

波長より細かな格子構造による光制御

菊田 久雄・岩田 耕一

近年の微細加工技術の発達にはめざましいものがあり、サブミクロンの微細構造が製作できるようになってきた。光学の分野においても、露光とエッチングにより格子の溝を階段状にすることで高効率の回折素子が作られている。このような状況の中で、光の波長より細かい構造をもつ光学素子に興味もたれている。人工的に制御された微細構造を作ることによって任意の屈折率分布や光学異方性をもたせることができ、微細構造をうまく設計することで新しい機能をもった光学素子が製作できる。

微細構造をもった光学素子の研究は1980年代後半より盛んになってきた。その後の微細加工技術の進歩にともない、さまざまな機能をもつ光学素子が提案、試作されている。反射防止構造、偏光制御回折素子、高効率回折素子などが考えられており、Raguinらは微細構造をもつ光学素子に関する技術をsub-wavelength structured (SWS) technologyと呼んでいる^{1,2)}。本稿では微細な格子構造をもつ光学素子の可能性を紹介し、それらの製作と設計の方法についても述べる。

1. 微細構造と有効屈折率

周期的な微細構造の例として、図1のような n_1 と n_2 の屈折率をもつ層状のものを考える。この中を進む光波の伝搬速度(位相速度)は偏光に依存する。屈折率を真空中の光速/伝搬速度で定義すると、偏光方向により屈折率が異なるので、光学異方性が現れる。上記の屈折率は有効屈折率(effective refractive index)と呼ばれ、構造の方向性のために発生する光学異方性は構造複屈折(form birefringence)または形態異方性と呼ばれる^{3,4)}。

ピッチ($a+b$)が光の波長に比べて十分に小さい場合、

層と平行に進む光波についての有効屈折率は簡単な式で与えられる。電場が層に平行に振動する波(TE波)については、

$$\tilde{n} = \sqrt{\frac{an_1^2 + bn_2^2}{a+b}} \quad (1)$$

電場が層に垂直な振動をする波(TM波)については

$$\tilde{n} = \sqrt{\frac{a+b}{a/n_1^2 + b/n_2^2}} \quad (2)$$

になる。式(1)の屈折率は誘電率の平均に、式(2)は誘電率の逆数の平均に対応している。留意すべきことは、層の厚み a と b の比により有効屈折率が n_1 から n_2 の範囲で変わること、および、各層が等方性媒質で構成されているにもかかわらず光学異方性が現れることである。したがって、微細構造の形状を制御することで任意の屈折率や光学異方性が作り出せる。微細構造により屈折率を積極的に作り出す意味で、有効屈折率のことを人工屈折率(artificial refractive index)と呼ぶこともある。

2. 微細構造の応用

現在考えられている微細構造の素子は、製作方法から次の3つに分類できる。第1は、誘電体多層膜のようにスパッター等で屈折率の異なる薄い層を積み上げる方法である。非常に多くの層を積み上げることでバルク状にすることもできる。第2は、プレーナー型の回折光学素子の製作と同様に、描画露光とエッチングにより微細構造を作るものである。この方法では波長程度の厚みをもつ構造しかできないが、面内において形状の異なる微細構造を分布させることができ、人工的に屈折率の分布を作ることができる。第3は、斜め蒸着によって方向性のある微細構造を作る方法である。高度な微細加工技術を用いずに構造複屈折をもつ薄膜が作成できる。

大阪府立大学工学部機械システム工学科(〒593 堺市学園町 1-1)
E-mail: kikuta@measure.mecha.osakafu-u.ac.jp

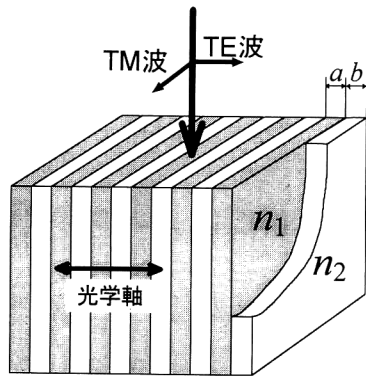


図1 1次元周期性多層膜の構造複屈折.

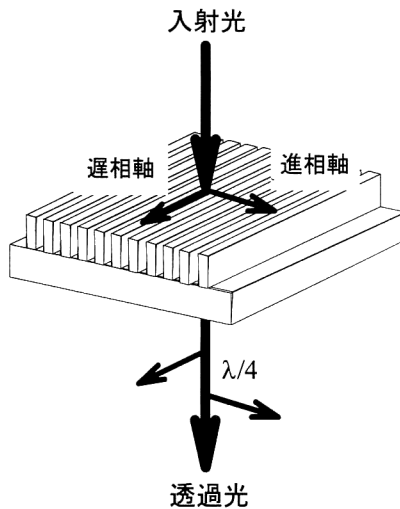


図2 微細周期格子による1/4波長板.

以下ではこれらの製作方法を使って作られたいくつかの光学素子を紹介する.

2.1 偏光素子

構造複屈折は通常の光学結晶に比べて強い異方性を示す. 図1の例において, $n_1=1.0$, $n_2=2.0$ で層の厚さが等しい($a=b$)とき, 有効屈折率の差 $\bar{n}-\tilde{n}$ は0.316になる.

強い異方性を利用すると, 波長程度の溝深さをもつ微細周期格子(図2)を作るだけで1/4波長板や1/2波長板として作用する. 1983年にFlandersが窒化珪素(SiN_x)の240 nmピッチの微細周期格子をもつ波長板を試作しており⁵⁾, その後, 紫外線レーザーを使ってのホログラフィックな製作も試みられている^{6,7)}. また, 構造複屈折のもうひとつの特徴である強い波長分散(構造の周期が波長と同程度になると現れる)を用いれば⁸⁾, 広い波長域に対して一定の位相遅れをもつ広帯域な複屈折波長板ができる可能性もある^{9,10)}.

斜め蒸着による方法で複屈折板を作ることにも可能である. 熔融石英ガラスの基板に Ta_2O_5 を斜め方向から蒸着すると, 図3のような断面をもつ薄膜ができる¹¹⁾. この膜は隙

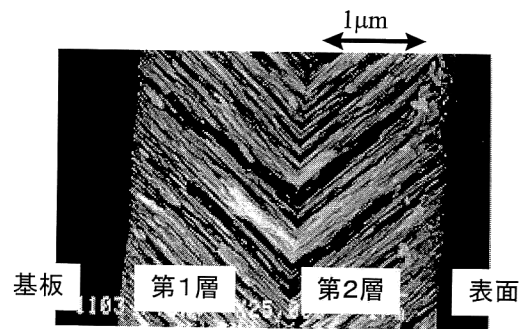


図3 斜め蒸着膜 (Ta_2O_5) の断面¹¹⁾.

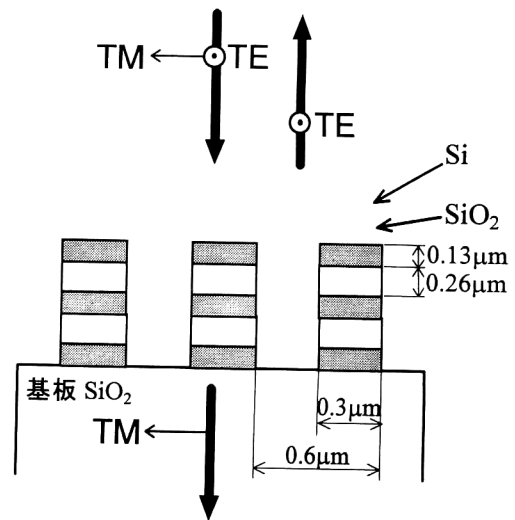


図4 偏光ミラー¹³⁾.

間のある微細構造をもち, 方向性があるために強い異方性を示す. 森本らはこの手法で500 nmの波長に対する1/4波長板を製作している¹²⁾. 図3は蒸着の方向を途中で変えた2層型のものであるが, これは波長板としての入射角依存性を低減するための工夫である.

基盤上に等方性の多層膜をつけ, エッチングによって図4のような構造を作ると偏光ミラーができる^{13,14)}. この例ではTE波がすべて反射し, TM波がすべて透過する. 同様の作用は微細構造を作らなくとも異方性の薄膜を積層することで実現できるが, 微細構造を使うことでより広い波長域にわたって偏光反射特性を保つことができる. Tyanらは図4の構造を製作し, 波長1.523 μm の近赤外線に対して220:1の偏光選択比を得ている.

透過型の偏光ビームスプリッターは, 微細周期構造をもつ部分とたたない部分が周期的に並ぶ図5のような構成で実現できる^{15,16)}. これは一種の偏光依存型の回折格子である. 微細格子部を通過する光波と微細部のない領域を通過する光波の位相差が 2π のとき, 回折波は0次だけの透過波となる. また, 位相差が π のときは0次の透過波はなく

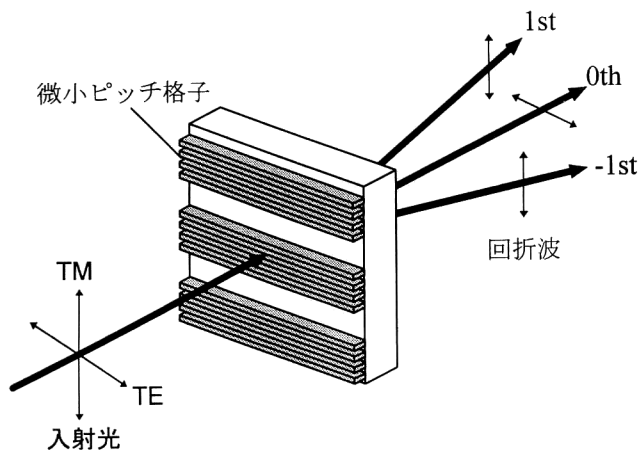


図5 偏光ビームスプリッター。

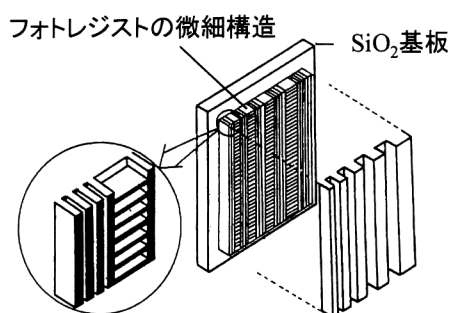


図6 集光型偏光ビームスプリッター¹⁸⁾。

なり、すべて1次以上の回折波になる。微細周期構造の異方性を利用してTE波に 2π の位相差、TM波に π の位相差がつくように微細格子部の厚さを設定すると、TE波が素通り、TM波がすべて回折する偏光ビームスプリッターができる。Xuらは、GaAs基板に微細部で $0.3\mu\text{m}$ のピッチ、回折格子として $10\mu\text{m}$ のピッチをもつ構造を製作し、波長 $1.5\mu\text{m}$ の光に対して250:1以上の偏光分離を得ている¹⁷⁾。また、青山らは図6のような複雑な微細構造のパターンを作ることで集光性をもった偏光ビームスプリッターを試作している^{18,19)}。

波長より細かい構造という意味では、赤外線用の偏光板として使われるワイヤーグリッドも微細構造素子の一部である。これと同じ原理であるが、高い消光比を得るために数nmの金属層と数百nmの誘電体層を交互に積み重ねた積層型偏光子も微細構造素子の範疇に入る²⁰⁾。また、佐藤らは等方性媒質である SiO_2 膜と TiO_2 膜を積み重ねてバルク結晶を製作し、層に対して斜め方向にカットすることで分離角の大きな偏光ビームスプリッターを製作している²¹⁾。

2.2 反射防止構造

基板表面に微細構造を作ると、外部媒質と基板の間に中

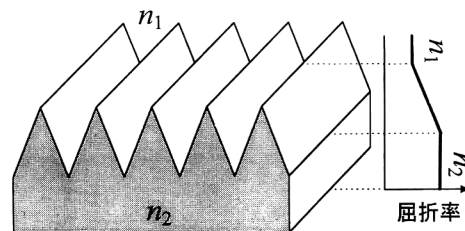


図7 反射防止構造。

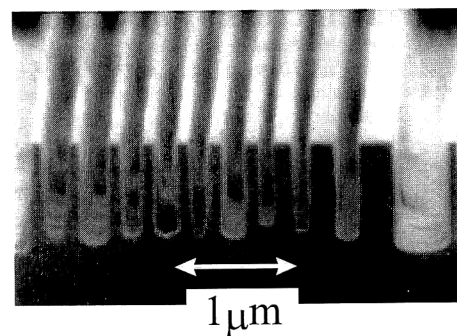


図8 高効率回折素子²⁶⁾。

間の屈折率をもつ薄膜層が存在することと等価になり、基板表面での反射が減少する。図7のように三角形の断面をもつ構造にすれば、深さ方向に屈折率が徐々に変化することになり、広い波長域にわたって反射を抑えることができる²²⁾。また、図のような1次元周期構造では反射率に偏光特性があるので、これをなくするために2次元周期構造のものが製作されている²³⁾。ピラミッド形状が並んだ微細構造が反射防止に高い効果があることはmoss eyeとして知られている^{24,25)}。

反射防止構造は赤外線用の光学素子に有効である。赤外線用の光学材料はSiやZnSe、Geなど種類が限られており、いずれも屈折率が高く表面での反射率も大きい。誘電体多層膜で反射防止を行うためには適当な屈折率をもつ誘電体材料を選ぶ必要があるが、この方法では基板表面に微細構造を作るだけで材料を選ぶ必要がない。また、数 μm 以上の波長に対しての微細構造は既存の微細加工技術で容易に製作できる。

2.3 位相板

回折素子の回折効率を上げるには、通常、格子をブレード化する。露光・エッチングのプロセスを複数回繰り返すことで階段状の溝を作ると高い回折効率を得られる。これに対し、図8のような微細構造で高い回折効率を得ようとする試みがある²⁶⁾。山と谷の比を変化させることで有効屈折率の分布をつくる。このような構造を周期的に並べて回折格子にすると、一周内の有効屈折率の分布により高い回折効率を得られる。図はGaAs基板に最小 63nm 幅の

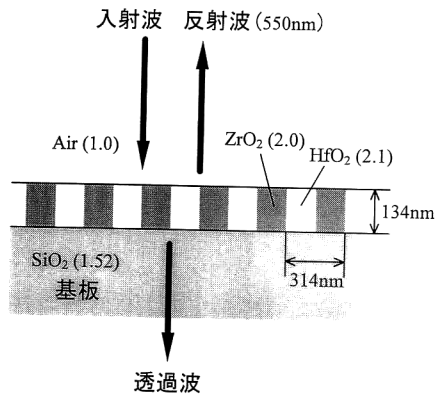


図9 導波モード型共振フィルター²⁹⁾。

微細構造を作ったものであり、波長 975 nm の光に対して 85% の回折効率が得られている。このような位相板の製作には、非常に細かい構造をつくる技術が必要であるが、一度の露光とエッチングだけでよいので露光マスクの位置合わせの必要がない。

図8では一方向への微細構造なので回折効率は偏光に依存する。これを解消するには正方形の柱または井戸を2次元的に配置すればよい²⁷⁾。その他、10.6 μm の赤外線用の反射型ゾーンプレートレンズも製作されている²⁸⁾。

2.4 波長選択フィルター

導波モード型共振フィルター (guided-mode resonance filter) と呼ばれる狭帯域の波長選択フィルターが提案されている²⁹⁾。図9のように、基板の上に2種類の高屈折率の格子構造をつくることで、特定波長だけが反射される。格子のピッチと光の波長が同程度の場合、ある波長において格子部で発生するエバネセント波と外部に出ていく放射モードの光波が強く結合する。図の例では結合が起きる波長 (550 nm) の光だけが強く反射され、その他の光は透過する。共振を利用しているのでQ値の高いフィルターである。また、周期構造部を多層にすることでさまざまな特性をもつフィルターが設計でき、透過型のものも考えられている。

3. 製作方法

第2章のはじめに述べたように、微細構造の製作は

- 1) スパッターにより多層膜を作る方法
- 2) 露光・エッチングにより凹凸を作る方法
- 3) 斜め蒸着による異方性薄膜を作る方法

の3つに分類できる。また、図4の偏光ミラーなどは1)と2)の方法を組み合わせて製作する。ここでは第2の方法について、その基本的なプロセスを紹介する。

描画は多くの場合、電子ビーム露光で行われる。電子ビ

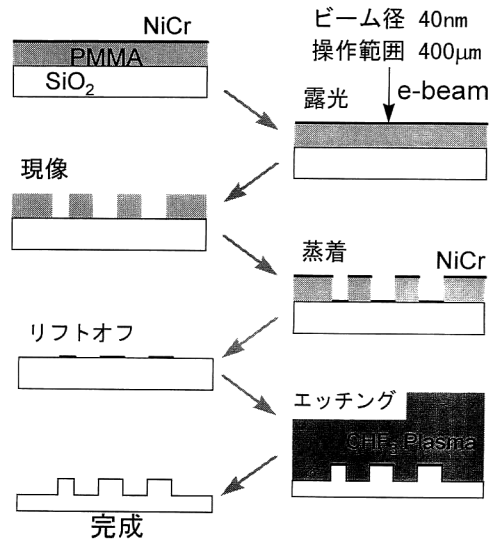


図10 微細構造の製作プロセス (SiO₂ の場合)。

ームの径は数十 nm であり、波長より細かいパターンを描くことができる。ただし、ビームの偏向だけで描ける面積が小さいこと (通常は数百 μm²) や描画に時間がかかるなどの問題があり、実用化にはフォトマスクを使うことが望まれる。文献5) では微細なパターンが描かれたフォトマスクを製作し、これをレジスト (PMMA) に密着して X 線で露光している。

ガラス基板を掘るプロセス例を図10に示す³⁰⁾。電子線描画の前にレジスト (PMMA) 上に NiCr の薄い金属膜をつける。これは電子線の露光によってたまる電荷を逃がすためである。露光と現像の後、もう一度 NiCr の膜をつけ、リフトオフでエッチング用マスクを作る。

エッチングは反応性イオンエッチング (RIE) が主流であるが、反応性イオンビームエッチングなど新しい技術もいろいろ試されている。これらはサイドエッチとよばれる横方向へのエッチングが少なく、アスペクト比の高い加工ができる。また、エッチングにおけるプラズマガスの種類もさまざま、基本的な CF₄ や CHF₃ の他に Si や GaAs では塩素系のガスが使われる。Si では塩素ガスを用いると、フッ素系のものに比べてよりサイドエッチの効果を抑制できる。図8は塩素ガスを使ったイオンビームエッチングで製作されている。

4. 設計方法

微細構造をもつ素子の設計には、第1章で述べた有効屈折率を使う方法と、電磁気学的な厳密計算を行う方法がある。

微細構造部を有効屈折率をもった薄膜として扱い、光学薄膜の計算手法で透過率・反射率を見積もる方法は

effective medium theory と呼ばれている³¹⁾。この方法は近似的な解析方法であるが、計算が単純なために設計においては見通しがたてやすい。図5や図6の偏向ビームスプリッターの設計では、はじめにキノフォーム的な考えで屈折率分布を決定し、つぎに各領域での屈折率を実現するように微細構造を決定している。また、図7のように光の伝搬方向に対して微細構造が変化する場合は、深さ方向に多層分割し、有効屈折率の異なる多層膜として扱う^{22,32)}。

有効屈折率は微細構造中を伝搬する光波の伝搬定数から求められることは第1章で述べた。構造が図1のような1次元方向に周期をもつ単純な場合、光の周波数と伝搬定数の関係を表す分散方程式は簡単な形になる³³⁾。一般に伝搬定数は周波数の関数になるので、有効屈折率も周波数に依存する。ただし、微細構造の周期が非常に小さい場合は、周波数依存が小さくなり有効屈折率は先に述べた式(1)、(2)に一致する。微細構造が波長の1/10程度より大きなものについては、分散関係を考慮に入れて有効屈折率を見積もる必要がある。

2次元的な周期構造をもつ場合の有効屈折率の算出は簡単でない。分散関係は closed form な方程式の形で表すことができず、有効屈折率を求めるには複雑な数値計算を行う必要がある^{34,35)}。また、1次元構造で周期が非常に小さい場合の有効屈折率は式(1)、(2)の簡単な形で与えられたが、2次元構造の場合は周期が小さくても有効屈折率は単純な式にならない。ただし、対称性のある2次元構造に限り、周期が小さい場合の有効屈折率は比較的簡単な数値計算で求めることができる³⁶⁾。

有効屈折率を使って透過・反射率を見積もる方法では、エバネセント波を無視して0次の伝搬光だけを扱っている。したがって、微細構造の周期が波長のオーダーに近いときは、エバネセント波の振幅が大きくなり、正しい結果が得られない。とくに透過光・反射光の強度をもとめる計算では大きなずれを生じる。一方、透過光の位相は有効屈折率を使ってもほぼ正しい値を見積もることができる^{37,38)}。透過型の素子ではもともと透過率が1に近いので、素子としての性能は位相の見積もり精度で決まる。したがって、透過型の素子の設計では、たとえ構造の周期が波長に近い場合でも、有効屈折率を用いて精度のよい設計が行える。

微細構造に周期性がある場合の設計には、回折格子の計算で使われる既存の電磁気学的解析法を使うことができる。なかでも rigorous coupled wave analysis と呼ばれる方法がよく用いられている^{39,40)}。厳密な電磁気解析を行うと、数値計算に時間を要するが、波長と同程度のスケール

をもつ構造も正しく扱える。

図7、図9の例を含めて、面内で構造に分布をもたないようなものは厳密な電磁気解析が可能である。また、図8の回折素子においても、 $3.28\ \mu\text{m}$ の周期をもった1次元周期格子と見なすことができ、厳密な電磁気解析を適用できる。図9の導波共振モードフィルターではエバネセント波と放射モードの強い結合を利用するので、有効屈折率を使うことができず、必ず厳密な電磁気解析を行う必要がある²⁹⁾。

非周期な微細構造をもつ素子の設計では、厳密な電磁気解析を行うことは容易でなく、有効屈折率が使われる。しかし、境界要素法的な解析方法で1次元の反射型ゾーンプレートレンズの集光を計算した例がある⁴¹⁾。また、電磁気解析の分野では時間領域差分法 (finite-difference time-domain method) など新しい計算手法が開発されている⁴²⁾。将来、これらの方法が微細構造素子の設計に役立つかもしれない⁴³⁾。

ここで紹介した光学素子はいずれも可能性を探る研究段階のものであった。微細構造を使えば屈折率の分布と偏光特性を同時に制御できる利点があり、今後も新しい素子の提案が続くであろう。実用化のためには、いっそうの微細加工技術の進展が望まれるが、赤外線波長に対して微細構造を作る技術はすでにレベルに達しつつあるように思われる。また、これまでは増幅機能のない受動的な素子についての研究であったが、レーザー機構と結びついた能動素子としてフォトリソグラフィギャップなどと結びついた新しい領域に発展する可能性もある。

文 献

- 1) D. Raguin: "Subwavelength structured surfaces and their applications," Proc. SPIE, **CR49** (1993) 234-261.
- 2) D. H. Raguin and G. Morris: "Subwavelength structured surfaces: Design and applications," *O.S.A. Meeting 1994 Technical Digest, Series 11* (1994) pp. 252-255.
- 3) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, Oxford, 1980) p. 705.
- 4) 鶴田匡夫: 続 光の鉛筆 (新技術コミュニケーションズ, 1988) p. 377.
- 5) D. Flanders: "Submicrometer periodicity gratings as artificial anisotropic dielectrics," Appl. Phys. Lett., **42** (1983) 492-494.
- 6) L. Cescato, E. Gluch and N. Streibl: "Holographic quarter wave plates," Appl. Opt., **29** (1990) 3286-3290.
- 7) T. Kim, G. Campbell and R. Kostuk: "Volume holographic phase-retardation elements," Opt. Lett., **20** (1995) 2030-2032.
- 8) C. Gu and P. Yhe: "Form birefringence dispersion in peri-

- odic layered media," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 504-506.
- 9) H. Kikuta, Y. Ohira and K. Iwata: "Achromatic quarter-wave plates using the dispersion of form birefringence," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 1566-1572.
 - 10) H. Kikuta, Y. Ohira and K. Iwata: "Subwavelength gratings optimized for broadband quarter-wave plates," *Proc. SPIE*, **2873** (1996) 218-221.
 - 11) T. Morimoto and Y. Taga: "Thin film retardation plate by oblique deposition," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 2466-2482.
 - 12) T. Morimoto, Y. Takeda, T. Hioki and S. Noda: "Simultaneous oblique deposition from opposite azimuthal directions for fabrication of thin film retardation plates," *Proc. SPIE*, **2873** (1996) 214-217.
 - 13) R. Tyan, A. Salvekar, H. Chou, C. Cheng, A. Scherer, P. Sun, F. Xu and Y. Fainman: "Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1627-1636.
 - 14) 佐藤 晃, 竹部雅博: "構造性複屈折による光学異方性多層膜", *Optics Japan '97 講演予稿集*, p. 95.
 - 15) A. Sutcliffe, Y. Kimura and Y. Ono: "Grating polarizer using form birefringence in silicon," *MOC/Grin '89 Tokyo, Technical Digest* (1989) pp. 164-167.
 - 16) 小野雄三: "偏光性ホログラム光学素子", *O plus E*, No. 136 (1991) 86-90.
 - 17) F. Xu, R. Tyan, P. Sun, Y. Fainman, C. Cheng and A. Scherer: "Form-birefringent computer-generated holograms," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1513-1515.
 - 18) S. Aoyama and T. Yamashita: "Grating beam splitting polarizer using multi-layer resist method," *Proc. SPIE*, **1545** (1991) 241-250.
 - 19) 青山 茂, 山下 牧: "超微細回折格子を用いた複屈折素子とその応用", *光学*, **21** (1992) 269-274.
 - 20) "積層型偏光子 Lamipol", 住友セメント(株)カタログ.
 - 21) K. Shiraishi, T. Sato and S. Kawasaki: "Experimental verification of a form-birefringent polarization splitter," *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 211-212.
 - 22) Y. Ono, Y. Kimura, Y. Ohta and N. Nishida: "Antireflection effect in ultrahigh spatial-frequency holographic gratings," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1142-1146.
 - 23) P. Lalanne and G. Morris: "Antireflection behavior of silicon subwavelength periodic structures for visible light," *Nanotechnology*, **8** (1997) 53-56.
 - 24) S. Wilson and M. Hutley: "The optical properties of 'moth eye' antireflection surfaces," *Opt. Acta*, **29** (1982) 993-1009.
 - 25) E. Grann, M. Moharam and D. Pommet: "Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structure," *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) 333-339.
 - 26) M. Warren, R. Smith, G. Vawter and J. Wendt: "High-efficiency subwavelength diffractive optical element in GaAs for 975 nm," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1441-1443.
 - 27) F. Chen and H. Craighead: "Diffractive phase elements based on two-dimensional artificial dielectrics," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 121-123.
 - 28) P. Kipfer, M. Collischon, H. Haidner, J. Scheridan, J. Schwider, N. Strible and J. Lindolf: "Infrared optical components based on a microrelief structure," *Opt. Eng.*, **33** (1994) 79-84.
 - 29) S. Tibuleac and R. Magnusson: "Reflection and transmission guided-mode resonance filters," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1617-1626.
 - 30) P. Blair, M. Taghizadeh, W. Parkes and C. Wilkinson: "High-efficiency binary fan-out gratings by modulation of a high-frequency carrier grating," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 2406-2413.
 - 31) S. M. Rytov: "Electromagnetic properties of a finely stratified medium," *Sov. Phys. JEPT Engl. Transl.*, **2** (1956) 466-475.
 - 32) D. Raguin and G. Morris: "Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 1154-1167.
 - 33) A. Yariv and P. Yeh: *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, New York, 1984) pp. 165-174.
 - 34) E. Grann, M. Moharam and D. Pommet: "Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994) 2695-2703.
 - 35) H. Kikuta, Y. Ohira, H. Kubo and K. Iwata: "Effective medium theory of two-dimensional subwavelength gratings in the non-static limit," *J. Opt. Soc. Am. A* (submitted), (菊田久雄, ほか: 光学連合シンポ '96 講演予稿集, p. 101).
 - 36) P. Lalanne and D. L-Lalanne: "On the effective medium theory of subwavelength periodic structures," *J. Mod. Opt.*, **43** (1996) 2063-2085.
 - 37) C. Haggans, L. Li and R. Kostuk: "Effective-medium theory of zero-order lamellar gratings in conical mountings," *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993) 2217-2225.
 - 38) H. Kikuta, H. Yoshida and K. Iwata: "Ability and limitation of effective medium theory for subwavelength gratings," *Opt. Rev.*, **2** (1995) 92-99.
 - 39) M. Moharam and T. Gaylord: "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1385-1392.
 - 40) M. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet and T. K. Gaylord: "Coupled wave analysis for a two dimensional grating," *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) 1068-1076.
 - 41) D. Prather, A. Mirotznik and J. Mait: "Boundary integral methods applied to analysis of diffractive optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 34-43.
 - 42) 市川裕之: "時間領域差分法による回折格子の解析", *応用物理学会 ('97 春) 講演予稿集*, Vol. 3, p. 915.
 - 43) 藤本正行, 奥野洋一, 松田豊稔: "超微細回折格子の回折特性算出", *Optics Japan '97 講演予稿集*, p. 101.

(1997年9月1日受理)