



光磁気記録用 PC 基盤の光学的異方性の解析

吉 沢 昭 彦

オリンパス光学工業(株)技術開発部 〒192 八王子市石川町 2951

(1986年4月25日受理)

An Analysis of Optical Anisotropy of PC Substrate for Magneto-Optical Disc

Akihiko YOSHIKAWA

Research Department, Olympus Optical Co., Ltd.,
2951, Ishikawa, Hachioji 192

Substrates of various plastic materials have been studied for the magneto-optical disc. Injection-molded PC is said to have higher birefringence level than PMMA does. Careful studies were done to clarify its causes. It is found that the optic axis in PC substrate was perpendicular to the disc surface, and was also found that the difference in principal refractive indices between perpendicular and horizontal directions was about 6×10^{-4} .

1. はじめに

最近、文書画像情報、コード情報を記録する大容量記憶装置として光ディスク装置の開発が活発に行なわれており、一部では商品化もされている。これらは一度書き込むと消せない write-once タイプのものであるが、何度も消去可能な光磁気ディスクも現在盛んに研究されている。

この光磁気ディスク媒体において基盤は透明なプラスチックが使われている。とくにトラッキング用溝を形成する必要から、量産性を考えて射出成形および 2P (photo-polymerization) 法により基盤を作ることが一般的になっている^{1,2)}。射出成形の場合、量産性は 2P 法より優れているが、熱などによる歪が残りやすく、PC (polycarbonate) の場合それが大きな複屈折となって現われることがある。

本稿では、PC と PMMA (polymethyl-methacrylate) をおのおの基盤に用いたときのノイズレベルの差の原因となっている複屈折について、PC 基盤の光学軸の向きを調べることによりある程度の知見を得たのでここに報告する。

2. 基盤材とノイズ

一般的な光磁気ディスク用光学ヘッドは Fig. 1 のような構成になっている。半導体レーザー 1 から出た光はプリズム 3 で直線偏光となり、対物レンズ 5 で絞られて基盤 6 に入射する。この偏光は記録膜 7 で反射するとき Kerr 効果により偏光面が左または右に回軸し、検光子 8 により光量の大小に変換され、それが信号としてフォトダイオード 10 によって検出される。また反射してきた光の一部は 11, 12 によりフォーカス、トラッキングサーボ用信号として検出される。このようなヘッドを用いて信号の記録再生を行なうが、一般的には単一周波数で変調した信号を記録し、再生時にその周波数の伝送波レベル (carrier level) とノイズレベルの差をスペクトルアナライザーで読みとり、媒体の特性を評価している。

同じスタンパーにより射出成形された PMMA 基盤と PC 基盤のおおのにおに Gd-Tb-Fe 合金の記録膜をつけ、1 MHz で記録したときの再生信号のスペクトル写真を Fig. 2 に示す。これからわかるように、伝送波レベルはほとんど同じであるが、ノイズレベルは PC のほうが PMMA に比べ高く、C/N (carrier-noise ratio) は 9 dB ほど低くなっている。

この原因については、いままで PC のほうが PMMA

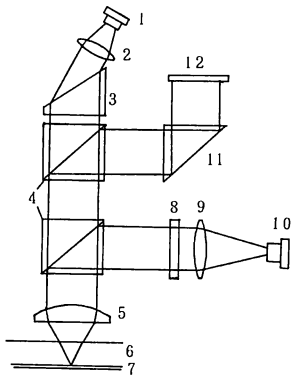


Fig. 1 The diagram of an optical head for magneto-optical disc. 1: laser diode, 2: collimator lens, 3: shaping prism, 4: half mirror, 5: objective lens, 6: substrate, 7: recording layer, 8: analyzer, 9: collector lens, 10: avalanche photo-diode, 11: critical-angle prism, 12: detector.

に比べてんに複屈折が大きいということで見つけられることが多かった^{1,3)}。しかし次節で述べるように複屈折の値とノイズレベルの差に必ずしも相関があるとはいえない。

3. ノイズレベルと垂直入射による複屈折測定

一般に **Fig. 1** のヘッドを用いた信号再生では、検光子の角度によりノイズレベルが変わってくる。そのような事を **Fig. 3** に示す。検光子 0° とは、偏光子に対して検光子がクロスニコル状態にあるときである。理想的には検光子 0° のところでは透過する光はないはずであるが、実際には基盤透過時に楕円偏光になったり、検光子自体の消光比がゼロでないために若干の光は検光子を通過して受光される。検光子を 0° から開いていくと、受光される光量が増すためにショットノイズや、レーザーノイ

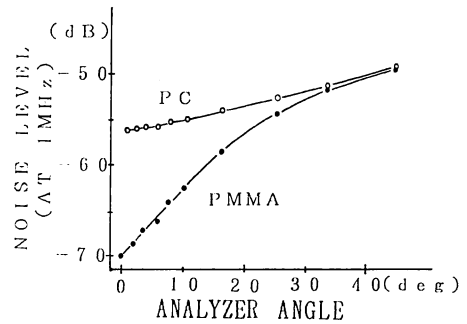


Fig. 3 Noise level vs. analyzer angle, experimental result.

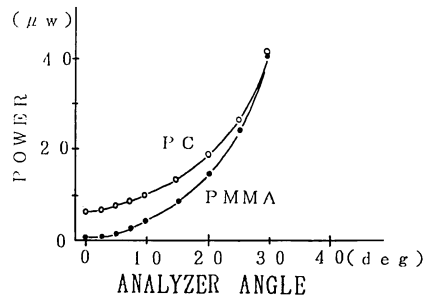


Fig. 4 The detected power vs. analyzer angle experimental result.

ズなどの光量変動ノイズが増加する。検光子が 20° 以下では PC と PMMA では、かなりのノイズレベル差がある。

Fig. 4 は **Fig. 1** のフォトダイオード 10 で受光される光量の変化を測定したものである。検光子が 20° 以下では、PC は PMMA に比べ受光される光量がかなり多いことがわかる。

ディスクの回転による影響を除けば、検光子の角度が小さいところではショットノイズが支配的であると一般

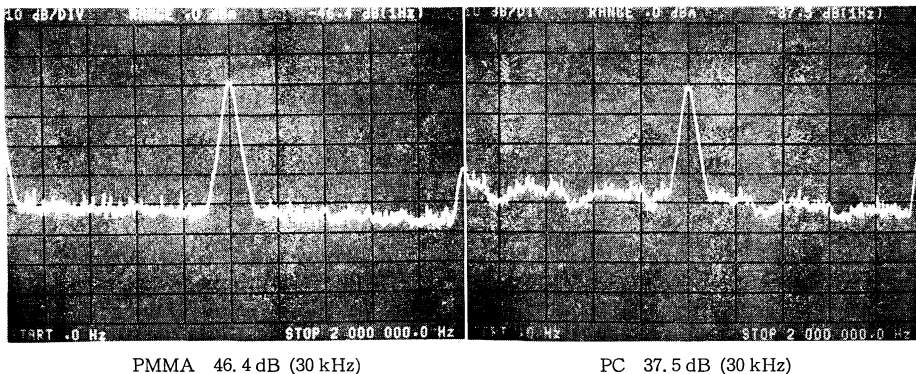


Fig. 2 Typical examples of spectrum of read signal and carrier to noise ratio of PC and PMMA discs.

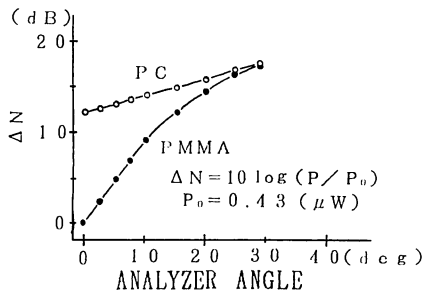


Fig. 5 ΔN vs. analyzer angle. Theoretical result derived from Fig. 4.

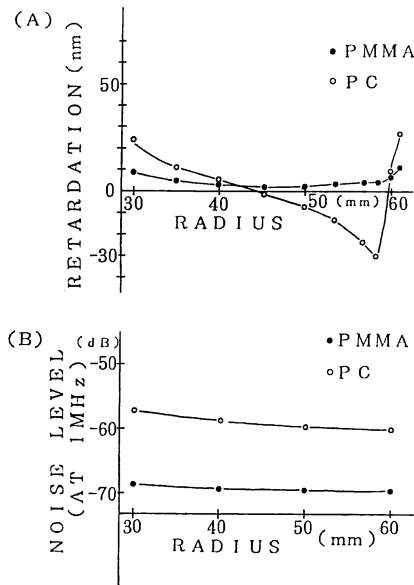


Fig. 6 Retardation of PC and PMMA discs vs. radius (A) and noise level of PC and PMMA discs vs. radius (B).

にいわれている⁴⁾。いま Fig. 4 の PC, PMMA の各点での光量を P として、 P の増加によるショットノイズの増加を計算してみる。ショットノイズの増加を ΔN とすると

$$\Delta N = 10 \log(P/P_0) \text{ (dB)}$$

P_0 : 検光子 0° のときの PMMA 基盤での受光量 ($0.47 \mu\text{W}$)

である。

Fig. 5 は Fig. 4 の縦軸に ΔN をとったものである。

PC と PMMA の差に注目すれば、Fig. 3 と Fig. 5 は同じ傾向にある。したがって PC と PMMA のノイズレベルの差はショットノイズの差であることが確認された。すなわち、基盤を透過して戻ってきた光が楕円偏

光になり検光子を通過する光量が増え、それがノイズレベルを高める原因であることがわかった。そこで楕円偏光の原因である複屈折とノイズレベルの相関を調べてみる。

Fig. 6 (A) は一般的な射出成形 PC 基盤と PMMA 基盤の複屈折で、後で説明するが、基盤に垂直にレーザー光を入射させて測定した結果である。(B) は同じ基盤に記録膜をつけて Fig. 1 の光学ヘッドを使って再生したときのノイズレベルを示す。ノイズレベルは複屈折がほぼゼロのところでも高く、半径方向ではほとんど変化しないことがわかる。Fig. 6 の結果を見る限り垂直入射で測定した複屈折とノイズレベルの差との相関がない。しかし実際はそうではなく、斜め入射による複屈折の測定では相関があることを次節で説明する。

4. 垂直入射と斜め入射の違い

従来から用いられている複屈折測定方法の 1 例を Fig. 7 (A) に示す。原理を簡単に説明すると、レーザー光を GTP (Glan-Thompson Prism)-A (図中の 2) で直線偏光にし、測定する基盤に垂直に入射させる。このとき、図中の 2 と 5 の GTP はクロスニコル状態にしておく。基盤の複屈折により楕円偏光になった光を、4 の Babinet-Soleil 位相補償板の調節により直線偏光に戻す。このときの補償値が複屈折の大きさを表す。この場合入射光は必ずディスク表面に対して垂直であるが、これは Fig. 1 のような光学ヘッドと比較すると問題がある。なぜならば、実際の光学ヘッドではレーザー光を

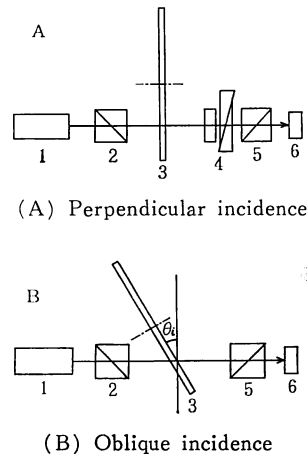


Fig. 7 Optical arrangements for measurement of birefringence in substrate. 1: He-Ne laser, 2: Glan-Thompson prism-A, 3: substrate, 4: Babinet-Soleil compensator, 5: Glan-Thompson prism-B, 6: detector.

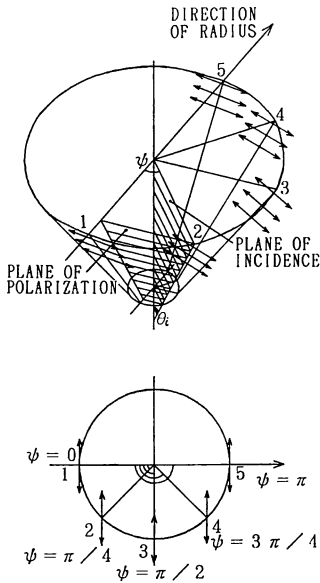


Fig. 8 Geometrical illustration of focussed beam.

レンズで絞り込んでいるために斜め入射となる。たとえば NA 0.5 の対物レンズを用いた場合、ビーム最外郭の光線の入射角は 30° である。

したがって、Fig. 7(B) に示すように、入射角に対応する角度 θ_i だけ基盤を傾けて複屈折を測定する必要がある。またそうした場合、入射光の振動方向により楕円偏光化の程度が変わってくる。実際の光学ヘッドでは、通常直線偏光の振動方向は基盤半径方向に対して垂直になっているので、以後斜め入射による測定では振動方向と半径方向のなす角度は $\pi/2$ とする。

Fig. 8 は、対物レンズで絞られたビームを斜め上から見た図である。1~5 の光線は、入射角はみな等しいが、進む方向はすべて異なる。基盤半径方向と入射面のなす角度を ψ とすると、Fig. 8 のビームにおいて任意の方向に進む光線は θ_i と ψ によって表わすことができる。

Fig. 9 は、 $\psi=45^\circ$ において入射角 θ_i に対する楕円偏光化の程度を測定したグラフである。縦軸の I は Fig. 7(B) の二つの GTP をクロスニコル状態におき基盤透過後の全光量を 1 mW としたときの GTP-B の透過光量である。以後、楕円偏光化の程度はこの I で表わす。垂直入射 ($\theta_i=0^\circ$) の場合、PC と PMMA の間に差はほとんどないが、入射角が大きくなるにつれその差は急激に大きくなることがわかった。

Fig. 10 は厚さ 1.2 mm の射出成形 PC 基盤と PMMA 基盤おのおのの $\theta_i=30^\circ$ における楕円偏光化の

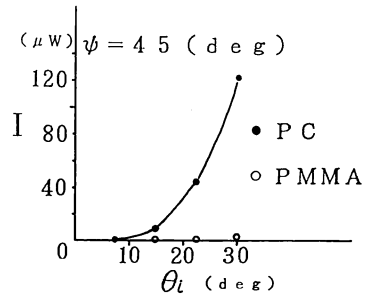


Fig. 9 The degree of polarization I vs. incident angles, experimental result.

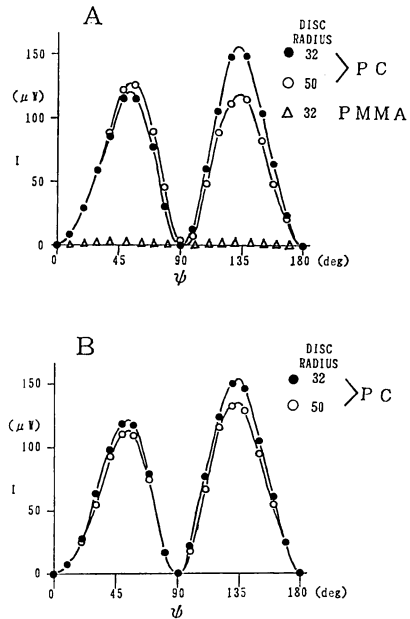


Fig. 10 The degree of polarization I vs. angle ψ , experimental results of a PMMA disc and two PC discs in A and B.

程度を測定した結果である。 $\psi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ での楕円偏光化の程度がほぼゼロで、 $\psi=50^\circ, 130^\circ$ 付近で極大になっている。

Fig. 11 は Fig. 1 の光学ヘッドにおいて、検光子直後の集光レンズ 9 と受光素子 10 を取り去り、かわりに半透明スクリーンを置き、検光子 0° においてもれてきた光のパターンを写真にとったものである。消光のよい部分が 90° をなす十字形をなしている。この部分は Fig. 10 における $\psi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ に対応している。また PMMA の場合は全体がよく消光するために像は写らなかった。

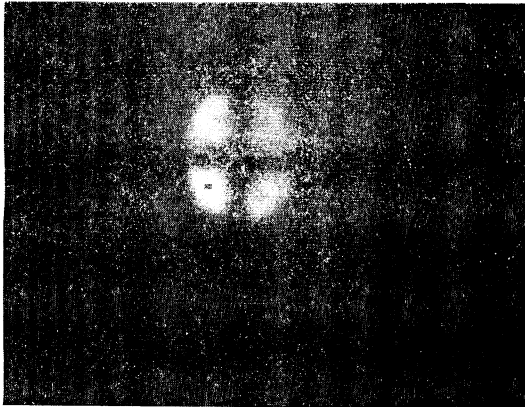


Fig. 11 The beam pattern caused by PC substrate observed behind analyzer in crossed-Nicols with polarizer.

5. 屈折率楕円体と楕円偏光化の程度の計算

前述の実験結果を説明するため、射出成形 PC 基盤の光学的異方性を考慮した解析を試みることにする。

複屈折のような光学的異方性をもつ物質は一般に直交する三つの主屈折率をもつ。入射した光がどのような影響を受けるかは、この三つの主屈折率 N_1, N_2, N_3 を主軸とする楕円体と考えるとわかりやすい⁵⁾。まず、入射する偏光の進行方向に垂直な面で楕円体を切断する。その楕円断面の長軸短軸をおのおの n'', n' とし、 n' 軸と偏光面のなす角を θ とし、基盤を透過することによって生じる位相差を α とする。GTP-A の偏光方向を X 軸、それに垂直な方向を Y 軸とし、Fig. 12 を参照して基盤透過後の楕円偏光は Jones vector を用いて次のように表わされる。 E_x, E_y をおのおの、楕円偏光の X 軸、Y 軸成分とすると

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(i\alpha/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\alpha/2) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta \exp(i\alpha/2) + \sin^2 \theta \exp(-i\alpha/2) \\ -\cos \theta \sin \theta \exp(i\alpha/2) + \sin \theta \cos \theta \exp(-i\alpha/2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる⁶⁾。

前述の実験で求めた楕円偏光化の程度 I に対応するのは $|E_y|^2$ である。すなわち(1)式より

$$I = |E_y|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \alpha \quad (2)$$

いま、PC 基盤の光学的異方性は一軸結晶性すなわち $|N_1| = |N_2| \equiv n_0$ と仮定する。当然のことながら、 N_3 の方向が光学軸となって常光屈折率 n_0 は一定である

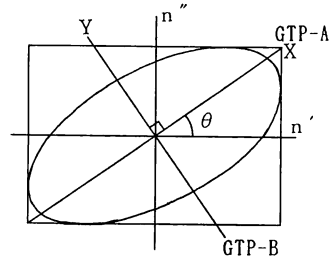


Fig. 12 An elliptic polarization with angle θ . Where, θ is the angle between GTP-A and n' .

が、異常光屈折率 n_e は入射角により $|N_1|$ から $|N_3|$ まで変化する。

また θ を求めるために便宜上、次の二つのパラメータを定義する。

γ : 偏光面と入射面のなす角

β : 光学軸と光線方向を含む面と入射面のなす角

そうすると Fig. 13 より

$$\theta = \pi - (\beta + \gamma) \quad (3)$$

である。

この θ を求めるには光学軸の傾き、偏光の入射方向、振動方向が定められなくてはならない。

振動の方向は前述の理由より半径方向に対して垂直とし、入射方向は θ, Ψ により定まる。光学軸の傾きについては、プラスチック基盤の射出成形において樹脂が基盤中心から外周に流れて冷え固まることから推測して、光学軸は基盤表面に対する法線と基盤半径方向を含む面内にあると仮定する。そこで Fig. 14 に示すように基盤表面に対する法線と光学軸のなす角を ϕ とする。

角度 β は、 Ψ, ϕ, θ_i を用いて幾何学的に求めることができる。すなわち

$$\tan \beta = \frac{\sin \Psi \sin \phi}{\sin \theta_i \cos \phi + \cos \theta_i \cos \Psi \sin \phi} \quad (4)$$

と表わされる。

γ も同様に Ψ, θ_i, θ_e を用い、フレネルの屈折法則より

$$\tan \gamma = \frac{\cos(\theta_i - \theta_e)}{\tan \Psi \cos \theta_i} \quad (5)$$

となる。

屈折角 θ_i は、 $\sin \theta_i = \sin \theta_i / n$ 、 n : 基盤の屈折率、より計算されるが、 n の値は n_0 と n_e のどちらでもかまわない。なぜならばプラスチックの場合、 n_0 と n_e の差は非常に小さく、その違いによる(4)式、(5)式の計算結果の差は無視できるからである。

したがって、(4)、(5)式を(3)式に代入することに

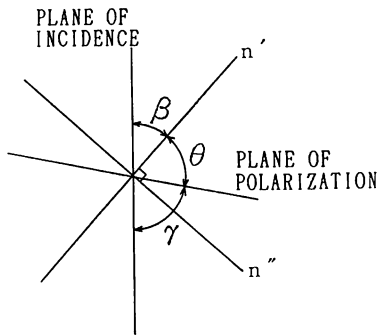


Fig. 13 Geometrical relations of optic axis, plane of incidence and plane of polarization.

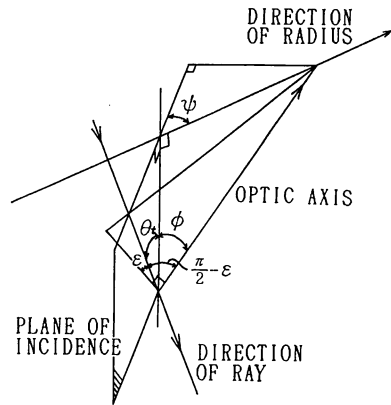


Fig. 15 Geometrical illustration of angle ϵ . Where ϵ is the angle between direction of ray and a plane perpendicular to optic axis.

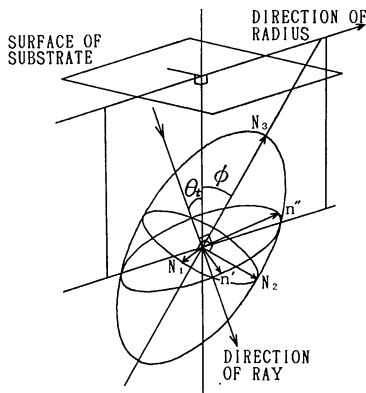


Fig. 14 Geometrical illustration of index ellipsoid.

より θ は次のように表わされる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Psi \sin \phi}{\sin \theta_t \cos \phi + \cos \theta_t \cos \Psi \sin \phi} \right) + \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\theta_t - \theta_i)}{\tan \Psi \cos \theta_i} \right\} \quad (6)$$

次に位相差 α は、

$$\alpha = \frac{2\pi h (n'' - n')}{\lambda \cos \theta_t} \quad (7)$$

h : 基盤厚み, λ : 波長

である。いま一軸結晶性と仮定しているので、

$$n' = n_o, \quad n'' = n_e \quad (8)$$

n'' は N_3 軸に垂直な面と光の進む方向とのなす角を ϵ とすると、

$$n'' = \frac{|N_3| |N_1|}{\sqrt{|N_1|^2 + (|N_3|^2 - |N_1|^2) \sin^2 \epsilon}} \quad (9)$$

となる。 ϵ については Fig. 15 を参照し、余弦定理を用いて

$$\sin \epsilon = \cos \theta_t \cos \phi - \cos \Psi \sin \theta_t \sin \phi \quad (10)$$

となる。

(10)式を(9)式に代入し、さらに(8)、(9)式を(7)式に代入すると

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{|N_3|}{\sqrt{|N_1|^2 + (|N_3|^2 - |N_1|^2) (\cos \theta_t \cos \phi - \cos \Psi \sin \theta_t \sin \phi)^2}} - 1 \right\} |N_1| h \quad (11)$$

ゆえに、(6)式と(11)式を(2)式に代入することにより基盤を透過する直線偏光の楕円偏光化の程度が計算できる。

6. 計算結果および実験結果との比較

Fig. 16 は $|N_3| = 1.58030$, $|N_1| = |N_2| = 1.58000$, $\theta_t = 30^\circ$ としたとき、 $\phi = 0^\circ \sim 90^\circ$, $\Psi = 0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で楕円偏光化の程度 I を計算した結果である。縦軸 I は実験と同じく基盤透過全光量を 1 mW としたときの検光子透過光量を表わす。光学軸の傾きによりかなり I が変化することがわかる。Fig. 10 の実験値と比較すると I の大きさは違うがグラフの曲線は $\phi = 0$ のみよく似ている。これは N_3 を変えても同様である。

このことにより、 N_3 すなわち光学軸が基盤表面に対してほぼ垂直に立っていると考えられる。

Fig. 17 は $\phi = 0$ で N_3 を変えて計算した結果で、 $|N_3| = 1.58060$ ないし 1.58070 で実験値とほぼ一致する。

Fig. 18 は $\Psi = 45^\circ$, $|N_3| = 1.58060$, $|N_1| = |N_2| = 1.58000$ で入射角を変化させたときの計算結果で、Fig. 9 の実験結果とほぼ一致する。

Fig. 10 の実験結果では、 I は $\Psi = 90^\circ$ 付近を境に左右で非対称になっているが、これは光学軸がまったく垂

直なものではなく、いくらか傾いていることを示すものである。

Fig. 19 は $\phi=0^\circ\sim3^\circ$ の範囲で I を計算した結果である。実験値と比較すると光学軸は垂直な状態から 1° ないし 2° 傾いているところがあることがわかる。

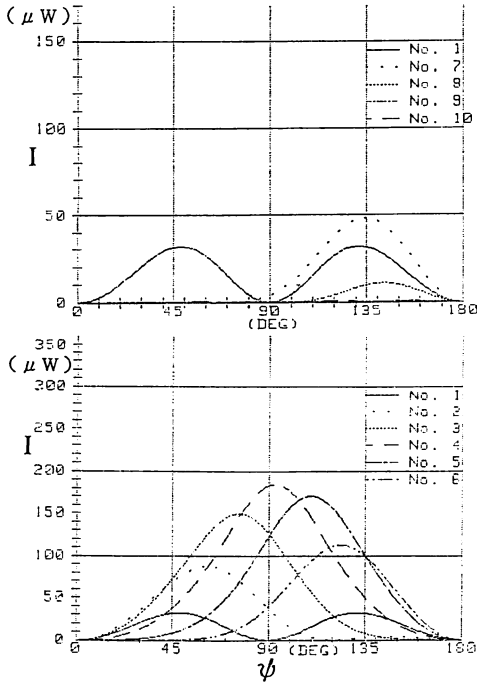


Fig. 16 The degree of polarization I vs. angle Ψ with angle ϕ as parameter. $|N_3|=1.58030$, $|N_1|=|N_2|=1.58000$, $\theta_1=30$ deg. No. 1: $\phi=0$, 2: $\phi=10$ deg, 3: $\phi=20$, 4: $\phi=30$, 5: $\phi=40$, 6: $\phi=50$, 7: $\phi=60$, 8: $\phi=70$, 9: $\phi=80$, 10: $\phi=90$.

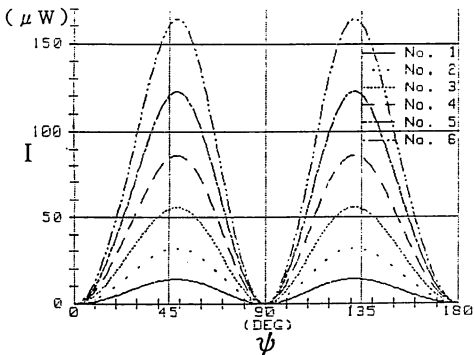


Fig. 17 The degree of polarization I vs. angle Ψ with $|N_3|$ as parameter. $|N_1|=|N_2|=1.58000$, $\phi=0$, $\theta_1=30$ deg. No. 1: $|N_3|=1.58020$, 2: $|N_3|=1.58030$, 3: $|N_3|=1.58040$, 4: $|N_3|=1.58050$, 5: $|N_3|=1.58060$, 6: $|N_3|=1.58070$.

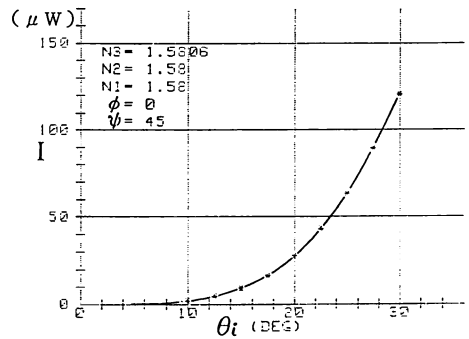


Fig. 18 The degree of polarization I vs. angle θ_i .

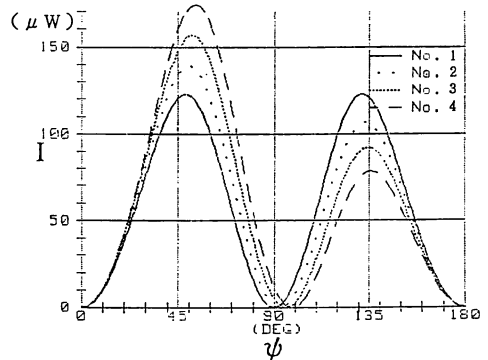


Fig. 19 The degree of polarization I vs. angle Ψ with ϕ as parameter. $|N_3|=1.58060$, $|N_1|=1.58000$, $\theta_1=30$ deg. No. 1: $\phi=0$, 2: $\phi=1$ deg, 3: $\phi=2$, 4: $\phi=3$.

以上の結果は PC の複屈折が一軸結晶性であるとの仮定をもとに導いたものである。もし二軸結晶性と仮定した場合、 I の計算式は前述のものより多少複雑になるが同様に計算することができる。その計算結果を Fig. 20 に示す。

Fig. 20 は、 $|N_2|$ と $|N_1|$ に多少差がある場合の計算結果である。差が 4×10^{-5} 程度であれば $\phi=0^\circ, 2^\circ$ で $|N_2|=|N_1|$ の計算結果に比べあまり変化していない。

もし $\phi=0^\circ$ であれば、垂直入射による複屈折は $|N_2|$ と $|N_1|$ の差によるものなので、垂直入射での測定値から $|N_2|$ と $|N_1|$ のおよその差を知ることができる。レターデーションが 30 nm とすると(7)式より

$$n'' - n' = \frac{\lambda \alpha}{2\pi h} \quad \alpha: \text{位相差 (ラジアン)}$$

$$= \frac{\alpha'}{h} \quad \alpha': \text{レターデーション}$$

$$= 2.5 \times 10^{-5}$$

となる。したがって、Fig. 6(A)の PC 基盤の $|N_1|$ と

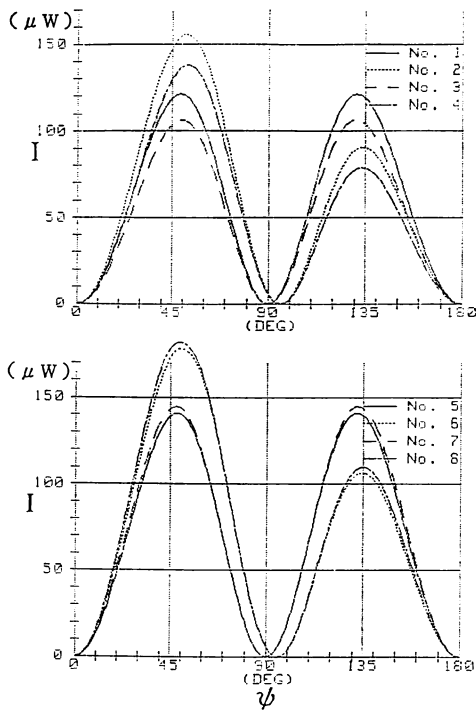


Fig. 20 The degree of polarization I vs. angle ψ with $|N_1|$, $|N_2|$ and ϕ as parameter. $|N_3| = 1.58060$, $\theta_1 = 30$ deg.

No.	$ N_1 $	$ N_2 $	ϕ (deg)
1	1.58002	1.58000	0
2	1.58002	1.58000	2
3	1.58004	1.58000	0
4	1.58004	1.58000	2
5	1.58000	1.58002	0
6	1.58000	1.58002	2
7	1.58000	1.58004	0
8	1.58000	1.58004	2

$|N_2|$ の差は大きいところで約 3×10^{-5} と考えられる.

ただし $|N_1| = |N_2|$ であっても $\phi \neq 0$ ならば, 垂直入射によるレターデーションはゼロにならない.

いずれにせよ, $|N_3|$ と $|N_1|, |N_2|$ の差は $|N_1|$ と $|N_2|$ の差に比べてかなり大きいと考えられるので, 射出成形 PC 基盤はほぼ一軸結晶性であると考えられる.

7. ま と め

前節までの結果をまとめると次のようになる.

- (1) 射出成形 PC 基盤の光学的異方性はほぼ一軸結晶性で, その光学軸は基盤表面に対してほぼ垂直である.
- (2) 垂直方向の主屈折率を N_3 とすると $|N_3 - N_1|$ は 6×10^{-4} 程度である.
- (3) PC 基盤と PMMA 基盤によるノイズレベルの差は(1), (2)の結論より導かれる直線偏光の楕円偏光化によるものである.

したがって, 基盤の光学特性を正しく評価するためには, 従来のような基盤面内方向の複屈折のみを測定する垂直入射による方法では不十分である. そのためには三つの主屈折率の差を評価する必要がある. その方法の一つとして, 前述した斜め入射による測定方法が有効と思われる.

おわりにあたり, ご指導いただきましたオリンパス光学工業(株)取締役・諸隈肇技術開発部長に感謝いたします.

文 献

- 1) 今村修武: "光磁気ディスクメモリの現状", 日本応用磁気学会誌, 8 (1984) 347.
- 2) 石井泰弘: "ディスク基板の種類と特性", 光磁気ディスク, 今村修武監修 (トリケップス, 東京, 1986) pp. 231-239.
- 3) 内山 晋: "光磁気記録媒体", 日本応用磁気学会第 42 回研究会資料 (1985) p. 7.
- 4) 松村宣秀: "光学ヘッドの開発(II)", 光磁気ディスク, 今村修武監修 (トリケップス, 東京, 1986) p. 220.
- 5) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, New York, 1980) p. 673.
- 6) 応用物理学会光学懇話会編: 結晶光学 (森北出版, 東京, 1975) pp. 128, 159-161.