

厳密結合波理論を用いたサブ波長反射防止構造の解析

入沢美沙子, 小舘香椎子

理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2007年 1 月24日受理)

要 旨 CD や DVD のピックアップをはじめ光学システムでは微小な回折効率低下や迷光がシステムの性能に影響するため、反射防止用の加工は重要である。従来から誘電体多層膜の AR (Anti Reflection) コートが用いられているが、波長や入射角度に敏感に変化する特性があり、安定した無反射状態が作りにくく、また凹凸表面のコーティングが難しいなどの課題がある。これらの課題を解決する方法として、入射波長以下のサブ波長格子の適用が検討されている。

昨年度、我々は平面基板状に周期 100 nm, アスペクト比 2, 3, 5 の形状を持つサブ波長格子について、数値計算と作製した素子を用いた評価実験により、反射率 1 % 以下の優れた無反射特性を持つ事を確かめた。

本稿では、このサブ波長格子が凹凸形状に一体型として作製が可能で、かつ一度の成形プロセスでレプリカができるなどの特徴があることに着目し、回折格子上に微細反射防止構造を施した反射防止一体型バイナリ格子 (Binary Grating with Anti Reflection Structure) の RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) による設計と試作格子による評価実験を行った。その結果、回折率が約 2 % 向上する結果が得られ、反射防止一体型格子としての有効性を確かめた。

キーワード：サブ波長格子, 反射防止構造, 反射防止一体型バイナリ格子, 厳密結合波解析 (Rigorous Coupled Wave Analysis : RCWA)

1. はじめに

近年の光技術の進展とともに、CD や DVD のピックアップをはじめ光学システムの需要が増えている。これらに使用されている光学デバイスにおける微小な回折効率低下や迷光はシステムの性能に影響を与えるため、反射防止用の加工は重要である。従来から誘電体多層膜の AR (Anti Reflection) コートが用いられているが、波長や入射角度に敏感に変化する特性があり、安定した無反射状態が作りにくく、また凹凸表面のコーティングが難しいなどの課題がある¹⁾。これらの解決法として、サブ波長格子の適用が注目されている^{2, 3)}。この微細反射防止構造としてサブ波長格子を用いるが、凹凸形状に一体型としての作製が可能で、かつ一度の成形プロセスでレプリカができ、大量生産も可能である。

サブ波長構造は、簡単な表面形状により光学的異方性

や屈折率分布を材質に持たせることができ、0 次光以外の回折光が発生せず高効率が得られるという特徴を持っている。サブ波長格子の反射防止効果は、1967 年に C.G. Bernhard によって、蛾の目の表面に形成されている微細な凹凸構造の反射率を測定することにより発見された⁴⁾。サブ波長格子の研究は、1980 年代後半から盛んになり、レーザ光の干渉露光、電子ビーム露光、などにより高精細な微細パターンが作製されるようになった^{5, 6)}。これまでに格子周期 150 nm の 2 次元円錐構造への作製が実現され、さらに回折格子や曲面上への形成が実現されている^{7, 8)}。しかし、まだ複雑な形状のサブ波長格子のシミュレーションによる厳密な評価は確立されていない。

本研究室では昨年度から、微細反射防止構造の解析について検討を行っている。平面基板上に作製した周期 100 nm, アスペクト比 2, 3, 5 の形状を持つサブ波長格子について、数値解析と試作デバイスを用いた評価実験を行い、反射率 1 % 以下の優れた反射防止特性を持つこ

とを確かめている⁹⁾。さらに、開発した厳密結合波解析 RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) プログラム^{10, 11)} がサブ波長格子の解析に適していることも分かった¹²⁾。

本論文では、反射防止一体型バイナリ格子 (Binary Grating with Anti Reflection Structure) の RCWA による設計と試作格子による評価実験を行い、回折効率の向上について両者の良い一致を確認したので報告する。第 2 章では多層膜コーティングとサブ波長格子による微細反射防止構造について述べる。第 3 章で RCWA を用いた、平面上にサブ波長格子の微細反射防止構造の高透過率が得られるパラメータの検討を行い、第 4 章では回折格子上に微細反射防止構造を施した反射防止一体型バイナリ格子の最適設計について検討し、反射特性のシミュレーション結果について述べ、第 5 章でまとめとする。

2. 反射防止機能

2. 1. 誘電体多層膜コーティングによる反射防止

従来から用いられてきた誘電体多層膜の AR コーティングは、フレネル反射を低減するために光の干渉を利用して反射光を打ち消すものである¹³⁾。光学薄膜の厚み $d \cdot n_m$ は入射波長 $\lambda/4$ となっており、光が入射すると、薄膜の表面で反射する光と透過して裏面で反射する光に分かれ、両者が $\lambda/2$ ずれた逆位相となり反射光が弱まる。多層膜での第 j 層番目の膜に対しての反射率 R は、

$$R_j = \frac{r_j (1 - r_j R_{j-1}) + (R_{j-1} - r_j) \exp(-i \delta_j)}{1 - r_j R_{j-1} + r_j (R_{j-1} - r_j) \exp(-i \delta_j)} \quad (1)$$

$$r_{j+1} = \frac{n_j \cos \theta_j - n_{j+1} \cos \theta_{j+1}}{n_j \cos \theta_j + n_{j+1} \cos \theta_{j+1}} \quad (2)$$

$$\delta_j = \frac{4\pi d_j n_j \cos \theta_j}{\lambda} \quad (3)$$

より算出でき¹⁴⁾、薄膜の屈折率 n 、膜厚 d や入射角度 θ 、入射波長 λ に依存している。ここで R_0 は基板からの反射率、 r_j は第 j 層へのフレネル反射係数、 δ_j は位相差を示す。波長や入射角度に敏感に変化する特性があり、安定した無反射状態が作りにくく、単層では広い可視波長領域、入射角度条件に対して優れた反射防止機能が得られず、反射率が高くなる。従って、高屈折率と低屈折率の 2 種類の膜を交互にし、屈折率と膜厚を最適化することで各層からの反射が互いに打ち消し合うようにしたものである。層数を増やし多層の複合膜によって反射防止の効果を高める必要がある。しかし、誘電体多層膜では使用波長用に最適な材料が限定され、基板と密着性の良い材料の選定が必要となる。さらに、薄膜の均質性、経時変化などが設計に必要な検討項目としてあげられる。

周期 \leq 入射波長

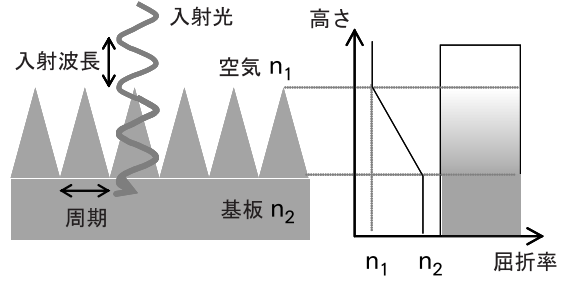


Fig. 1 The principle of anti-reflection using optical element with subwavelength and distribution of effective refractive index.

また、光学素子の形状作製とは別に素子表面への成膜プロセスを必要としており、作製コストを引き上げる要因にもなっている。それらに加えて、凹凸表面にコーティングが難しいなどの課題がある。

2. 2. サブ波長格子による反射防止

誘電体多層膜コーティングの課題を解決するために、サブ波長格子を反射防止構造として用いる方法が有り、凹凸形状に一体型として作製も可能なため注目されている。サブ波長構造は、Fig. 1 のような波長以下のサイズの二等辺三角錐が多数並んだものである。通常の屈折率を持つ素子に光が垂直入射 (屈折率 $n_1 \rightarrow n_2$) したときの反射率 R は、式 (2) のフレネル反射係数 r_{j+1} から式 (4) のように示すことができる。

$$R = r^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 \quad (4)$$

ここで R は、例えば空気 (屈折率 $n_1: 1.0$) から素子 (屈折率 $n_2: 1.5$) に垂直入射 (入射角度 $\theta_1 =$ 反射角度 $\theta_2 = 0^\circ$) した場合には、4 % の反射光が発生することを表している。しかし、格子周期が入射光の波長以下であるサブ波長格子では、空気層から基板層に向かって有効屈折率分布が緩やかに変化し、空気と材料の界面で、光は屈折率差を感じないまま基板へ到達することができるため、急激な屈折率差がなくなり反射防止が可能となる。この方法は波長域、入射角度に対して有効性を持っており、また金型の段階から素子表面を形成しておく事で、一度の成形が可能などの大きなメリットを持っている。

近年の微細加工技術の進展により、比較的容易にナノ構造の加工が可能になってきている。しかし、成形に関しては加工上の種々の検討が必要とされており、まだ技術的な課題は多い。サブ波長格子の作製法として、レジストを基板上に塗布し、電子ビーム露光によりサブ波長

格子の描画を基板に行う。電子ビームは主に LSI などの半導体微細パターン作製法として用いられているが、ナノオーダーの描画精度が高精度に得られ、自在なパターンニングが出来ることから、近年は微細回折光学素子のパターンニングにも適用されている。レジストをマスクとしてドライエッチングによりサブ波長格子を作製する。これを母型として用いて、ガラス基板上に UV 硬化樹脂によりインプリントを行い、レプリカを作製する。凹凸形状を持つバイナリ格子への作製は、最初にバイナリ格子を作製し、それを基板としてほぼ同様の工程で作製される。

3. RCWA を用いた平面上の反射防止構造の解析

サブ波長格子の光波の振る舞いを厳密に取り扱うには、屈折率分布、偏光特性、エバネッセント波を考慮出来る電磁波としての取り扱いが必要になる。この電磁波解析の手法には、モード展開法、積分法、微分法¹⁵⁾ など

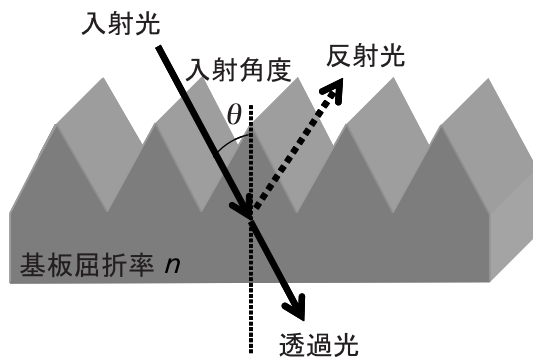


Fig. 2 Optical element with a 1-D subwavelength profile.

があり、特に近年はナノ構造やフォトニック結晶などの解析に適用されている。本研究では、電磁波解析の中で、1980年代初めに M.G. Moharam と T.K. Gaylord によって提案された厳密波結合解析 RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis)^{16, 17)} を用いて数値計算を行った。RCWA は格子を深さ方向に複数の層に分割して、各層毎に光波の伝搬を算出するので、二等辺三角錐が多数並んだ構造を持つサブ波長格子の解析には適している。RCWA 理論に基づいて開発したプログラム^{10, 11)} は UNIX や PC 環境において使用が可能である。今回は UNIX (Sun Ultra60 : Clock 330MHz, Ultra SPARC-II I) を用いた。

3. 1. 微細反射防止構造の特性

回折格子の周期を微細にしていくと回折光が生じず、高透過率を得ることができるため、はじめに透過率の波長規格化周期依存性に関する数値解析を行った。Fig. 2 のように周期格子の溝方向と入射面が直交する構造のサブ波長格子について、波長規格化高さの検討を行った。入射光の電場が回折格子の溝方向と平行である TE (Transverse Electric) モード、入射光の磁場が回折格子の溝方向と平行である TM (Transverse Magnetic) モードの偏光条件を考慮し、素子 (屈折率 1.53) に空気側から光を垂直入射させたときの透過率を示す。

Fig. 3 より、波長規格化周期が 0.64 以下では回折光が生じなく、0 次光の透過率が高くなることを確認した。さらに、格子高さ依存性を解析するために、波長規格化周期依存性 0.64 以下において、高効率 99% 以上を得ることができる規格化高さを検討した結果を Fig. 4 に示す。その結果、規格化高さは TE モードでは 0.32, TM モー

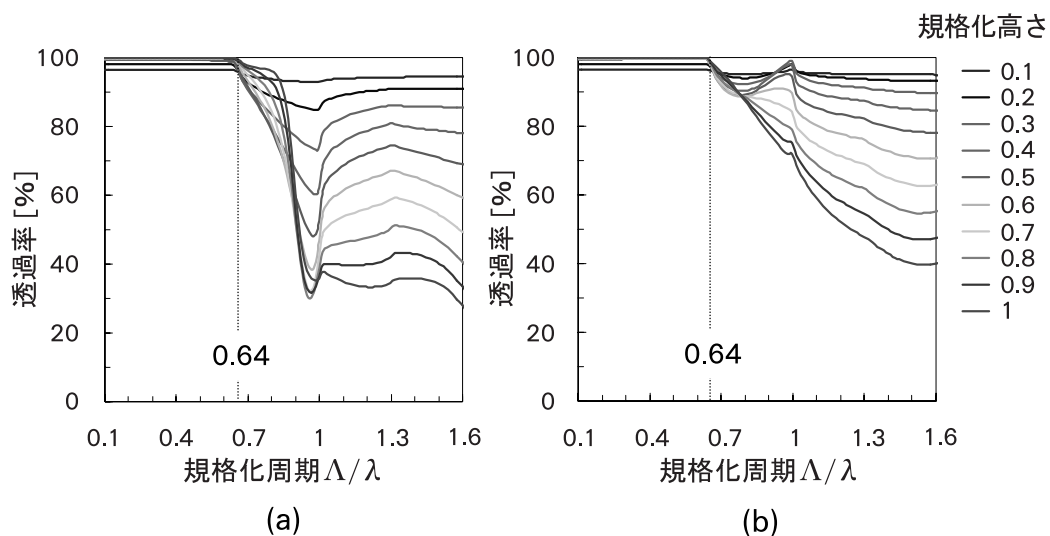


Fig. 3 Dependent on the normalized period for the transmittance (Λ : Period, λ : Wavelength, (a) TE mode, (b) TM mode).

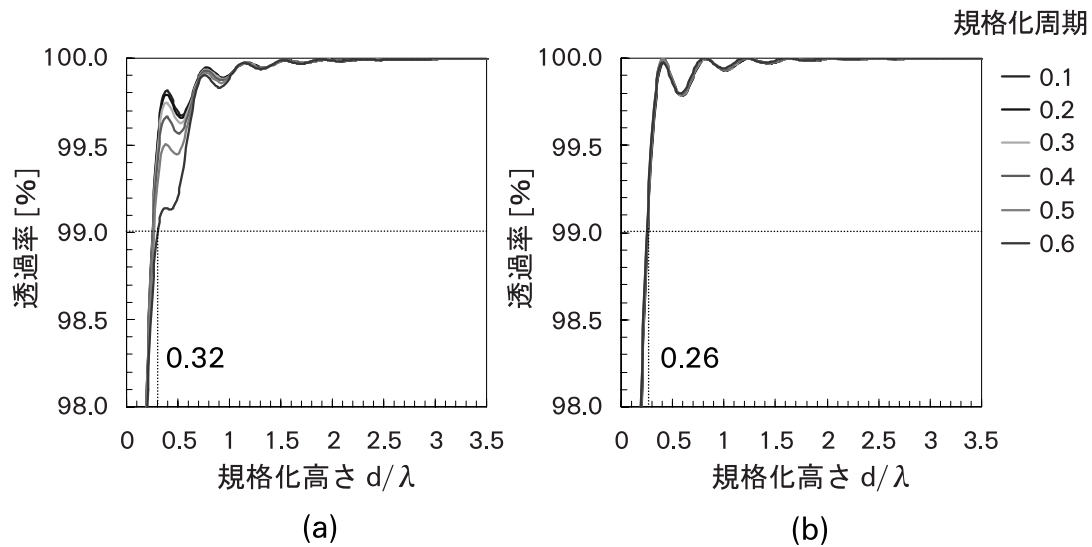


Fig. 4 Dependent on the normalized depth for the transmittance (d : Depth, λ : Wavelength, (a) TE mode, (b) TM mode).

ドでは0.26で高透過率99%以上得られることが分かる。従って、垂直入射時に設計波長532nmにおいて透過率99%以上得るためには、格子周期は340nm以下、格子高さはTEモードでは170nm以上、TMモードでは140nm以上のサブ波長格子が必要となることが分かる。

3. 2. 可視領域・高透過率の微細反射防止構造の検討

平面上に垂直入射で、設計波長 (λ : 532nm) において高透過率 (99%以上) が得られる格子周期、高さの算出をRCWAを用いたシミュレーションにより行ったが、微細反射防止構造としての有効性として入射角度、入射波長の広い範囲で高効率を得ることが必要である。そこで今回、可視領域 (380~780nm)、入射角度 $0 \sim 40^\circ$ の広範囲で、1%以下の無反射構造 (透過率99%以上) を得るための格子周期と格子高さの最適な設計に付いて検討を加えた。数値計算のアルゴリズムをFig. 5に示すが、今回は、設計波長 (λ) は532nm、サブ波長構造を屈折率 (n) 1.53の透明樹脂基板上に作製した場合を仮定した。格子周期を100nmから250nmまで50nm間隔 (うち150nmから200nmまでは10nm間隔)、格子の高さを100nmから300nmまで100nm間隔で変化させ、TE、TMモードにおける素子の透過率の数値計算を行った。得られた結果のうち、格子周期を100, 150, 160, 170, 200nm、格子高さを100, 200, 300nmとしたときのTEモードの数値計算結果をFig. 6に示す。図中では青 (透過率90%) と赤 (透過率100%) で示す範囲が透過率90%以上を示している。また、アスペクト比とは格子周期と格子高さの比である。

数値計算結果のグラフから波長380~780nmの可視域

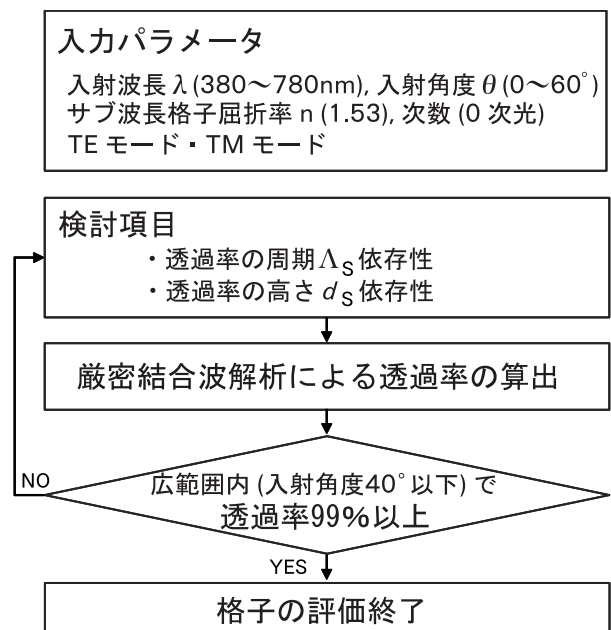


Fig. 5 Algorithm for the design planar substrate with anti reflection structure.

で、格子周期170nmになると入射角度 60° で回折光が生じていることが分かる。さらに、格子周期200nmでは、回折光を生じる入射角度の範囲が入射角度 30° からとさらに広がり、また、波長範囲も広がっていることがわかる。従って、透過率が低下し、入射波長、入射角度の広い範囲における高い透過率を得る事は難しい。Fig. 6に示す結果から、透過率はアスペクト比ではなく、格子高さに依存していることが分かった。

Fig. 5に示すアルゴリズムに従った数値計算を繰り返

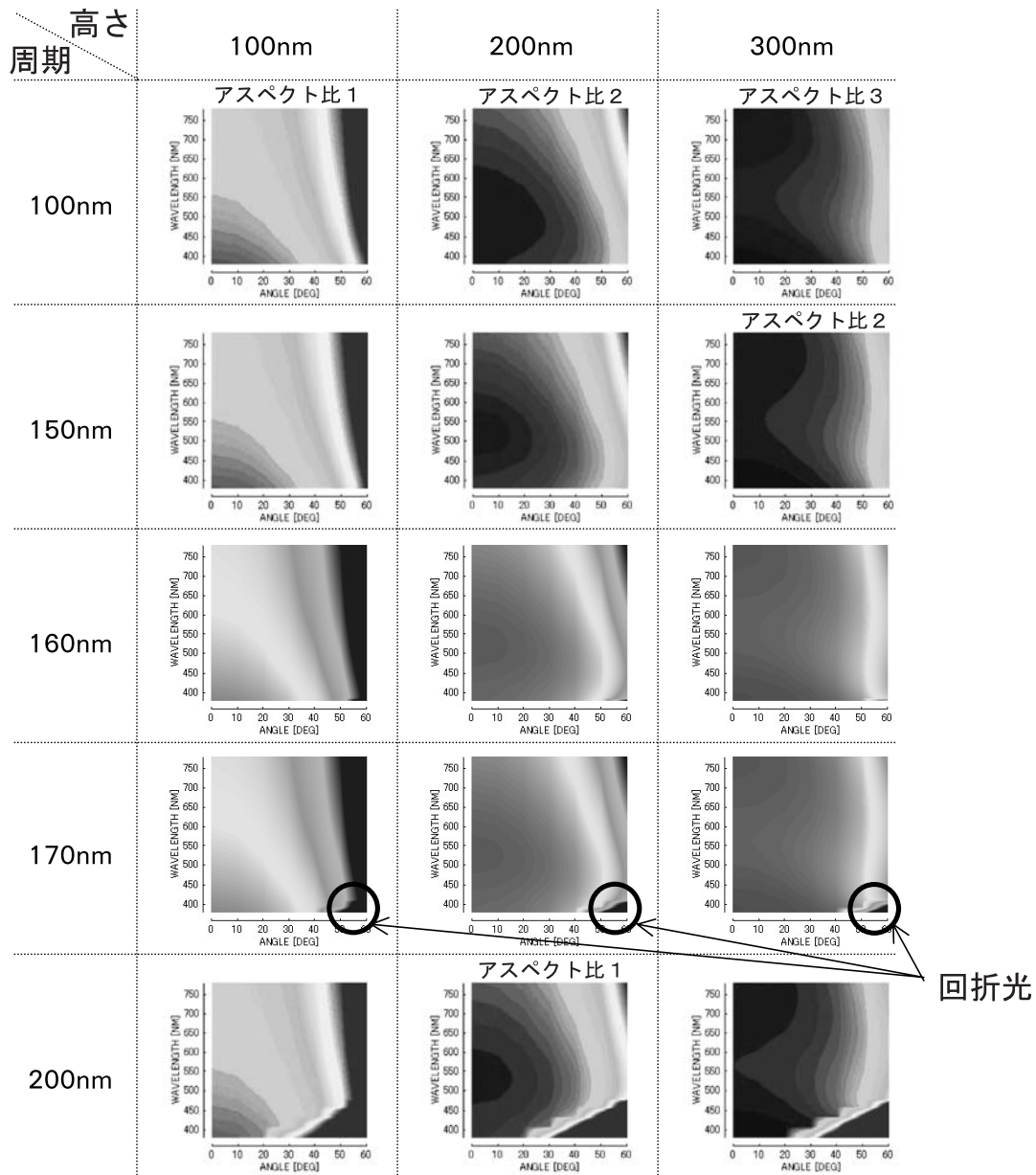


Fig. 6 Dependent on the angle and wavelength for transmittance of the optical element with subwavelength ($n: 1.53$, $\lambda: 532 \text{ nm}$, $\Lambda: 100, 150, 160, 170, 200 \text{ nm}$, $d: 100, 200, 300 \text{ nm}$, TE mode).

した結果、格子周期 160 nm に対しては格子高さが 300 nm 以上になると、入射角度が 40° 以内であれば、約 99% 以上の高透過率（ 1% 以下の無反射）を得られることを確かめた。

4. RCWA を用いた反射防止一体型バイナリ格子の解析

本節では、凹凸のある形状への一体化型の作製について、Fig. 7 のような構造を持つバイナリ格子にサブ波長格子を作製した、反射防止一体型格子の検討について

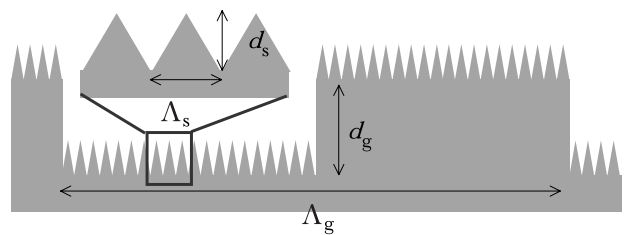


Fig. 7 Anti reflection structure placed on top of a two-level grating. (Λ_g : Period of binary grating, d_g : Depth of binary grating, Λ_s : Period of anti reflection structure, d_s : Depth of anti reflection structure)

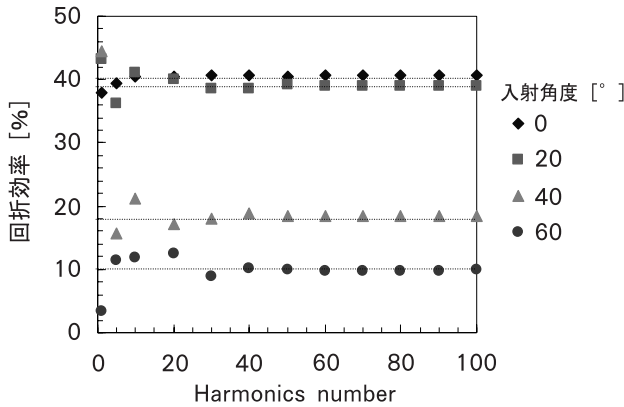


Fig. 8 Harmonics Number of binary grating with ARS.

述べる。

4. 1. Harmonics Number の最適化

RCWA は Kogelnik 等と異なり、入射光の全回折次数を数値計算で算出することができる。従って、回折効率の値は、考慮する Harmonics Number (計算次数) に依存するので、あらかじめ予備的な検討を行い、大きな値の変動を与えない、格子構造に対して適切な計算次数を用いる必要がある。また、回折次数の重ねあわせの次数の設定によっても計算の精度が大きく変わるため、確認を行った。次数 N のときマトリックスの要素の数は $2N+1$ となる。TE モード、入射角度 ($0 \sim 60^\circ$) にて Harmonics Number を $\pm 1 \sim 100$ まで 10 刻みで変化させ計算を行った結果を Fig. 8 に示す。この結果から Harmonics Number ± 50 次光からで収束していることが分かる。従って、この値を最適値として固定し、複雑な形状となった反射防止一体型格子のシミュレーションを行う。

4. 2. バイナリ格子の検討

Fig. 9 に示すアルゴリズムにより、反射防止一体型バイナリ格子の解析を行った。

まず、反射防止構造を付加していない通常の透過型バイナリ格子の回折効率について、RCWA による数値計算を行った。Fig. 10 に素子屈折率 1.53 としたとき TE, TM 偏光の裏面側入射と溝側入射の波長規格化周期別、波長規格化高さ依存性の数値計算結果を示す。入射波長に対する規格化周期が 20 以上であれば、入射方向の影響も無いことが分かる。また、入射波長規格化高さ 0.94, 2.82, 4.70, 6.58, 8.46 (位相 2π に相当) において高効率を得られる。この値を用いて、設計波長 532 nm の溝側入射の場合における TE, TM モードの波長規格化周期依存性を Fig. 11 に示すが、変動が少なく安定した回折

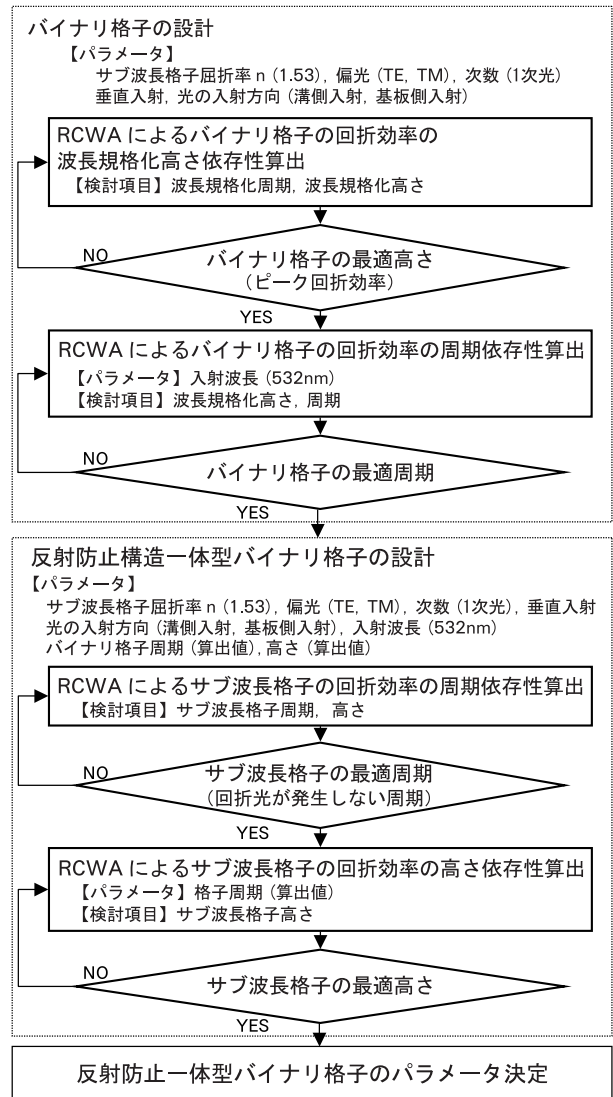


Fig. 9 Algorithm for the design binary grating with anti reflection structure.

効率が得られるバイナリ格子周期 Λ_g として $30 \mu\text{m}$ 以上であることが分かる。これらの結果から、今回設計に用いるバイナリ格子のパラメータとして格子周期 Λ_g : $30 \mu\text{m}$, 格子高さ d_g : $1.5 \mu\text{m}$ (波長規格化高さ 2.82 より) と決定した。

4. 3. 反射防止一体型バイナリ格子のサブ波長格子の検討

反射防止一体型バイナリ格子の最適設計を行った。バイナリ格子のパラメータは 4.2 より、格子周期 Λ_g : $30 \mu\text{m}$, 格子高さ d_g : $1.5 \mu\text{m}$ と固定した。また、サブ波長格子は設計波長 532 nm, 素子屈折率 1.53 のバイナリ格子に平行な一次元格子とした。サブ波長格子高さ d_s を 50 nm から 400 nm まで 50 nm 間隔と固定し、垂直入射時の格

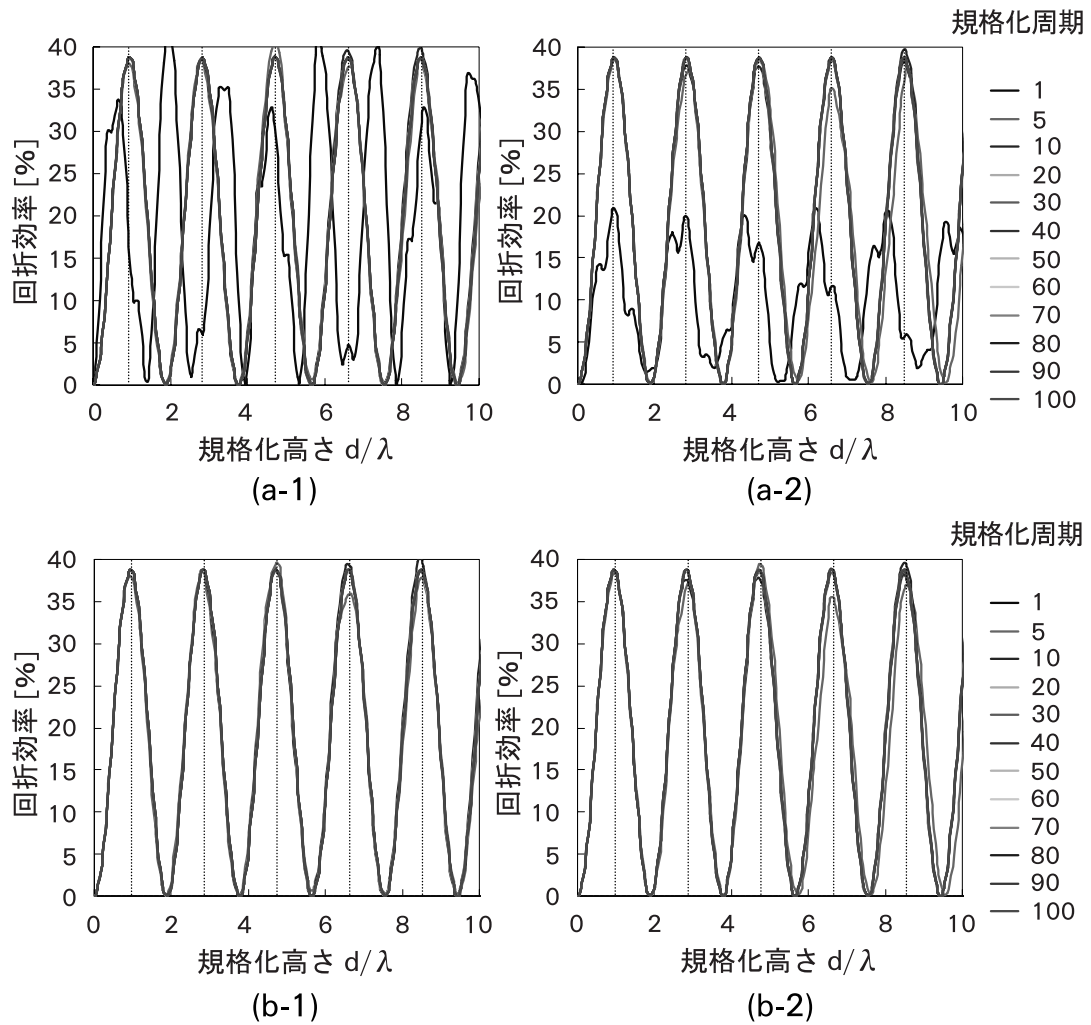


Fig. 10 Dependent on the normalized depth for the diffraction efficiency ((a) Light is incident from the air, (b) Light is incident from the substrate, (1) TE mode, (2) TM mode).

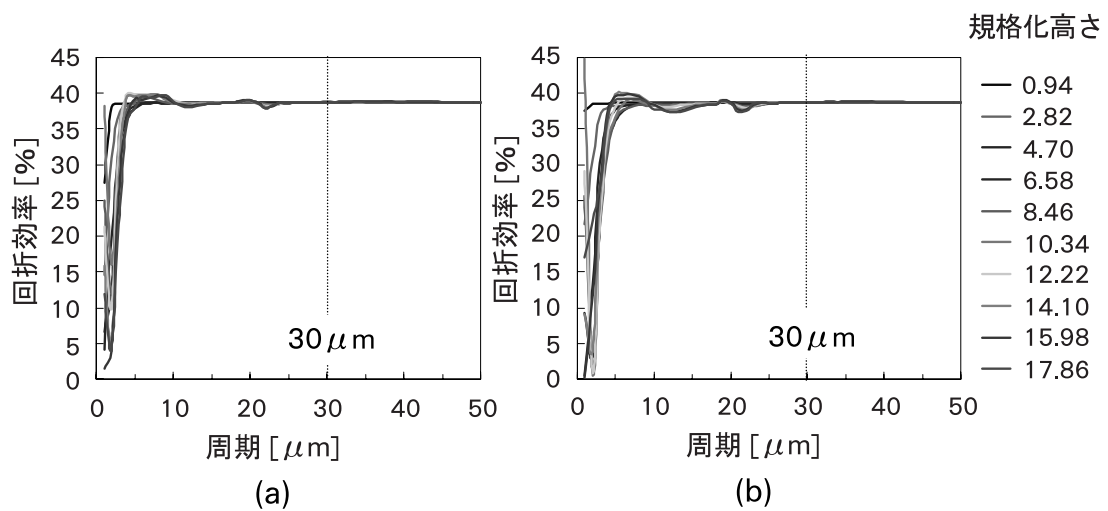


Fig. 11 Dependent on the period for the diffraction efficiency ((a) TE mode, (b) TM mode).

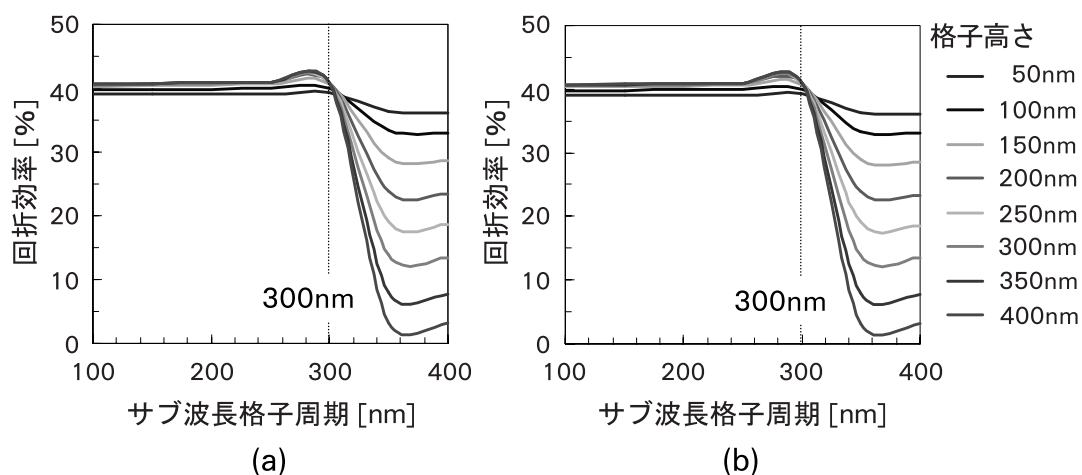


Fig. 12 Dependence on the period of ARS for the diffraction efficiency of binary grating with ARS ((a) TE mode, (b) TM mode).

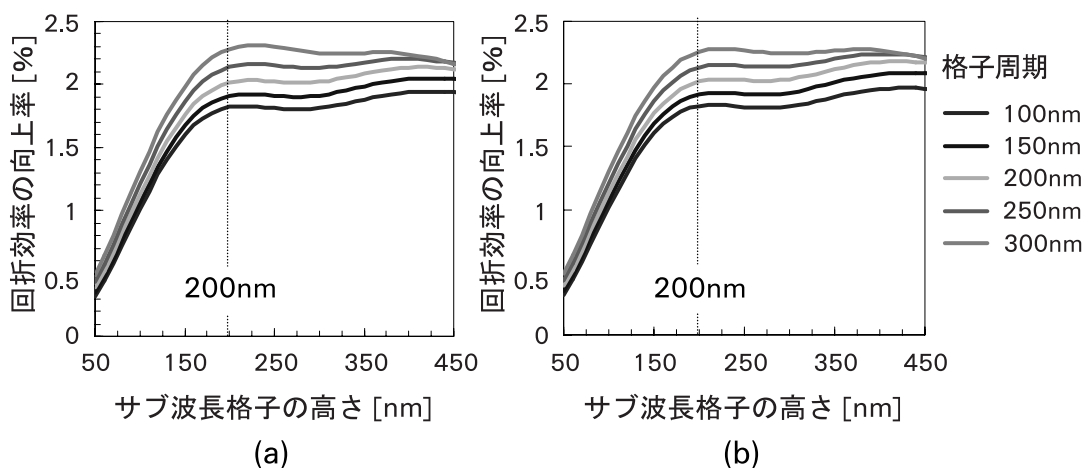


Fig. 13 Dependence on the depth of ARS for the difference value of diffraction efficiency of binary grating with ARS ((a) TE mode, (b) TM mode).

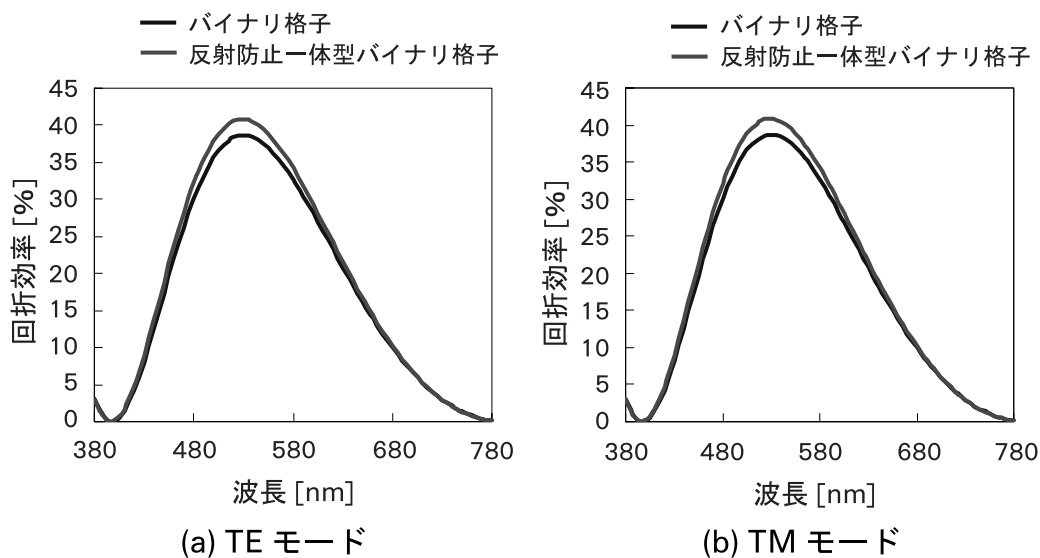


Fig. 14 Dependence on the period for the diffraction efficiency ((a) TE mode, (b) TM mode).

子周期依存性の数値計算結果を Fig. 12 に示す。設計波長 532 nm において, TE, TM モード共にサブ波長格子周期 Λ_s が 300 nm 以上では回折光が生じ, 反射防止一体型バイナリ格子全体に影響を及ぼし回折効率が低下することが分かる。

さらに, 格子高さを決定するために, Fig. 12 の結果と作製の可能性を考慮し 100 nm から 300 nm までの格子周期 Λ_s において, 格子高さ依存性を RCWA によって数値解析した結果を Fig. 13 に示す。縦軸は反射防止一体型バイナリ格子の回折効率からバイナリ格子の回折効率を引いた, 反射防止構造を施したことによる回折効率向上率となっている。その結果, TE, TM モードにおいてサブ波長格子の高さ d_s は 200 nm 以上で安定した回折効率の向上が得られることが分かる。

従って, 今回反射防止一体型バイナリ格子の設計値として, バイナリ格子周期 Λ_g を 30.0 μm , 格子高さ d_g を 1.5 μm , サブ波長格子周期 Λ_s を 150 nm, 格子高さ d_s を 150 nm と決定した。このパラメータを持つ格子の可視領域における波長依存性に対する無反射効果の数値計算結果を Fig. 14 に示す。

偏光 TE, TM モードの条件において, 設計波長 532 nm のバイナリ格子は, サブ波長格子無し 38.7% に比べ, サブ波長格子と一体型にした場合 40.9% の回折効率を得られ, 回折効率 2.2% の向上が得られている。このように数値計算結果から, サブ波長格子を反射防止構造とした一体型バイナリ格子により, 無反射の寄与があり回折効率の向上がある事が確かめられた。

5. ま と め

厳密結合波解析 RCWA を用いた数値解析により, サブ波長格子である微細反射防止構造の検討を行った。平面基板上のサブ波長格子を, 周期と高さを変化して解析を行った。その結果, 設計波長 532 nm, 垂直入射にて高透過率 99% 以上を得る条件としてサブ波長周期: 340 nm 以下, 高さは TE モードでは 170 nm 以上の値を得た。さらに高精度な反射防止機能を得るために, 広範囲 (入射角度 0 ~ 40°, 波長 380 ~ 780 nm) で 99% 以上の高透過率条件として, サブ波長格子周期 160 nm 以下, 格子高さ 300 nm 以上の値が必要であることが分かった。

凹凸のある複雑な表面形状に反射防止構造の作製ができる利点を活かし, 回折格子上にサブ波長格子を刻んだ反射防止一体型バイナリ格子を提案した。サブ波長格子の周期と高さの検討を加えた結果, バイナリ格子 (周期 Λ_g : 30.0 μm , 高さ d_g : 1.5 μm) 上に, 周期 Λ_s : 300 nm

以下, 高さ d_s : 200 nm 以上のサブ波長格子を付加することにより, 設計波長 532 nm において回折効率 2.2% の向上が得られた。サブ波長を用いた反射防止構造の任意形状への適用の可能性を示し, 高性能な反射防止機能をシミュレーションにより確認した。今後は, 実際に試作した素子の性能評価と, シミュレーションによる比較を行い, 反射防止構造の回折効率向上の立証を行う。

謝 辞

厳密結合波解析の数値計算プログラムは, 岡 恵子氏 (現, 株式会社日立製作所) によって作成されました。また, 長吉真弓氏 (2006 年本校卒業, 現, 株式会社日立製作所) には, 多くのご助言をいただきましたこと感謝申し上げます。また, 本研究は独立行政法人情報通信研究機構クラウド・ヴェルナー氏とアルプス電気株式会社との共同研究の一部です。この場をお借りし, 感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本学術振興会薄膜第 131 委員会: 薄膜ハンドブック オーム社 (1983).
- 2) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya, and H. Kikuta: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L747 (2001).
- 3) 菊田久雄, 岩田耕一: 電子情報通信学会論文誌 C **J83-C** 173 (2000).
- 4) C.G. Bernhard: *Endeavour* **26** 79 (1967).
- 5) K. Kintaka, J. Nishii, A. Mizutani, H. Kikuta and H. Nakano: *Opt. Litt.* **26** 1642 (2001).
- 6) 金森義明, 羽根一博: *O plus E* **24** 53 (2002).
- 7) 前納良昭: 光技術コンタクト **43** 638 (2005).
- 8) 大森滋人, 西田直樹, 山本裕子, 上田裕昭, 中塚雄三: 第 31 回光学シンポジウム **33** (2006).
- 9) 長吉真弓, 岡 恵子, 駒井友紀, クラウス・ヴェルナー, 小館香椎子: 日本女子大学理学部紀要 **14** 13 (2006).
- 10) 岡 恵子, クラウス・ヴェルナー, 小館香椎子: 日本女子大学理学部紀要 **10** 99 (2002).
- 11) 岡 恵子: 日本女子大学 博士論文 (2005).
- 12) 長吉真弓, クラウス・ヴェルナー, 伊藤直樹, 小館香椎子: 第 53 回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集 1051 (2006).
- 13) 藤原史郎: 光学薄膜 共立出版 (1986).
- 14) M. Ishii, S. Iwai, T. Ueki, and Y. Aoyagi: *Appl. Opt.* **36** 2152 (1997).
- 15) 小館香椎子: デジタル回折光学 丸善株式会社 (2005).
- 16) M.G. Moharam and T.K. Gaylord: *J. Opt. Soc. Am.* **72** 1385 (1982).
- 17) W. Klaus, K. Oka, M. Fujino and K. Kodate: *Opt. Review* **8** 271 (2001).

Analysis of Anti Reflection Structure Using Rigorous Coupled Wave Theory

Misako Irisawa and Kashiko Kodate

The Graduate School of Science, Division of Mathematical and
Material Structure Science, Japan Women's University

(Received January 24, 2007)

Abstract: In order to realize optical devices with high transmittivity, anti reflection coatings are required to reduce Fresnel reflections from device surface. Owing to the progress of ultra-fine processing technology and constant improvement of numerical tools for electromagnetic wave analysis, a highly precise anti-reflection structure can now be produced. Yet conventional anti-reflection coatings in the form of layers may be difficult to apply to complicated shapes such as lenses and diffractive gratings. To overcome its difficulties, direct applicability to the substrate is an attractive feature. In this paper, we examine characteristics of anti reflection structures, which are made of subwavelength optical elements, using the rigorous coupled wave analysis (RCWA). The optical elements feature a period shorter than the wavelength of the incident light. Previously, we analyzed the grating period and depth of the subwavelength optical element (100nm, aspect ratios 1, 2 and 3 respectively on a planar substrate. The results from our numerical analysis confirmed excellent reflection rate of less than 1%. Furthermore, we experimentally evaluated performance of the designed anti-reflection structure on top of a binary grating. Increase in grating efficiency by 2% demonstrated effective anti-reflection feature and applicability to the binary grating combined with ARS.

Key words: Sub-wavelength grating, Anti reflection, Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA)