

## 光クロスコネクト用マイクロミラー

羽 根 一 博

### Micro-Mirrors for Optical Cross-Connect

Kazuhiro HANE

Optical cross-connect using micro-mirrors, which are fabricated by MEMS (micro-electro-mechanical systems) technology attracts a high level of attention to solve the bottle-neck of WDM (wavelength division multiplex) optical communication. Optical paths are connected with micro-mirrors by steering light beams. In the first stage of the development, the micro-mirrors were fabricated based on the surface-micro-machining of poly-Si thin film. Lately, to improve the flatness of the mirror, the micro-mirrors have been often fabricated by the bulk-micro-machining of crystalline silicon. The history and the recent development of the optical cross-connects are given.

**Key words:** micro-mirror, cross-connect, micromachining, micro-electro-mechanical systems (MEMS), optical communication

インターネットや携帯電話の急激な増加にともない、ネットワークの高速・大容量化が必要とされている。都市間の接続を行う幹線の光ネットワークでは、情報の増減に対応して光路を切り換えることが必要とされ、100本オーダーの光ファイバー間ルーティングのために大規模のスイッチが用いられている。光路の切り換えには、光ファイバーで送られてきた信号を電気に変換し、電気的に接続を切り換えて、レーザー変調器により再び、光信号に変換してから光ファイバーに送る。光通信の大容量化のボトルネックとして、光路切り換えのスイッチが指摘されていた。(光路切り換え用の大規模なスイッチはクロスコネクトとよばれている。) 実用的な光通信の変調速度が10GHzレベルに達し、光・電気・光変換に超高速の高価なエレクトロニクスや光源のレーザーが必要とされる。これまでの電子式では、信号の高速化、光電変換のコストと煩雑さの問題を抱えている。そこで、光路の切り換えを電気信号に変換せず、光ファイバーからの光をミラーにより方向を切り換えて、そのまま送り先の光ファイバーに導入する方式の光クロス

コネクトが提案された。また、情報量の増加に対応するため、波長多重方式が用いられるが、スイッチングに波長依存性のないマイクロミラーを用いた光クロスコネクトは波長多重方式にとって都合のよいスイッチ方式であることも重要な点である。

現在ITバブルの影響で光通信網への過剰投資が明らかになり、光ネットワークシステムと光部品の供給は低迷の期間にある。このため光クロスコネクトへの期待も初期のころより、かなり冷え込んでいる。しかしながら、将来の光ネットワークとして、全光化への期待は高い。光アンプにより中継の煩雑さが根本的に解決されたように、光クロスコネクトにより波長多重通信時代の全光化が期待される。

本稿では、光クロスコネクトの初期提案から現在の開発状況までを、光クロスコネクト開発技術の、ひとつの鍵となるシリコンマイクロマシニング技術の発展史とともに概説する。マイクロマシニングにより製作される可動機構をもつ微細な機械構造はMEMS(micro-electro-mechanical

表1 光クロスコネクットの開発状況.

方式	開発者	規模	挿入損失 [dB]	クロストーク [dB]	スイッチ時間 [ms]	文献
アナログ (大規模)	Lucent	256×256	2	<-50	4	1)
	$\chi$ ros	1152×1152	<3.0	<-55	<5	
	Blue Sky Research	32×32	<3	—	5~10	web
	IMMI	64×64	3	—	—	web
デジタル (中規模)	AT&T	8×8以上	2~7	<-60	0.7	2), 3)
	Agilent	32×32	平均5	<-50	<10	4)
	NTT	16×16	2~5.5	<-50	6	5)
	ONIX	8×8	<4	<-45	<10	web

( $\chi$ ros (Nortel) の規模以外の数値はターゲットスペック)

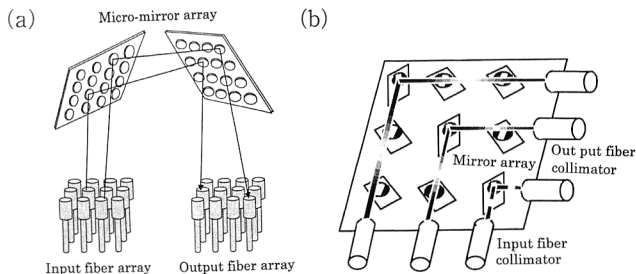


図1 (a) マイクロミラーによるアナログビーム操舵式の光クロスコネクットの構成例, (b) マイクロミラーを用いたデジタルクロスバー式光クロスコネクット.

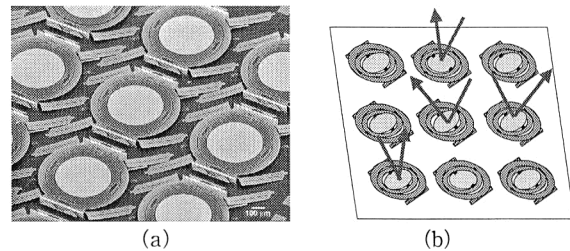


図2 Lucent社のビーム操舵式クロスコネクット<sup>1)</sup>とビームの操舵.

systems) とよばれる. 特に光学用の MEMS は optical MEMS とよばれ, マイクロミラーはこの分野のキーデバイスである. 最近マイクロミラー開発では, バルク MEMS の再評価, SOI (silicon on insulator) ウェハの利用, ダイナミック特性の改善, 低電圧化などについて新しい提案が活発に行われている.

## 1. 光クロスコネクットの方式

MEMS を用いた大規模な光クロスコネクットとして立体的な光路を形成し, 反射光線の方向制御により光線の接続を行う方式 (アナログビーム操舵式) と中規模の光スイッチ用で光路が平面上に形成されてオン-オフで切り換える方式 (デジタルクロスバー式) の2種類がある. 図1(a) にアナログビーム操舵式の光学系の構成をしめす. この場合はファイバーから出射された光ビームを2回ミラーで反射させて出力ファイバーに導く. 2つのマイクロミラーアレイを用いずに1つのマイクロミラーアレイと1枚の大きな平面ミラーを用いる方式もある. 光ビームの方向制御に高い精度が必要であるので, 制御用エレクトロニクスも大掛かりになる.

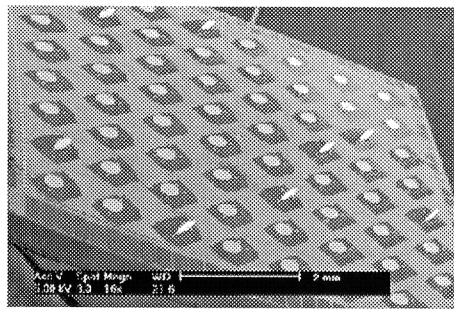
デジタルクロスバーの方式では図1(b) に示すように光路を平面上に構成し, マトリックス状に配置したマイクロミラーのオン-オフ制御で光路を切り換える.  $N$  本× $N$  本の光路切り換えのため  $N^2$  のミラーが必要となる. アナ

ログ方式が  $2N$  レベルのミラー数で実現できることに比べると, 大型化には不向きである. しかし, ミラーの制御はオン-オフの簡単な制御で対応できるので, 中規模の光クロスコネクットとして有望な方式である.

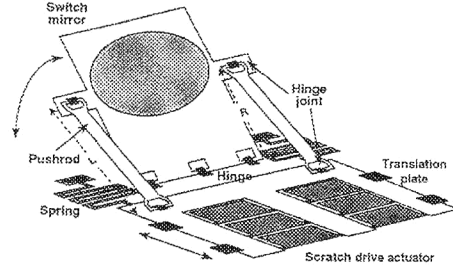
## 2. 第1世代の光クロスコネクット

2000年以前を第1世代と考えて, 光クロスコネクット開発の初期に報告されたデバイスの特性を表1で比較した. 最も注目を集めたのは Lucent 社から4, 5年前に報告されたアナログ式の光クロスコネクットである. Lucent 社のクロスコネクットは開発が続けられ, 製品化に至っている. 以下では初期の開発とその後の開発状況について述べる.

アナログビーム操舵式は Lucent 社<sup>1)</sup> (<http://www.bell-labs.com/news/1999/november/10/1.html>) や  $\chi$ ros 社 (Nortel 社に買収された) などから発表されていた. 図2に Lucent 社のミラーの写真 (a) とビーム操舵の概略 (b) を示す. 2自由度 (2方向制御可能) のマイクロミラーを二次元に配置して, 入射光ビームの方向を変える. ミラーの裏側には静電引力を用いたアクチュエーターが用いられた. ミラーからファイバーまでの距離がある程度必要であるので, ミラーの反射光の方向はかなり正確に制御する必要がある (10 cm 離れると  $10 \mu\text{m}$  のコアに入れるためには  $0.1 \text{ mrad}$  の精度が必要). 受光側のファイバーからの出力光を利用したミラー角度のフィードバック制御が必要と考えられる.



(a)



(b)

図3 (a) AT&T社のクロスバー式の光クロスコネクットと (b) スクラッチドライブによるミラーの駆動。

デジタルクロスバー方式の代表としては、1998年にAT&T社から報告されている光クロスコネクットが挙げられる。表面マイクロマシニングで製作したミラーのアレイが基板からスクラッチドライブアクチュエーター\*により立ち上がる方式である。ミラーを立ち上げる時間は0.7msであり、ミラーの慣性が小さいので、90度の大きな角度の駆動にもかかわらず高速である。図3(a)にクロスコネクットの写真と(b)にミラーの駆動機構を示す<sup>2,3)</sup>。

上に述べたように、初期の光クロスコネクットミラーの製作には表面マイクロマシニング技術が用いられている。表面マイクロマシニングではマイクロミラーはポリシリコンを減圧化学反応気相堆積法で成膜して、直下のガラス層(犠牲層)を取り除いて完成する。比較的長いアニール時間により、応力を減らすことができるが、ミラー面のポリシリコン層(~1μm)をあまり厚くできないこともあり、残留応力と金属のコーティングによるミラー面のひずみが生じやすく、完全な平面を実現することが難しい。製作プロセスはLSI (large scale integration) とコンパクトな方法となるので、製作のためのファウンダリーには問題が少ない。表面マイクロマシニングのミラーでは犠牲層の厚さによりミラーと電極の距離が決まるが、この間隙をあまり大きくできない。このことは低い電圧で駆動できる反面、ミラーが傾くと基板に接触するのでミラーの走査角度が小さくなる。Lucent社のマイクロミラーでは、薄膜の残留応力を逆に利用して、犠牲層のエッチング後にミラーの支持部が反ることで、ミラーをもち上げてミラーと基板の間隙を広げている。これにより走査角度を増加させている。

他のデジタルクロスバー式の光クロスコネクットとし

て、溝に発生させた泡による全反射を用いたAgilentからの報告があった<sup>4)</sup>。インクジェットプリンターと同様にマイクロヒーターに通電加熱することで15μm幅の溝に泡を発生させて、全反射により光路を換える。同様に気体との界面で発生する全反射を用いた光スイッチはNTTからも発表されていた<sup>5)</sup>。NTTの方式はキャピラリーのオイルをヒーターにより移動させる。スイッチ速度は初期には100msより少し早いレベルであったが、液体の粘性を低くして現在では10ms以下のスイッチ速度を実現している。

アナログビーム操舵式はLucent社が発表してから4、5年となるが、最近の国際会議や展示会において、同様の方式の光クロスコネクットがさらに数社から発表されている。ミラーは、ねじれヒンジ\*\*により支持されており、ミラーの傾斜は静電引力により制御されている。Lucent社のクロスコネクット(Lambda star)は、制御性や信頼性のテストが行われていたが、2001年の9月に行われたOptical MEMSの国際会議においてそれらの結果も報告された。ミラーアレイの規模が大きくなり256×256である。スイッチング時間は4ms、全体の挿入ロス2dB、クロストークは50dBとなっている。ミラーの回転テストでは18×10<sup>9</sup>サイクルで、問題ないとのことであった。また6日間の安定性は0.1dB、衝撃試験による機械的なダメージの閾値も実用的に問題とならないほど高いとのことで、安定性と信頼性が強調された。すでに、実際にネットワークへ導入が始まっているとのことであった。

Blue Sky ResearchはMEMSによるアナログビーム操舵式N×Nのクロスコネクットを開発している。2001年で32×32、2002年で64×64の開発を行っていた (<http://>

\*ポリシリコンの薄膜にプッシング(下駄の歯のような構造)を設け、静電引力により引き付けることで弾性エネルギーを蓄える。電圧を取り除いたとき開放される弾性エネルギーにより摩擦駆動が生じ、ステップ移動する。電圧の印加を繰り返し、ステップモーターとして動作する。

\*\*ガルバノミラーのようにミラーを支えるとき両端固定の梁により支持する。この梁は細いのでねじれやすく、ねじれ型のヒンジとして動作する。

www.bluskyresearch.com). スイッチの切り換え方式は Lucent 社の方式と同じである. 2 枚のミラーアレイが配列された基板を直角に置いて, 反射光を出力ファイバーに導く. スイッチの時間は 5~10 ms, 挿入損失は  $N < 4$  では 1 dB 以下,  $N > 4$  では 3 dB 以下である. Integrated Micromachines Incorporate (IMMI) は  $1 \times 1$  の小さい光スイッチから  $1024 \times 1024$  のアナログビーム操舵式のクロスコネクタまでの開発を行っていた (<http://www.micromachines.com>). アナログビーム操舵式のクロスコネクタでは 3 dB のロスであることがウェブで述べられていた.

中規模の光スイッチの分野では多くのベンチャー企業や光関連会社が新しく MEMS スイッチに取り組んでいる. 表 1 のデジタル方式の欄に挙げた ONIX の  $8 \times 8$  の光スイッチは完成度が高く市販されている. 単結晶シリコンのミラーを用いており, 信号により, ミラーが基板面からその上の光路にスライドする仕組みのようである. 市販のデバイスでは, スイッチングの仕組みを公開しているものは少なく詳細を知ることは難しい\*\*\*.

### 3. 第 2 世代の光クロスコネクタ開発に向けて

最近のマイクロミラー研究の話題として, 結晶シリコンのミラーの再評価とミラーの動的特性の研究が挙げられる. 表面マイクロマシニングでは, シリコン基板の上に減圧化学反応気相堆積法により成膜した薄膜を自立させて, ミラーを構成するが, 残留応力によりミラー面が完全な平面でないことが問題となる. このためバルクマイクロマシニングにより基板のシリコンからミラー面を構成する方法が再び注目されている. 基板のシリコンを薄くしてミラー面を残す方法なので平面性がよい. また結晶面をシリコン異方性エッチングにより残す方法は, 本質的に結晶の格子平面が利用できる. これらの技術発展には SOI ウェハの導入による効果も大きい (図 4).

SOI ウェハでは酸化シリコン膜がエッチングの停止

層として利用でき, 薄い結晶シリコン層をミラーとして残すことができる. また幅の狭いシリコンのパターンと幅の広いパターンを設計し, 深堀の反応性イオンエッチング (deep reactive ion etching: DRIE) プラズマでシリコンをエッチングした後, 犠牲層の  $\text{SiO}_2$  を適当な時間ウェットエッチングすると, 狭いシリコンパターンの下だけにエッチング液が到達し, 犠牲層の  $\text{SiO}_2$  がなくなり, 自立可動構造となる. この方法で楕円型アクチュエーターを容易に (1 枚のマスクで) 実現できる. また自立層をミラーとして用いる場合, 反射コーティング後で  $10 \mu\text{m}$  厚のミラーの曲率半径は 1 メートルオーダーとなり, 表面マイクロマシニングのポリシリコンミラーで得られる曲率半径より 1 桁以上大きくできる. このような特性を生かして, 最近ではクロスコネクタ用ミラーとしては,  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  厚さのシリコン単結晶層が用いられる. 以下に最近の国際会議で発表されたアナログビーム操舵型のクロスコネクタ用ミラーを紹介する.

Optical MEMS 2001 において NTT からアナログビーム操舵式のクロスコネクタ用ミラーが発表された<sup>6)</sup>. ミラー層が  $10 \mu\text{m}$  厚の SOI ウェハから製作している. 対向する電極は別のウェハにウエットエッチングによりピボット構造 (高さ  $40 \mu\text{m}$ ) (ミラーの回転中心となるように作った突起構造, 図 5(a) 参照) を作り, ミラーとの間にかかる静電引力を強め, 駆動電圧を低くするような設計となっている. ねじれヒンジのアスペクト比を高くして, ねじれやすく, 曲がりにくい構造を提案している. 電極側のウ

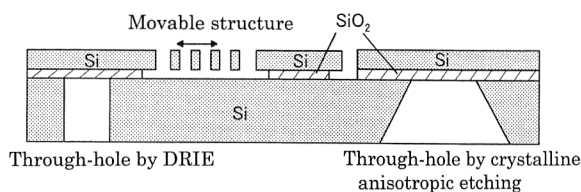


図 4 SOI ウェハを用いたマイクロマシニング.

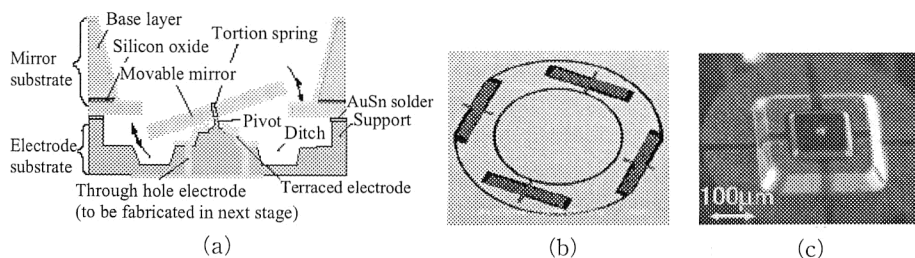


図 5 (a) NTT のクロスコネクタ用ミラーの断面構造, (b) 可動ミラーとばね, (c) 電極とミラーの支持部<sup>7)</sup>.

\*\*\*現在は光通信分野の不況のため, 開発の存続に対する変化が激しく, 2 章で述べた開発状況は歴史的なもので, すでに変化していることがあることを了解いただきたい.

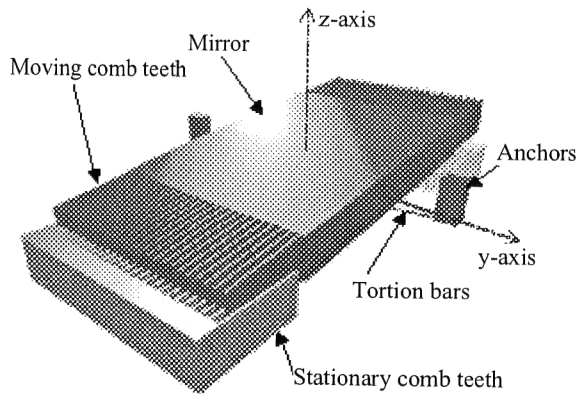


図6 コム駆動マイクロミラーの構造<sup>9)</sup>(富士通研究所)。

エハーとミラー側のウェハーは張り合わされる。その後 Optical MEMS 2002 において、 $32 \times 32$  のミラーをパッケージした結果と測定した特性が報告された<sup>7)</sup>。図5に構造と製作されたミラーの写真を示す。スプリングのアスペクト比は6、ミラーの直径は  $500 \mu\text{m}$  であるがミラーの反りは  $20 \text{ nm}$  以下ときわめて平坦であった。共振周波数は  $1 \text{ kHz}$  程度、ミラーを2回反射させ、ファイバー光学系を通る光路における損失は約  $3 \text{ dB}$  で、ミラーの安定性は  $0.012$  度であった。ミラーの走査角は  $5.4$  度/ $75 \text{ V}$  であった。

また、富士通研究所からは、垂直櫛型アクチュエーターを備えた  $80 \times 80$  のアナログビーム操舵式のマイクロミラーアレイが Optical MEMS 2002 において報告された<sup>8)</sup>。SOI ウェハーを用いて製作されている。SOI ウェハーは上下のシリコン層がともに  $100 \mu\text{m}$  である。ミラーの走査角は  $\pm 5$  度/ $60 \text{ V}$  である。ミラーの1軸の基本構造は MEMS 2002 において先に報告されていた<sup>9)</sup> が、入れ子の構造で2自由度を実現している。ミラーを支える梁部の1つ1つは2本の近接した梁(2本の梁はV型に並んでいる)で構成される。1軸のミラーの構造を図6に示す。ミラー両端には櫛歯の構造が形成されている。櫛歯は対向する櫛歯との間で静電引力により引き合う。櫛歯部はSOI ウェハーの上下層に別々に形成されており、図6のように櫛歯が引き合って重なることでミラーを回転させる。このときミラーの回転力とミラーを平行移動させる不必要な引力が働くが、V型に並んだ支持梁を用いることで、ねじれて回転しやすいが、不必要な平行移動が生じにくい構造となっている(図6のtortion barsの部分)。

同様にSOI ウェハーを用いるミラーは Corning Intellisense から Optical MEMS 2002 で発表された<sup>10)</sup>。図7に構造を示す。ミラーはSOI ウェハーから製作される。電極をパターンニングしたガラス基板とミラーを形成したシリコン基板を陽極接合により貼り付けている。ミラーは  $320$

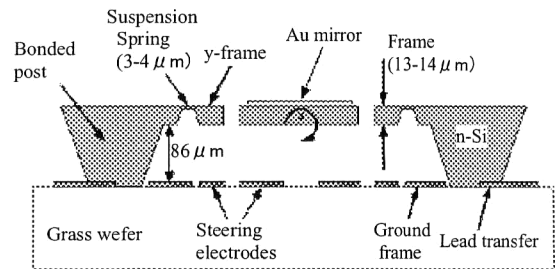


図7 陽極接合を用いたマイクロミラーの構造<sup>10)</sup>(Corning Intellisense)。

個のアレイとして製作され、個々のミラーの大きさは  $750 \times 800 \mu\text{m}$  で厚さは  $14 \mu\text{m}$  である。ミラーの曲率半径は  $0.75 \sim 2 \text{ m}$  の範囲であった。共振周波数は  $200 \sim 400 \text{ Hz}$ 、ミラーの走査角度は  $\pm 5$  度/ $60 \text{ V}$  程度であった。

デジタルクロスバー式のクロスコネクットの最近の開発では、 $2 \times 2$  の小型スイッチを発展させて、 $N \times N$  の光スイッチを実現する試みが盛んである。ヌシャテル大学の  $2 \times 2$  のスイッチを  $4 \times 4$  のアレイに並べ、ガラスのエッチングにより製作した導波路を組み合わせたスイッチが Transducers '01 において報告されている<sup>11)</sup>。また、MEMSCAP は東京大学の研究成果を発展させて、 $N \times M$  (例として  $16 \times 16$ ) のスイッチを共同で開発している。中央に挿入されるミラーがSi結晶面で構成されているので、平面度がすぐれており光の伝達特性がよい。初期的なデータとして挿入ロスが  $0.5 \text{ dB}$ 、スイッチング時間が  $300 \mu\text{s}$  の結果が報告されている<sup>12)</sup>。

最後にクロスコネクットの範疇には入らないが、ユニークな add/drop 用のモジュールとして、アレイ導波路グレーティングを組み合わせた MEMS スwitch が、2001 年 OFC (Optical Fiber Communication Conference) において住友電工から報告された<sup>13)</sup>。PLC 基板にニッケルのカンチレバー構造が製作されている。カンチレバーの先端にはシリコンあるいは金属薄膜のミラーが形成されている。カンチレバーが湾曲しており、静電気により引き付けて溝にミラーを挿入することで、導波路の光路を切り換えることができる。挿入ロスは  $2.0 \text{ dB}$  以下、駆動電圧は  $30 \sim 40 \text{ V}$  であった。

光通信産業は 2002 年現在、低迷状況にある。通信容量増加見込みが大きすぎ、設備過剰の状況とのことである。しかし長いスケールで見れば、通信網の充実は欠かせず、通信網の全光化とオフィスまで光ファイバーが引かれることが期待される。MEMS はディスプレイやエアバックセンサーなど、すでに実績は高い。高い信頼性が要求される光

通信分野への MEMS の導入は、産業界からの要求の高さと技術者の努力が合わさって初めて可能である。今後の発展を期待したい。

## 文 献

- 1) R. Giles and D. Bishop: "Lightwave micromachines in optical networks," *Proc. Optical MEMS*, additional paper (Hawaii, 2000).
- 2) L. Y. Lin, E. L. Goldstein and R. W. Tkach: "Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects," *IEEE Photon. Technol.*, **10** (1998) 525-527.
- 3) L. M. Lunardi, L. Y. Lin and E. L. Goldstein: "Micromachined optical cross connects with integrated signal-monitoring functionality," *OFC '99*, FH3-1 (1999) pp. 128-130.
- 4) J. E. Fouquet: "Compact optical cross-connect switch based on total internal reflection in a fluid-containing planar light-wave circuit," *OFC 2000*, TuM 1 (2000) pp. 204-206.
- 5) M. Makuhara: "Microelectromechanical intersecting waveguide optical switch based on thermo-capilarity," *Proc. Optical MEMS* (2000) pp. 33-34.
- 6) R. Sawada, E. Higurashi, A. Shimizu and T. Maruo: "Single crystalline mirror actuated electrostatically by terraced electrodes with high-aspect-ratio torsion spring," *Proc. Optical MEMS* (2001) pp. 23-24.
- 7) R. Sawada, J. Yamaguchi, E. Higurashi, A. Shimizu, T. Yamamoto, N. Takeuchi and Y. Uenishi: "Single Si crystal 1024 ch MEMS mirror based on terraced electrodes and a high-aspect ratio torsion spring for 3-D cross-connect switch," *Proc. Optical MEMS* (2002) pp. 11-12.
- 8) Y. Mizuno, O. Tsuboi, N. Kouma, H. Soneda, H. Okuda, Y. Nakamura, S. Ueda, I. Sawaki and F. Yamagishi: "A 2-axis comb-driven micromirror array for 3D MEMS switches," *Proc. Optical MEMS* (2002) pp. 17-18.
- 9) O. Tsuboi, Y. Mizuno, N. Koma, H. Soneda, H. Okuda, S. Ueda, I. Sawaki and F. Yamagishi: "A rotational comb-driven micromirror with large deflection angle and low drive voltage," *Proc. MEMS* (2002) pp. 532-535.
- 10) M. R. Dokmeci, S. Bakshi, M. Waelti, A. Pareek, C. Fung and C. H. Mastrangelo: "Bulk micromachined electrostatic beam steering micromirror array," *Proc. Optical MEMS* (2002) pp. 15-16.
- 11) L. Dellmann, W. Noell, C. Marxer, K. Weible, M. Hoffmann and N. F. de Rooij: "4×4 matrix switch based on MEMS switches and integrated waveguides," *Transducers '01* (2001) pp. 1332-1335.
- 12) P. Helin, T. Bourouina, L. Houlet, G. Reyne and H. Fujita: "Monolithic single crystal silicon vertical mirrors arrays with improved integration density for optical crossconnects," *Proc. Optical MEMS* (2001) pp. 83-84.
- 13) M. Katayama, T. Kanie, H. Okuyama, T. Sano, K. Koyama, T. Sasaki, C. Hirose, T. Hattori, M. Nishimura and S. Semura: "Micromachined curling optical switch array for PLC-based, integrated programmable add/drop multiplexer," *Tech. Digest OFC 2001* (2001) WX4-1-WX4-3.

(2002年10月16日受理)