

偏光分離・合成用人工光学異方性媒質の作製

白石 和男

宇都宮大学 工学部

電気電子工学科 助教授

1. はじめに

任意の偏光状態の光を直交する2つの平行な偏光ビームに分離あるいは逆に合成することは、光通信、光センシング、光交換、光情報・画像処理等に不可欠で重要な技術の一つである。この作用をもつ偏光素子をウォークオフ (Walk-off) 偏光子と呼ぶ。この偏光分離は光学的な一軸異方性媒質が有している特徴である。この一軸異方性とは、特定の方向 (主軸) に対する屈折率が他の2方向と異なる性質をいい、良く知られた材料として方解石やルチルがある。方解石の小さなブロックを文字の書かれた紙の上に置くと、文字が二重に見えるという実験は良く知られている。これは、電界の向きが直交した2つの光に分離することに依る (等位相面に対して垂直に伝搬する偏波を常光、斜めにシフトしながら伝搬する偏波を異常光と呼ぶ)。

従来、ウォークオフ機能は自然界に存在する結晶の一軸異方性を利用してきた。透明度や硬度、耐環境性などの点を考慮すると利用可能な結晶は実質上、ルチルと方解石の2つの結晶に限られてきた。しかし、自然界に存在するこれらルチルや方解石の偏光分離角は高々 5.6° に過ぎないという問題があった。空間光交換器や光アイソレータなどの光部品に高機能性を付加したり、小型・高性能化をもたらすためには、より大きな偏光分離角が必要である。この問題を解決するため、先に筆者らは屈折率が互いに大きく異なる2種の誘電体薄膜から成る交互多層膜が大きな一軸異方性を示すことに着目し、これを適当な方位で切り出すことにより、高いウォークオフ特性を有する新素子が人工的に合成可能であることを初めて明らかにした〔1, 2〕。

本研究では、この新偏光子を実際に合成し、自然界に存在する結晶では得られない、大きなウォークオフ特性をもつ偏光子の実現を目標にした。構成材料である2種の誘電体には石英 (SiO_2) と水素化したアモルファス状態のシリコン (a-Si:H) の組み合わせを検討した。作製は高周波スパッタリング法に依った。この試作における最も重要なパラメータはスパッタ中の全ガス圧、水素のガス分圧、および基板温度であることがわかった。試作の結果、波長 $1.55\mu\text{m}$ で偏光分離角 15.5° を得た。この値は、自然に産する結晶を用いた従来の素子の値の約3倍である。

2. 構造と理論的光学特性

筆者らによって考案されたウォークオフ偏光子の構造を図1に示す。図1 (a) は鳥瞰図で同図 (b) はこれを下面から見た図である。屈折率が n_1 と n_2 ($n_1 > n_2$) の2種の誘電体 (透明体) を交互に積層した構造であり、その各層厚は光の波長よりも十分薄い。このウォークオフ偏光子を以下、LPS (Laminated Polarization Splitter) と呼ぶ。LPSは、微細構造に起因し、図の θ 方向を主軸とする光学的一軸異方性をもつ。 q を2種の膜の周期に対する高屈折率材料 (n_1) 層の膜厚割合、即ち充填率とすると、常光 E_o 及び異常光 E_e に対するこの媒質の実効的屈折率はそれぞれ、

$$n_o = \left[qn_1^2 + (1-q)n_2^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$n_e = \left[q/n_1^2 + (1-q)/n_2^2 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

と表わすことができる〔1, 3〕。図2は、高屈折材料としてアモルファスシリコン（a-Si、屈折率は3.5と仮定）を、低屈折材料として石英を仮定した時の n_o と n_e を充填率に対してプロットしたものである。この構造が非常に大きな屈折率異方性を示すことが分かる。例えば充填率 $q=0.6$ の時には0.84にも達する。因みに、異方性が大きい結晶として知られるルチルでも高々0.296に過ぎない（方解石では0.172）。

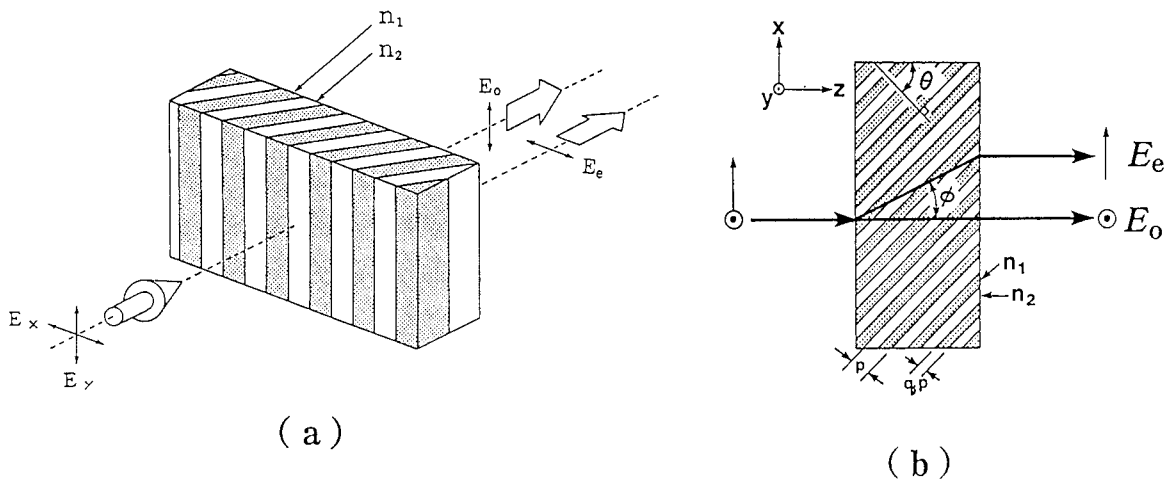


図1. LPSの構造 (a) 鳥瞰図 (b) 底面側から見た図

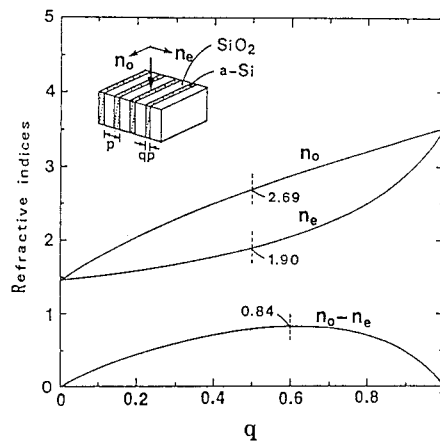


図2. LPSの光学異方性（複屈折）充填率依存性

一軸異方性媒質が有する偏光分離角 ϕ は、

$$\phi = \frac{(n_0^2 - n_e^2) \tan \theta}{n_0^2 + n_e^2 \tan^2 \theta} \quad (3)$$

で表される。 ϕ は $q=0.5$ かつ $\tan \theta = n_e/n_0$ の時に最大値をとる。構成材料の屈折率を用いてこの条件を表せば、 $\theta = \tan^{-1} [2r/(r^2+1)]$ の時に最大値

$$\phi_{max} = \frac{(r^2 - 1)^2}{4r(r^2 + 1)} \quad (4)$$

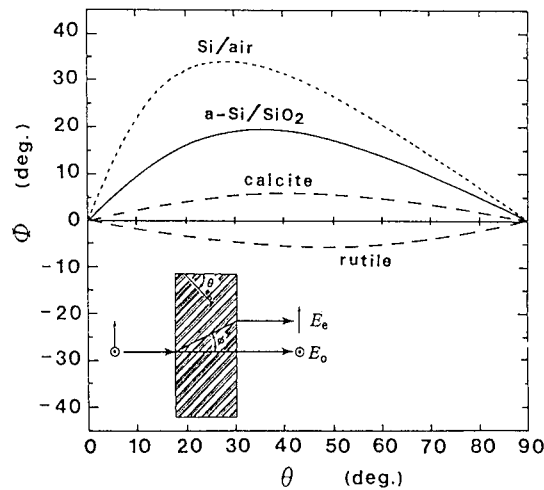


図3. LPSおよび従来の結晶の光学的主軸の傾き角に対する偏光分離特性

をとることになる。ただし、 $r = n_2/n_1$ とおいた。図3はLPSと他の結晶の偏光分離性能を、光の入射方向に対する主軸の傾き角 θ を変化させて比較したものである。LPSでは $q=0.5$ としている。a-Siと石英の組み合わせから成るLPSは従来の結晶よりもはるかに大きな偏光分離角を有することが分かる。尚、同図に示したSiと空気の組み合わせから成るLPSは、実際の作製には困難が予想されるが、理論的には35° 近い分離角も可能であることを示している。

3. 作製と評価

本研究では屈折率の大きく異なる2種 material として石英とシリコン (Si) を選んだ。石英は屈折率の小さい光学材料として良く知られ、一方Siは半導体基板の代表であり可視域では不透明であるが、長波長域では屈折率の大きい (結晶で3.5程度) 透明体でもある。これらの材料はCVD法や高周波スパッタリング法で成膜することができる。本研究では、素子の構造上、長時間にわたる連続作製が必要なことから、安全性を考慮して図4に示す構造の高周波スパッタリング装置を用いて作製した。本装置は、石英とSiを交互にスパッタリングし、基板を交互に移動することにより多層膜を形成するものである。成膜プロセスは計算機制御され、装置は自動運転が可能になっている。

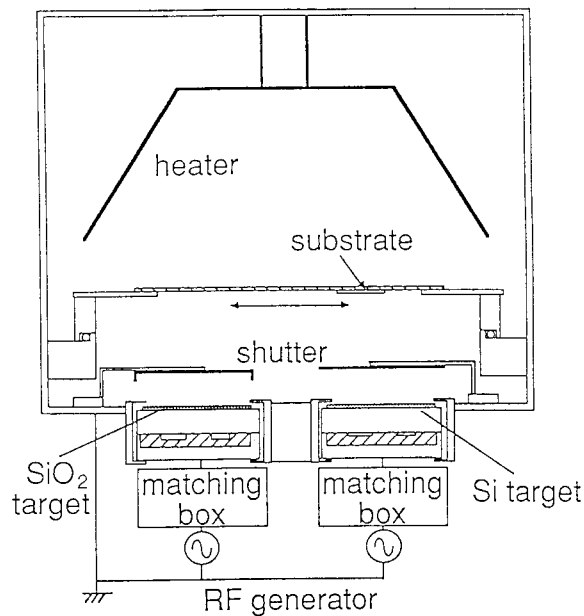


図4. LPS作製に使用した高周波スパッタリング装置略図

本研究では以下に示す一連の実験を計画し、実用可能な特性を有するLPSの作製条件を探究した。LPSをスパッタリング法で作製するためには、特にSiの成膜に際して解決しなければならない問題が大別して3つある。吸収損失の低減化、高屈折率化、及び低応力化である。Siをスパッタリング法で作製すると、一般にはアモルファス(a-Si)になる。この際、未結合手の存在のために光の吸収が増加する。これを防ぐにはスパッタ用のガスに水素を添加(水素化)すると良いことが知られている。しかし、一方で水素の添加は屈折率の低下をまねく。さらに、積層数が多くなると、蓄積した膜応力によって素子が基板ごと割れてしまう問題がある。

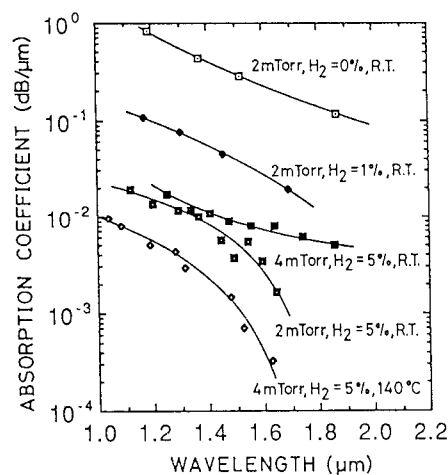


図5. 種々の作製条件に対するa-Si膜の波長に対する吸収損失

図5は、a-Si膜の吸収係数の波長特性を水素添加量及び全ガス圧、基板温度をパラメータとして調べた結果である。水素の添加によって吸収係数が激減することがわかる。また同じ水素添加量(5%)でも全ガス圧が低いほど、また基板温度が高いほど吸収係数が小さいことが分かる。

図6は同様にa-Si膜の屈折率の波長特性を水素添加量及び全ガス圧、基板温度をパラメータとして調べた結果である。水素の添加量が増加するにつれて屈折率が低下すること、及び同じ水素

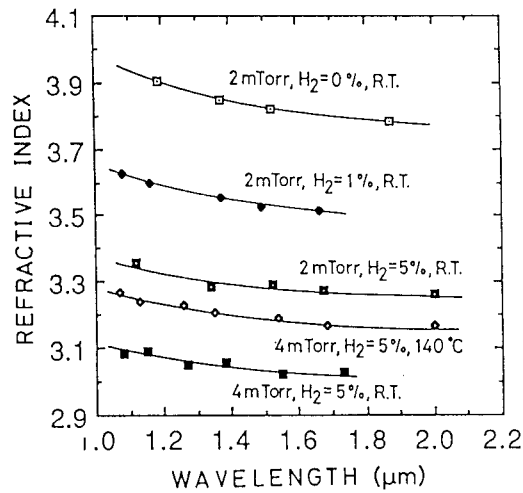


図6. 種々の作製条件に対するa-Si膜の波長に対する屈折率

添加量（5%）でも全ガス圧が高いほど屈折率が低下し、また基板温度を高くすると屈折率が増加することが分かる。一方、膜応力の低下のためには、全ガス圧を高く、基板温度を高くすることが有効であることが分かった。

以上の種々の実験結果より、最適な作製条件として、全ガス圧4 mTorr、水素濃度5%、基板温度140°Cを得た。この時のa-Si:H膜の特性は、屈折率3.18、吸収損失 7×10^{-4} dB/ μ m、圧縮応力 1.3×10^{-9} dyn/cm²であった。

以上の基礎実験をもとに、LPSの作製を開始した。石英基板上に、石英と水素化a-Si:Hを交互に成膜した。各層の厚さは67nmで、全積層数は1440層に達した。図7に作製後の断面を電子顕微鏡で観察した結果を示す。交互に規則的に積層されているのが分かる。

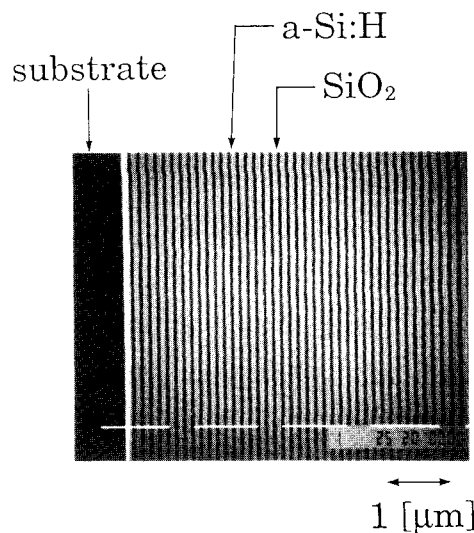


図7. 作製したLPSの断面の電子顕微鏡写真

基板上に積層した膜を基板ごと斜め（33°）に切断して1 mm程度の厚さに切り出し、両面を66 μ mまで研磨後、無反射コーティングを施してLPSとした。波長1.55 μ mの光を入射させて、偏光分離特性を調べた。図8にその様子を示す。常光（E_o）と異常光（E_e）に分離しているのが分かる。分離角は15.5°であった。この値は、ルチルや方解石の3倍近い値である。これを用いれ

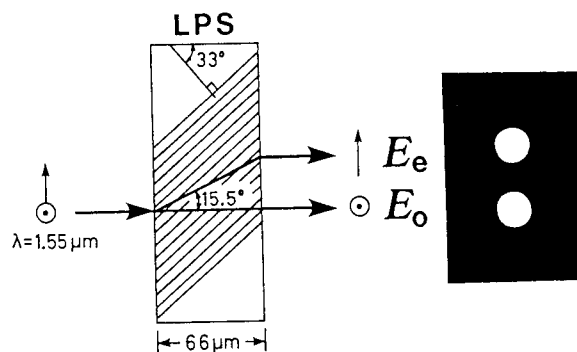


図8. 作製したLPSの偏光分離特性

ば、光通信や光情報処理用デバイスの小型・高性能化ができる。特に、光アイソレータやファイバ型スイッチなどには直ちに応用可能である。これによって、当初の研究目標を達成することができた。尚、LPS作製のために開発した、高屈折率・低損失・低応力の薄膜作製技術や1000層以上にわたる超多層積層技術は、広い分野に応用できる工学上の重要な基礎技術と言える。

4. おわりに

本研究では、大きな光学異方性をもつ新素材を人工的に合成することに成功した。得られたLPS素子の偏光分離特性は、従来自然界に存在していた結晶の約3倍の特性を有していることが明らかになった。本研究で開発したLPSは、今後その高効率性を活かして光アイソレータ、スイッチ、光磁記録用ヘッドなどの種々の光デバイスに利用されるであろう。他のいかなる素材よりも優れた偏光分離特性を有している事実は、これを利用する分野でのキーデバイスといえる。

最後に、本研究の遂行にあたり多大なご支援を賜った(財)高柳記念電子科学技術振興財団並びに関係各位に深く感謝致します。また、共同研究者の東北大学・川上彰二郎教授および同研究室の諸兄に深謝致します。

参考文献

- [1] K. Shiraishi and S. Kawakami, "Spatial walk-off polarizer utilizing artificial anisotropic dielectrics," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 9, 516(1990).
- [2] K. Shiraishi, T. Sato, and S. Kawakami, "Experimental verification of a from-birefringent polarization splitter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 3, 211(1991).
- [3] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon, Oxford, Oxford, 1975.