

11 MEMS 光スイッチの開発

Development of Optical Switch Using MEMS (Micro Electro Mechanical System) Technology

高橋	あゆ美	Ayumi Takahashi	中央研究所	研究開発部	
森	恵一	Keiichi Mori	中央研究所	研究開発部	主任
加藤	嘉睦	Yoshichika Kato	中央研究所	研究開発部	
伊巻	理	Osamu Imaki	中央研究所	研究開発部	
間瀬	高生	Takao Mase	中央研究所	研究開発部	主任
加来	良二	Ryoji Kaku	中央研究所	研究開発部	微細加工技術担当課長

キーワード：光スイッチ、マイクロマシン、MEMS、ポリシリコン、静電駆動、ミラー、厚膜レジスト、メッキ

要 旨

光スイッチは光ネットワークの発展に伴い、極めて重要な光デバイスとして注目されています。さらに、近年の爆発的な情報の大容量化に伴い、その大規模化および小型化が強く望まれているところです。そこでそのニーズに応える技術として現在注目を集めているマイクロマシン技術(MEMS)を用いて、光スイッチを開発しましたので報告いたします。

このたび新しく考案した光スイッチはその動作に静電駆動を用い、マイクロミラーを上下させることで光のスイッチングを可能にしています。作製した 1×2 光スイッチは大きさ 1mm 以下、駆動電圧 5V 以下、消費電力 $1\mu\text{W}$ 以下、クロストーク・消光比 50dB 以上、損失 5dB で超小型・低電圧駆動・低消費電力を実現しています。これにより、本光スイッチは、今後の光ネットワークに必要とされる大規模光スイッチに向けて大きな可能性を示したと言えます。

SUMMARY

Optical switches are widely recognized as extremely important optical devices for the development of optical networks. The explosive growth in the volume of information flows in recent years has generated the need for higher performance and miniaturization of optical switches. This paper introduces our newly developed optical switch, for which we employed Micro Electro Mechanical System (MEMS) technology, which now coming under focus as means of addressing the above need.

Operation of the new optical switch is powered by an electrostatic actuator, which implements switching by moving a micro-mirror up and down. The 1×2 optical switch that we manufactured achieves a compact design, low voltage operation, and low power consumption. It is less than 1mm in size, drives at under 5V , consumes less than $1\mu\text{W}$ of power, achieves a crosstalk and an extinction ratio of 50dB or greater, and a loss of 5dB . These specifications give this optical switch great potential for the massive switching capabilities needed by optical networks.

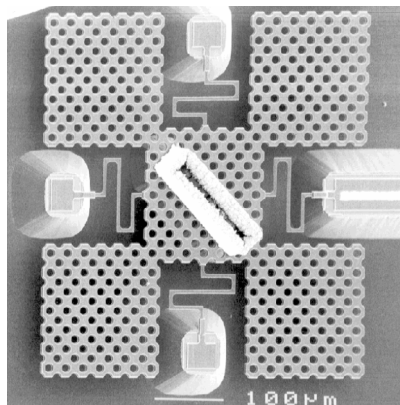


写真1 光スイッチ素子 SEM 写真

1 はじめに

近年、大容量の情報を高速に伝達するため、光ネットワークの開発が活発に行われており、これを背景として、光ネットワーク構築に必要とされる光スイッチに注目が集まっています。

そして、ネットワーク用光スイッチの性能には低損失で波長依存性・偏波依存性が小さく、しかも低電圧・低消費電力が望まれます。また、性能以外からの要求としては大規模化($N \times N$: およそ $N=8 \sim 1024$)と小型化が望まれています。

ところが、現在の主流である導波路式光スイッチは、分岐導波路と熱を用いた屈折率変化を利用しているため、挿入損失・クロストーク・消費電力に問題を残しています。また、その大規模化に対しても、サイズが大きくなるという問題があります。

そこで、わたしたちはこれらの要望に応える光スイッチとして、マイクロマシン技術を用いた機械式光スイッチをここに提案いたします。性能への要求には、光スイッチを機械式とすることで、大規模化・小型化への要求には、マイクロマシン技術を用いることで応えるものです。一般に機械式光スイッチは導波路式光スイッチに比べ、低損失・低クロストークで波長や偏波に対する依存性が小さいとされています。また、マイクロマシン技術は集積回路作製と同様のプロセスを用いるため、超小型で超大規模な光スイッチが実現される可能性が十分にあります。

2 構造

2.1 スイッチ素子構造

図1に光スイッチの素子構造を示します。このスイッチ素子は、基板(固定電極)と基板上に形成された可動電極およびそれをささえるビーム、さらに可動電極上に形成されたミラー部より構成されています。固定電極は可動電極の上下移動領域を確保するため、可動電極およびビームの下部が掘られた形をしており、可動電極は固定電極の凸部より4本のビームにより支持されています。

ここで、可動電極の形状は駆動電圧の低減化とスイッチの小型化を同時に実現するため、4つ葉の形状としました。この形状により、一定面積内で可動電極を支えるビーム長をより長く、そして可動電極面積をより大きく取ることが可能となり、駆動電圧の低減化を図ることができます。

さらに、より低電圧化を図るため、ビーム部のみ厚さを薄くすることを行っています。

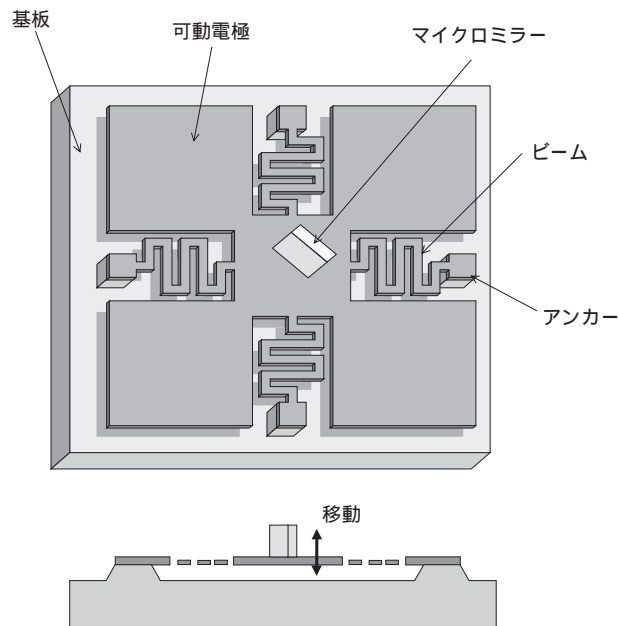


図1 マイクロ光スイッチ素子構造

2.2 モジュール構造

図2にモジュール構造を示します。光スイッチ素子が中央部にあり、その3方向(IN, OUT-1, OUT-2)にそれぞれ平板マイクロレンズ(PML)および、シリコンV溝基板上に固定された光ファイバーが配置されています。光のスイッチングは、固定電極・可動電極間に電圧を印加することで可動電極を上下に移動させ、可動電極上のミラーを光軸に抜き差しすることによって行われます。INポートから入射した光はミラー挿入時には、ミラーに反射されOUTポート2に出射され、挿入されていない時には、OUTポート1に出射されます。

また、光スイッチ素子を図3のようにマトリックス状にウエハに一括形成することによって、今後光ネットワークに必要とされる小型で大規模な光スイッチへ拡張することができます。

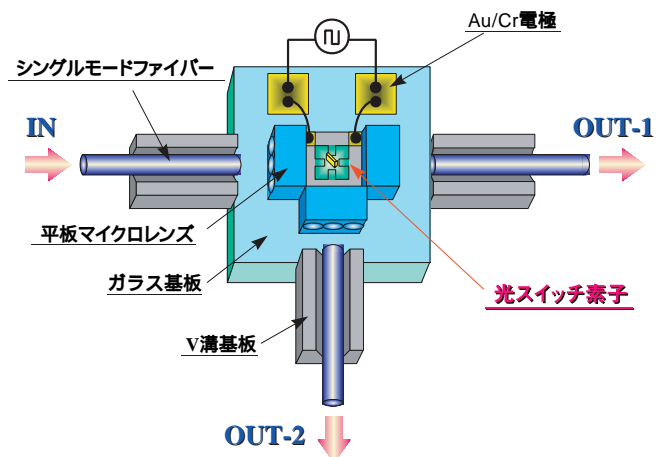


図2 モジュール概略図

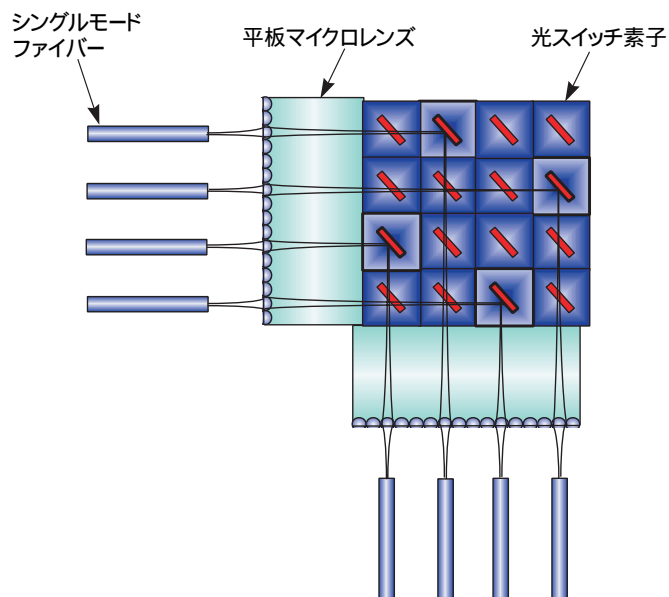


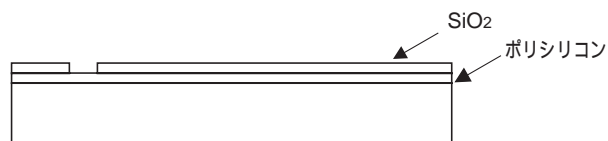
図3 マトリックススイッチ構想図

3 作製方法

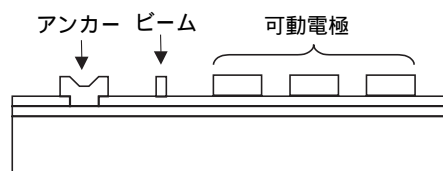
図4に光スイッチ素子の加工工程を示します。

まず、ポリシリコン・SiO₂膜を成膜・パターンニングします。そして、最終的に構造物となるポリシリコン膜(厚さ4μm)を減圧CVD装置を用いて成膜し、可動電極・ビーム・アンカーの形状となるようパターンニングします。この時、ポリシリコン成膜温度が重要なパラメータとなります。それは、ポリシリコン膜の応力が成膜温度¹⁾、および、その後のプロセスにおける加熱により変化するため、最終段階でどのような応力が必要かによって、その成膜温度を設定する必要があるからです。次にSiO₂膜を成膜し、電極およびミラー形成のためのメッキ用シード層を形成します。次に、高アスペクト比の得られる厚膜レジストを50μm塗布・パターンニングし、Auメッキにて高さ45μm×長さ200μm×幅40μmのミラーを形成します。最後に、厚膜レジストを除去して、構造物下部をKOH水溶液を用いて45μmエッチングし、SiO₂膜を除去することにより光スイッチ素子を形成することができます。このエッチングされた45μmが可動電極の移動範囲となります。写真1に作製された光スイッチ素子のSEM写真および写真2に1×2光スイッチモジュール写真を示します。

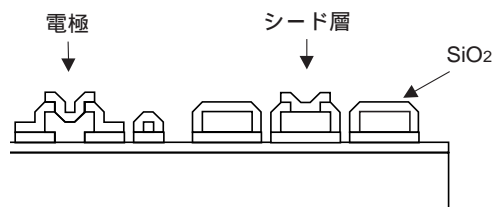
- ① ポリシリコン / SiO₂ 成膜
SiO₂ パターンニング



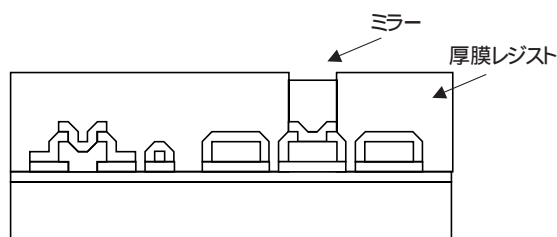
- ② ポリシリコン成膜、パターンニング



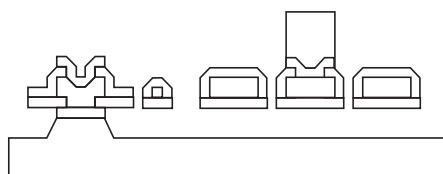
- ③ SiO₂ 成膜、電極 / ミラー用シード層形成



- ④ 厚膜レジストパターンニング、Au メッキ



- ⑤ 厚膜レジスト剥離、構造物下部エッチング



- ⑥ SiO₂ 膜除去

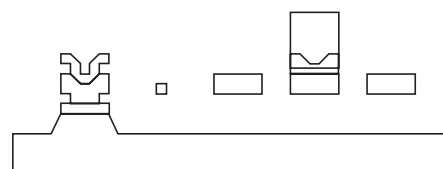


図4 加工工程

4 試作結果

4.1 駆動電圧 / 消費電力

図5に各ビーム厚の可動電極サイズ（可動電極の1辺の長さ）と最小駆動電圧の関係を示します。点は実測値、線はシミュレーション結果です。当初の設計通りに可動電極サイズが大きいほど、また、ビーム厚が薄いほど最小駆動電圧が小さくなっているのが分かります。また一般に、駆動電圧に対しての要求は5V以下とされていますが、駆動電圧5V以下の光スイッチが作製可能であることが確認できます。例えば、ビーム厚が $0.5\mu\text{m}$ であれば、可動電極サイズ $600\mu\text{m}$ の超小型の光スイッチが作製できることになります。

図6に様々なビーム厚・可動電極サイズを持つ、光スイッチの最小駆動電圧と消費電力の関係を示します。このグラフは駆動電圧5V以下で消費電力数 μW 以下の低消費電力な光スイッチが作製できることを示しています。

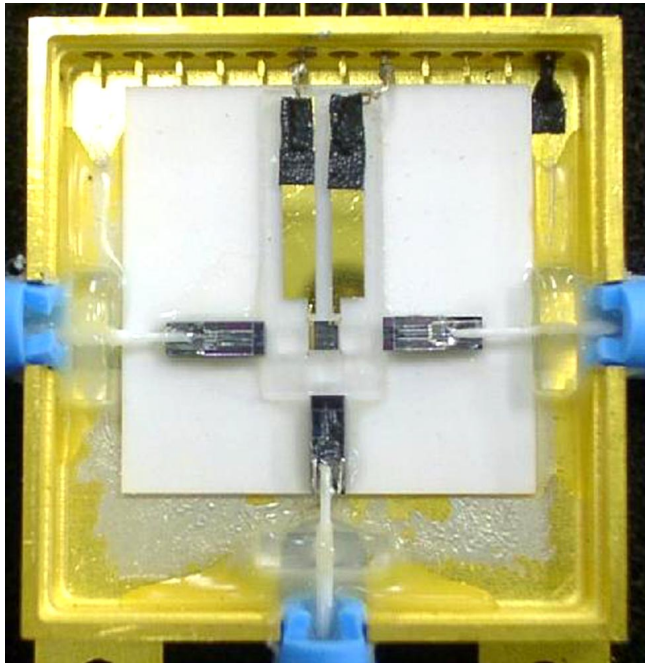


写真2 モジュール写真

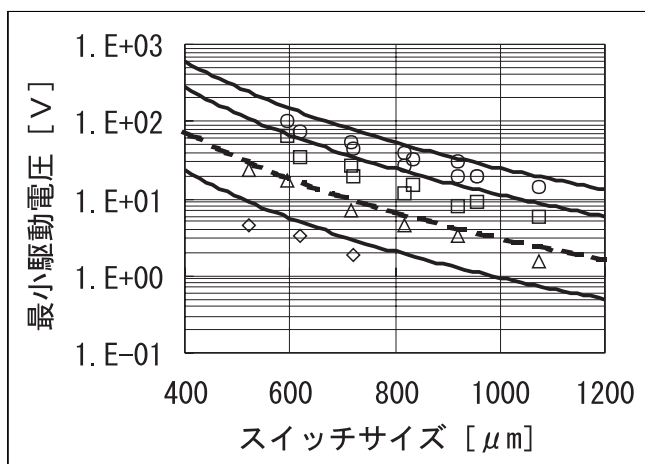


図5 スイッチサイズと最小駆動電圧
ビーム厚: $2.9\mu\text{m}$, $1.9\mu\text{m}$
 $0.9\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$

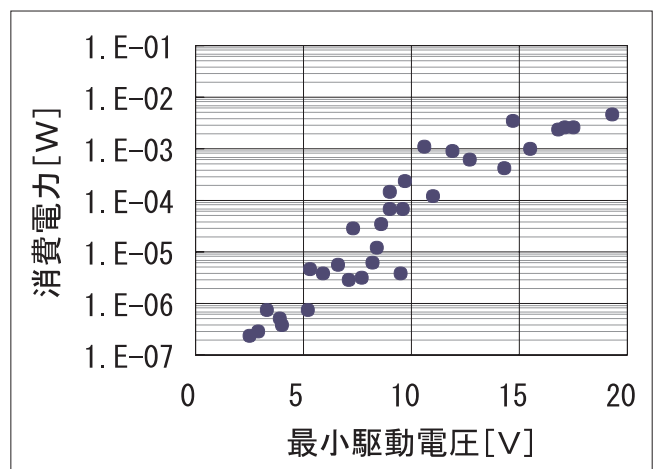


図6 最小駆動電圧と消費電力

4.2 光学特性

(1) 光ビームシミュレーション

図7に本光スイッチにおいて光ビームがINポートから入射し、OUTポート2に出射されるまでの光ビームシミュレーションを示します。ファイバーより出射された光ビームはPML入射までに直径約140μmまで広がりますが、PMLによりミラー到達時までに33μmまで絞られミラーによって反射されます。よって、ミラー高さは45μmとしています。

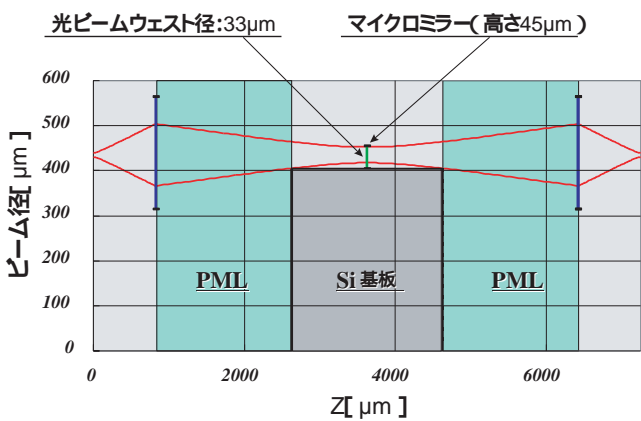


図7 光ビームシミュレーション

(2) 特性結果

この設計により構成された本光スイッチの光学特性を表1に示します。測定は波長1.55μmを用いて行っています。クロストークおよび消光比に関してはOUT-1、OUT-2共に50dB以上あり問題がないと思われますが、損失に関しては3.6dB、5.7dBと、まだ問題を残しており、今後の課題となっています。

挿入損失の内訳は、OUT-1・OUT-2共通の原因としては、フレネル損（今回作製した光スイッチには、ファイバー、レンズにARコートを実施しておらず、フレネル損約1.2dBを含んでいる。）光軸ずれによる結合損失・基板からのけられ・レンズからはみ出しが考えられます。OUT-2固有のものとしては、ミラーの表面粗さ、光軸ずれによるミラーからはみ出し、ミラーの角度ずれが考えられます。これらは設計の最適化により、改善可能であると考えられます。

表1 光学特性

挿入損失	OUT-1	3.6dB
	OUT-3	5.7dB
クロストーク	OUT-1	56dB
	OUT-2	69dB
消光比	OUT-1	52dB
	OUT-2	63dB

5 むすび

マイクロマシン技術(MEMS)を用いることで、大きさ1mm以下、駆動電圧5V以下、消費電力1μW以下、クロストーク・消光比50dB以上、損失5dBの超小型・低電圧駆動・低消費電力光スイッチを作製することができました。また、今後の光ネットワークに必要とされる大規模光スイッチに向けて大きな可能性を示すことができました。

[参考文献]

1) Kenichiro Suzuki : “HEMISPHERICAL-GRAIND LPCVD-POLYSILICON FILMS IN USE FOR MEMS APPLICATIONS,” TRANSDUCERS'97, pp253-256 (1997)

2) S.Sugiyama et.al : “MICRO-DIAPHRAGM PRESSURE SENSOR,” Dig.IEEE IEDM, pp184-187 (1986)