ナノインプリント法による光ファイバ端面への 反射防止サブ波長構造の製作*

金 森 義 明^{*1}, 大河内 昌章^{*2}, 羽 根 一 博^{*3}

Fabrication of Antireflective Subwavelength-Grating Structures on Optical Fiber End Faces Using Nanoimprinting Technique

Yoshiaki KANAMORI^{*4}, Masaaki OKOUCHI and Kazuhiro HANE

^{*4} Department of Nanomechanics, Tohoku University,
6-6-01 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

We proposed optical fibers with antireflective subwavelength-grating (SWG) structures and their fabrication method using a nanoimprinting technique. Antireflective coatings on optical fiber end faces are essential optical components to couple efficiently the light with the optical fiber. Because commercially available nanoimprinting machines are designed to press two plates set parallel to each other, it is difficult to set a flexible and long optical fiber in the nanoimprinting machine, and to press the optical fiber end face to a mold. In this paper, we developed a novel nanoimprinting machine to press an optical fiber end face to a plate of mold. Using the developed machine, antireflective SWGs with the periods of 150 nm were fabricated on the end faces of plastic optical fibers. A silicon SWG with 150 nm period and 348 nm height was used as a mold. Reflectance and transmittance of the SWGs were measured and compared with that of a flat end face of a plastic optical fiber.

Key Words: Nanoimprint, Subwavelength Grating, Nano & Micro Machining, MEMS (Micro Electro-Mechanical System), Metal Mold and Die, Antireflection, Optical Fiber

1. 結 言

光ファイバは、通信・計測・エネルギー伝送等、幅広い分野で利用されている。石英系光ファイバは、長距離伝送用途で多く使われている。また、安価で加工性に優れたプラスチック系光ファイバは、民生用（家電、車両等）の短距離伝送用途で使われる。光ファイバ伝送システムを構築するには、発光素子、光ファイバ、受光素子の三要素が必要であり、それぞれの接続部で光学的反射損失が発生する。近年、発光素子の高出力化に伴い、光ファイバへの入射損失を低減するために、光ファイバ入射端面に反射防止層を形成することが実用上不可欠となっている。同様に、光ファイバ出射端面にも反射防止層を形成し、戻り光によるノイズの低減や光結合効率を向上させることが不可欠である。また、研究・分析用途の光ファイバにおいてもノ

イズの低減や高精度計測を行うために反射防止コートされた光ファイバが多く使用されている。

現在、光ファイバ端面上の反射防止層の形成には、スパッタ装置が一般に使われており、単層あるいは多層の誘電体薄膜を光ファイバ端面上に成膜しているが、膜の密着性が問題であり、また、真空プロセスとなるので高価となる。

近年、ナノ機械加工技術の発展に伴い、入射波長よりも小さな周期構造を持つ、サブ波長構造 (Subwavelength grating: SWG) による反射防止層が注目されている^{(1)~(6)}。最近では、SWGが形成された高輝度発光ダイオードやカメラ用レンズが実用化されている。SWGによる反射防止層は、誘電体膜と比較して以下の特徴を持つ。

- ・基板と同じ材質で形成できるので膜の密着性の問題が無い。
- ・広い波長帯域と入射角度に対して反射率を低減できる。
- ・多くの材質に適用できる。（誘電体膜は適当な屈折率を持つ材質を選ぶ必要がある）

* 原稿受付 2010年5月13日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉6-6-01)。

^{*2} 東北大学工学部。

^{*3} 正員、フェロー、東北大学大学院工学研究科。

E-mail: kanamori@hane.mech.tohoku.ac.jp

更に、ナノインプリント法による低コスト生産ができる⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。ナノインプリント法は、Si モールドを用いた精密プレス成型によりポリマ表面にナノ構造を形成する手法であり、大気環境下で 10nm 以下のパターン転写が可能であることから、超微細構造を安価に大量生産する技術として注目されている。

光ファイバ端面に、SWG を安価に形成できれば利用価値の高い優れた反射防止層になると期待できるが、適当な製作方法が無いため報告例はない。

本論文では、反射防止 SWG が形成された光ファイバおよびナノインプリント法を用いた製作方法について提案する。一般的なナノインプリント装置は、モールドと被転写材のプレート同士をそれぞれ固定して平行度を調整後、プレスするように構成されている。従って、フレキシブルで細長いファイバ状の被転写材を固定し、その端面にパターン転写するのは困難である。また、スラブ型光導波路端面へのインプリントの報告例もあるが、光ファイバを装置に固定するのは困難である⁽¹¹⁾。本論文では、光ファイバ端面用ナノインプリント装置を開発した。直径 250 μm のプラスチック光ファイバ (Plastic optical fiber: POF) 端面に、周期 150nm、高さ 348nm の二次元周期構造が形成された Si モールドを押し当てて SWG を形成し、光学特性を評価した。

2. 反射防止 SWG の原理

光が POF に入射する際、または POF から出射する際、POF-空気界面でのフレネル反射により、反射損失が生じる。そこで、光の波長よりも十分短い周期を持つ SWG を用いた反射損失の低減を考える。格子周期が入射波長よりも小さな SWG は回折波を発生せず、入射光に対して平均的な屈折率を持った媒質と等価とみなすことができる。つまり、形状を制御することにより、POF の屈折率と周囲（ここでは、空気）の屈折率の中間的な任意の等価屈折率を持つ層を作ることができる。図 1 に、SWG による反射防止の原理図を示す。

Fig.1 Schematic diagram of an antireflective SWG and the effective refractive index on the POF end face

屈折率 n_1 の入射層から n_2 の POF へ波長 λ の光が入射するとき、図 1(a) のようなテーパ形状を持つ SWG では、SWG の先端から根元にかけて入射媒質と POF 材質の体積占有率が徐々に変化するため、図 1(b) に示すように、等価屈折率分布は n_1 から n_2 にかけて緩やかに変化する。光の反射は主に屈折率の急激な変化により生じるので、連続的な屈折率変化に対して光はほとんど反射しない。従って、反射率を低減することができる。光が POF から出射する際も同様に反射率が低減される。

3. 数値解析

3.1 計算モデル SWG の理論計算は、厳密解法である Rigorous coupled-wave analysis (RCWA) を用いた⁽¹²⁾。RCWA 法は回折格子をフーリエ級数展開で表し、電磁場との結合方程式を求め、これを境界条件の下で数値的に解くことで回折効率を算出する計算手法である。この方法は、周期構造を高さ方向に多層分割して、各層の電磁界は Maxwell 方程式の固有モードで展開して取り扱うため、マルチレベル格子を解析することができる。また、周期構造における誘電率分布をフーリエ級数展開で表現するため、任意の格子形状に対して適用することができる。市販ソフト (DiffractionMOD: 日本アールソフトデザイングループ) を用いて計算を行った。

計算モデルを図 2 に示す。ここで、 λ は入射波長、 θ は入射角度（垂直入射のとき、 $\theta = 0^\circ$ ）、 d は SWG の深さ ($d = 348\text{nm}$)、 Λ は SWG の周期 ($\Lambda = 150\text{nm}$) を示す。図 2(a) は光が POF に入射する場合の入射光の方向を示し、図 2(b) は光が POF から出射する場合の入射光の方向を示している。図中では 2×2 個の逆円錐形状のホール（空気が充填）が配置されているが、実際は無限周期構造として計算を行っている。RCWA 法は

Fig.2 Calculation model (a) when the light impinges to the POF and (b) when the light emits from the POF

厳密解法であるが、計算機のメモリ容量と計算速度の制約から、フーリエ級数展開で考慮する次数とマルチレベル格子として扱う場合の分割層数を、解の収束性を考慮して決定する必要がある。今回、SWG を、同じ厚さを持つ 10 層にスライスしたモデルを用いた。また、解の収束性を確認した結果、289 次の次数まで考慮することとした。POF の材質である Polymethyl methacrylate (PMMA) の屈折率として $n = 1.492$ を用いている。SWG のホールは空気 ($n = 1.0$) とした。なお、本論文で示す透過率および反射率の計算値は、全て 0 次回折効率である。

使用した POF の開口数 (Numerical Aperture: NA) は、 $NA = 0.5$ であるので、POF の導波モードと結合できる光の許容入射半角は、以下ようになる。

(i) 光が POF に入射する場合

許容入射半角 θ_i は、スネルの法則より、

$$\sin \theta_i \leq NA = 0.5 \quad (1)$$

なので、

$$\theta_i \leq \sin^{-1}(0.5) = 30^\circ \quad (2)$$

となる。

(ii) 光が POF から出射する場合

許容入射半角 θ_i は、スネルの法則より、

$$1.492 \sin \theta_i \leq NA = 0.5 \quad (3)$$

なので、

$$\theta_i \leq \sin^{-1}(0.5/1.492) = 19.58^\circ \quad (4)$$

となる。

3.2 POF に入射する場合の反射率特性 POF のコア径は、一般に直径数十～数百 μm と微小であり、レンズなどの集光光学系を用いて光入射することが多い。従って、広い入射角度に対する反射防止特性が要求される。そこで、光が POF に入射する際の POF 端

Fig.3 Calculated reflectance of the SWG as functions of wavelength and incident angle for random polarized incident light

Fig.4 Calculated transmittance as a function of incident angle at the wavelength of 653.5nm

面における反射率特性を評価する。図 3 に、SWG 反射率の入射波長と角度依存性を示す。入射光はランダム偏光である。計算モデルは図 2(a)である。図より、可視光全域で反射率が低減されていることが分かる。例えば、平坦な PMMA 表面からの垂直反射率はおおよそ 3.9%であるが、図 3 より、SWG を形成することで、垂直入射 ($\theta = 0^\circ$)、波長 400～800nm における反射率を 0.54%以下まで低減できることが分かる。また、図 3 より、広い入射角度に対しても反射率が低減されていることが分かる。例えば、図 3 より、波長 650nm において、許容入射半角の 30° まで反射率は 0.57%以下であることが分かり、斜入射においても反射防止効果を有することが分かる。

3.3 POF から出射する場合の透過率特性 次に、光が POF から出射する際の POF 端面における透過率特性を評価する。透過率の入射角度依存性を図 4 に示す。計算モデルは図 2(b)である。入射波長は、実験で用いた $\lambda = 653.5\text{nm}$ とし、ランダム偏光である。図 4 より、垂直入射において平坦面からの透過率は 96.1%であるが、SWG を形成することにより透過率が 99.5%まで増加することが分かる。また、SWG は入射角度 30° においても、98.8%の高い透過率を保つことが分かり、平坦面の場合と比較すると、より広い角度に対して高い透過率特性を保つことが分かる。また、許容入射半角の $0 \sim 19.58^\circ$ において、透過率の角度依存性は少ないことがわかる。垂直入射における透過率比から、SWG を形成することにより約 3.5%の出力増加が期待できる。

4. 装置構成

光ファイバ端面用ナノインプリント装置の模式図を図 5 に示す。本装置は、ロードセル、ヒータ、光ファ

Fig.5 Schematic of nanoimprinting machine for optical fiber end face

Fig.6 Developed nanoimprinting machine for optical fiber end face

Fig.7 Optical fiber holder

イバホルダ, 3 軸直動ステージ, 2 軸傾斜ステージ, ズームレンズ付き CCD カメラ, アライメント用レーザ等から構成される。ヒータにより加熱されたステージ上の Si モールドに, 光ファイバホルダに固定された POF 端面を押しつけることによりナノインプリントを行う。ステージ下部にはロードセルおよび熱電対が内蔵されており, 加重および温度が計測される。光ファイバ端面と Si モールドの平行度の調整は 2 軸傾斜ステージお

Table 1 Characteristics of developed nanoimprinting machine for optical fiber end face

Pressing system	AC servo
Maximum heating temperature	300 °C
Rated capacity (resolution) of load cell	4.903 N (490.3 μ N)
Magnification of zoom microscope	0.75 ~ 4.5 X
Travel (lead of actuator) of XY axis manual stage	± 9 mm (0.5 mm/rotation)
Travel (resolution) of Z axis motorized stage	35 mm (1 μ m)
Travel (lead of actuator) of $\alpha\beta$ axis manual goniometer	$\pm 15^\circ$ (0.84°/rotation)
Parallelism tolerance of optical fiber end to Si mold surface	$\pm 0.06^\circ$

よび CCD カメラを用いて行われる。また, 光ファイバに可視レーザ光を入射し, 光ファイバ端面から放射される可視レーザ光と Si モールドの位置を CCD カメラで観察しながら, XY 直動ステージを用いて, 光ファイバ端面と Si モールドの位置合わせを行う。位置合わせ後, Z 軸自動ステージにより光ファイバを降下させ, インプリントを行う。

図 6 に, 開発した光ファイバ端面用ナノインプリント装置の全体写真を示す。CCD カメラ使用時は, 照明光で Si モールド表面を照らし, モニタで観察しながら光ファイバ端面と Si モールドの大まかな位置合わせを行う (微調整は上述の可視レーザ光を用いて行う)。ロードセルの加重は表示器により 0.01g 単位で表示される (ただし, ロードセルの分解能は 0.049g)。また, ヒータ温度は, 温度コントローラにより 1°C 単位で調節できる。位置合わせ用の可視レーザ光は, 波長 653.5nm の半導体レーザを用いた。Z 軸自動ステージは AC サーボモータにより駆動する。CCD カメラを含めたプレス部分は 500mm 角程度のスペースに収まる。

図 7 に, 光ファイバホルダ部の写真を示す。光ファイバホルダのフェルールに直径 250 μ m の POF を挿入し, フェルール先端から POF を約 300 μ m 突き出した状態で, POF をクランプする。

また表 1 に, 開発した光ファイバ端面用ナノインプリント装置の, その他の仕様をまとめた。プレスは AC サーボによる Z 軸自動ステージにより行い, 最大加熱温度は 300°C である。POF 端面と Si モールドの平行出しは 2 軸傾斜ステージで行い, $\pm 0.06^\circ$ の精度で平行出しが可能である。

5. SWG の製作

5.1 製作工程 図 8 に, SWG の製作工程を示す。初めに, 研磨シート (ラッピングフィルムシート: 3M) を用いて POF 端面を研磨する (図 8(a))。次に, POF

と Si モールドをナノインプリント装置に取り付け、Si モールドを 150°C に加熱する (図 8(b))。Si モールドは、POF との剥離を容易にするため、離型剤 (オプツール DSX:ダイキン工業) がコーティングされている。その後、Si モールドを用いて POF をプレスする (図 8(c))。POF の材質である PMMA のガラス転移点が 105°C なので、それよりも高い温度で加熱を行う。複数回の実験を試みた結果、プレス条件は加熱温度 150°C、加圧 10MPa、圧力保持時間 10 分間とした。加圧 P (Pa) は以下の式で求めた。

$$P = F/S = m \cdot 0.001 \cdot g / \pi r^2 \quad (5)$$

ここで、 F は加重 (N)、 S はプレス面積 (m^2)、 m はロードセルで計測される重量 (g)、 g は重力加速度 ($=9.81\text{m/s}^2$)、 r は POF 半径 ($=125 \times 10^{-6}\text{m}$) である。最後に、PMMA のガラス転移点以下の 90°C まで冷却後、離型することで、POF 端面に SWG を製作する (図 8(d))。

使用した Si モールドの走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を図 9 に示す⁽¹⁾。高さ 348nm の円錐形状の Si 構造体が周期 150nm で二次元配置されているのが分かる。製作は、電子線描画装置でパターンニング後、パターンニングされた電子線レジストをマスクにして高速原子線加工装置でエッチングすることにより行われた。

5・2 製作結果 図 10 に、研磨シートで研磨後の POF 端面の SEM 写真を示す。POF 側面と比較して、端面が研磨により平坦化されていることが分かる。使用した研磨シートの砥粒は酸化アルミニウムであり、粒度 3.0 μm と 0.3 μm のシートを順番に用いて研磨を行

Fig.8 Fabrication process

Fig.9 SEM photographs of Si mold⁽¹⁾. (a) Tilted view and (b) cross-sectional view

った。使用した POF は、直径 250 μm 、コア径 240 μm であり、コア部の材質は PMMA である。

6. 製作結果および光学測定

図 11 に、POF 端面に製作した SWG の SEM 写真を示す。図 11(a) に示す POF 端面の全領域に、図 11(b) に示す SWG が形成されている。製作された SWG は、周期 150nm であり、逆円錐形状のホールが二次元配置されており、Si モールドの反転パターンが POF 端面全体に転写されていることが分かる。SWG の高さは、断面観察が困難なため測定していない。また、熱ナノインプリント時における熱変形により、POF 先端から 14 μm 厚ほど、ファイバ径が拡大した (図 11(a))。ファイバ径の急激な変化は光伝搬損失の一因となる。POF のクラッド材はフッ素ポリマであり、ガラス転移点はプレス時の温度 (150°C) よりも高いため、コア材 (PMMA) とクラッド材の拡散は生じていない。プレス時の条件 (加圧、圧力保持時間、加熱温度) を絞り込むことにより、ファイバ径の拡大を低減できる。

Fig.10 A SEM photograph of the POF end face after polishing

Fig.11 Fabricated antireflective SWG on a POF end face. (a) A low magnification image and (b) a high magnification image

Fig.12 Measured reflectance of the fabricated SWG on the POF end face as a function of wavelength

Table 2 Measured output power of the LD light from the POF end face at the wavelength of 653.5nm

End face	Output power [μ W]
Without SWG (Flat)	13.81
With SWG	14.16

図 12 に、POF 端面に製作した SWG の反射スペクトル特性を示す。顕微分光測定装置の試料観察部に POF を垂直に立て、POF 端面の反射スペクトルを測定した。比較のため、POF 端面を研磨した平坦面からの反射スペクトルも示す。図 12 より、平坦面からの反射率は可視光領域において 4~5%程度であるのに対して、SWG を形成することにより反射率が 2~3%に低減していることが分かる。図 11 の SEM 写真から SWG の断面形状を観察することは困難であったが、広い波長帯域において反射防止効果が得られていることから、テーパ断面であることが推測でき、Si モールドを反転した逆円錐状のホールアレイが形成されていると考えられる。もし、円筒状のホールアレイの場合、特定波長近傍のみ反射率が大きく低減し、図 12 のような反射スペクトル特性にならない。

表 2 に、POF 端面に製作した SWG の透過出力特性を示す。波長 653.5nm の半導体レーザ光を POF に入射させ、POF 端面からの出射光をパワーメータで受光し、出力を測定した。比較のため、POF 端面を研磨した平坦面からの出力も示す。レーザ光の強度は 16.5 μ W (駆動電流: 30mA) である。表 2 より、平坦面からの出力が 13.81 μ W、SWG からの出力が 14.16 μ W であり、SWG を形成することにより出力が約 2.5%上昇した。半導体レーザと POF 間の光結合損失のため、平坦面および SWG の透過率は図 4 に示す理論値よりも低い値となっている。なお、出力測定誤差は 10nW である。SWG

の形状を最適化することにより更に透過率を増加させることができる。

7. 結 言

POF 端面に反射防止 SWG が形成された低反射損失の光ファイバを製作した。また、POF 端面に SWG を製作するために、光ファイバ端面用ナノインプリント装置を開発した。RCWA 法による数値解析により、POF 端面に形成された SWG の反射防止特性を評価した。開発した光ファイバ端面用ナノインプリント装置を用いて、直径 250 μ m の POF 端面に周期 150nm の反射防止 SWG を製作することができた。POF 端面に製作した SWG の反射スペクトル特性を測定した結果、平坦面からの反射率は可視光領域において 4~5%程度であるのに対して、SWG を形成することにより反射率を 2~3%に低減することができた。また、波長 653.5nm の半導体レーザ光を POF に入射させ、SWG が形成された POF 端面からの出力を測定した結果、SWG を形成することにより出力が約 2.5%上昇した。SWG の形状を最適化することにより更に反射防止特性を向上させることが可能である。

文 献

- (1) Kanamori, Y., Sasaki, M., Hane, K., Broadband Antireflection Gratings Fabricated upon Silicon Substrates, *Optics Letters*, Vol. 24, No. 20 (1999), pp. 1422- 1424.
- (2) Kanamori, Y., Hane, K., Sai, H., Yugami, H., 100 nm Period Silicon Antireflection Structures Fabricated Using a Porous Alumina Membrane Mask, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 2 (2001), pp. 142- 143.
- (3) Toyota, H., Takahara, K., Okano, M., Yotsuya, T., Kikuta, H., Fabrication of Microcone Array for Antireflection Structured Surface Using Metal Dotted Pattern, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 40, No. 7B (2001), pp. L747- L749.
- (4) Kanamori, Y., Ishimori, M., Hane, K., High Efficient Light-Emitting Diodes with Antireflection Subwavelength Gratings, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 8 (2002), pp. 1064- 1066.
- (5) Yanagishita, T., Nishio, K., Masuda, H., Anti-Reflection Structures on Lenses by Nanoimprinting Using Ordered Anodic Porous Alumina, *Applied Physics Express*, Vol. 2 (2009), pp. 022001-1- 022001-3.
- (6) Grann, E. B., Moharam, M. G., Pommert, D. A., Optimal Design for Antireflective Tapered Two-Dimensional Subwavelength Grating Structures, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 12, No. 2 (1995), pp. 333-339.
- (7) Chou, S. Y., Krauss, P. R., Zhang, W., Guo, L., Zhuang, L., Sub-10 nm Imprint Lithography and Applications, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 15, No. 6 (1997), pp. 2897- 2904.
- (8) Zhang, W., Chou, S. Y., Fabrication of 60-nm Transistors on 4-in. Wafer Using Nanoimprint at All

- Lithography Levels, *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 8 (2003), pp. 1632- 1634.
- (9) Bao, L.-R., Cheng, X., Huang, X. D., Guo, L. J., Pang, S. W., Yee, A. F., Nanoimprinting Over Topography and Multilayer Three-dimensional Printing, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 20, No. 6 (2002), pp. 2881- 2886.
- (10) Alkaisi, M. M., Jayatissa, W., Konijn, M., Multilevel Nanoimprint Lithography, *Current Applied Physics*, Vol. 4 (2004), pp. 111- 114.
- (11) Kanamori, Y., Hishinuma C., Hane, K., Fabrication of a Diffraction Grating on End Face of a Light Guide Plate Using Imprint Lithography, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 759 (2009), pp.2853- 2858.
- (12) Moharam, M. G., Gaylord, T. K., Rigorous Coupled-Wave Analysis of Planar-Grating Diffraction, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 71, No. 7 (1981), pp. 811-818.
-