

大きな分離角をもつ積層形偏光分離素子

白石 和 男

任意の偏光状態の光を、偏波が互いに直交する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・画像処理などの分野で重要な技術のひとつである。この偏光分離作用をもつ偏光分離素子をウォークオフ (walk-off) 偏光子と呼ぶ。現在の光通信システムで不可欠となっている偏光依存性のない光アイソレーターやサーキュレーターなどでは、必ず複数のウォークオフ偏光子が使われている。光通信路中の信号光を偏光分離した後、それぞれの偏光ビームを偏光依存性がある機能素子を通し、その後で2つの偏光ビームを再び合成することにより、素子全体としての偏光依存性をなくしている。

偏光のウォークオフは光学的な一軸異方性媒質が有する特長である。一軸異方性とは特定の一方向(光軸)に対する屈折率が他の2方向と異なる性質をいい、よく知られた材料に方解石やルチルがある。方解石のブロックを文字の書かれた紙の上に置くと、文字が二重になって見えるという実験はよく知られており、これは互いに電界の向きが直交する2つの光に分離することによる。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。

従来からウォークオフ偏光子には自然界に存在する結晶が利用されてきた。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ルチルや方解石などに限られている。表1にルチルと方解石について、常光および異常光に対する屈折率¹⁾ n_o , n_e と偏光分離角を示す。これらの結晶の偏光分離角は6°程度、すなわち偏光ビームの分離幅は素子長の10分の1にすぎないことがわかる。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性能をもつウォークオフ偏光子が望まれている。

1. 積層形偏光分離素子 (LPS) の構造と原理

屈折率が互いに異なり、光の波長に比べて十分薄い2種の誘電体薄膜からなる交互多層膜が光学的な一軸異方性を示すことはかなり以前から知られていた²⁾。この2種の誘電体の屈折率差を大きくするほど異方性も大きくなる^{3,4)}。この性質を利用し、高いウォークオフ特性を実現させるものが積層形偏光分離素子 LPS (laminated polarization splitter) である⁵⁻⁸⁾。

構造の概略を図1に示す。(a)は鳥瞰図で(b)はこれを上面からみた図である。屈折率が n_1 と n_2 の2種の透明体を交互に積層した構造であり、その各層の厚さは光の波長よりも十分薄い。LPSは、積層膜面に垂直な方向(図の θ 方向)を光軸とする一軸異方性を示す。光軸が光の入射方向に対して斜めになっているため、入射光はLPS内で常光と異常光に分離して伝搬し、これによりLPSはウォークオフ偏光子として働く。

まず、LPSのもつ屈折率異方性を調べる。高屈折率層が占める割合、すなわち充填率を q とし、高屈折率層と低屈折率層の屈折率をそれぞれ n_1 , n_2 とする。膜面に平行な電界をもつ光(常光 E_o)および膜面に垂直な方向に電界をもつ光(異常光 E_e)に対するLPSの屈折率をそれぞれ、 n_o , n_e とすれば

$$n_o^2 = qn_1^2 + (1-q)n_2^2 \quad (1)$$

$$1/n_e^2 = q/n_1^2 + (1-q)/n_2^2 \quad (2)$$

となる^{2,5)}。屈折率異方性を大きくするには n_1 と n_2 の差を大きく選べばよい。またLPSのような積層構造では常に $n_o > n_e$ となり、方解石と同様に負の一軸異方性にな

宇都宮大学工学部電気電子工学科(〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: kazuos@cc.utsunomiya-u.ac.jp

表1 方解石とルチルの光学異方性¹⁾と偏光分離特性.

複屈折物質	方解石 (CaCO ₃)			ルチル (TiO ₂)		
波長 (μm)	0.7	1.0	1.5	0.7	1.0	1.5
n_o	1.652	1.643	1.635	2.548	2.483	2.451
n_e	1.484	1.479	1.477	2.827	2.746	2.709
分離角 (度)	-6.18	-6.04	-5.83	5.96	5.78	5.74

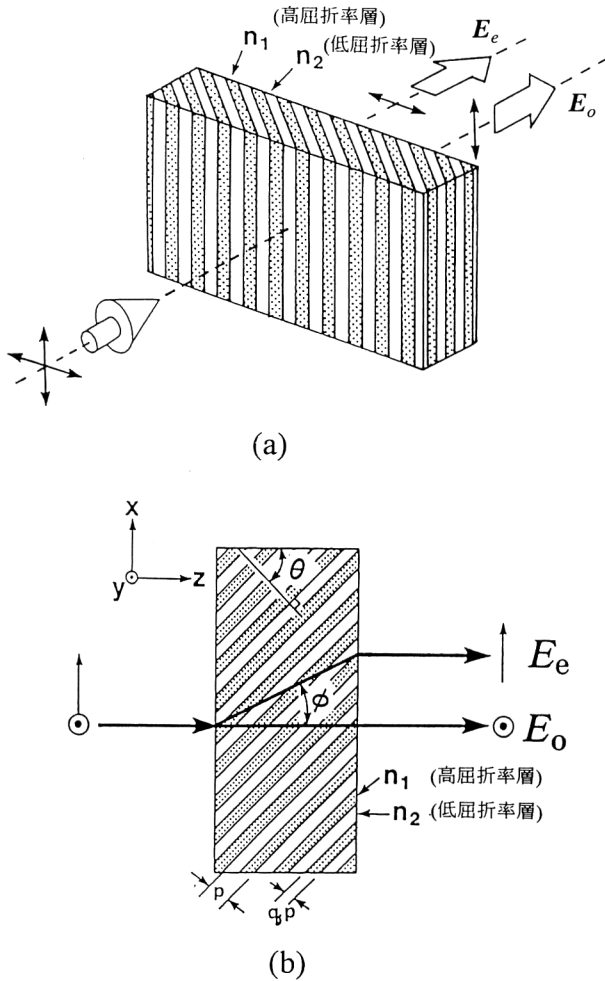


図1 LPSの構造。(a) 鳥瞰図, (b) 上面側からみた図.

る。一方、本稿の最後に紹介する蒸着膜などにみられる柱状構造では、ルチルと同様に正の一軸異方性を呈する。一般に半導体は高屈折率であり、その中でもSiは光通信用長波長帯 (1.3~1.55 μm 帯) において透明である特長がある。そこで、高屈折層としてSi、低屈折層としてSiO₂を仮定し、充填率を変えたときの n_o と n_e を求めた結果を図2に示す。ここで、SiとSiO₂の屈折率はそれぞれ3.5, 1.45と仮定した。この構造が非常に大きな屈折率異方性を示すことがわかる。例えば、充填率 $q=0.6$ のときには0.84にも達する。異方性が大きい結晶として知られるルチルでもたかだか0.26にすぎない。

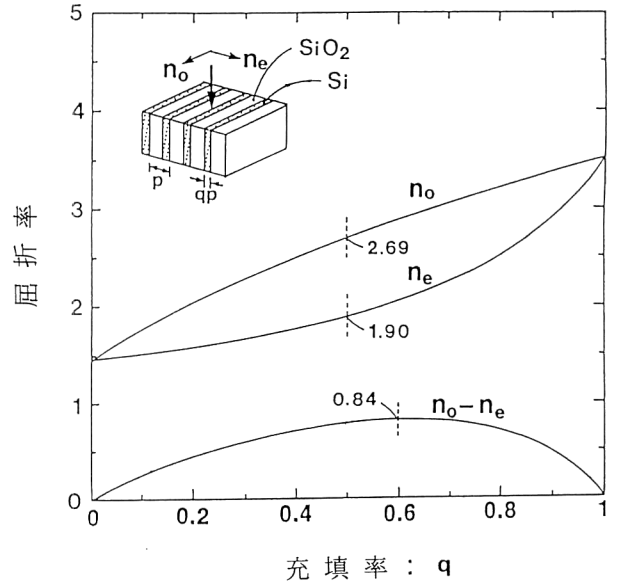


図2 SiとSiO₂との交互多層膜が有する光学異方性.

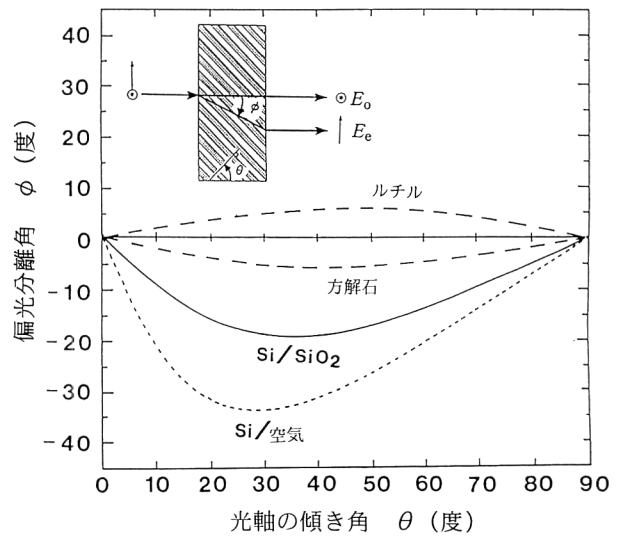


図3 LPSの偏光分離特性の計算値.

次に、偏光分離角を最大にするためのLPSの構造パラメータを示す。充填率 q は0.5、すなわち構成する2種の誘電体層厚が等しいときに偏光分離角が最大になる。さらに、光の入射方向に対する光軸の傾き角 θ を、

$$\theta = \tan^{-1}[2r/(1+r^2)] \quad (3)$$

とした場合に偏光分離角が最大となり、その値 ϕ_{\max} は

$$\phi_{\max} = \tan^{-1}[(1-r^2)^2/4r(1+r^2)] \quad (4)$$

で与えられる⁹⁾。ただし、 $r = n_2/n_1$ とおいた。

図3はSiとSiO₂の交互多層膜からなるLPSの偏光分離特性を、光軸の傾き角 θ に対して求めた結果である。充填率 q は0.5とした。参考のためにルチルと方解石についても示した。LPSは従来の結晶よりも大きな偏光分

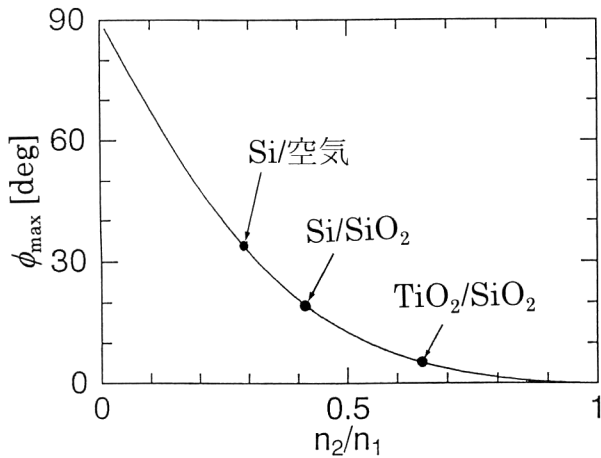


図4 LPSを構成する2種の材料の屈折率に対する最大偏光分離角の計算値。

分離角を有することがわかる。同図に示したSiと空気の組み合わせでは、実際の作製は困難が予想されるものの、理論的には35°近い分離角が可能であることを示している。図4はLPSを構成する2種の誘電体薄膜の屈折率比 n_2/n_1 に対する最大偏光分離角を示している。LPSの動作が初めて観測されたときに使用されたTiO₂とSiO₂との組み合わせ例⁷⁾も示した。同図より、屈折率の比が大きい組み合わせを選ぶことが重要であることがわかる。

2. LPSの作製

Siは屈折率が高いほか、低屈折率物質であるSiO₂との付着力の点でも望ましい。SiやSiO₂の薄膜はCVD(chemical vapor deposition)法や高周波スパッタリング法などを用いて作製することができる。これらの薄膜を交互に積層した後、斜めに切り出せばLPSが得られる。LPSの実用を考慮すると、用途によるがその全積層厚は数十～数百 μm が必要になり、1層あたりの膜厚は波長より十分小さい数十nmであるから、総積層数は1000層以上に達する。したがってLPSの作製に際しては、積層界面の平坦化と膜の応力の低減化に留意しなければならない。また、一般にSiの吸収損失と屈折率はその成膜方法に大きく依存するため、成膜条件の最適化が重要になる。

一般に蒸着法やスパッタリング法などの気相から急冷して成膜するSiはアモルファス(a-Si)となり、その光学特性は単結晶のSiと大きく異なる。10¹⁹～10²⁰/cm³の多量の未結合手が存在するためバンドギャップ内に局在準位が多量に存在し、結晶のSiでは吸収がない長波長域の光に対しても吸収が大きくなる。一方、プラズマCVD法で作製されたSi膜は原料ガス中にH原子が存在するために、膜中にH原子が取り込まれて水素化アモルファス・

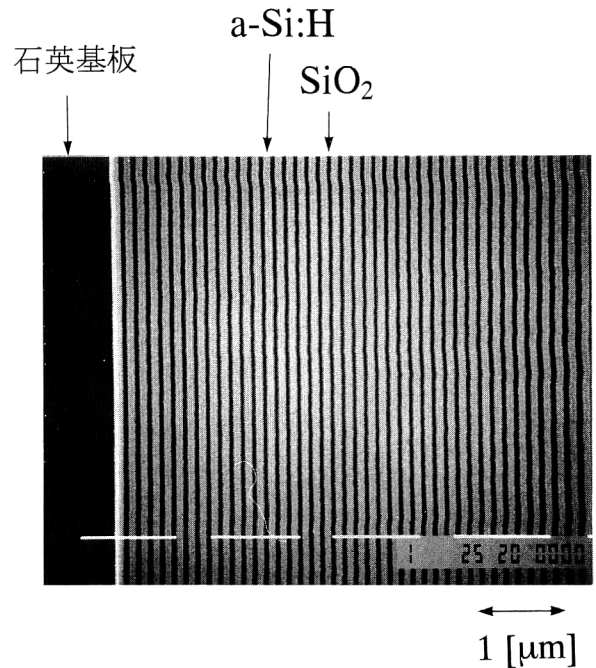


図5 a-Si:HとSiO₂の交互多層膜の断面SEM写真。

シリコン(a-Si:H)となる。これらのH原子が未結合手を終端させるためa-Si:H膜は吸収が小さい。同様にスパッタリング法でもスパッター・ガスにH₂を混合することによって水素化を行い膜の低損失化ができることが知られている^{9,10)}。本章ではこの手法を用いて成膜したa-Si:H層とSiO₂層からなるLPSを紹介する⁸⁾。

図5は高周波スパッタリング法により作製したLPS用多層膜の断面のSEM(走査型電子顕微鏡)写真である。Siの水素化は、スパッタリング時のArガスに対する水素分圧を5%にすることによって行った。水素化によりa-Si膜の光学定数は大幅に変化し、波長1.55 μm において屈折率は3.81から3.28に、吸収係数は0.28dB/ μm から0.004dB/ μm まで減少する。屈折率も減少するのは水素化によってSiの密度が低下したためと考えられる。また、層間の界面のゆらぎはバイアススパッタリング法を併用することで回避できる。積層は、SiとSiO₂のターゲットを交互にスパッタリングすることにより行った。

約100 μm 厚さまで積層した交互多層膜を積層面に対して斜めに切り出し、両面を研磨した後、対空気の反射防止膜をコートしてLPSとした。図6は偏光分離動作を示している。分離角は18°であり、この値はルチルや方解石の場合の約3倍である。図7は素子長70 μm のLPSに対し、波長1.55 μm の光を常光と異常光が同程度励振されるような偏波状態で入射したときの、出射端における2次元の光強度分布を測定したものである。良好に偏光分離さ

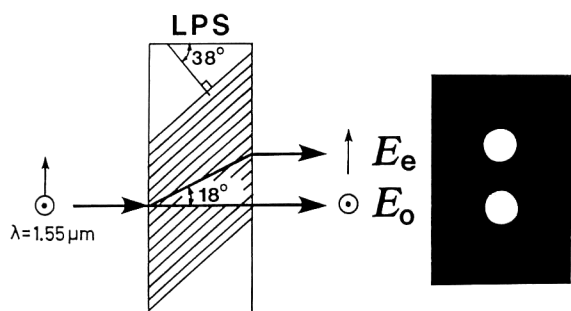


図6 試作した LPS の偏光分離動作.

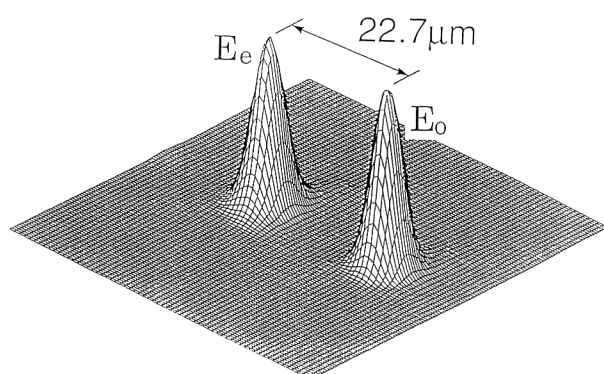


図7 試作した LPS の射出端における 2次元光強度分布.

れているのがわかる。挿入損失は、常光で 0.084 dB、異常光で 0.063 dB であり微小光学用部品として十分小さな値といえる¹¹⁾。LPS の作製方法としては、このほかにプラズマ CVD 法を利用して波長 1.3 μm 用の素子を試作した例などがある¹²⁾。

このようにして作製された LPS は、大きな偏光分離角と低損失性が実証された。ただし、欠点としては開口幅が 100 μm 程度に制限されることである。ファイバー型光部品への応用は可能であるが、数 mm オーダー角の開口が必要なバルク型光部品への適用は難しい。これは、上記の作製方法では作製に要する時間が長くなること、積層膜の平坦度の確保と膜応力の低減化、などの問題をクリアしなければならないことによる。

3. 作製方法の簡単化

前章で紹介した LPS の作製方法を、より簡便にした方法が最近提案された^{13,14)}。図 8 に示すようにターゲットには Si のみを用い、スパッタリング時の Ar ガスに対して、酸素の添加をタイマーにより ON/OFF させる方法である。酸素が導入されたときには SiO₂ 層が成膜される。機構が簡単のために信頼性が高く、またスパッタリングを連続して行えるために作製に要する時間が短縮できる。さらに成膜室内には機械的な動作がないため、パーティクルの

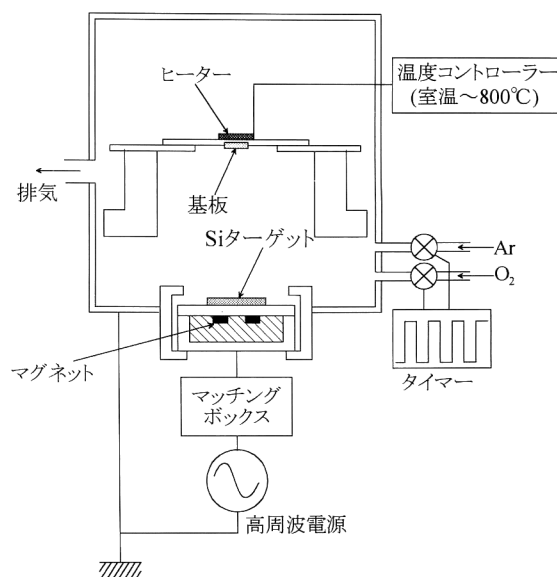


図8 単純化した LPS 作製装置の概略.

発生が防止できる特長もある。

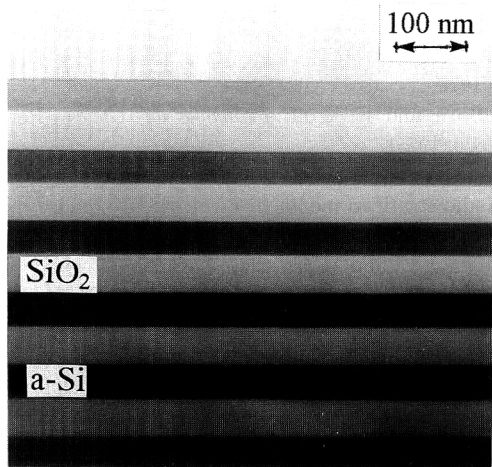
本作製方法では基板温度を高く (600°C 以上) することにより、Si を多結晶 (poly-Si) 化していることも特長のひとつである。これにより a-Si で問題となる未結合手による吸収が回避できるほか、単結晶 Si と同程度の高屈折率 (波長 1.55 μm で 3.5) が得られる。また、波長 1.3 μm 帯での吸収損失も低く抑えられる。

図 9 に積層膜の断面 TEM (透過型電子顕微鏡) 写真を示す。(a) は基板温度が室温で成膜した多層膜である。酸素の ON/OFF だけの簡単な操作であっても急峻な境界面が得られることがわかる。ただし、基板温度が低い場合、Si はアモルファスになっている。(b) は基板温度が 700°C における積層膜であり、Si 層が多結晶になっている。poly-Si 層表面には微細な凹凸が存在するが、その上に堆積される SiO₂ のマイグレーション効果により、この凹凸は積層方向に伝搬しない。

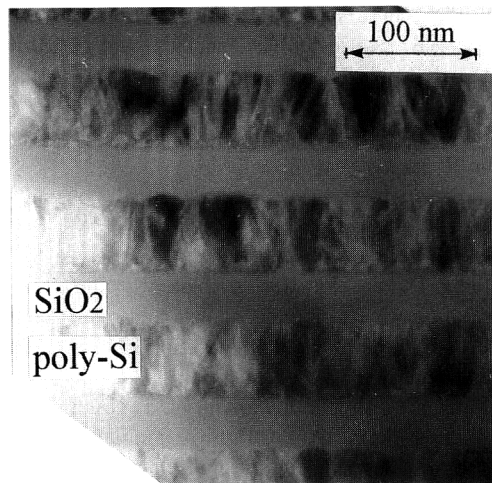
本方法により作製した LPS の偏光分離角は、波長 1.33 μm および 1.55 μm でそれぞれ 22° および 21° となり、いずれも 20° 以上の大きな値になった。また損失は 0.24 dB/100 μm (波長 1.55 μm) と十分小さな値が得られた¹⁴⁾。積層厚は 100 μm まで可能であることが確認されており、さらに厚膜化が試みられている段階である。

4. 素子の広開口化への試み

先に紹介した LPS の作製方法の欠点は、LPS の開口幅が多層膜の積層厚程度に制限されることである。そこで本稿の表題からは少し外れるが、新しい試みとして斜め蒸着を利用して開口の大きなウォークオフ偏光子を作製する方



(a)



(b)

図9 酸素導入のON/OFFのみにより作製した多層膜の断面TEM写真。(a)基板温度が室温の場合、(b)700°Cの場合。

法が提案されているので紹介する^{15,16)}。この作製方法では数十mm角の素子を、同時に多数作製できる特長がある。

一般に光学用蒸着膜においては、膜中にボイド（空孔）が存在することは嫌われている。しかし、このボイドを逆に利用することができる。ボイドが微小な径をもつ針状の状態が無数存在し、かつそれらが特定方向に配向している場合、膜全体としてはボイドが配向している方向に光軸を有する光学的一軸異方性を呈する。空間中に高屈折率の針状物質が配向して存在する場合も同様である。そこで、基板に対して斜めに針状物質（あるいはボイド）を形成すれば、ウォークオフ偏光子が得られるはずである。ちなみに、屈折率 n_2 の物質中に屈折率 n_1 の針状物質が存在し、屈折率 n_2 の物質の充填率を q とすると最大の偏光分離角が得られる充填率および針状物質の基板法線方向に対する

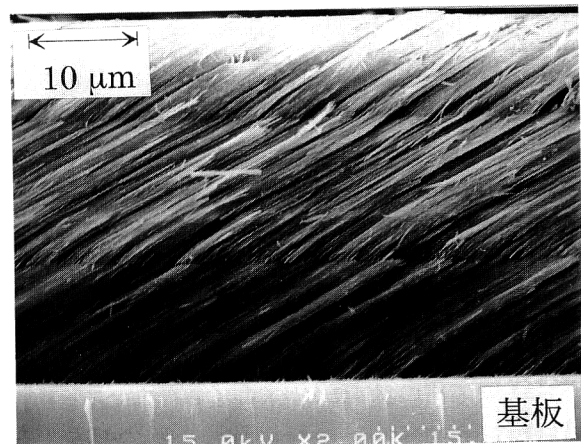


図10 Siの斜め蒸着厚膜の断面SEM写真。

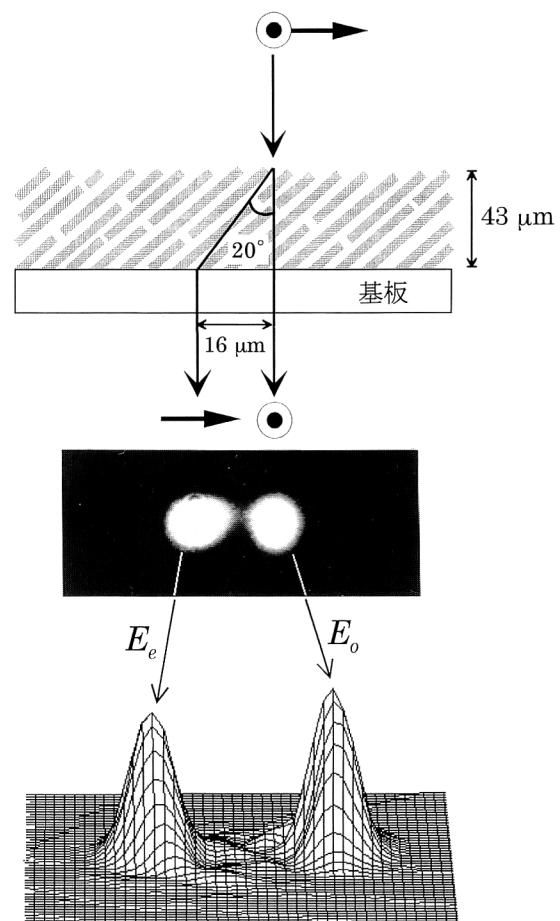


図11 Si斜め蒸着厚膜の偏光分離動作。

傾き角 θ は

$$q = \frac{\sqrt{2(1+r^2)} - (1+r^2)}{1-r^2} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{2(1+r^2)} - 1}{r} \right\} \quad (6)$$

で与えられる。ただし、 $r = n_1/n_2$ とおいた。このときの偏光分離角は

$$\phi_{\max} = \tan^{-1} \left\{ \frac{r^2 - 2\sqrt{2(1+r^2)} + 3}{2r[\sqrt{2(1+r^2)} - 1]} \right\} \quad (7)$$

となる¹⁵⁾。

針状物質が斜めに配向した状態の膜は、斜め蒸着法を利用すれば作製できる。図 10 は Ar を蒸着槽に導入しながら、基板の法線方向に対して 85° の方向から Si を斜めに蒸着して作製した厚膜の断面 SEM 写真である¹⁶⁾。蒸着は、電子ビーム加熱によって行った。成膜中に Ar を導入したのは、蒸着槽のガス圧を高くして膜がポーラスになるのを助長するためである。a-Si の針状コラムが 58° の方向に成長しているのがわかる。膜厚 43 μm、a-Si の充填率 q は 0.53、コラムの直径は約 20 nm である。この厚膜に波長 1.55 μm の光を通して偏光分離特性を調べた結果が図 11 である。偏光分離角は 20°、消光比は 20 dB であった。大きな偏光分離角が得られたのは、a-Si と空孔との屈折率比が大きいためである。ただし、透過損失は 1.5 dB/10 μm (波長 1.55 μm) と大きかった。これは a-Si に未結合手が存在するためであり、水素化あるいは多結晶化により改善できるものと思われる。なお、現在の段階では膜厚が 50 μm 程度まで成長できることが確認されており、膜厚がどの程度まで厚くできるかは今後の課題である。

以上、LPS の原理と作製方法および最近の技術状況を紹介した。LPS の作製は、2 種の誘電体薄膜の交互積層を単純に繰り返すだけの操作である。マクロな結晶成長と呼ぶこともできる。従来の「高級な」光学薄膜作製技術にとらわれない、新しい成膜方法によりバルク状 LPS を実現することが今後の目標である。なお、本稿で紹介した内容の前半は筆者が東北大学在職中に始めた研究の成果であり、同大学の川上彰二郎教授ならびに佐藤尚博士によるところが大きく、記して感謝申し上げます。poly-Si/SiO₂ からなる LPS の作製では本学の室幸市博士 (現在株式会社コーニングジャパン)、斜め蒸着では青柳友行氏 (現在株式会社フジクラ)、また斜め真空蒸着の技術に関しては坂本幸夫氏 (株式会社シンクロン) の貢献が大きく、感謝申し上げます。

文 献

- 1) 工藤恵栄：分光学的性質を主とした基礎物性図表 (共立出版, 1972)。
- 2) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon, Oxford, 1975)。
- 3) A. Yariv and P. Yeh: "Electro-magnetic propagation in periodic stratified media II. Birefringence, phase matching and X-ray lasers," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 438-448.
- 4) M. Kitagawa and M. Tateda: "Form birefringence of SiO₂/Ta₂O₅ periodic multilayers," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3359-3362.
- 5) K. Shiraishi and S. Kawakami: "Spatial walk-off polarizer utilizing artificial anisotropic dielectrics," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 516-518.
- 6) 川上彰二郎, 白石和男, 大橋正治: 光ファイバとファイバ形デバイス (培風館, 1996) pp. 249-263.
- 7) K. Shiraishi, T. Sato and S. Kawakami: "Experimental verification of a form-birefringent polarization splitter," *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 211-212.
- 8) T. Sato, K. Shiraishi, K. Tsuchida and S. Kawakami: "Laminated polarization splitter with a large split angle," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 2633-2634.
- 9) E. Palik: *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press, 1985) pp. 571-586.
- 10) E. C. Freeman and W. Paul: "Optical constants of rf sputtered hydrogenated amorphous Si," *Phys. Rev. B*, **20** (1979) 716-728.
- 11) T. Sato, T. Sasaki, K. Tsuchida, K. Shiraishi and S. Kawakami: "Scattering mechanism and reduction of insertion losses in a laminated polarization splitter," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 6925-6934.
- 12) O. Hanaizumi, Y. Lee, I. Takahashi, T. Nakajo, J. Murota and S. Kawakami: "a-SiC:H/SiO₂ laminated polarization splitter for the wavelength region longer than 1.3 μm prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition," *Opt. Fiber Technol.*, **1** (1995) 359-362.
- 13) K. Muro and K. Shiraishi: "Poly-Si/SiO₂ laminated walk-off polarizer having a beam-splitting angle of more than 20°," *J. Lightwave Technol.*, **16** (1998) 127-133.
- 14) 室 幸市, 白石和男: "20°以上の分離角を有する積層形偏光分離素子用光学多層膜の低損失化", 電子情報通信学会論文誌, **J82-C-I** (1999) 824-825.
- 15) K. Shiraishi and K. Matsumura: "Fabrication of spatial walk-off polarizing films by oblique deposition," *J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 2417-2420.
- 16) K. Shiraishi and T. Aoyagi: "Fabrication of spatial walk-off polarizing film exhibiting a large split angle by oblique silicon deposition," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1232-1234.

(2000年10月17日受理)