銀粒子の大きさがかなり広い分布を持つためであると考えられている⁴⁾。このことは、実用上は重要なことである。設計時の中心波長に若干の誤差が存在しても、ガラス偏光子の特性は大きな影響を受けない。同様に、光源波長の変動や熱的な影響も受け難い。例えば、複屈折回折格子型や導波路型の偏光素子では、高いコントラスト比を持つ領域はこのような広い範囲にはならない^{5), 6)}。

これまでに述べた二つの方向に対する分光透過率の測定から、同様の試料に対するコントラスト比が求まる。Fig. 4 に、同じ試料でのコン

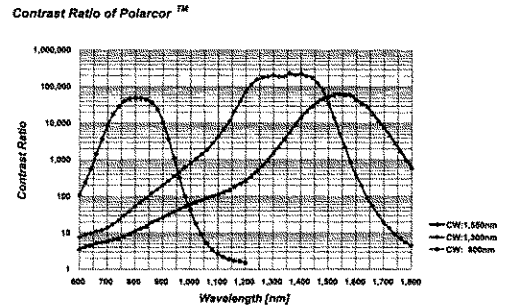


Fig. 4 Spectral contrast ratios of some glass polarizers with different center wavelengths

トラスト比を波長の関数として片対数グラフで示す¹⁾。この図から、コントラスト比の波長依存性として、1,000 : 1 以上のコントラスト比が 650 nm 以上の領域で、また 10,000 : 1 以上のコントラスト比が 700 nm 以上の領域で得られていることがわかる。近赤外領域の 1.3 μm や 1.55 μm の良く普及している光通信用波長帯では、中心波長 1,300 nm の偏光ガラスで 100,000 : 1 以上のコントラスト比が得られている。また、短波長側では、光ピックアップに最も良く利用されている波長帯である、650 nm から 1,000 nm の間で優れたコントラスト比特性を示している。中心波長が 800 nm の製品を一例にとれば、コントラスト比 100 : 1 以上の領域は、600 nm から 950 nm 程度にも及んでいる。更に、コントラスト比 1,000 : 1 以上の領域は、中心波長 800 nm に対して概ね ± 150 nm に及んでいる。コントラスト比の高い領域を広げるために、高橋等はハロゲン化銅を分散した偏光ガラス中の銅をイオン交換によって銀で置換することで、高コントラスト比の領域を拡幅する方法を考案した⁷⁾。彼等は 1.06 μm で 8000 : 1, 1.3 μm で 1000 : 1, 1.55 μm で 4 : 1 であったコントラスト比が、この方法によって処理した後はそれぞれの波長で 6000 : 1, 4000 : 1, 4000 : 1 と大幅に改善している。ただし、この方法では透過率も 2% T 程低下する。

Angular Dependence of Contrast Ratio

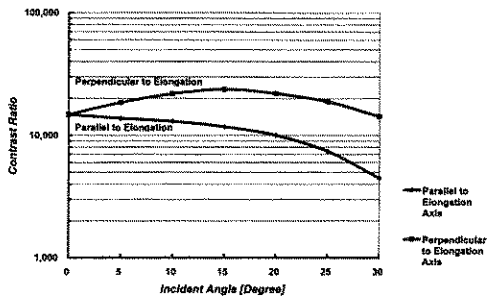


Fig. 5 Angular dependence of contrast ratio on incident angle

ガラス製偏光素子の特徴の一つとして、入射角度依存性が少ない事がある。Fig. 5に、中心波長 800 nm の、ポーラコア偏光素子のコントラスト特性の入射角依存性の例を片対数グラフで示す¹⁾。図中の下側の曲線は、入射光が伸長方向に傾いて入射する場合のコントラスト比の入射角依存性であり、垂直に入射する場合の入射角を 0 としている。図中の上側の曲線は、同じく伸長方向と直角な方向への傾きに対するコントラスト比の入射角依存性である。両方向ともに、入射角 20 度前後まで、コントラスト比は大きく変化しない。この様に、入射角依存性が低いことも、ガラス偏光素子のと言える。

偏光ガラスのその他の特徴

代表的なガラス偏光素子（ポーラコア）の諸特性を Table I にまとめて示す¹⁾。このガラスの基本組成はアルミノ硼珪酸ガラスであり、密度は 2.41 g/cm³ である。この偏光性ガラス製品の厚みは標準で 1 mm, 0.5 mm と 0.2 mm である。ガラス偏光素子は形状的にも設計上の自由度が高く、大きさも数センチメートル角程度から 1 mm 角迄、容易に加工することができる。小型の光学系を考えた場合、例えば 0.2 mm 厚、5 mm 角の部品の重量は、12 mg 程度であり、他の偏光素子で構成する場合に比べてずっと軽量である。優れたコントラスト比に加

Table I Other properties of a glass polarizer, polarcorTM

密度	2.41g/cm ³
屈折率 (λ=589nm)	1.523
熱膨張係数(0-300°C)	6.5ppm/°C
熱衝撃試験(-55°Cから125°C)	2時間、500回
耐環境試験(温度85°C、相対湿度95%RH)	1,000時間
耐熱性(2時間)	最高400°C
レーザー光の連続照射	25W/cm ² 程度

えて、密度が小さく、薄く加工出来ることは、ガラス偏光素子の優れた特性の一つである。

熱的な安定性においても、偏光ガラスはプリズム製の偏光素子等にはない優れた特徴を持っている。偏光特性が広い領域にわたっている為に、通常温度変化による特性の劣化は殆ど無い。ポーラコアを例にとれば、熱膨張係数は 6.5 ppm/°C であり、2 時間以内であれば、最高 400°C までの環境に耐える。また、レーザー光の連続照射に対する許容の程度は、偏光を吸収する方向に対して 25 W/cm² 程度である。更に、偏光ガラスはその屈折率が凡 1.5 程度であるため、通常に良く用いられている反射防止膜を有効に利用できる。標準的な反射防止膜を形成したポーラコアの製品では、2 時間 500 回の -55°C から 125°C における熱衝撃試験、さらに 1,000 時間にわたる温度 85°C、相対湿度 95% RH における耐環境試験の後、特性に大きな変化は見られない¹⁾。

偏光ガラスの加工とパターン形成

従来から偏光ガラスは、比較的容易に任意の形状に加工できる偏光素子として知られている。その加工時の偏光方位に対する精度は 0.1 度以下である。最近、コーニング社で同一の偏光ガラス素子上に偏光部と非偏光部を形成する技術が開発された。偏光部と非偏光部の組み合わせで任意のパターンの作成が、金属や金属酸化物を用いてハロゲン化銀の還元を抑制することで可能になった⁸⁾。この様な新しい加工法の応用例として、中心部に直径数 mm の円形の偏光性の無いガラス部分と、周辺部に偏光性を

Synthesized Transmission Photograph at 630nm

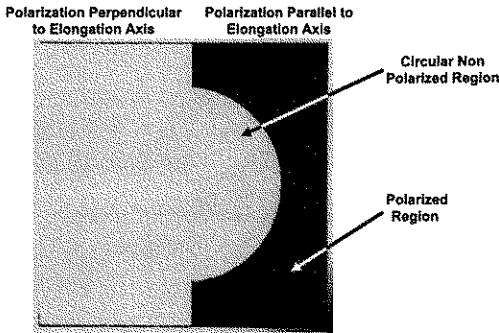


Fig. 6 Patterned Polarcor™ polarizing glass

持つガラス部分をポーラコアに形成した例を Fig. 6 に示す。図の例では波長 630 nm の偏光を用い、右側半分は透過する方向で、左側半分はそれと直交する方向で撮影した写真を合成したものがある。外周部だけが偏光ガラスとして作用していることがわかる。この例では、コントラスト比は 100 : 1 程度である。このようにしてパターン形成された偏光ガラスにおいても全波面収差は 0.01λ RMS 以下である。この作成方法によるパターンの精度は、直径数 mm 程度の非偏光部分に対して、標準偏差にして $20\ \mu\text{m}$ 以下である。同様な機能を偏光子に持たせる方法として、プロトン交換を行ったニオブ酸リチウム等を用いる複屈折回折格子型偏光子が知られている。これらの複屈折回折格子型偏光子における、中心波長に対して 0 次光が 1,000 : 1 以上のコントラスト比を持つ領域の幅は、概ね $\pm 10\ \text{nm}$ 程度である⁵⁾。一次回折光では波長依存性はないが、回折角がブラッグ条件に従って波長に依存する。前述のように、偏光ガラスは広い範囲でコントラスト比が高く、かつ波長による分散は生じない。

最近の応用

偏光ガラスは赤外線を用いたセンサー等にも応用されてきたが、近年では通信用や民生用の光学機器への応用が注目されている。ここで解

説したハロゲン化金属を分散して作られる偏光ガラスは、偏波依存型光アイソレータや光ピックアップ等に用いられている。これらの二つの応用例を、以下に簡単に紹介する。

偏波依存型光アイソレータは、コヒーレント光通信において戻り光を防ぎ通信の S/N 比を向上させたり、レーザーの寿命を延ばす為に用いられるデバイスで、レーザー光源内や光通信路中に置かれる。その需要は近年の光通信の普及に伴って、主として CATV や 600 MHz 以上の幹線系用途で急速に拡大している。アイソレーションはデバイスにも依るが、概ね 30 dB から 60 dB である。挿入損失は大凡 0.5 dB 程度である。ルチルやニオブ酸リチウム等の複屈折結晶を用いたものや積層型の偏光子を用いたもの等もあるが、偏光ガラスと希土類ガーネット結晶を組み合わせたものが小型かつ高性能である事から大半を占める。

偏波依存型光アイソレータの模式的な構造を Fig. 7 に示す。図の左側からアイソレータに入射する光（実線矢印で示す）は、第一の偏光ガラスを透過し、磁場の中に置かれたファラデー回転子で 45 度だけ旋光される。出口側にある第二の偏光ガラスはその透過方向が第一の偏光ガラスと 45 度の角を成すように配置されている。この様にして入射光はその偏波面を 45 度回転されて進む。戻り光（破線矢印で示す）は、この逆の経路をたどる。出口側の第二の偏光ガラスを透過した戻り光の偏波面はファラデー回転子で更に 45 度回転される。第一の偏光ガラスに到達した戻り光の偏波面は、結果として入射光のそれと 90 度の差を持つため、この偏光ガラスで吸収され光源側には戻らない。光アイソレータは光通信用途には不可欠であり、今後の光通信網の整備に伴って更に小型化が進むと考えられる。

ガラス製偏光素子の光ピックアップへの応用として、Fig. 6 に示した形状と類似の偏光素子が、液晶シャッター方式^{9),10)}と呼ばれる CD 互換性を持った DVD (Digital Video Disk) 用の

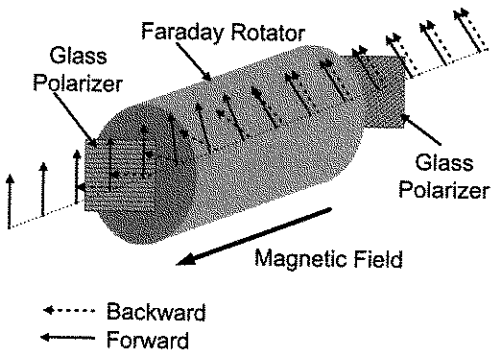


Fig. 7 Schematic drawing of a polarization dependent optical isolator

光ピックアップに利用されている。この例では液晶シャッターと偏光ガラスの組み合わせで開口を制御し、CDとDVDの両媒体に対応するための、二つの異なった開口を得ている。これらの異種のディスクを再生可能にする互換性ピックアップの中でも、液晶シャッター方式は、単一波長の光源を用いながらも偏光方向を液晶シャッターで切り替えることにより、それぞれの媒体に適した開口を得てCDとDVDの互換性を実現する独創的な方法である。この利用例では、対物レンズ直下のアクチュエータ内に配置されたパターンを形成した偏光素子と、パターンの無い液晶シャッターの組み合わせで、開口が制御されている。ガラス製偏光素子は小型軽量であり、このような用途には特に適している。

光ピックアップ等に応用する上で、偏光性ガラスはその広範囲なコントラスト比特性の為、複数の光源波長に対して、ほぼ同程度のコントラスト比を持っている。光ピックアップ等の光学系に用いられているレーザーダイオードの波長は、現在630nm前後から800nm前後である。偏光性ガラスでは、一つの中心波長の偏光素子を、比較的広い波長領域に利用することができるため、光源波長の変更等に柔軟に対応できる。また、レーザーダイオードの温度依存性等による波長変動や、素子単体のばらつき等による影響も避けられる等の利点が考えられる。

よる影響も避けられる等の利点が考えられる。

終わりに

二回にわたり偏光ガラスについて簡単に解説した。偏光ガラスは光学的に等方性のガラスに光学的異方性を持たせた、興味深い機能性ガラスである。偏光ガラスはその発明から30年を経ているが、その応用は近年になってますます広がりを見せている。今後の光通信や光応用製品の開発と普及は更に高機能な偏光ガラスを必要とするであろう。近い将来の青色半導体レーザーの実用化に伴い、特に高密度の光記録装置ではますます短波長化が進むことは確実である。ここに見てきたように利点の多い偏光ガラスではあるが、ハロゲン化銀やハロゲン化銅を用いる現在のガラス偏光素子は緑色や青色等の短波長には対応できていない。今後確実に進むであろう短波長化に向けて、可視光領域全域で優れたコントラスト比を持つ偏光ガラスの開発が急務といえる。

本稿を終わるにあたり、データの引用を快諾して頂いた米国コーニング社の研究員のM. P. Taylor 博士, D. G. Grossman 博士, 及び N. F. Borrelli 博士の各に感謝の意を表します。また、有意義な意見を頂いたコーニング静岡テクニカルセンターの林, 安間, 蓮井の各氏, ならびに G. A. Luers 所長にも、同様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M. P. Taylor, "Design Consideration For POLARCOR™ Micro-Polarizers", NEW GLASS, 7(2), 108, 1992.
- 2) 田島, 高橋 "偏光ガラス及びその製造方法", 特開平 8-248227, 1996.
- 3) G. N. Whitbread, Private Communication.
- 4) N. F. Borrelli, "Optical elements derived from stretched glass", SPIE Vol. 1761, 202, 1992.
- 5) 片山, "偏光ホログラム光学素子と光磁気ディスクヘッドへの応用", OPTRONICS, (8), 112,

1996

- 6) S. Kawakami, "Light propagation along periodic metal-dielectric layers", *Applied Optics*, 22(16), 2426, 1983.
- 7) 高橋, 虎溪, "偏光ガラス及びその製造方法", 特開平 7-48143, 1995.
- 8) A. Okada, K. Hasui, D. G. Grossman, and N. F. Borrelli, "Patterning Glass Polarizer and Its Application Example", *Proceedings of The Sixth International Symposium on New Glass*, 177, October 1997, Tokyo.
- 9) 土屋, 梶山, 加納, "光学再生装置", 特開平 9-27138.
- 10) Y. Tsuchiya, S. Kajiyama, Y. Kano, Y. Matsumura, and S. Ichiura, "Digital Video Disc/Compact Disc Compatible Pick-up with Liquid Crystal Shutter", *Jpn. J. Appl. Phys.* 36, 481, 1997.