マイクロ金型を用いたキャストニング法による 低密度波長分割多重用アレイ導波路回折格子に関する研究(第一報)*

—アレイ導波路回折格子製作方法の検討—

岡田 和志** 渡邊 英応*** 大平 文和† 三原 豊** 鈴木 孝明*** 小川 一文***

Fabrication of AWG for the CWDM by the Casting Method using a Micro Die (1st Report)

—Fabrication Process of Arrayed Waveguide Grating—

Kazushi OKADA, Hideo WATANABE, Fumikazu OOHIRA, Yutaka MIHARA, Takaaki SUZUKI and Kazufumi OGAWA

We proposed a fabrication process of an Arrayed Waveguide Grating (AWG) by a casting method using a micro die for the low cost Wavelength Division Multiplexing (WDM) system. We designed and made an optical simulation of the wavelength demultiplexing for the AWG. In order to fabricate the AWG with low cost and high accuracy, we proposed the fabrication process of the micro die by the electro-plating after fabricating the mother shape. We proposed the fabrication process of the mother shape using the SU-8 resist which is the negative resist. By using SU-8 resist, the high cost fabrication process using the dry etching equipments can be deleted. We fabricated the AWG with an UV cure material using the fabricated micro die. As the result, it has become possible to fabricate the AWG with low cost.

Key words: AWG, WDM, SU-8 resist, micro die, casting method

1. 緒 言

近年、光通信技術や光インターコネクション技術、光記憶技術が飛躍的に進歩しており¹⁾。それに伴い、微細光学部品が重要となっている。このうち光通信分野においては、波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 技術のキーデバイスである波長合分波器の研究が行われている²⁾。その中でも、アレイ導波路回折格子 (Arrayed Waveguide Grating: AWG)³⁾は、合波された波長の光を、所定の波長に分波するデバイスである。本デバイスは、Input / Output 導波路、Array 導波路のチャンネル数や波長分波の波長間隔等に対する設計の自由度が高く、多チャンネル化・小型集積化が可能である点から WDM 実現のためのキーデバイスとして注目されており、今後ますます重要になると予想される。

現在、AWG は石英材料を用いて半導体プロセスにより製作されているが⁴⁾、プロセスコストが高い、製作時間がかかる、特殊な装置が必要等の課題がある。一方、カプラやスプリッタといった簡単な構造を有する導波路は金型を用いたキャストニング法により製作されている⁵⁾。しかし、より複雑な導波路パターンを有する AWG については、金型製作やコアの埋め込み工程の困難さ等の課題により、現在までにキャストニング法により実現された報告例はない。

そこで本研究では、AWG を低コストかつ高精度に製作する技術の確立を目指す。このため AWG を製作する方法として、金型による転写成型技術を用いることにより、低コストかつ高精度に一括して製作する方法を検討した。特に、本研究ではその金型の

元となる母型の製作技術として、Si 基板を用いる方法、および厚膜レジストである SU-8 を用いる方法を新たに提案し、その実現性を検討した。本方式で製作した母型からメッキによりマイクロ金型を製作した。さらに、製作した微細三次元形状を有するマイクロ金型を用いて、転写成型により AWG を製作するための方法を提案、実証し、これにより AWG を実現した。

2. AWG の設計

本研究では、低密度波長分割多重 (Coarse Wavelength Division Multiplexing: CWDM) システム用に中心波長 1530nm で波長間隔 20nm の 1 入力 7 出力の AWG を製作する。今回製作する AWG は左右対称モデルとし、図 1 のような AWG モデルで設計を行った。設計を行うにあたり初期値として、中心波長 $\lambda_0=1530\text{nm}$ 、コアの屈折率 $n_{\text{core}}=1.522$ 、クラッドの屈折率 $n_{\text{clad}}=1.516$ を用いた。設計手順として、まず 3 次元導波路の解析方法として一般的な Macatiili 法^{6,7)}を用いて Input / Output 導波路、Array 導波路のコア寸法を算出し、その後、波長合分波のための

Fig.1 Model of AWG

* 原稿受付 平成 21 年 1 月 21 日

** 学生会員 香川大学大学院博士後期課程知能機械システム工学専攻 (香川県高松市林町 2217-20)

*** 香川大学工学部 (香川県高松市林町 2217-20)

† 正 会 員 香川大学工学部 (香川県高松市林町 2217-20)

パラメータの算出を行った。AWG の設計を行った結果の一部を表 1 に示す。次に、設計値を基に AWG モデルを製作し、そのモデルを用いて Optiwave 社の WDM-Phasar によりシミュレーションを行った結果を図 2 に示す。図 2 は Output 導波路での強度分布を表したものである。横軸の $0\mu\text{m}$ 付近の 7 つの同値のピーク部分が Output 導波路のコア部を表しており、コア部に出力ピークが確認できることから、波長が分波できていることが分かる。このように、コア寸法 $5\mu\text{m}$ の型を製作する必要があるため、このため次項で述べる製作方法を提案、検討した。

3. 製作方法の提案

本研究では、低コスト化のために金型技術を用いたキャスト法により AWG を製作する。金型を用いたキャスト法による製作方法は以下のような工程からなる(図 3 参照)。

Process 1 : 母型製作工程

Process 2 : 金型製作工程

Process 3 : 転写成型工程(コア埋め込み工程)

ここで、低コスト化を考慮し、母型を製作しメッキを施すことで金型を製作する手法を採用した。

まず、予備検討として、Si 基板を用いてドライエッチングにより母型を製作する方法を用いて製作を行った。下記に Si 母型

の製作方法を示す(図 4 参照)。初めに、SOI 基板の上にアルミ膜を形成し、アルミ膜のパターニングを行う。次に、アルミ膜を保護膜として ICP-RIE により Si を中間酸化膜層の手前までエッチングする(図 4 Process 1)。酸化、エッチングを行い、ICP-RIE によりエッチングした際に生じる側面の凹凸であるスキヤロップを平滑化する(図 4 Process 2)。側面の平滑化が完了した後、レジストを塗布し、露光・現像を行うことにより保護膜を製作する(図 4 Process 3)。ICP-RIE により、中間酸化膜層まで Si をエッチングする(図 4 Process 4)。

Process.1 を行い、Si をエッチングした結果を図 5 に示す。図 5 よりコア寸法が $5.1\mu\text{m}$ であることが確認できた。しかし、上記の方法では、真空プロセスを多用するために、製作工程が複雑でかつ製作時間がかかる、プロセスコストが高いために低コスト化に限界がある、Si エッチング時にスキヤロップが生じる等の課題がある。また、スキヤロップを平滑化する工程(図 4 Process 2)の際に、酸化、エッチング工程を複数回繰り返す必要があるために、導波路形状にだれが生じやすい、Process3, 4 から中間酸化膜までの Si エッチング工程でアライメントのずれによりコア部に段差が生じる等の課題もある。図 6 にアライメントのずれにより段差が生じたコア形状の一例を示す。

そこで、これらの課題を解決するために、新たに SU-8 を用いる方法を検討した。SU-8 を用いて母型を製作する工程を図 7 に示す。

Table 1 Design result

The central wavelength	1530 nm
The wavelength spacing	20 nm
Refractive index of the core	1.522
Refractive index of the clad	1.516
The relative refractive index Δn	0.39
The width of the core	5 μm
The thickness of the core	5 μm
Pitch of a adjacent array waveguides	28 μm
Pitch of a adjacent Input/Output waveguides	28 μm
Diffraction order	10
Focal length of the Slab waveguide	5917.7 μm
Length difference of adjacent array waveguides	10.35 μm
FSR	151.99 nm
Number of Input waveguide	1
Number of Output waveguide	7
Number of Array waveguide	45
The central angle	1.13 rad

Fig.2 Simulation result

Fig.3 Fabrication process by a casting method using a micro die

Fig.4 Fabrication process by the dry etching process

Fig.5 Scallops in the side wall

Fig.6 Core shape

Fig.7 Fabrication Process using SU-8 resist for a mother shape formation

まず、Si 基板上に SU-8 を塗布する(図 7 Process 1)。次にマスクを介して SU-8 を露光し(図 7 Process 2)、現像を行うことにより SU-8 母型を製作する(図 7 Process 3)。

本方式では、ドライエッチング装置を必要としないために真空プロセスを用いる工程が大幅に減少し、製作時間、製作コスト等低減することが可能である。また、図 5 のようなスキラップが生じず、また SU-8 を用いることにより、図 6 のようなアライメント誤差が生じないために高精度な母型を製作することが可能である。これらの結果より、以下の項では SU-8 を用いて母型を製作する方法により AWG の製作を行った。

4. 製作結果

4.1 AWG 製作プロセスの概要

以下に、SU-8 を用いた母型製作から、金型製作および転写成型までの AWG の製作工程を述べる(図 8 参照)。

Si 基板上にスピコートにより SU-8 を $5\mu\text{m}$ (4000rpm / 30sec.) 塗布する(図 8 Process 1)。次にマスクを介して SU-8 を露光し、現像を行うことにより SU-8 母型を製作する(図 8 Process 2,3)。現像後の洗浄時に、エアーを用いて乾燥を行うと、導波路パターンが破損するために、ベークによる乾燥を行う。そして、メッキの下地金属である Ti/Pd をスパッタリングにより成膜し(Ti: 1000 Å, Pd: 1000 Å)、Ni メッキを行う(図 8 Process 4,5)。メッキ後、Si 基板と SU-8 を KOH により除去し金型を製作する(図 8 Process 6)。製作した金型表面に離型剤である化学吸着単分子膜を製膜する⁸⁾。製膜する際にコロナ放電処理を行い、Ni 金型表面を親水化させ製膜する。化学吸着単分子膜製膜後、紫外線硬化型樹脂を塗布しアンダークラッドを形成する(図 8 Process 7)。アンダークラッド形成後、屈折率の異なる紫外線硬化型樹脂を用いてコアを形成する(図 8 Process 8)。最後に、オーバークラッドを形成し AWG とする。

上述の Process1 から Process3 までが母型製作工程、Process4 から Process6 までが金型製作工程、Process7 から Process9 までが転写成型工程である。

4.2 母型製作

4.1 節で記述した SU-8 母型の製作工程を詳細に述べる。後の Ni メッキを行う際に応力がかかり SU-8 が Si 基板上から剥離する、シワが入る等の問題が生じることが分かった。そこで、SU-8 と Si 基板の密着性を向上させるために、SU-8 製膜の際に基板表

Fig.8 Fabrication process of AWG

面にコロナ放電処理を行った。これにより上記の課題を低減することが出来た。図 9 に製作した SU-8 母型の SEM 写真を示す。(a)が Input 導波路と Slab 導波路、(b)が Slab 導波路と Array 導波路、(c)が Array 導波路、(d)が Array 導波路と Slab 導波路、(e)が Slab 導波路と Output 導波路の SEM 写真である。図 9(a)よりコア寸法が $5\mu\text{m}$ であり、この値は測定誤差範囲内であると考えられるため、ほぼ設計値通りの形状が形成できたと言える。

4.3 金型製作

前工程で製作した SU-8 母型に Ni メッキを施し、金型を製作した。メッキを施す際に、Ni メッキの触媒として Pd と、下地金属である Ti を母型表面に形成した。まず、無電解メッキを行い、その後電解メッキにより厚さ $500\mu\text{m}$ 程度製膜した。メッキ後、KOH と SU-8 リムーバを用い、下地基板である Si と SU-8 母型を除去し Ni 金型とした。

Fig.9 Fabrication result of the mother shape

Fig.10 Fabrication result of the micro die

その結果を図 10 に示す。(a)が Input 導波路と Slab 導波路, (b)が Slab 導波路と Array 導波路, (c)が Array 導波路, (d)が Array 導波路と Slab 導波路, (e)が Slab 導波路と Output 導波路の SEM 写真である。図 11(a)よりコア寸法が約 $5\mu\text{m}$ であり, 母型形状が精度よく転写できていることが分かる。

4.4 転写成型

前述で製作した Ni 金型を用いて転写成型を行った。転写成型を行うために, 離型剤として化学吸着単分子膜を用いた。使用した化学吸着単分子膜の構成分子(撥水剤分子)は, ヘプタデカフルオロ 1,1,2,2-テトラヒドロデシル・トリメトキシシラン(構造式: $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7(\text{CH}_2)_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$)である。離型剤を製膜する方法を以下に示す。製膜を行う前に, Ni 金型表面にコロナ放電処理を行い親水化し, Ni 金型を吸着液に浸し化学吸着単分子膜を製膜する。このときの水滴との接触角は, 未処理の金型で約 70° , コロナ放電処理後で約 7° , 離型剤製膜後で 108° である。離型剤製膜後, Ni 金型上に紫外線硬化剤を塗布し脱気を行った。脱気後, 紫外線を照射し硬化させ, 金型からの離型を行いアンダークラッドとした。

図 11 に製作したアンダークラッドの SEM 写真を示す。(a)が Input 導波路と Slab 導波路, (b)が Slab 導波路と Array 導波路, (c)が Array 導波路, (d)が Array 導波路と Slab 導波路, (e)が Slab 導波路と Output 導波路の SEM 写真である。図 11(a)よりコア寸法が約 $5.1\mu\text{m}$ であり, 金型から形状が精度よく転写できていることが分かる。このことから, 化学吸着単分子膜が, 優れた撥水・撥油性

(a) Input waveguide and Slab waveguide (b) Slab waveguide and Array waveguide

(c) Array waveguide and Slab waveguide (d) Slab waveguide and Output waveguide

Fig.11 Fabrication result of the under clad

(a) Mother shape (b) Under clad

Fig.12 Fabrication result of the mother shape and the under clad

を持つため, 微細マイクロ部品に対する優れた離型材として利用することが可能であることが分かった。図 12 に製作した SU-8 母型とアンダークラッドの写真を示す。図 12(a)が SU-8 母型, (b)がアンダークラッドである。図 13 より, SU-8 母型形状を精度よく転写できていることが確認できた。

次に, 製作したアンダークラッドに形成されているコア溝部に, コア材料である紫外線硬化剤を充填させた。充填させる方法として, 低粘度の紫外線硬化剤を滴下し毛細管現象により約 $5 \times 5\mu\text{m}$ のコア溝部に充填していく方法を提案し, その有効性を確認した。コア材料を充填させる方法を以下に示す(図 13 参照)。まず, アンダークラッドと同様に紫外線硬化剤を用いてオーバークラッドを製作した(図 13 Process 1)。次に, アンダークラッドとオーバークラッドを, 治具を用いて加圧した(図 13 Process 2)。加圧後, 導波路端部にコア用樹脂を滴下し, 真空引きを行い, コアを充填した(図 13 Process 3)。最後に, 紫外線を照射しコア材料を硬化させた(図 13 Process 4)。

以上の方法により, コアを充填した結果を図 14(a)に示す。コアとクラッドの屈折率がほぼ同じであるために写真では見難いが, 図 14(b)のイメージ図に示すように, 左から Input 導波路, Slab 導波路, Array 導波路, Slab 導波路, Output 導波路が形成されている。

Fig.13 Method of filling a core material

(a) Fabrication result

(b) Image of (a) Fabrication result

Fig.14 Fabrication result of AWG

Fig.15 Cutting result of the waveguide end face by dicing

Fig.16 Polishing result of the waveguide end face

最後に、製作した AWG の Input / Output 導波路の端面の切り出しおよび端面研磨を行った。端面の切り出しには、ダイシング装置を用いた。図 15 にダイシング装置により切り出した端面の写真を示す。図 15(b)より、コア寸法 $5\mu\text{m}$ よりも大きい凹凸が確認できる。また、図 16 に切り出した端面を研磨した結果を示す。図 16(b)より、大きい凹凸が図 15 に比べ大幅に減少していることが確認できる。このことから、光学特性評価実験が十分可能な端面が得られた。

光学特性の評価に関しては、今後第 2 報で述べる予定である。

5. 結 言

本研究では WDM システム実現のためのキーデバイスである AWG の製作を目的とし、マイクロ金型を用いたキャスト法による AWG 製作プロセスの提案と製作を行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

(1) 母型製作(AWG 形状の製作)

母型の製作方法として、予備検討として Si 基板を用いてドライエッチングにより母型を製作する方法を用いて試作を行った。その結果、エッチング時にスキヤロップが生じる、製作工程が複雑なために加工時間がかかる、スキヤロップ平滑化工程を行

うことで形状にだれが生じる等の課題があることが明らかになった。そこで、厚膜レジストである SU-8 を用いて母型を製作する方法を提案した。両方式による試作検討の結果、真空プロセスを用いる工程が大幅に減少し、製作時間、製作コスト等が低減することが可能で、スキヤロップが生じない等の利点がある SU-8 を用いて母型を製作する方法が有効であることを示した。

(2) 金型製作

Ni メッキを行うにあたり下地金属の形成や最適なメッキ条件を把握し、AWG の形状を転写した。これにより表面粗さの良好な精密な Ni 金型の製作を可能とした。

(3) 転写成型

Ni 金型を用いてアンダークラッドの製作を行った。また、離型剤として化学吸着単分子膜を用い、その有効性を実証した。さらに、アンダークラッドに形成されているコア形状にコア材料の充填する方法として、アンダークラッドとオーバークラッドを治具で挟み込み真空中でコア材料を充填する方法を提案し、それにより寸法 $5\mu\text{m}$ のコア溝部への充填を可能とした。

また、製作した AWG の Input / Output 導波路の端面研磨を行い、光学部品として十分良好な面を得た。

以上により、提案したプロセスを基に、精密マイクロ金型を用いた転写成型により初めて AWG を製作した。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会の特別研究員奨励金の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) Yasuhiro ANDO: Trends in Optical Interconnection Technologies and their Impact on Next-Generation Equipment Packaging, NTT R&D, **48**, 3, (1999) 271(15).
- 2) Yuzo YOSHIKUNI, Akira HIMENO, Testuo MIYA, and Jun-ich YOSHIDA: Evolution in Optical Devices for WDM Networks, NTT R&D, **46**, 7, (1997) 663(35).
- 3) H.Takahashi, Y.Hibino, and I.Nishi: Polarization-insensitive arrayed-waveguide grating wavelength multiplexer on silicon, OPTICS LETTERS, **17**, 7, (1992).
- 4) Hiroshi Takahashi, Katsunari Okamoto, and Yasuyuki Inoue: Arrayed-waveguide grating for WDM systems, NTT R&D, **46**, 7, (1997) 685(57).
- 5) TAKAHASHI Toshiyuki, HIGUCHI Masayoshi, YASUDA Naru, and HOSOKAWA Hayami: Fabrication of Replicated Polymer Optical Waveguides, Technical report of IEICE OPE, **102**, 369, (2002) 29.
- 6) E.A.J.MARCATILI: Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics, THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL, (1969) 2071.
- 7) Katsunari Okamoto: Fundamentals of Optical Waveguides, Academic Press, 2005.
- 8) I. Tuji, Y. Ookubo, and K. Ogawa: Study on Super-Hydrophobic and Oleophobic Surfaces Prepared by the Chemical Adsorption Technique, The Surface Finishing, **59**, 7, (2008) 460.