

無反射周期構造

豊 田 宏

Antireflection Structured Surface

Hiroschi TOYOTA

A microstructured surface with a period shorter than the wavelengths of visible light can suppress the reflection of light. This antireflection effect provided by a microstructured surface is known as a “moth-eye,” and the structured surface is called an antireflection structured (ARS) surface. There have been many experimental and theoretical studies of ARS surfaces. In this paper, our current work is reviewed. The ARS surface fabricated on a fused silica substrate consisted of a microcone array with a smooth taper. Measured reflectivity of the antireflection structured surface is less than 0.5% in the wavelength range of 400-800 nm for normal incidence.

Key words: antireflection structured (ARS) surface, moth-eye, microcone array

近年、半導体作製やマイクロマシニングに用いられている超微細加工技術の発展に伴い、ナノメートルオーダーの精度の加工が可能になってきており、光の波長よりも細かな周期をもつサブ波長格子 (SWG: subwavelength grating) が作製できるようになってきている。この SWG は通常の回折格子とは異なり、0 次光以外の回折光を生じないため、任意の断面形状による光学的異方性や屈折率分布を、加工する材料表面にもたせることが可能である。これまでにこのような効果を用いて、無反射周期構造、高効率回折光学素子、偏光素子および波長選択フィルターなどへの応用が提案され、実際に試作されてきている¹⁾。

SWG のひとつである無反射周期構造は、光の入射する表面において物質固有の屈折率で決められるフレネル反射を小さくすることができる。これは、物質表面に形成した波長よりも細かな表面構造により人工的な屈折率が形成され、なおかつ、その分布が光の入射する側から基板部材との間で連続的に変化することにより可能になる。

このような無反射周期構造は、

- 広い波長域と入射角度に対して反射率が低減可能
- 多くの材料に適用可能
- 基板部材との一体作製が可能

といった特徴を有している。

SWG による反射防止効果は、蛾の目の表面に形成されたサブミクロンオーダーの凹凸構造の反射率を測定することで 1967 年に C. G. Bernhard によって発見された²⁾。それ以後、この構造は “moth-eye” 構造ともよばれるようになってきている。この “moth-eye” 構造は、1980 年代からレーザー光による干渉露光法を用いて作製されるようになってきた³⁻⁵⁾。その後には、電子ビーム露光装置などを用いて、より高精細な微細パターンを形成することで構造が作製されるようになってきている^{6,7)}。さらに近年では、材料組成からのアプローチにより、無反射周期構造が作製されるようになってきている⁸⁾。一方、理論的考察より反射防止に対して有効な形状を最適化する研究も多く行われており、計算においては回折格子での電磁波の振る舞いを正確に求めるさまざまな厳密計算法がよく用いられている^{9,10)}。

本稿では、無反射周期構造における基本原理および理論計算に基づく設計について説明し、筆者らの最近の研究に関して紹介する。

1. 無反射周期構造の原理

図 1(a) に示す二次元ピラミッド構造は、反射防止効果が得られる一例を示すものである。このような表面は、広い波長帯域、広い入射角度で反射防止効果を示し、また表面構造が二次元格子であることから、表面に入射してくる

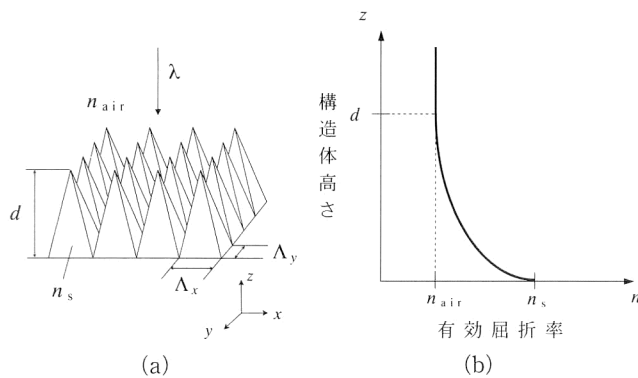


図1 (a) 二次元ピラミッド構造をもつ無反射周期構造, (b) 有効屈折率分布.

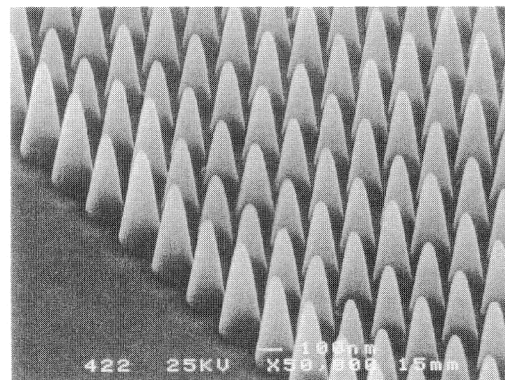


図2 石英上に形成された無反射周期構造.

光の偏光状態に反射率特性が依存しないといった利点をもつ. 図1(a)のような形状が材料表面に形成されたとき, 光が入射する側を空気層 ($n_{\text{air}}=1$) とし, 材質基板をある屈折率 n_s をもったものとする. ここで, Λ_x および Λ_y は周期を示しており, 入射してくる光の波長 λ より小さいものとする. また, d は構造の高さを示す. このとき, 図1(a) に示す構造の断面を考えると, 深さ d 方向に対し, xy 面に占有する基板材質の体積は徐々に変化し, それに応じて有効屈折率 (図1(b)) も構造の最頂部から最低部に向かい, 連続的に分布する¹⁰⁾. 空気層から基板層に向かって滑らかな屈折率の変化をもつ基板に光が入射した場合, 急激な屈折率差がないため, 光はほとんど反射されず基板内へ到達する.

2. 無反射周期構造の設計

無反射周期構造の設計においては, まず表面を形成する構造体の周期を決定する必要がある. この周期は反射防止効果を得ようとする波長帯域の最短波長と構造を作製する材質の屈折率で与えられ, 最短波長を λ_1 , 材質の屈折率を n_s とすると, 格子周期 Λ は次式で与えられる.

$$\Lambda \leq \frac{\lambda_1}{n_s} \quad (1)$$

ここで, 石英基板上に無反射周期構造を作製し, 400 nm の光を入射させて石英内部にその光波エネルギーのほとんどを透過させる場合, λ_1 は 400 nm, $n_s=1.46$ であるから, 周期 Λ は約 274 nm 以下となる.

無反射周期構造体を作製するとき, 構造体高さも設計パラメータとなる. この構造体高さは, 構造体の周期および高さを与えて, rigorous coupled wave analysis (RCWA)¹¹⁾ で求められる光学特性 (回折効率) をもとに決定できる. 構造体高さ d と, 反射防止効果が得たい波長帯域の長いほうの波長 λ_2 との間に, 次式の間があることを計算から確認した.

$$d \geq 0.4\lambda_2 \quad (2)$$

ここで, 式(1) および (2) を満たす場合の例を示す. 表面に形成する構造体は円錐 (周期 250 nm, 材質: 石英) とし, 構造体高さを 750 nm にした場合, 次のような光学特性を示した. 入射角度依存性については, 光源として He-Ne レーザー (633 nm) を用いて, p および s 偏光のそれぞれに対し入射角度 0~60 度の範囲で反射率が 1% 以下, 波長依存性については光が垂直入射した場合, 波長帯域が 400~800 nm で 0.5% 以下となった.

3. 無反射周期構造の作製とその特性

筆者らは, 微小な金属マスクを用いた反応性イオンエッチング (RIE: reactive ion etching) により, 石英基板上へ二次元円錐構造を作製し, 可視光領域で良好な反射防止効果を確認している¹²⁾. この作製法は, 微小金属マスクの厚みや RIE 条件を変えることにより作製する円錐構造の高さの制御も行うことができるため, さまざまな反射率をもった原器が作製できる柔軟性をもつ. さらに, 紫外線レーザーを用いた干渉露光法も適用可能であるので, 大面積の素子作製も可能である.

実際に作製された無反射周期構造を図2に示す. 表面構造は二次元円錐を正方配列したもので, その周期は 250 nm, 構造高さが 750 nm のものである. 実際の光学特性は 400~800 nm の可視光領域で 0.5% の値を示し (図3), 通常発生するフレネル反射 (約 4%) に比べて非常に小さな値である. この構造は二次元構造であるので, 入射してくる光の偏光状態にも依存しない. 入射角度依存性については, 光源として He-Ne レーザーを用いた場合, s および p 偏光のそれぞれに対して, 0~60 度の入射角度まで 1% 以下の反射率であることを確認している.

サブ波長構造による反射防止の効果が発見されてから 40 年近く経過した現在, 半導体作製技術の恩恵を受け, 実

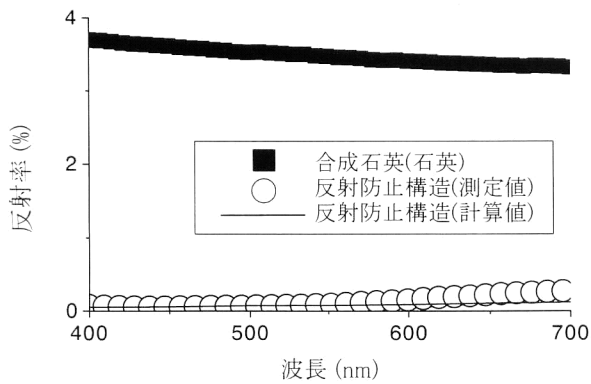


図3 作製した無反射周期構造の反射率.

際に高性能なものが試作されはじめています。応用も含めた無反射周期構造の研究は行われているが、産業的な応用はほとんどない。しかしながら、この構造のもつ光学特性は、従来から用いられている多層膜の反射防止膜に比べると魅力的なものである。今後、このような機能が付加された光学素子、光デバイスの開発がなされ、量産化技術開発が進み、幅広く産業的に利用されることを期待したい。

最後に、本研究は、科学技術振興事業団、大阪府地域結集型共同研究事業の一環として行われた。

文 献

- 1) 菊田久雄, 岩田耕一: “波長より細かな格子構造による光制御”, 光学, **27** (1998) 12-17.
- 2) C. G. Bernhard: “Structural and functional adaptation in a

- visual system,” Endeavour, **26** (1967) 79-84.
- 3) S. J. Wilson and M. C. Hutley: “The optical properties of ‘moth eye’ antireflection surfaces,” Opt. Acta, **29** (1982) 993-1009.
- 4) R. C. Enger and S. K. Case: “Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations,” Appl. Opt., **22** (1983) 3220-3228.
- 5) Y. Ono, Y. Kimura, Y. Ohta and N. Nishida: “Antireflection effect in ultrahigh spatial-frequency holographic relief gratings,” Appl. Opt., **26** (1987) 1142-1146.
- 6) Y. Kanamori, M. Sasaki and K. Hane: “Broadband antireflection gratings fabricated upon silicon substrates,” Opt. Lett., **24** (1999) 1422-1424.
- 7) Y. Kanamori, H. Kikuta and K. Hane: “Broadband antireflection gratings for glass substrates fabricated by fast atom beam etching,” Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) L735-L737.
- 8) K. Kintaka, J. Nishii, A. Mizutani, H. Kikuta and H. Nakano: “Antireflection microstructures fabricated upon fluorine-doped SiO₂ film,” Opt. Lett., **26** (2001) 1642-1644.
- 9) D. H. Raguin and G. M. Morris: “Analysis of antireflection-structured surfaces with continuous one-dimensional surface profiles,” Appl. Opt., **32** (1993) 2582-2598.
- 10) E. B. Grann, M. G. Moharam and D. A. Pommet: “Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures,” J. Opt. Soc. Am. A, **12** (1995) 333-339.
- 11) M. G. Moharam and T. K. Gaylord: “Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction,” J. Opt. Soc. Am., **71** (1981) 811-818.
- 12) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya and H. Kikuta: “Fabrication of microcone array for antireflection structured surface using metal dotted pattern,” Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) L747-L749.

(2003年3月11日受理)