

解説

マイクロマシニングと光デバイスへの応用

浮田 宏生

NTT 境界領域研究所 〒180 武蔵野市緑町 3-9-11

(1994年7月30日受理)

Micromachining and Its Application to Optical Devices

Hiroo UKITA

NTT Interdisciplinary Research Laboratories, 3-9-11, Midori-cho, Musashino 180

1. ま え が き

最近ではいわゆるマイクロマシンの実現は、まだまだ将来の夢物語であると認識されている¹⁾。関係者はその基盤技術であるマイクロマシニング(半導体微細加工技術)により、マイクロメカトロニクス、さらには光技術を融合したマイクロオプトメカトロニクスの可能性を追求するようになってきた。本文では、まずこのマイクロマシニングに関し、微小化の方法と問題点を述べる。

一方、マイクロマシンそのものの研究は機械加工によるミリマシンやミリメカニズムの研究にシフトし²⁾、実用性に重点が移っている。精密工学会の春の全国大会では「山登りマイクロメカニズム作製コンテスト」が恒例行事になり、光誘導で走行するムッシュ君のようなミリマシン(10mm 立方)が誕生した。共同作業で大きな棒を運搬できる。また、ミリメカニズムは医療、化学のほか、マイクロメカニカル光スイッチ³⁾、光ファイバー接続などの通信用機器の分野⁴⁾で、応用が注目されている。

これに対し、マイクロマシニングで作製した自動車関連の2~3のシリコンセンサーが実用になってきた⁵⁾。しかし、マイクロアクチュエータなどそのほとんどは研究段階にある。このような要素部品の一括加工をねらいとしたマイクロマシニング技術の可能性を拡大するため、最近は(1)材料選択幅の拡大、(2)光技術との融合など研究のすそ野が広がっている。(1)は材料が従来のシリコン(Si)から金属、有機、光半導体に拡大していることを示している。Siによる穴加工、ダイアフラム(膜)、梁、ギア、モーターのほかには有機材料による静電アクチュエータ⁶⁾やマイクロポンプ⁷⁾などが提案さ

れ、微量化学分析装置に応用されようとしている。(2)の光技術との融合は、Si基板上の微小光学素子⁸⁾、ガリヒ素(GaAs)基板の振動子とレーザーの集積素子⁹⁾、紫外線硬化樹脂による光造形^{6,10)}、ワイヤレスのマイクロエネルギー供給^{11,12)}などへ展開している。光技術への微小運動機構の導入の機運は機構部がマイクロ化されて高速になり、光センサー^{9,13)}、光スキャナ¹⁴⁾、デジタルミラーディスプレイ¹⁵⁾などの光制御に適することがその背景にある。ちなみにこれらの光機械デバイスの機械共振周波数は数十kHz~1MHz⁹⁾に達する。

このようなマイクロマシニングによる光と微小機械の融合技術はマイクロオプトメカトロニクスあるいはマイクロメカニカルフォトリクス¹⁶⁾と呼ばれ、センサーを中心に新技術分野を形成しつつある。本文では以上のようなマイクロマシニングの現状を光技術との融合、微小化の観点から述べる。

2. マイクロマシニング

2.1 微小化の目的と問題点

マイクロマシニングの最大の特徴はフォトリソグラフィによる一括加工にある。機構部品、信号処理回路、光部品を同一基板上に集積できるほか、量産化により低価格・高信頼を実現できる。この結果、全体の寸法が極端に小さくなるので、対象や環境に対して影響が少なく、自然に優しいという微小化メリットがある。しかし、微小化に伴う問題点も存在する。Feynmannはすでに30年前、Siマイクロモータを作製する時の犠牲層エッチングの概念を示すとともに、静電アクチュエータなどの微小デバイスで表面積が相対的に増加するので、

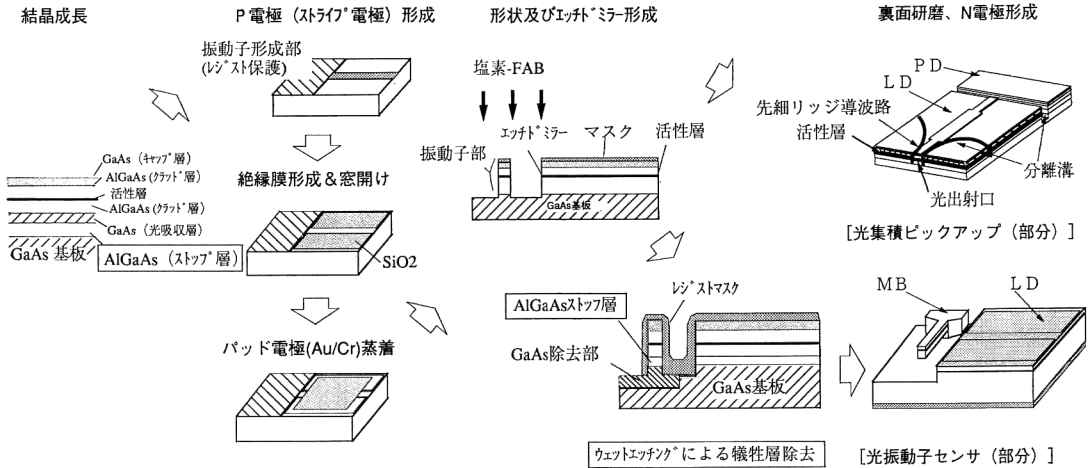


図 1 光(半導体レーザー)と機械(記録媒体, 振動子)の融合デバイスの作製プロセス

摩擦の減少が重要であると指摘している¹⁷⁾。

薄膜物性値はバルク値と異なるのが一般的である。同じように寸法がミクロンの世界では空気ダイナミクス, 液中ダイナミクス, 熱伝達特性¹⁸⁾などが従来のミリメートル以上の世界の特性と異なる。このようなマイクロ理工学の現象は現在十分に解明されていないので, マイクロマシンの設計における問題点になっている。しかし, STM や AFM による観測手段の進展は, マイクロ領域やナノ領域の表面物理を解明し, マイクロメカニズムに関するわれわれの知識を飛躍的に増大させている。

一方, 学問としてのマイクロ理工学の進展を待たず, 1980 年代後半から半導体微細加工技術によるセンサーやアクチュエータなどのマイクロシステムが作製されるようになった^{5,19)}。今後は以上のマイクロ理工学(理論)とマイクロシステム(実験)が車の両輪となって機械やそれを応用した光デバイスの微細化を促進させると考えられる。

2.2 微小化の方法

マイクロ加工の基本はフォトリソグラフィという光による表面印刷加工技術である。フォトリソグラフィでは, 希望のマスクを通して露光された基板上的フォトレジストがある種の溶液に溶解, エッチングにより希望の形に基板を削り取ることができる。従来, このような技術を Si 基板に繰返し適用し, 加速度センサー⁵⁾, 圧力センサー⁵⁾, マイクロフォン²⁰⁾など, 機械部品と電気部品の集積化を図ってきた。最近では, 腕時計サイズの磁気ディスク装置の実現を狙い, この種の技術を微小スライダーや微小機構の作製に応用することが検討されている^{21,22)}。なお, ここでは 3 次元加工の LIGA プロセス, さらに小さなナノ寸法の EB (電子ビーム) 加工や

原子レベルの光 STM 加工²³⁾については省略する。

2.3 光マイクロマシニング

光との融合・光応用を考えた場合, Si は必ずしもいい材料ではない。現在, Si 材料でレーザーなどの光部品を作れないからである。そこで, われわれは Si 材料の代わりにガリヒ素 (GaAs) 材料を使用した。

図 1 に示す光と機械の融合プロセスでは, ドライエッチによる表面加工にウェットエッチを組み合わせ, 立体加工を可能にしている(光振動子)。光学部品の加工には面精度が $0.1 \mu\text{m}$ 以下で, かつ狭く深い加工(高アスペクト比加工)が必要になる。このため, ドライエッチには塩素ガスを用いた反応性高速原子線エッチング (RFAB)²⁴⁾を用いた。中性原子を用いる本手法では, エッチ部に電荷がたまらないので高面精度, 高アスペクト比の加工が可能である。この結果, 半導体レーザー (LD) や光検出器 (PD), 機構部品を集積化, 動作を確認できた²⁵⁾。

次章では, 作製プロセスや信号検出方法が共通な光集積ピックアップと光振動子センサーを紹介する。作製プロセス上での両者の相違点は, 前者では微小光ビームを実現するため先細リッジ導波路を作製し, 後者では選択ウェットエッチングにより振動子を基板から解放する点にある。

3. 半導体レーザーと微小機械の融合

光(半導体レーザー: LD)と運動機構(記録媒体, 振動子)の融合・微小化に対し以下の点を考慮した。まず, 半導体レーザー自身を信号検出手段とし(複合共振作用), 対象物に極限まで接近 ($3 \mu\text{m}$ 以下)させ, 全体のサイズを減少した。次に, 摩擦の増大に対し, 浮上ス

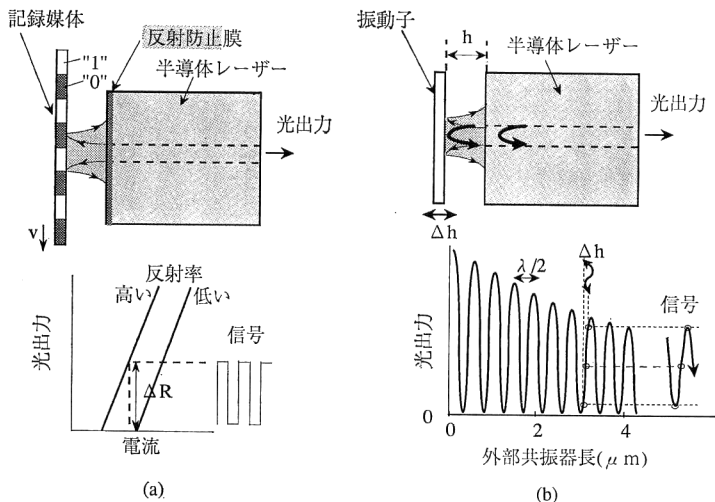


図2 複合共振作用による信号検出原理

ライダー(光ピックアップ)や弾性支持(光振動子)により接触部分がない構造とした。なお、前者の近接型複合共振作用は構成の単純化、信号品質の向上、集積の容易化をもたらした²⁶⁾。

3.1 近接型複合共振作用

図2は両デバイスの信号検出原理である。運動機構部はLDに近接配置されて外部共振鏡となり、その反射率(a :光ピックアップ)または光軸方向の変位(b :光振動子)が、それぞれLDの光強度に変換される。前者では運動機構部反射光とレーザー端面反射光の干渉を避けるため、運動機構部側のレーザー端面に反射防止膜が付与されている。

この複合共振系は、いずれの場合も各反射面間の間隔に対応した定在波が発生し、そのモード間隔は $\Delta f = c/2nL$ である。ここで c は光速、 n は屈折率、 L は共振器長である。半導体レーザーの共振器長 $L = 250 \mu\text{m}$ に対し、本センサーの外部共振器長は $L_{\text{ex}} = 2 \sim 3 \mu\text{m}$ と極めて小さいので、そのモード間隔はレーザー本体のモード

間隔の百倍に広がる。したがって、外部共振器モードはレーザー利得の外になり(図3)、外部共振器モードで発振することはない。このため、半導体レーザーが運動機構(記録媒体や振動子)に近接配置された場合には、戻り光によるモードの飛びが生じないので、良質の信号が得られる。

3.2 光集積ピックアップ

光ディスク用ピックアップは、情報ビットの反射率あるいは磁化の向きを検出するセンサーデバイスである。本光ピックアップは図4(a)に示すように空気浮上スラ

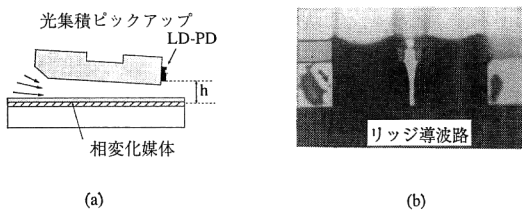


図4 浮上型集積ピックアップの(a)構成、(b)先細リッジ導波路付き半導体レーザー

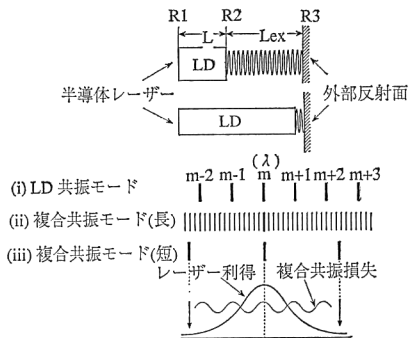


図3 複合共振系における戻り光の影響

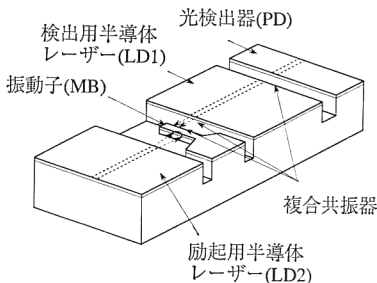


図5 光振動子センサーの斜視図

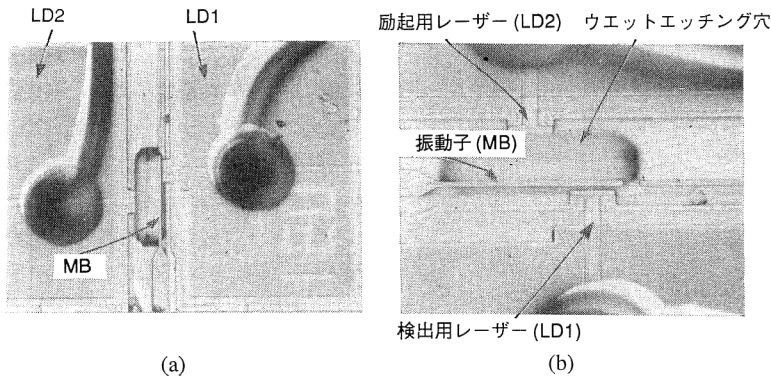


図 6 フタロシアニン蒸着膜 (1 μm 厚) 付き光振動子センサー. (a) センサー中央部, (b) 同拡大図.

イダに搭載して使用する. 記録媒体側の LD 端面には反射防止膜が付与されているので, 媒体の情報面と LD のもう一方の端面とが共振系を構成し, 情報面の反射率変化を LD の光出力変化に変換して信号を検出する. 空間分解能を高めるため LD 出射端部に先細リッジ導波路が形成され (同図 (b)), 記録媒体上での光スポットは直径 1.0 μm (半値全幅) 以下である. この結果, トラックピッチ 1.5 μm の従来の光ディスクの情報を記録・再生できる²⁷⁾.

3.3 光振動子

光振動子は, 振動子を挟んで片側に振動検出用半導体レーザー (LD 1) と光検出器が, 他の側に励起用半導体レーザー (LD 2) が配置された構成になっている (図 5). この構成では, 振動子 (MB) からの反射光と LD 1 端面からの反射光とが LD 内部で干渉し, MB と LD 1 の間隔に対し $\lambda/2$ ($\lambda=0.8 \mu\text{m}$) を周期とする光強度信号となる. LD 1 と MB の間隔 h_1 は $3 \mu\text{m}$ で, 振幅変化 Δh に対応した光出力が振動子の変位信号となる. なお, 振動の励起には LD 2 の光パルスによる熱歪み作用を利用する.

基本設計では, LD 1 と MB の間隔 h_1 は複合共振信号 SN 比から, LD 2 と MB の間隔 h_2 は梁上での励起光照射状態とウェットエッチング窓の寸法などプロセス上の観点から, MB の長さ l は共振周波数, 梁たわみなどから, 光励起位置と振動検出位置は励起感度, 検出感度, 励起光の信号光への漏込みなどから決定した²⁸⁾. 具体的には $h_1=3 \mu\text{m}$, $h_2=30 \mu\text{m}$, $l=50$ または $110 \mu\text{m}$ である. 振動子長 $50 \mu\text{m}$ の場合の共振周波数は, $f_0=1.0 \text{MHz}$, 半値全幅は $\Delta f=40 \text{kHz}$ で, その Q 値 ($f_0/\Delta f$) は約 250 である.

なお, 光振動子の応用として周波数変化検出型セン

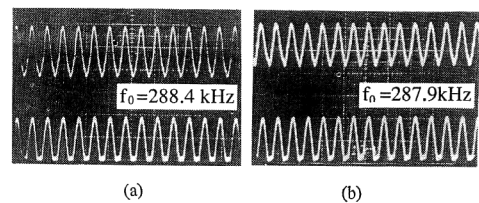


図 7 フタロシアニン蒸着膜 (振動子上の総重量は 54 ng と推定される) による共振周波数の変化. (a) 蒸着前, (b) 蒸着後.

サー (加速度センサー, 真空度センサー, 質量センサー) や通信用の同期信号抽出用メカニカルフィルタなどが考えられる. 図 6 は将来のガスセンサー (極微量センサー) を目的にフタロシアニン (ガス吸着剤) を振動子表面に厚み約 $1.0 \mu\text{m}$ (振動子上の総重量は 54 ng) 蒸着した例である. 蒸着による LD 特性, 振動振幅, 検出振幅に変化はなかった. しかし, この質量負荷効果 (54 ng) により, 蒸着の前後で共振周波数は 288.4 kHz から 287.9 kHz へ 0.5 kHz 減少した (図 7). 実際のガス吸着実験は今後の課題であるが, 共振周波数検出型センサーとしての基本動作を確認できた.

なお, 本振動子は半導体レーザーウェハの上に大量生産され, 光軸調整が不用であるため実用価値が高い. また, 材料は単結晶状態であり, ドライエッチング加工なのでクラックや残留応力が発生せず, 機械強度は鋼鉄のスチールより高いと言える²⁹⁾.

4. その他の集積化光デバイス

上述の GaAs 材料をベースに, 半導体レーザーに異種材料のマイクロレンズを集積化した²⁹⁾光デバイスとしてファイバーガイド付き集光レーザーやマイクロエンコーダ³⁰⁾がある. 前者は光インタコネクションの分野で, 後

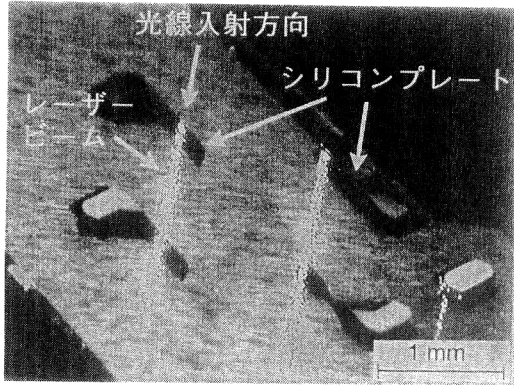


図8 基板上に集積されたシリコンプレート
(マッシュウェンダー干渉計配置)⁹⁾

者は光計測の分野で将来の発展が期待できる。

一方、従来の Si 材料による光集積デバイスには微小干渉系⁹⁾ やデジタルミラーディスプレイ (DMD)¹⁵⁾ がある。前者は (1 1 0) シリコン基板の異方性エッチングにより、高アスペクト比の Si プレート (厚さ数 μm , 高さ 100~200 μm) を作製し、シリコン基板の上に微小光学素子を実現した。Si プレートの (1 1 1) 側面は鏡面研磨した Si ウェハ表面と同等の反射率を有し、適当な厚さを選べば He-Ne レーザー光に対し透過率 50%

が得られることから、ビームスプリッターとして使用可能である。このため、これらのプレートを組み合わせ、マイクロエタロンやマイクロ干渉計を構成できる。図8はマッシュウェンダー干渉計に He-Ne レーザービームを入射させた時の顕微鏡写真である⁹⁾。板の厚さは約7 μm , 高さ約 150 μm , 長さ 500 μm である。レーザービームが透過・反射している様子が観測できる。

後者の DMD は SRAM 上に配置した多数のミラーによる大型ディスプレイである¹⁵⁾。アルミ製のマイクロミラーそれぞれがピクセルに対応し、ミラーの角度を変えて反射光の明暗を制御する空間光変調器である。図9は DMD の構造でアルミミラーが2本の支柱に懸られている。この構造は有機材を犠牲層エッチングして作製される。ミラーは電極とアルミミラー間の静電力で ± 10 度回転する。応答速度は 10 μs で 768 \times 576 ピクセルから成るカラーディスプレイに十分な速さである。コントラスト比は 100, 光効率は 60% 以上 (アルミミラーの反射率は 90% 以上) で、ミラーの動作は連続4年以上繰返し使用に耐え得るとのことである。

5. あとがき

マイクロメートルスケールのオプトメカトロニクス (マ

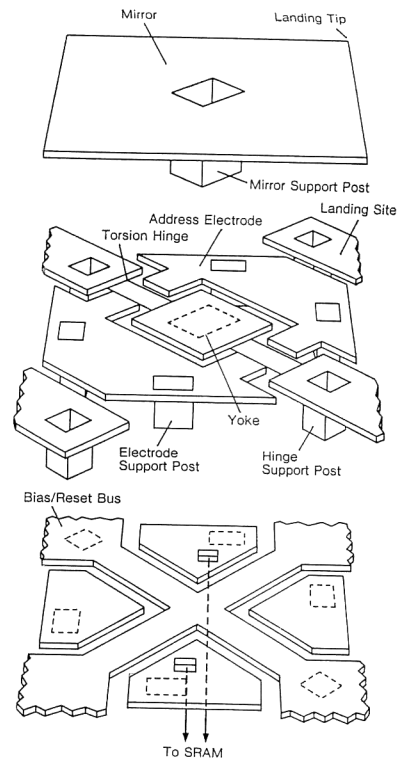
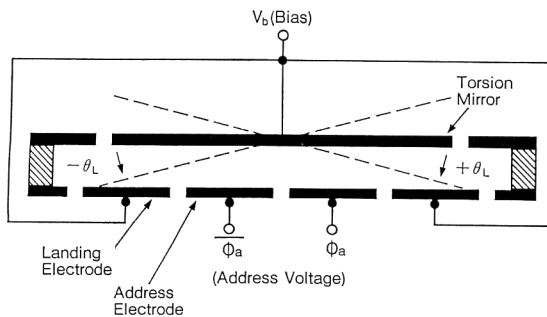


図9 デジタルマイクロミラーデバイス (DMD) の断面構造¹⁵⁾

イクロメカニカルフォトリクス) では, マイクロマシニング技術を適用して光・機械・電子の技術融合が進んでいる。マイクロメカニクス(微小機械)を光技術に取込むことにより, これまでないタイプの光デバイス, 製造方法, 駆動源を提供する可能性がある。マイクロマシニング用の材料もシリコンから金属, ガリヒ素光半導体, 有機へと広がり, センサーデバイスを中心に技術が広がりを見せている。しかし, この分野での最大の課題は光駆動のマイクロアクチュエータであろう。大変位, 高速応答の小型運動機構の誕生を待ちたい。

共同研究者の NTT 境界領域研究所日暮栄治, 上西祐司, 片桐祥雄, 澤田廉士, 田中秀尚, 大口脩, 中田宏, 鈴木与志雄の各位に深謝する。有益な討論をいただいた丸野透ほかメカフォトリクス研究グループの各位に感謝する。また, 久保寺憲一郎長, 木暮賢司部長, 戸島知之所長は本研究の遂行を終始励まして下さいました。ここに感謝申し上げます。

文 献

- 藤田博之: “マイクロマシニングを考えた直す”, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(IV) (1994) pp. 264-266.
- 特集: 実働の微小機械(ミリマシン), 精密工学会誌, **60** (1994) 331-366.
- 長岡新二: “マイクロメカニカル光スイッチ”, OPTRONICS, No. 9 (1992) pp. 80-85.
- 桑野博喜: “通信におけるマイクロマシニングの必要性”, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(IV) (1994) pp. 258-260.
- J. Bryzek, K. Petersen and W. McCulley: “Micromachines on the march,” IEEE Spectrum, **5** (1994) 20-31.
- K. Ikuta, K. Hirowatari and T. Ogata: “Three dimensional micro integrated fluid systems (MIFP) fabricated by stereo lithography,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94 (IEEE Oiso, 1994) pp. 1-6.
- A. Furuya, F. Shimokawa, T. Matuura and R. Sawada: Proc. of Micro Electro Mechanical Systems (IEEE Fort Lauderdale, 1993) pp. 59-64.
- Y. Uenishi, M. Tsugai and M. Mehregany: “Micro-opto-mechanical devices fabricated by anisotropic etching of (110) silicon,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94 (IEEE Oiso, 1994) pp. 319-324.
- H. Ukita, Y. Uenishi and H. Tanaka: “A photomicrodynamical system with a mechanical resonator monolithically integrated with laser diodes on gallium arsenide,” Science, **260** (1993) 786-789.
- T. Takagi and N. Nakajima: “Architecture combination by micro photoforming process,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94 (IEEE Oiso, 1994) pp. 211-216.
- J. B. Lee, Z. Chen, M. G. Allen, A. Rohatgi and R. Arya: “A high voltage solar cell array as an electrostatic MEMS power supply,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94 (IEEE Oiso, 1994) pp. 331-336.
- E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka and O. Ohguchi: “Rotational control of microobjects by optical pressure,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94 (IEEE Oiso, 1994) pp. 291-296.
- H. Toshiyoshi, H. Fujita and T. Ueda: “A self-excited chopper made by quartz micromachining and its application to an optical sensor,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94 (IEEE Oiso, 1994) pp. 325-330.
- 後藤博史: “シリコンマイクロキャナと2次元センサへの応用”, 光技術コンタクト, **32** (1994) 322-330.
- J. M. Jounce: “Mirrors on a chip,” IEEE Spectrum, **11** (1993) 27.
- P. Szuromi: “Micromechanical photonics,” Science, **260** (1993) 733.
- R. Feynmann: “Infinitesimal machines,” J. Microelectromech. Sys., **2** (1993) 4-14.
- 小竹 進: “マイクロマシニングの熱と流れ”, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(IV) (1994) pp. 270-272.
- 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進: マイクロマシニングとマイクロメカトロニクス(培風館, 1992).
- D. E. Newland: “Acoustic micromachines,” Nature, **370** (1994) 21-22.
- D. K. Miu and Y. C. Tai: “Silicon micromachined SCALED technology,” Proc. of the 1993 JSME (1993) pp. 527-532.
- 多川則男: “マイクロマシニングの磁気ディスク装置への応用”, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(IV) (1994) pp. 686-688.
- 大津元一, 堀 裕和: “フォトン STM の実験と理論”, 光学, **21** (1992) 780-788.
- 下川房男: “高速原子線を用いた GaAs のドライエッチング”, 第1回粒子線の先端的应用技術に関するワークショップ (Proc. BEAMS 1990) pp. 209-214.
- Y. Uenishi, H. Tanaka and H. Ukita: “Monolithic integration of microbeam resonators and laser diodes using AlGaAs/GaAs micromachining,” 3rd Int. Conf. on Micro Electro. Opto. Mechanics Systems and Components (IEEE Berlin, 1992) pp. 313-322.
- 浮田宏生: “機械の微小化—フォトマイクロダイナミクスからのアプローチ—”, 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集(IV) (1993) pp. 553-555.
- 浮田宏生: “浮上型光集積ピックアップ”, 応用物理, **61** (1992) 60-63.
- 浮田宏生, 上西祐司, 田中秀尚, 板生 清: “GaAs マイクロマシニングによるレーザ集積化振動子の諸特性”, 精密工学会誌, **59** (1993) 1560-1565.
- J. Shimada, O. Ohguchi and R. Sawada: “Microlens fabricated by the planar process,” J. Lightwave Technol., **9** (1991) 571-576.
- 澤田廉士: “光エンコーダ・光コンポーネントへの応用”, 計測と制御, **31** (1992) 656-659.