

MEMS応用光マトリクススイッチの開発

Development of MEMS-based Optical Matrix Switch

伊藤康博* Yasuhiro Itou
明石照久** Teruhisa Akashi
金丸昌敏** Masatoshi Kanamaru
風間 敦** Atsushi Kazama

今後の光通信ネットワークへの適用が期待される全光式光マトリクススイッチを株式会社 日立製作所 機械研究所と共同で開発している。本光マトリクススイッチはMEMS技術を活用したデバイスである。MEMSプロセスの検討を行い、アンダーカット量 $3.4\mu\text{m}$ 、角度 89.9° の高精度貫通孔形成技術と、幅 $10\mu\text{m}$ の微小梁の均一形成技術、および曲率半径 1.0m 以上の平坦性を持つMEMSミラー形成技術を確立した。さらに開発した光スイッチの特性を評価し、平均値 1.5dB の低挿入損失を確認すると同時に、設計手法の有効性も確認した。以上の結果を踏まえ、最終的な製品形状へと仕上げるための評価を今後進めていく。

All optical matrix switches based on MEMS technology have been developed in cooperation with the Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd. The switches are expected to be used in future optical communication networks. We developed a precise through-holes fabrication process, with an average undercut of $3.4\mu\text{m}$ and a sidewall angle of 89.9 degrees. We also fabricated uniform torsion bars with a width of $10\mu\text{m}$ and flat MEMS mirrors with a minimum curvature of 1.0 m . This switch shows a low insertion loss of 1.5 dB . We were able to confirm the validity of our design technique as well. Further development and measurements based on these results will be tested to achieve a final design.

① 緒 言

FTTH (Fiber to the Home) やADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) などのブロードバンド回線加入者数は堅調に増加している¹⁾。これらを介して取り交わされる情報は光通信ネットワーク、すなわち世界中に張り巡らされた光ファイバ網によって伝達される。光通信ネットワークにおいては、ノードと呼ばれる光ファイバ網の交点において光信号の経路が切り替えられる。現在この切り替えには電気変換式の光スイッチが用いられている。電気変換式の光スイッチとは、光通信ネットワークを伝搬する光信号をいったん電気信号に変換し、電気的処理によって経路を切り替えた後、再度光信号に変換して光通信ネットワークに送出するタイプの光スイッチである。このタイプの光スイッチでは、信号内容の確認や信号波形の再生という機能を付与することができるが、その反面、装置への設備投資が必要になる。

一方、本報告で取り扱う光スイッチは、光信号の経路を光のまま切り替える光スイッチであり、全光式の光スイッチと呼ばれる。全光式の光スイッチは、信号内容を解釈する能力はないが、いったん設定した経路では通信速度やプロトコルに依存せず情報を伝達することが可能

である。現在のところ全光式の光スイッチはノードにおける経路切り替えという用途では本格導入されていない。しかしながら、光通信ネットワーク全体を設計する際に、電気変換式と全光式の光スイッチを適所に使い分けることで、低コスト化や効率的運用が可能になると期待されている²⁾。また全光式光スイッチの別の用途として、パッチパネル(光ファイバの配線盤)の代替が考えられる。現在パッチパネルにおける接続は、作業者が直接光ファイバのコネクタの抜き差しを行うことで切り替えている。これを自動化・遠隔操作するために、全光式の光スイッチを適用することが考えられる。以下全光式の光スイッチを単に光スイッチと称する。なお全光式の光スイッチとして、当社はすでにMSシリーズを製品化しているが、本報告の光スイッチはより大規模のマトリクススイッチに用いることを想定して開発したものである。

光スイッチの実現方法としていくつかの方法が提案されている³⁾⁻⁵⁾が、その1つにMEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) と呼ばれる技術を活用する方法がある。MEMSとは半導体製造技術を活用した製造方法およびそれによる製造物であり、典型的にはフォトリソグラフィを用いてSiをエッチング加工することで三次元構造物を製造する。MEMSを活用した光スイッチでは、光

* 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所
** 株式会社 日立製作所 機械研究所

* Advanced Electronics Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.
** Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

ビームを空間中で伝播(ば)させる。このときMEMS技術で作製したMEMSミラーで光ビームの伝搬方向を変えることで、光信号の経路を切り替える。当社が(株)日立製作所機械研究所と共同で開発を進めている光スイッチもMEMS技術を応用したものであり、以下その開発状況について報告する。

② 光マトリクススイッチ

2.1 光スイッチ素子の構造

図1に試作した光スイッチ素子の外観写真を示す。ここで、光スイッチ素子とは、光スイッチにおいて光信号経路の切り替えに直接作用する部分を指すこととする。本報告における光スイッチ素子は、光ファイバ、コリメートレンズ、MEMSミラー、MEMSミラー用配線、およびそれらの支持部材と筐(きょう)体を構成要素として含む。MEMSミラーを駆動する回路は光スイッチ素子内には存在しない。

光ファイバは図1右奥から光スイッチ素子の同一面を通過して光スイッチ素子内部に入る。光ファイバの総数は16本であり、そのうち8本が入力用で、残りの8本が出力用である。

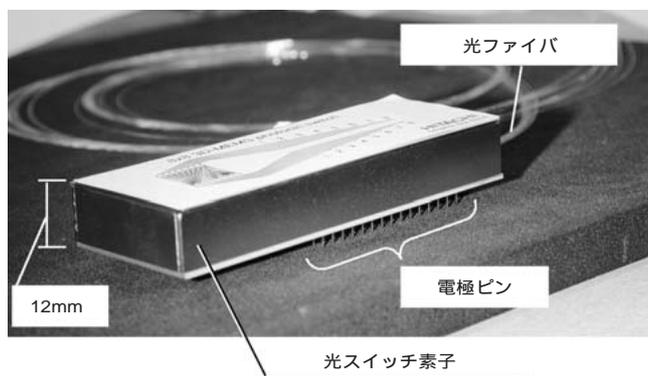


図1 試作した8×8光スイッチ素子の外観写真
Fig.1 Photograph of 8×8 Optical Matrix Switch device prototype.

図2に光スイッチ素子内における光ビームの伝搬を示す。同図(a)に光スイッチ素子内部の概略を示し、光路を1つ例示する。光ファイバを伝搬してきた光信号は、入力ポートで光ビーム化され光スイッチ素子内の空間へ射出される。その後、出力ポートで光ファイバに再結合する。光ビームの伝搬方向は光スイッチ素子内部で三次元的に変化する。このような構造の光スイッチは三次元MEMS光スイッチ⁶⁾と呼ばれる。

図2(b1)に8つの入力ポートのうちの1つを示す。入力ポートにおいては、光ファイバを伝搬してきた光はコリメートレンズでビーム化された後、MEMSミラーで伝搬方向を変えられて光スイッチ素子内部の空間に射出される。MEMSミラーは光ビームが目的の出力ポートに伝搬するように、反射方向を2軸方向に調整する。MEMSミラーに関しては次節で説明する。

光ビームは、固定ミラーで反射され出力ポートへ伝搬する。この固定ミラーは非駆動であり、伝搬方向の調整はできない。

図2(b2)に8つの出力ポートのうちの1つを示す。出力ポートにおいては、光スイッチ素子内部を伝搬してきた光ビームは、MEMSミラーでコリメートレンズへ向かうように伝搬方向を調整され、光ファイバに再結合する。MEMSミラーは、光ファイバでの再結合を最適化するように、光ビームの反射方向を2軸方向に調整する。

入出力ポートともに、MEMSミラーは外部から制御電圧を供給することで駆動させる。制御電圧をMEMSミラーに供給するための電極ピンは、実装の容易さを考慮して、すべて光スイッチ素子底面に配置した。電極ピンは図1に示したが、図2では省略した。

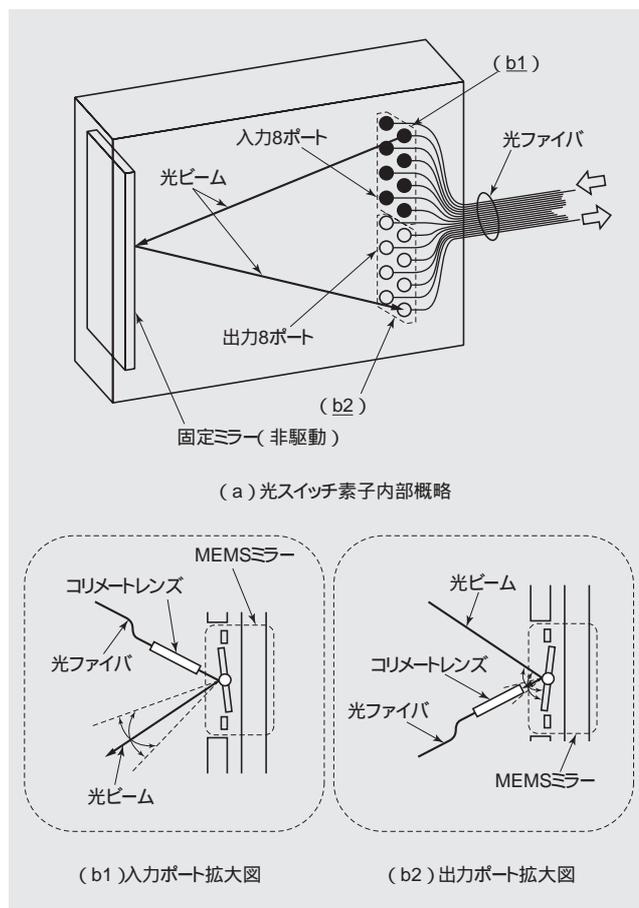


図2 光スイッチ素子内における光ビームの伝搬
(a) 光スイッチ素子内部概略 (b1) 入力ポート拡大図 (b2) 出力ポート拡大図

Fig. 2 Propagation of an optical beam from the inside of the optical switch

(a) rough sketch of the inside of the optical switch (b1) enlargement of an input port, (b2) enlargement of an output port.

2.2 MEMSミラー構造

図3にMEMSミラーの構造を示す。同図(a)に上面図を、同図(b)に断面図を示した。図3(b)を使ってMEMSミラーの全体構造を説明する。同図に示したとおり、MEMSミラーの構成部材は可動電極とXY軸方向の梁(はり)、および固定電極である。可動電極と梁は可動電極基板の一部として存在し、固定電極は固定電極基板の一部として存在する。可動電極基板および固定電

極基板はMEMS技術で形成した。可動電極基板は16組の可動電極と梁を有し、固定電極基板は16組の固定電極を有する。図3(b)に示したのは、それらのうちの1組である。この1組が入出力ポートいずれかのMEMSミラーとなる。したがって、1つの可動電極基板内に、8組の入力ポートに属する可動電極と梁と、8組の出力ポートに属する可動電極と梁とが存在する。このことは固定電極基板に関しても同様である。つまり、本光スイッチは入出力ポートが一体に形成されている。このことがもたらす特長については次節で説明する。

可動電極基板と固定電極基板との上下方向の位置決めには、スペーサを用いた。さらに並進方向については、可動電極基板、固定電極基板、およびスペーサのそれぞれに、貫通孔を形成し、その孔に位置決めピンを通すことでパッシブな組み立てを実現した⁷⁾。このパッシブな組み立てを実現するためには、貫通孔を高精度に形成することが不可欠である。

可動電極の上面が実際に光を反射するミラー面であり、下面が電極面である。可動電極は梁によって中空に浮いた状態で保持されている。可動電極と固定電極との間に静電引力を発生させると、可動電極はこの梁を回転軸とした回転運動をする。図3(a)にMEMSミラーの上面図、すなわち、可動電極の上面図を示した。同図に示すとおり、ミラー面はX軸回転をするように支持されているだけである。しかし、その外側の可動枠がY軸回転するように支持されているので、ミラー面は2軸回転が可能となっている。

MEMSミラーの回転角度は静電引力(正確には静電トルク)と、梁のねじれに対する復元力(正確には復元トルク)とのバランスで決まる。MEMSミラーの回転角度は梁のねじれ量に等しい。梁のねじれ量は梁の剛性で決まる。そして梁の剛性は梁の寸法で決まるので、設計どおりのMEMSミラーの挙動を実現するためには、梁を精度良く加工することが重要である。

次に静電引力に着目する。静電引力は電極寸法とスペーサ厚さの影響を受けるが、特にスペーサ厚さが重要である。これはスペーサの厚さが薄いために製造ばらつきが相対的に大きく影響することに加えて、静電引力がスペーサの厚さ方向の変化に敏感であるためである。したがって、所定のMEMSミラーの挙動を実現するためには、スペーサの加工精度も重要である。

スペーサ厚さに関してさらに詳細に述べる。静電引力はスペーサ厚さの2乗に反比例して低下するので、スペーサが厚過ぎると、駆動力不足になる。逆にスペーサが薄過ぎると、MEMSミラー回転角度の上限値が低下し、光スイッチとして必要な回転角度が得られなくなる。MEMSミラー回転角度の上限値の低下にはプルインと呼ばれる静電アクチュエータに特徴的な現象が関係している。プルインとは、静電引力が梁の復元力に比べて過大となって可動電極の姿勢が安定に制御できなくなる現象である。プルインを超えた静電引力を与えると、可動電極は固定電極に衝突する。プルインと駆動力不足をともに回避するためには、スペーサを厚くし、かつ梁の剛性を低くすればよい。しかし梁の剛性の低下は可動電極の固有振動数を低下させることになるので、制御上の不安

定要因となる。このように、すべてを満足させる方向にスペーサ厚さを調整することはできないので、スペーサ厚さは全体のバランスを考慮して設計上最適と考える厚さとした。ほかの設計パラメータについても同様であり、各値は全体のバランスを考慮して、適宜調整して決定した。

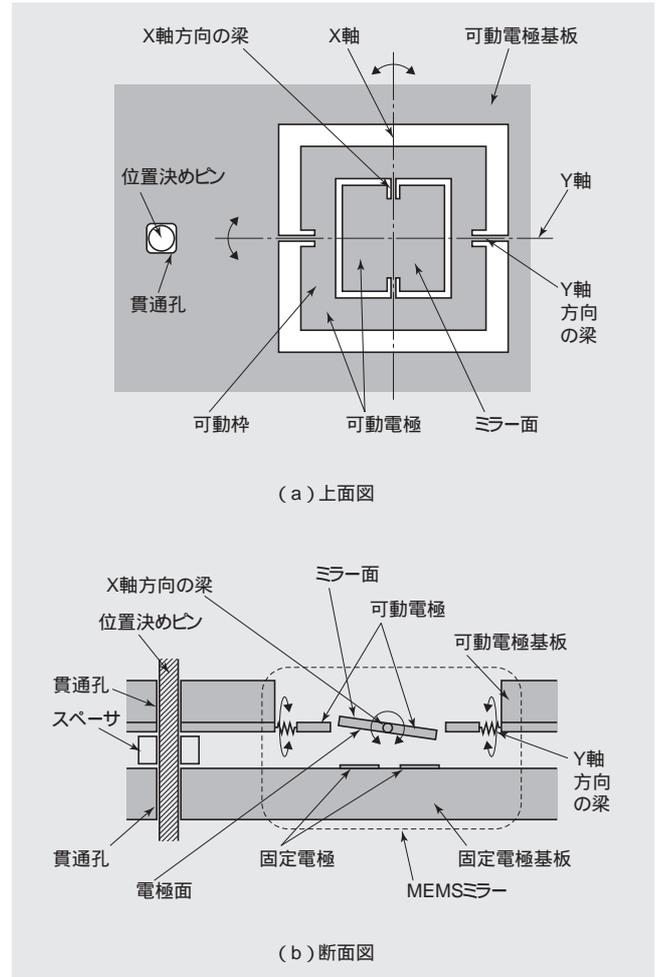


図3 MEMSミラー構造図
(a) 上面図 (b) 断面図

Fig. 3 Structure of the MEMS mirror
(a) top view (b) cross section.

2.3 機能的特長

開発中の光スイッチは8つの入力ポートと、8つの出力ポートを持つ8×8の光マトリクススイッチである。光マトリクススイッチとは複数の入出力ポートを持つデバイスであり、任意の入力ポートから入力した光信号を、任意の出力ポートに出力する機能を持つ。このとき入力ポートをN個、出力ポートをM個持つ光マトリクススイッチを、N×Mの光マトリクススイッチと称する。

図4(a)に8×8の光スイッチの入出力構成を模式的に示す。同図において、黒丸が入力ポートを示し、白丸が出力ポートを示す。マトリクススイッチであるので、各入力ポートは、どの出力ポートとも経路接続が可能である。ただし、同時に複数の入力ポートで1つの出力ポートを共有することはできない。同図においては、入力

ポートを1つ例に取り、接続中の経路を矢印付き実線で、接続可能な経路を点線で記した。ほかの入力ポートについても同様の線が引けるが、図が煩雑になるので割愛した。

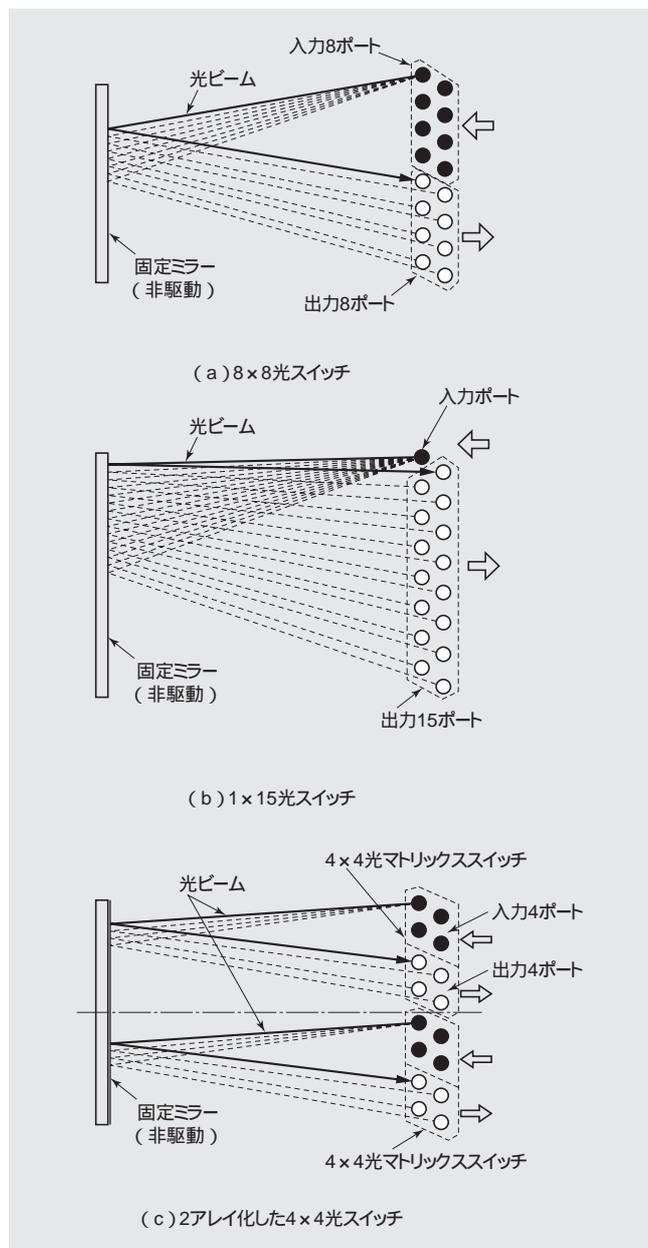


図4 光スイッチの入出力構成模式図
(a) 8×8光スイッチ、(b) 1×15光スイッチ、(c) 2アレイ化した4×4光スイッチ

Fig. 4 Diagram of an optical switch's input and output-port configuration,
(a) 8x8 configuration (b) 1×15 configuration (c) 2-arrayed 4×4 configuration.

前節で述べたとおり、本光スイッチは入出力ポートが一体に形成されている。光ビームの伝搬方向は、入力ポートにおいて自由に変えることができるので、実際には、どの入出力ポートへも伝搬させることができる。そのため、従来入力ポートとして取り扱っていたポートを出力ポートとして取り扱うことにするだけで、本光スイッチは、外見上のデバイス構成を全く変えることなく、入

力構成を変えることができるといった特長を持つ。例として、同図(b)に1×15の構成を、同図(c)に4×4の2アレイとしたときの入出力構成模式図を示す。

③ MEMSミラーの構成基板の製造

3.1 固定電極基板

固定電極基板は525μm厚のSi基板に電極パターンを形成し、位置合わせピン用の貫通孔を形成して作製した⁸⁾。図5に固定電極基板の製造プロセスフローを図示し、以下に工程の概略を説明する。

第1工程として、DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 用のマスクとなるAl膜パターンを(100)方位のSi基板両面にスパッタ成膜した後、DRIEで貫通孔用の深さ100μmの穴をSi基板裏面に形成した。

第2工程では、Al膜を除去した後Si基板に熱酸化膜(SiO₂)を形成し、Si基板表面に貫通孔用のパターンを形成した。裏面に形成したSiO₂膜の一部は第6工程でエッチストップ層として機能し、表面に形成したSiO₂膜は電極の絶縁膜として機能する。

第3工程として、Tiを下地としてPt膜、次にAu膜を電子ビーム蒸着で順次形成し、これをフォトリソグラフィでマスクングした後、イオンミリングを施すことで電極を形成した。

第4工程として、Si基板表面をスパッタリングによりTi膜で覆い、フォトリソグラフィでマスクングした後、イオンミリングで貫通孔用の窓部のTi膜を除去した。

第5工程として、第4工程と同様の手順でAl膜パターンを形成した。ただし、窓部のAl膜はTi膜を完全に覆うように、窓部中心側へはみ出させた。

第6工程としてDRIEで貫通孔を形成した。このときのSiのエッチングにおいては、第2工程で裏面から形成したSiO₂層をエッチストップ層として機能させた。

第7工程として、Si基板表面のAl膜とTi膜を除去した後、貫通孔形成時のエッチストップ層となっていたSiO₂膜を除去し、最終的にチップ状にダイシングした。

この加工プロセスで重要となるのは、貫通孔の加工精度である。貫通孔の形成条件を検討することで、アンダーカット量3.4μm、角度89.9°の高精度貫通孔が形成できた。この結果、実装時に特別な位置決め操作を行うことなしに、MEMSミラーの高精度組み立てが可能となった。

3.2 可動電極基板

可動電極基板はSOI (Silicon on Insulator) 基板を用いて作製した。SOI基板は上部Si層が10μm厚で、下部Si層が350μm厚、両者の間のSiO₂層が0.4μm厚の基板を用いた⁸⁾。上部Si層を可動電極および梁とした。図6に可動電極基板の製造プロセスフローを図示し、以下に工程の概略を説明する。

第1工程として、上部SiにDRIE加工するときのマスクとなるレジストパターンを形成した。

第2工程として、DRIEにより上部Si層にミラーおよび支持梁を形成した。その後、レジストを除去した。

第3工程として、SOI基板に熱酸化膜(SiO₂)を形成し、裏面にDRIE用のマスクとなるAl膜をスパッタで成膜した。

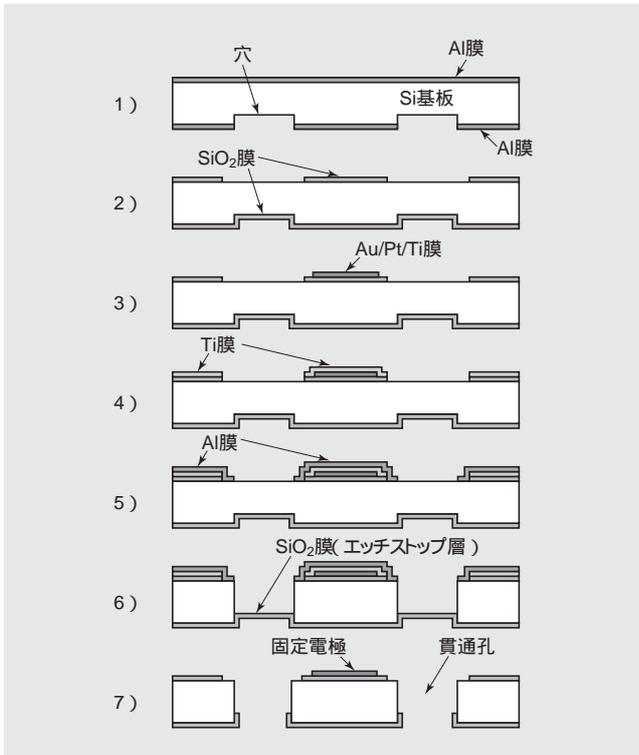


図5 固定電極基板の製造プロセスフロー

Fig. 5 Fabrication-process flow for a fixed electrode substrate.

第4工程として、Al膜とSiO₂膜のマスクを形成した。

第5工程として、裏面からのDRIEでキャビティと貫通孔を形成した。中間のSiO₂層はDRIEのエッチストップ層として機能させた。

第6工程として、Al膜とSiO₂膜を除去し、最後にSOI基板の両面にTi膜を下地としてAu膜をスパッタにより成膜した。

この加工プロセスでも、3.1節同様に、貫通孔を高精度加工した。加えて最小寸法10 μ mの支持梁を均一に加工する技術と、可動電極を平坦性良く作製する技術を開発した。可動電極の平坦性を向上させるためには、可動電極両面にTi/Au膜を成膜するときの条件が重要である。この条件を適正化することで、最小曲率半径1.0m以上の平坦性を実現した。

④ 基本特性評価

表1に開発した光スイッチの基本特性の評価結果を示す。評価は周辺環境が安定した実験室環境で、光スイッチ素子に対して実施した。光学特性の評価には $\lambda = 1,540\text{nm}$ の赤外光を用いた。

測定した挿入損失は平均値1.5dBであり、この種の光スイッチとしては優れた特性であることを確認した。そのほかの光学特性および切替特性に関しては、反射損失 $> 50\text{dB}$ 、偏波依存性損失 $< 0.3\text{dB}$ 、静的なクロストーク $< -60\text{dB}$ 、および切替時間 $< 10\text{ms}$ となり標準的な仕様を満した。この結果は開発中の光スイッチが特性的に競争力のある製品となり得ることを示している。また光スイッチ素子の挙動はおおむね設計どおりであり、設計手法の有効性も確認できた。

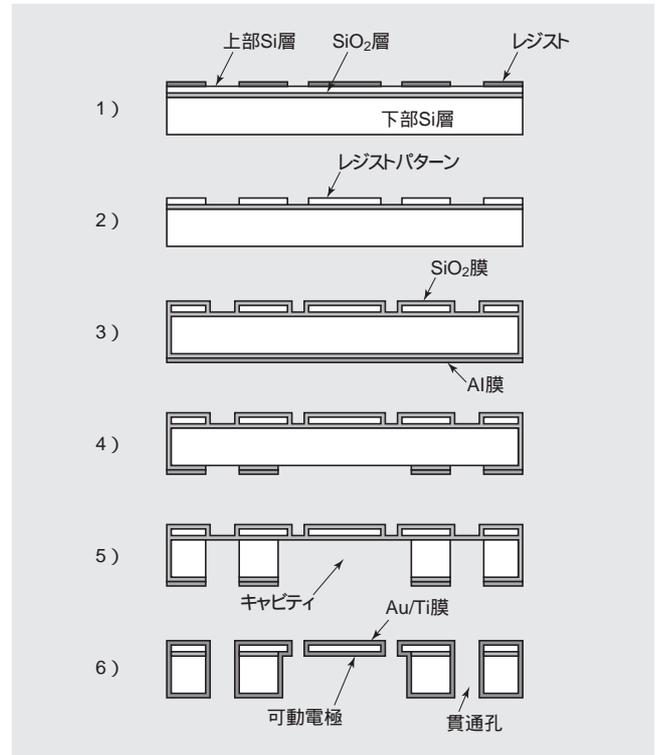


図6 ミラー基板の製造プロセスフロー

Fig. 6 Fabrication-process flow for a moving electrode substrate.

表1 光マトリクススイッチの評価結果

Table 1 Test results for optical matrix switch. ($\lambda = 1,540\text{nm}$)

Insertion Loss (Typ.)	1.5dB
Return Loss	$> 50\text{ dB}$
Polarization Dependent Loss	$< 0.3\text{ dB}$
Static Cross Talk	$< -60\text{ dB}$
Switching Time	$< 10\text{ ms}$

⑤ 結 言

株式会社 日立製作所機械研究所と共同でMEMS応用光マトリクススイッチを開発した。MEMSプロセスを検討し、アンダーカット量3.4 μ m、角度89.9 $^\circ$ の高精度貫通孔形成技術と、幅10 μ mの微小梁の均一形成技術、および曲率半径1.0m以上の平坦性を持つMEMSミラー形成技術を確立した。さらに開発した光スイッチの特性を評価し、平均値1.5dBの低挿入損失を確認すると同時に、設計手法の有効性も確認した。この特性を維持しつつ、最終的な製品形状へと仕上げていくための評価を継続中である。

本光スイッチの開発にあたっては株式会社 日立製作所 機械研究所 福田研究員、同所 堀野主任研究員、株式会社 日立製作所 基礎研究所 石川主任研究員、同所 原田主任研究員および株式会社 日立製作所 研究開発本部 岡田部長に多大なご助力を頂いた。本来、連名者とするべきところであるが、紙面の都合により割愛させて頂いた。この場を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) http://www.soumu.go.jp/s-news/2003/031031_4.html
- 2) 日経エレクトロニクス, 788, (2001), p.160
- 3) 相馬：電子情報通信学会論文誌C, Vol.J86-C, No.11 (2003), p.1107
- 4) 壺井, 他：電学論E, 123巻10号, (2003), P.398
- 5) A.Gasparyan, et al. : OFC2003, (2003), PD36-1
- 6) 例えば, 藤田：電子情報通信学会誌, Vol.85, No.7 (2002), p.496
- 7) A.Kazama et al. : Proc. of the 20th Sensor Symposium (2003), p.29
- 8) T.Akashi et al. : Proc. of the 20th Sensor Symposium (2003), p.35



伊藤康博

Yasuhiro Itou

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所



明石照久

Teruhisa Akashi

株式会社日立製作所 機械研究所



金丸昌敏

Masatoshi Kanamaru

株式会社日立製作所 機械研究所



風間 敦

Atsushi Kazama

株式会社日立製作所 機械研究所