熱毛管型光導波路スイッチの開発*

下川房男** 佐藤 誠*** 牧原光宏†
稲垣秀一郎*** 西田安秀†

Development of Intersecting Waveguide Optical Switch based on Thermo-capillary /

Fusao SHIMOKAWA, Makoto SATO, Mitsuhiro MAKIHARA, Shuichiro INAGAKI and Yasuhide NISHIDA

Key words: MEMS, mechanical optical switch, optical waveguide, thermo-capillary, capillarity, high aspect ratio deep trench, oil sealing, oil injection

1. ま え が き

近年のインターネットの爆発的な普及に伴い、大容量で柔軟なネットワーク構成が可能な波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)通信システムの開発が進められている。このネットワークの実現には、任意の波長信号を分岐・挿入できる光アド・ドロップマルチプレクサや各波長ごとに光路を切り替える光パスクロスコネクタ、さらに光通信システムの故障の際に予備系への切替えを、より経済的に実現し得る光スイッチの開発が急務となっている。

上記の光スイッチには、自己保持性や優れた光学特性(低挿入損失、高消光比、低クロストーク、波長・偏波低依

存性)、さらに小型・高集積化、高信頼化、低価格化等が同時に要求される。これらの要求条件に対して最も高いポテンシャルを持つのが、MEMS (Micro Electro Mechanical System) テクノロジーにより形成したマイクロミラー等を用いて、機械的に光路の切替えを行うメカニカル光スイッチである。

著者らは、「液体の表面張力を駆動源とし、これを利用して機械的に光路の切替えを行う」という新規な発想を基に、MEMS テクノロジーを駆使し、光導波路基板上に光路の切替え機構を集積化した導波路型のメカニカル光スイッチを開発した。本報では、提案した光スイッチの構造や動作原理、光スイッチを実現するためのキーテクノロジー、さらに開発した光スイッチの特性や適用例、等について述べる。

2. 熱毛管型光導波路スイッチの構造とその動作原理¹⁾

図1に熱毛管型光導波路スイッチの基本構造を示す。このスイッチは、スイッチング動作を行うための機構(液駆動用の溝や薄膜ヒータ)が形成された光導波路基板(下部基板)とスイッチング動作をより安定に行うための迂回管路や液を注入するための注入管路等の構造が形成されたガラス基板(上部基板)から構成されている。光導波路基板には、所望の交差角度で交わる交差光導波路が製作されており、その交差光導波路の交差部付近には、液駆動用の狭小溝(溝幅が5 μm)が形成されている。溝の中には、導波路のコアとほぼ同一の屈折率を持つ液体(シリコンオイル)が注入されており、溝近傍には、一対の薄膜ヒータが設けられている。光導波路の交差部に形成した溝に液がある場合には導波光は溝部分を透過し、また溝に液がない場

下川房男

1983年長岡技術科学大学大学院工学研究科電子機器工学専攻修了。日本電信電話(株)NTT通信エネルギー研究所ネットワーク装置インテグレーション研究部主任研究員、工学博士

佐藤 誠

1982年九州大学大学院理学研究科修士課程修了。東日本電信電話(株)企画部担当課長、理学博士

牧原光宏

1989年東京大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。日本電信電話(株)NTT通信エネルギー研究所ネットワーク装置インテグレーション研究部主任研究員

稲垣秀一郎

1979年電気通信大学工学部電子工学科卒。東日本電信電話(株)企画部担当課長

西田安秀

1978年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。日本電信電話(株)通信エネルギー研究所企画担当部長

* 原稿受付 平成12年6月27日、1999年度(第19回)精密工学会技術賞受賞業績、受賞者: 下川房男、佐藤 誠、牧原光宏、稲垣秀一郎、西田安秀

** 正会員 日本電信電話(株)NTT通信エネルギー研究所(厚木市森の里若宮3-1)

*** 東日本電信電話(株)(東京都新宿区西新宿3-19-2)

† 日本電信電話(株)NTT通信エネルギー研究所

図1 熱毛管型光導波路スイッチの基本構造

図2 熱毛管型光導波路スイッチの動作原理

合には導波光は溝壁面で全反射し、別の導波路に導波される。すなわち、交差する光導波路を遮る溝に「液があるか」「液がないか」によって、光路の切替えが行われる。

図2を用いて、この光スイッチの動作原理（液の駆動原理と移動した液を溝内の所定の位置に保持する機構）を示す。Aの薄膜ヒータに通電すると、液柱の片側が加熱され、液柱の両端に温度勾配が生じる。暖められた側の液体の表面張力が低下し、液柱はバランスを崩して低温側、すなわち溝の反対側に移動する（熱毛管現象(thermocapillary)）。この熱毛管現象により移動した液柱は、表面張力が釣り合う位置で保持されるが、ここでは、液保持動作をより安定に行うために、溝の部分にはあらかじめ段差構造を設けておき、液柱が所望の位置に保持できるように設計した（毛管現象）。このような二つの毛管現象（熱

毛管現象と毛管現象）を組み合わせることにより、光路の切替えを自由自在に行える（図2に示す透過状態→反射状態の切替え）自己保持機能を持つ光スイッチを実現した。

3. 熱毛管型光導波路スイッチを実現するためのキーテクノロジー

著者らは、熱毛管型光導波路スイッチに要求される仕様（基本性能、機能等）を実現するために、次に述べるようなMEMSテクノロジーを開発した（図3）。

(1) 高精度・高アスペクト比深溝加工技術²⁾

この光スイッチでは、全反射を利用して光路の切替えを行っているため、反射面の良否がスイッチの性能を大きく左右し、また光信号が溝部を透過する際には、導波路構造が一部破れるために回折現象による損失が生じる。このため、できる限り細く、光学的に平坦な反射面を持つ溝加工技術の開発が必須である。そこで、高選択比マスクの選定、側壁保護膜の利用、ドライエング条件の最適化等により、溝幅5~10 μm 、深さ45 μm 、溝側壁の傾き $\pm 0.5^\circ$ 以下、溝側壁の平均粗さ10~20 nm程度、溝側壁の理想反射面からの位置ずれ $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下の高精度・高アスペクト比深溝加工技術を確立した（図4）。これにより、光スイッチの低損失化（透過溝における損失を0.05 dB/溝、反射溝の損失を1 dB/箇所以下）を実現した。

(2) 液の完全密封化構造の形成³⁾

液の完全密封化構造は光スイッチの高信頼化と深くかかわっており、極めて重要な課題である。この光スイッチでは、(a) ヒータ配線が埋め込まれた絶縁膜上を数 nm 程度に平坦化する超高精度研磨加工技術と、(b) この研磨面を接合面として上下基板を張り合わせる基板接合技術（陽極接合）を組み合わせることにより、液の完全密封化構造を実現した。

(3) 極微量・一括液注入技術⁴⁾

この熱毛管型光導波路スイッチにおいて、正常なスイッチング動作を行うには、100 pL 程度の液を液駆動溝の所望の箇所に注入する必要があるが、かつ実装の観点からは複数の素子に対して一括して注入できることが要求される。

図3 熱毛管型光導波路スイッチを実現するためのキーテクノロジー

図4 熱毛管型光導波路スイッチの溝断面形状

図5 圧力制御法を用いた極微量・一括液注入のプロセスフロー

そこで, (a) 液柱を液駆動溝のみに形成するために管路構造 (液駆動溝, 液注入口, 迂回路) の最適設計を行うとともに, (b) 真空差圧を利用した圧力制御法 (所望の注入量になるようにあらかじめ算出した減圧下で液を垂らし, 大気圧に戻す) により, 複数の素子に均等に, かつ一括して液を注入する極微量・一括液注入技術を開発した (図5). この方法によって, 光スイッチの全素子に対し, 上記必要量を注入できること (注入量のばらつきは $\pm 10\%$ 程度で

あり, 許容値以内) を確認した.

4. 開発した熱毛管型光導波路スイッチとその諸特性

図6は, 製作した 1×8 規模の熱毛管型光導波路スイッチの外観写真である. 光スイッチのチップサイズは光ファイバとの接続等のために 12 mm 角程度あるが, 実際の素子部は $2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ と小さい. しかも, 挿入図に示すように, 基本素子を $250 \mu\text{m}$ のピッチで配置できるため, 高集積化 (例えば $m \times n$ マトリックス配置等) が容易に図られることがわかる.

また図7は, この光スイッチを用いて, その切替え動作を行った結果である. ここでは, 共通ポートから入力した光信号を共通ポートから近い素子から順に切り替えて行き, その時の各出力ポートの光信号を観察した. この図より, 全素子において, 所望のスイッチング動作が実現できていることがわかる. スwitchング時間は, ヒータへの通電開始時刻からの遅延も含め 100 ms 以下であり, 信号の立上がり自体は数十 ms 程度である. さらに, この光スイッチでは, 消光比は 50 dB 以上, クロストークは -50 dB 以下が得られることが確認された.

表1に, この光スイッチの基本性能をまとめて示す. な

図6 製作した 1×8 熱毛管型光導波路スイッチの外観

図7 1×8 熱毛管型光導波路スイッチの切替え波形

表1 1×8 熱毛管型光導波路スイッチの基本特性

・挿入損失	3 dB 以下 (図6の入力-共通ポート間)
・消光比	$> 50 \text{ dB}$
・クロストーク	$< -50 \text{ dB}$
・波長依存性	$\pm 0.5 \text{ dB}$ 以下
・偏波依存性	$\pm 0.1 \text{ dB}$ 以下
・スイッチング速度	100 ms 以下
・消費電力	0.1 W 以下
・パッケージ寸法 (幅×長さ×高さ)	$40 \times 50 \times 2.5 \text{ mm}$ チップ単体では, $12 \times 12 \times 1 \text{ mm}$

図8 開発した光スイッチの通信系システムへの適用想定例

お、商用化されている光ファイバスイッチとほぼ同程度の性能（光学特性）が実現できている⁵⁾。

さらに、この光スイッチでは、基本的、初期的な信頼性に関しても良好な特性が得られた。まず基本検討では、(1)製作したヒータは、極めて高い耐久性を持つこと（10万回の切替え動作を確認）、(2)開発した単一成分の屈折率整合液は、高温放置下（200℃、3h）でも、屈折率などの物性に全く変化がなく、良好な耐熱性を持つこと、等が明らかとなった。また、数百時間を目安とした初期的な信頼性試験においても、極めて良好な特性（温湿度サイクル試験における損失変動値は、±0.5 dB以下）が得られている。

5. 熱毛管型光導波路スイッチの期待される 応用展開例

ここでは、開発した熱毛管型光導波路スイッチの具体的な応用例について述べる。図8(a)は、著者らが、加入者光伝送システムの経済化と高信頼化を目的に提案したNTT設備センタの光加入者系端局装置(OSU: Optical Subscribe Unit)における共通予備系構成である(8個の現用系装置のいずれかに障害が発生した場合、予備系装置に切り替えることが可能)。この構成は、商用化されている1×2の光ファイバスイッチを複数個組み合わせても可能であるが(1×2光スイッチが15個必要)、通信システムの信頼性を維持しつつ、小型化、経済化を図るには、提案する予備系構成が有利である。図8(b)は、開発した1×8規模の光スイッチを搭載し、実装架に組み込める形態で試作した予備系切替え用のスイッチボードである。

熱毛管型光導波路スイッチは、上述の予備系切替え用の光スイッチだけでなく、この光スイッチの持つ良好な光学特性、小型・高集積化、さらに他の導波路型光デバイスとの一体形成が可能なことから、さまざまな応用展開が期待

される。現在、著者らは、冒頭で述べた光アド・ドロップマルチプレクサ用の光スイッチ⁶⁾や光クロスコネクト用のキーデバイスであるマトリクス光スイッチ⁷⁾の基本動作を確認すると共に、実用化に向けた検討を進めている。

6. おわりに

著者らが提案した熱毛管型光導波路スイッチは、動作原理がユニークであるばかりでなく、安定した自己保持機能や優れた光学特性、さらに高い信頼性を有する等、実用域に達した最初の導波路型のメカニカル光スイッチである。今後の課題は、光スイッチの高性能化の追究(数ms程度的高速化、一層の低損失化)と高機能化への展開(他の導波路型光部品との一体化等)である。

参考文献

- 1) M. Makiyara, M. Sato, F. Shimokawa and Y. Nishida: Micromechanical Optical Switches Based on Thermo-capillarity Integrated in Waveguide Substrate, J. Light-wave Technol., **17**, 1, (1999) 14.
- 2) 下川房男, 花岡頼子, 牧原光宏, 西田安秀: 低損失自己保持型光マトリクススイッチの研究, NTT R & D, **48**, 1, (1999) 9.
- 3) M. Sato, M. Mikiyara, F. Shimokawa and Y. Nishida: Self-latching Waveguide Optical Switch Based on Thermo-capillarity, Tech. Digest of 23rd ECOC, (1997) 73.
- 4) H. Togo, M. Sato and F. Shimokawa: Multi-element Thermo-capillary Optical Switch and Sub-nano Litter Oil Injection, Tech. Digest of MEMS '99, (1999) 418.
- 5) 長岡新二: 自己保持型単一モード光ファイバスイッチの構成法, 電子情報通信学会論文誌, **J79-CII**, 11 (1996) 649.
- 6) T. Sakata and H. Togo: Novel 2×2 Optical Switch That Has a Self-latching Function and Its Applications, Tech. Digest of 25th ECOC, (1999) 178.
- 7) M. Mikiyara, F. Shimokawa and K. Kaneko: Strictly Non-blocking $n \times n$ Thermo-capillarity Optical Matrix Switch Using Silica-based Waveguide, Tech. Digest of 25th OFC, (2000) 207.