

講義

フレッシュマンのための現代光学—VI
偏光の扱いと応用素子

太田 義徳

NEC 研究開発技術本部 〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1993年8月2日受理)

Modern Optics for Freshmen—VI
Optical Polarization and Devices

Yoshinori OHTA

R&D Planning and Technical Service Division, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 216

1. はじめに

光学的測定的手段として、偏光の解析の研究は古くから行われており、結晶の光学的異方性の解析による対称性の特定、エリプソメトリ法による固体表面や薄膜の解析、光弾性法による応力解析などがよく知られており、これらの基礎となる偏光の測定法、解析法や表示法については、これまでに数多くの名著が記され、遺されている¹⁻³⁾。

レーザーの開発によって始まったレーザー光のエレクトロニクスへの応用の展開では、この偏光を利用した光部品や機器の開発が数多く進められてきている。偏光の測定法や解析法、表示法については他著に譲ることとし、ここでは、レーザー光に偏光の状態として情報を付加することを主眼に置いて解説する。前半は主に波動の伝搬について述べ、後半では偏光を利用した素子について述べる。以下、第2節では光の偏りの一般的な説明と屈折率の異方性のある結晶中での光の伝搬特性の説明を行う。

そして後半では、偏光を応用した素子について、静的に偏光を弁別または整えるための素子である偏光素子を第3節において、時間的にダイナミックに制御する偏光制御器については、偏光を制御する素子に原理として多用されている各種の物理光学効果と併せて第4節で説明する。

2. 光の偏り

2.1 偏光

光は電磁波の一種の横波であって、マックスウェルの電磁界方程式を満たすベクトル量である。平面波の持つ情報としては、振幅（または強度）、位相、周波数（波長）のパラメータに加えて偏光の状態がある。

光の領域での平面波の偏光状態は直線偏光、円偏光、楕円偏光のいずれかに分けられる。平面波の進行方向に垂直な断面内での光の電界ベクトルは直交する成分に分解でき、その成分の間の位相差によって合成電界の描く軌跡は直線、円、楕円を与える。図1に示すように直交成分の振幅が等しい場合を考え、位相差が0または $\pm\pi$ のとき直線偏光、 $\pm\pi/2$ のとき円偏光、上記特定の値以外の任意の位相差のときを楕円偏光と呼ぶ。

偏光状態を簡便な計算によって求め、表示する方法は古来幾つか編み出されている。代表的な手法の一つがジョーンズベクトルによる偏光の取扱いである。これは、系に入射する偏光状態を、直交する電界成分を要素とする 1×2 の列ベクトルで表し、途中に挿入された媒質や部品の偏光特性を 2×2 の行列で表して、これらベクトル、行列の積によって途中または射出の偏光状態を列ベクトルで求める方法であって、透過特性や反射特性に偏光依存性のある媒質や複数の部品で構成される複雑な系における偏光状態の解析には有効である。

ジョーンズ行列の手法では要素や演算が複素数による

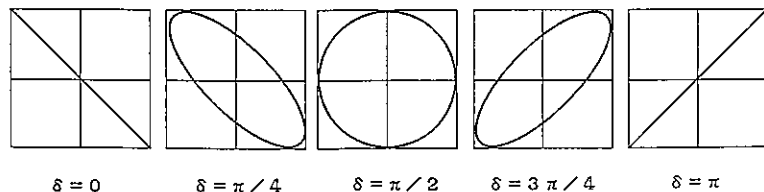


図1 偏光の状態

取扱いとなる。偏光の状態を、その要素を四つの実数（ストークスパラメータ）を用いて 1×4 の列ベクトルで表し、媒質や部品の偏光特性を 4×4 の行列（ミュラー行列）で表して実数による計算を可能とする方法がストークス法またはミュラー行列計算法と称する方法である。

また、四つのストークスパラメータのうち三つの独立なパラメータを直角座標軸にとって、偏光状態を球面上の点で表現するポアンカレ球による表記もしばしば用いられている。

2.2 複屈折性

等方で均質、無損失の媒質が光が進む場合、直交する成分間の位相差や振幅は時間や場所によらず一定で偏光の状態も一定している。結晶のように屈折率の異方性を有する媒質では、光波が進むにつれ偏光状態は変化する。

異方性媒質中の平面波の伝搬の様子は、結晶の対称性を反映した誘電率テンソルの下でマクスウェルの電磁界方程式を解くことで知ることができる。誘電率テンソルは一般に六つの成分で表されるが、主軸変換を施すと三つの成分で表すことができる。マクスウェルの式に平面波の解を代入すると電界成分 E に関する斉次方程式が導かれる。 E がゼロでない解を持つために、係数行列式 $= 0$ から、次の関係式が得られる。

$$\frac{s_1^2}{1/n^2 - 1/\epsilon_1} + \frac{s_2^2}{1/n^2 - 1/\epsilon_2} + \frac{s_3^2}{1/n^2 - 1/\epsilon_3} = 0 \quad (1)$$

平面波の波面法線ベクトル s すなわち波面伝搬方向を与えると、屈折率 n が媒質の持つ主誘電率 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ によって表されることを示す。(1)式を位相速度 $v_i = c/\epsilon_i^{1/2}$ で表すと、

$$\frac{s_1^2}{v_p^2 - v_1^2} + \frac{s_2^2}{v_p^2 - v_2^2} + \frac{s_3^2}{v_p^2 - v_3^2} = 0 \quad (2)$$

となり、 v_p^2 に関する2次方程式となる。この式をフレネルの位相速度の式という。異方性媒質中を伝搬する平面波は、位相速度、偏光状態の異なる二つの独立な波が存在する。二つの平面波の位相速度の違い、すなわち $n = c/v_p$ から、屈折率の違いを複屈折という。

波面法線方向によって二つの平面波の屈折率が異なる

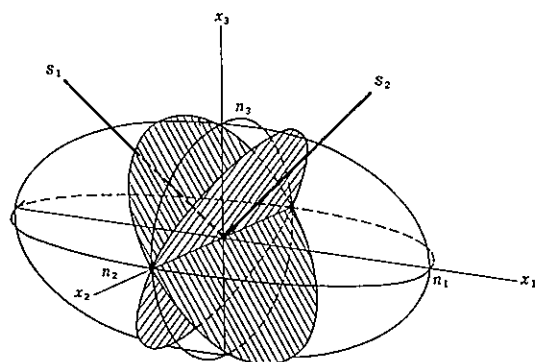


図2 屈折率曲面

り、これを表すのが屈折率曲面（図2）であって、一般には三軸の楕円体で表され、これを屈折率楕円体といい、次の式で表される。

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (3)$$

複屈折を示さない方向があり、この方向が一方のみの結晶を一軸性結晶、二方向ある結晶を二軸性結晶という。一軸性結晶では屈折率楕円体は回転楕円体となる。この複屈折を示さない波面伝搬方向を光学軸という。

3. 偏光デバイス

光回路を構成する上で、光の偏光状態を所望の状態に整えたり、時間的に変化させる機能が必要となる。偏光状態を整える素子を偏光素子、時間的に変化させる素子を偏光制御素子とここではいう。

3.1 偏光素子

光の偏光を一定状態に作り出す受動素子としては、移相子、旋光子、偏光子、偏光分離素子等を挙げることができる。

(1) 移相子

移相子は直交する偏光成分に移相量の差を与える素子で、代表的な素子はコンペンセータ（補償子）であり、 $1/2$ 波長板や $1/4$ 波長板も移相子の一つである。通常、水晶のように透明性の高い複屈折結晶を光学軸を含む面

(主平面)に垂直に光が透過するように切断研磨して作られている。また、近年、コヒーレント光通信や一部の光ファイバーセンサーのように単一モード光ファイバーを透過した光を干渉させ、その干渉光強度を検出するような光回路系では、光ファイバーをコイル状に曲げ、コア部に応力を付加し、光弾性効果による複屈折を利用した移相子も検討されている⁹⁾。

(2) 旋光子

旋光子は偏光状態を θ だけ回転させる素子であって、水晶のように旋光性を有する結晶の、光学軸方向に進む右周り、左周り円偏光間に生ずる円複屈折による位相差を利用するものである。後に述べるファラデー効果と類似するが、旋光性が相反な効果であるのに反し、ファラデー効果は非相反である。45 度回転角の旋光子とやはり 45 度回転角のファラデー回転子とを光透過方向に連続に配置して組み合わせて、入射直線偏光と出射直線偏光の角度差が 90 度となるように構成する光アイソレータや光サーキュレータが提案されている。

(3) 偏光子

偏光子は特定の直線偏光を取り出す素子であり、偏光分離素子は直交する二つの直線偏光を空間的に光路を分離する素子である。用いられている光学現象には、複屈折、反射、透過、回折、吸収、二色性など多岐に挙げられる。代表的な素子に関して、表 1 は偏光子に対して素子のタイプと用いられている光学的な原理とをまとめている。

まず偏光子に関しては、積層板偏光子は光軸に対してブリュースタ角に配置した、シリコンのように高い屈折率の板によって s 波を反射し、p 波を透過させるもので、透過光中の s 波成分を少なくするために多数枚を重ねて用いられている。

フィルム偏光板は、近年液晶ディスプレイパネルに多

く利用されてきている。一方向に延伸した高分子のシートにヨードを含浸させたものであって、延伸によって複屈折が生じると同時に生じる複吸収ともいえるべき、偏光による吸収損失の差を利用する吸収型の偏光子である。シート状で大きな面積のものが作れ、液晶パネルを挟み込んで使う上記の用途には好都合であるが、高分子の不整や散乱等で消光比が十分に得にくい場合もあり、計測や光部品等では使われていない。

金属/誘電体積層偏光子¹⁰⁾は図 3 に示すように厚さ数 nm の金属膜と厚さ数百 nm の誘電体の交互多層膜よりなっており、TE 波を吸収させ、TM 波を透過させる吸収形の偏光子である。金属膜を Cu、誘電体を石英で構成した素子で、波長 0.85 μm で消光比 46 dB、挿入損 0.3 dB の結果が得られている。大面積の素子を作成することは難しいが、ファラデー回転子と組み合わせてファイバー通信の小型の光アイソレータとして実用化されている。

図 4 および図 5 に示す複屈折回折格子形偏光子¹¹⁾は、ニオブ酸リチウム結晶表面からのプロトンイオン交換が常光線屈折率に比べ異常光線屈折率を大きく増大させることを利用して、異常光線に対して回折を起こし、常光線は透過となるように位相格子を形成した板状の偏光回折形の偏光子である。消光比 20 dB、挿入損 0.1 dB の特

表 1 偏光子

タイプ	原理
積層板偏光子	高屈折率積層板によるブリュースタ角での p 波透過、s 波反射。
フィルム偏光板	高分子延伸フィルムの二色性吸収。
金属/誘電体積層偏光子	金属層による TE 波吸収、TM 波透過。
複屈折回折格子形偏光子	複屈折結晶板に異常光線に作用する位相格子を形成。常光線は透過。

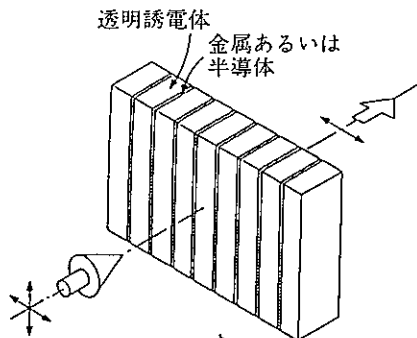


図 3 金属/誘電体積層偏光子

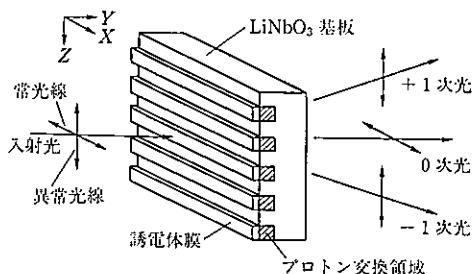


図 4 複屈折回折格子形偏光子の基本構造

偏光	空間的位相変化	出射光
常光線		回折なし
異常光線		全て回折

図5 複屈折回折格子形偏光子の動作原理

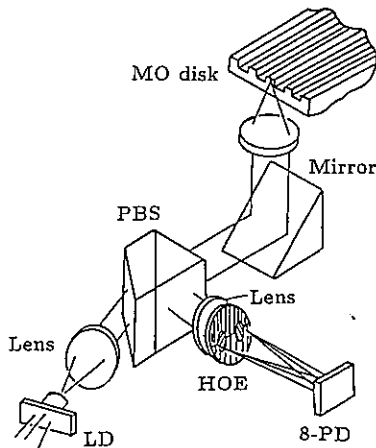


図6 ホログラム光学素子を使った光ヘッド

性が得られている。大面積で量産に向けた構造であり、また、板の両面を利用する、板を重ね合わせて消光比や広波長帯域化を図る等、特性向上の工夫も容易という特長もある。金属/誘電体積層偏光子と同じようにファラデー回転と組み合わせ、光通信用アイソレータを実現する研究が進められた。近年、回折格子をホログラム状に形成して偏光分離機能とビーム分割機能を併せ持たせた機能光学部品として、図6に示すように光磁気ディスク用の光ピックアップへ応用する試みが行われている⁷⁾。

上記以外、光ファイバーのコア部までクラッドを研磨し、金属膜や複屈折結晶を装荷して導波光のうちの特定の電界成分を吸収や放射させるタイプの光ファイバー形、同様の原理を導波路光に適用する検討も行われている。

(4) 偏光分離素子

偏光分離素子は、複屈折が大きく透明性のよい光学結晶を利用した素子の研究が古くから行われて来ている。

表2 偏光分離素子

タイプ	原理
複屈折プリズム	<ul style="list-style-type: none"> ・複屈折プリズム反射面での常光線反射, 異常光線透過 (گران=トムソン・プリズムなど) ・複屈折プリズムでの常光線/異常光線の屈折角の違い (ウォラストン・プリズムなど) ・複屈折結晶板での異常光線のウォークオフ (サバル板)
偏光フィルター	ガラス直角プリズム反射斜面での多層膜によるs波反射増強, p波透過
稠密格子	高屈折率/低屈折率稠密格子が作る構造複屈折による異常光線のウォークオフ

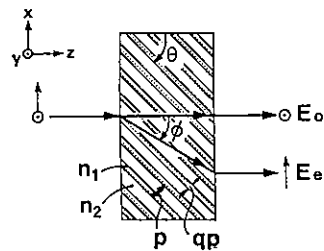


図7 積層形偏光分離素子

表2には偏光分離素子に対して素子のタイプと用いられている光学的な原理とをまとめてある。گران=トムソン・プリズムに代表されるように、方解石のプリズムを屈折率が結晶の異常光線屈折率と常光線屈折率の間の値を持つカナダバルサムで貼り合わせ、異常光線はプリズム反射面を透過、常光線は全反射させるように構成したタイプのもの、ウォラストン・プリズムのように結晶楔によって二光線に角偏位を与えるタイプのもの、サバル板のように、異常光線に生ずるウォークオフ (波面伝搬方向からポインティングベクトルの方向がずれる) を利用して二光線を偏光分離する素子など広く知られている。

上記の偏光分離素子は結晶を使って高価であるのに対して、より安価な等方性のガラスを使って、その直角プリズムの斜面にs波の反射率を高める誘電体干渉膜を設けて貼り合わせて用いる偏光フィルターが広く実用されている。

屈折率の高い誘電体と低い誘電体とを交互に積み重ねその周期を光波長以下の稠密な層格子を形成すると、人工的な複屈折 (構造複屈折) が発現し、図7に示すように⁸⁾、層に斜めに入射した異常光線は複屈折結晶と同様

にウォークオフを生じる。このためサバール板と同じ機能が実現できる。高屈折率膜にアモルファス・シリコン、低屈折率膜に SiO_2 を用いた計算では、ウォークオフ角 19.5° の結果が示されている。

4. 偏光制御素子

時間的に偏光を制御することは、外場によって偏光間の位相差すなわち媒質の複屈折を電場、歪や磁場等の外場によって制御することである。利用されている効果は、電気光学効果、光弾性効果、磁気光学効果等の物理光学効果に帰着される。このうち多く使われる代表的な効果は、電気光学効果と磁気光学効果である。

4.1 電気光学効果と偏光制御器

電気光学効果は、結晶に電界を印加すると屈折率楕円体の変形や回転を起こす効果であって、1次の効果であるポッケルス効果と2次の効果であるカー効果がある。よく利用されるのは1次のポッケルス効果である。

例えば、電気光学結晶としてよく用いられる結晶の一つである LiNbO_3 や LiTaO_3 結晶の場合、結晶の外から電場 E_x, E_y, E_z が印加されると、(3)式の屈折率楕円体は、

$$\begin{aligned} & (1/n_0^2 - r_{22}E_y + r_{13}E_z)x^2 \\ & + (1/n_0^2 - r_{22}E_y + r_{13}E_z)y^2 \\ & + (1/n_e^2 + r_{33}E_z)x^2 - 2r_{22}E_xxy \\ & + 2r_{51}E_yyz + 2r_{51}E_xzx = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、 r_{ij} はポッケルス係数である。また、 LiNbO_3 は一軸性結晶であって、 $n_x = n_y = n_0$ (常光線屈折率)、 $n_z = n_e$ (異常光線屈折率) とし、 z 軸を光学軸に取っている。

4.1.1 横効果形偏光制御器

いま、 x 方向に外部電場が印加され、光の透過方向を y 方向としたとき、 $E_x \neq 0, E_z = E_y = 0, y = 0$ で屈折率楕円体は、

$$(1/n_0^2 + r_{13}E_x)x^2 + (1/n_e^2 + r_{33}E_z)x^2 = 1 \quad (5)$$

となり、楕円体の回転は生ぜず、主屈折率が変化する。電場を印加しない時の楕円体、

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (3')$$

と比較すると、電場 E_x によって近似的に、

$$n_x = n_0 - n_0^3 r_{13} E_x / 2$$

$$n_z = n_e - n_e^3 r_{33} E_z / 2$$

となり、主屈折率の大きさが変化するようになる。

結晶の光透過方向の長さを1とし、 xz 面内で 45° の直線偏光が入射したとすると、結晶透過後の x, z 両方

向成分の位相の差 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = 2\pi(n_x - n_z)l/\lambda_0$$

となり、電場 E_x の強度によって、 $\Delta\phi$ が $0 \sim \pi/2 \sim \pi$ と変位し、出射光の偏光は直線偏光、楕円偏光、円偏光、楕円偏光、直線偏光と推移する。

電気光学結晶の後の光路中に既に述べた偏光子を挿入することによって、任意の直線偏光成分の偏光子透過強度を電場によって制御することができる。このような原理に基づくのが電気光学強度変調器である。上の例では、電場の方向と光の透過方向が直交しているため、横効果形変調器という。

4.1.2 縦効果形偏光制御器

また、KDP (KH_2PO_4) 結晶の場合で、 z 方向に外部電場が印加され、光の透過方向を x 方向としたとき、 $E_z \neq 0, E_x = E_y = 0, z = 0$ で屈折率楕円体は、

$$(1/n_0^2)x^2 + (1/n_0^2)y^2 + 2r_{63}E_zxy = 1$$

となり、楕円体の回転が生じる。 xy 面内で座標軸の主軸変換を施し、元の座標軸 x, y に比し新しく 45° 回転した軸を x', y' とすると、

$$n_{x'} = n_0 - n_0^3 r_{63} E_z / 2$$

$$n_{y'} = n_0 + n_0^3 r_{63} E_z / 2$$

となる。 x 方向または y 方向に振動する直線偏光が入射したとすると、結晶透過後の x', y' 両方向成分の位相の差 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = 2\pi(n_{x'} - n_{y'})l/\lambda_0$$

となり、印加電場 E_z の強度によって、出射光の偏光は直線偏光、楕円偏光、円偏光、楕円偏光、直線偏光と推移する。この場合も偏光子と組み合わせた強度変調器が実用されている。この場合は縦効果形電気光学変調器という。

4.2 磁気光学効果と回転直線偏光器

光を透過する媒質に外部磁場を印加すると、直線複屈折、円複屈折が生ずる。光の進行方向に平行に磁場を印加し円複屈折を生じさせる効果をファラデー効果、垂直に印加し、直線複屈折を起こすのを、フォークト効果またはコットン・ムートン効果という。

ファラデー効果を用いると、入射偏光を直線-楕円-直線と辿るのではなく、直線偏光のまま回転させることができる。

光透過方向に磁化された媒質中では、右周りおよび左周りの円偏光が伝搬中不変に保たれる偏光状態となり、いわゆる固有伝搬光となる。入射直線偏光は振幅の等しい二つの円偏光に分かれて媒質中を進む。各々の屈折率 n_+, n_- の間に差があると、媒質を透過した後、 n_+, n_-

の差と媒質の長さ l に比例した偏光の回転が生じる。回転角 θ は、

$$\theta = VHI$$

で与えられる。ここで、 V はヴェルデ定数、 H は印加磁界を表す。3.1(2)に述べたように旋光性と類似するがファラデー効果は非相反であるのに対して旋光性は相反な効果である。すなわち、ファラデー効果は印加磁界に対して順方向、逆方向に光が透過しても同一方向に偏光回転を生じるのに対し、旋光性では光学軸方向に光が往復すると偏光回転は元に戻る。

媒質が強磁性体であると、一定以上の印加磁界で内部自発磁化が飽和し単位長さ当りの回転角は飽和して一定となる。45°ファラデー回転子と偏光子とを組み合わせた光アイソレータはこの原理に基づく。

媒質が常磁性体であると、回転角は印加磁界の大きさに比例して増大する。コイル等によって印加磁界を制御することによって回転直線偏光を生成することができる。

4.3 音響光学効果と回転直線偏光器

音響光学効果は音波の作る位相格子によって光が回折を受ける効果であって、超音波光変調器や偏向器、波長フィルター等が実用になっている。この超音波光変調器の一次回折光と0次光とをそれぞれ左右周りの円偏光にして合波すると、音波の周波数に応じた回転周波数の回転直線偏光が得られる⁹⁾。

このような回転直線偏光器の用途の一例として次のようなものがある。光磁気ディスク媒体のカー回転角の測定のように、媒体からの反射光の微小な偏光回転角変化を計るのに、通常は直線偏光光を媒体に照射し、反射光を偏光子に透過して測定する方法が取られるが、回転直線偏光を媒体に照射し、反射光を固定した偏光子に透過し、透過強度を光電変換した電気信号の位相を高感度に

測定する方法もある。

5. おわりに

偏光の扱いと応用素子について、筆者なりの知識の範囲で述べてきた。偏光の扱いや表示については、古くポアンカレ表示やジョーンズベクトルによる取扱いなど詳しく論じられている。それらは文献に譲ることにした。ここでは、エレクトロニクスで用いる光学に視点を置き、応用素子を中心に述べてきた。その意味では多少「看板に偽り有り」の誇りを免れない。お許し願いたい。

光ディスクを含む光情報機器や光通信などのエレクトロニクス産業分野では偏光や結晶光学の知識が新しい部品や光回路を実現する上で極めて重要であったし、これからも重要性は変わらない。拙文がフレッシュマンの今後の勉学に多少のきっかけにでもなれば幸いである。

文 献

- 1) 久保田広, 浮田勇吉, 會田軍太夫編: 光学技術ハンドブック 増補版(朝倉書店, 東京, 1975).
- 2) 飯田修一, 大野和郎, 神前 照, 熊谷寛夫, 沢田正三編: 光学的測定(朝倉書店, 東京, 1969).
- 3) 応用物理学会光学懇話会編: 結晶光学(森北出版, 東京, 1975).
- 4) 笹岡英資, 高城政浩, 菅沼 寛: “ファイバ偏光子”, 応用物理, 62 (1993) 51-52.
- 5) K. Shiraishi, T. Yanagi, Y. Aizawa and S. Kawakami: J. Lightwave Technol., 9 (1990) 430-432.
- 6) Y. Urino, H. Nishimoto and Y. Ohta: Technical Digest 2nd Optoelectronics Conference (1988) pp. 167-171.
- 7) A. Ohba, Y. Kimura, S. Sugama, Y. Urino and Y. Ono: Jpn. J. Appl. Phys., 28 (1989) 359-361.
- 8) K. Shiraishi and S. Kawakami: Opt. Lett., 15 (1990) 516-518.
- 9) J. Shamir and Y. Fainman: Appl. Opt., 21 (1982) 364-365.