

光マイクロマシンの物理

羽 根 一 博

1980年代後半にシリコンプロセスにより微小な動くモーターや歯車が制作され、マイクロマシンが注目されるようになった¹⁾。その技術はセンサーに必要な立体構造の製作などに応用され、夢から実用の時代に入った。最近のマイクロマシンの発展については文献2)を参照いただきたい。さて、近年半導体の微細加工を利用したマイクロマシンを光学へ応用する研究が注目されている。その理由として、マイクロエレクトロニクスにおいて異種のシステムの集積化が必要とされることや、微小光学の発展、半導体マイクロマシニング技術の向上によるところが大きいと考えられる。光マイクロマシンは光学領域への半導体マイクロマシン技術の応用であるが、特徴は複雑な機械的な立体構造が製作できることと、アクチュエーターにより動く機能を集積化できることである。動く部分があるので、光学特性に加えて、力学的な物理が重要となる。

1. マイクロ化によるスケール効果

機械をマイクロ化したことにより生じる特徴は、力学のスケール則により知ることができる³⁾。たとえば、機械をマイクロ化したことにより空気の摩擦抵抗が無視できなくなる。表面積が大きく、熱容量が小さくなるので熱交換や化学反応が活発になる。また、液体の表面張力が運動に大きな影響を与える。このような基礎的な効果を簡単なスケール則で考察してみよう。

空気や液体中の物体の運動方程式は運動の変位を r 、時間を t で表すと

$$m \frac{dr^2}{dt^2} + \alpha \frac{dr}{dt} + kr + F = 0 \quad (1)$$

のような二次方程式で表現できる。 m は物体の質量、第2項は速度に比例する抵抗力である。第3項は変位 r に比例する力で、ばねによる復元力などである。 F は重力のように変位に関係なく作用する力である。物体の運動はそれらの係数の相対的な大きさに支配される。質量 m は体積に比例するので、物体の代表寸法を L とすると L の3乗に比例する。気体や液体の中で物体が運動するとき、 $\alpha (dr/dt)$ は流体の粘性に起因する粘性力を与える。 α は粘性係数 μ と代表寸法 L に比例する。したがって、代表寸法 L が小さくなると質量は L の3乗に比例して小さくなるので、物体の慣性力より流体の粘性力が重要になる。また、重力は重力加速度を g として $F = -mg$ で表現できるが、代表寸法 L の3乗に比例するので、同じく機械が小さくなると粘性力に比べて無視できるようになる。このように、大気中や液体中のマイクロマシンの運動に対しては、重力や慣性力より粘性力が重要になる場合が多い。

マクロスケールでは固体表面の接触による摩擦力は垂直抗力に比例する。しかしながら、マイクロスケールでの摩擦は原子分子間力などマイクロな要因による場合が多く、垂直抗力だけでは説明できない。大気中では物体の表面が数ナノメートルの水の膜で覆われているので、水の吸着力、すなわち表面張力の影響が大きい。表面張力は物体の周辺に長さ L に比例するので、寸法 L の1乗に比例する力である。したがって、表面張力はマイクロマシンで重要な力となる。マイクロマシンの部品間に液体が入ってくると、表面張力で吸着されて動かなくなることはよく経験される。

ばね定数 k は $k = ES/P$ で与えられる。ここで E , S , P はそれぞれ材料のヤング率、断面積、バネの長さである。したがって k は寸法 L に比例する。重力は L の3乗に比例することより、小さい機械構造では重力に対してばねは剛くなる。スケールを小さくしたマイクロマシンの剛性は

東北大学工学部機械電子工学科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)
E-mail: hane@hane.mech.tohoku.ac.jp

高くなり、機械共振振動数も高くなる。また圧縮と座屈において構造を破壊する力は面積に比例するので、 L の2乗に比例する。したがって重力による破壊は、小さい構造ほど起こりにくくなる。このようにマイクロマシンでは重力に対する剛性は高くなる。

2. 光マイクロマシンの特徴

光を制御するには大きな力を必要としない。光学でよく使うミラーをマイクロマシンで小さく作れば、大きな駆動力は必要ない。小型化したほうが軽量になり、高速動作も可能になる。また半導体レーザーや導波路、レンズなどを同一基板上に配置した光集積回路技術が発達してきており、マイクロマシン技術により、従来面倒であった光軸調整が簡素化されるなどの大きなメリットがある⁴⁾。以下で光マイクロマシンの代表的な特徴をみてみよう。

マイクロミラーは初期より研究が行われている。電気光学効果や音響光学効果を利用した光学素子による光の制御は高速ではあるが、比較的大きな基板を必要とするだけでなく、大きな偏向角が得られない。一方、マイクロマシンで製作できる静電アクチュエーターや電磁アクチュエーターを用いたマイクロミラーは、偏向角を大きくとることができる ($\pm 10^\circ$ 以上)。また慣性が少ないので、マイクロ秒で応答させることもできる。応答速度は共振周波数により制限されるので、応答速度を上げるためには共振周波数を上げることが必要で、軽い質量と硬いばねが必要である。ばねが硬いと偏向角は小さくなるので、ばねはやわらかく保ち、質量をさらに小さくする必要がある。

光ファイバーが家庭までつながる高度光通信システムの実現のためには、光関係の高精度の部品を安く大量に供給する必要がある。レーザー光源とファイバー、ファイバーと光スイッチ等の接続に必要な精密な位置合わせに対して、波長オーダーの立体加工ができるマイクロマシン技術が適している。近年、マイクロミラーを駆動して機械的に光路を切り替える光スイッチ⁵⁾の研究が盛んであるが、漏れ光の少ない切り替えが期待できる。また、シャッターやミラーを小さく製作できるので、高速に応答する。

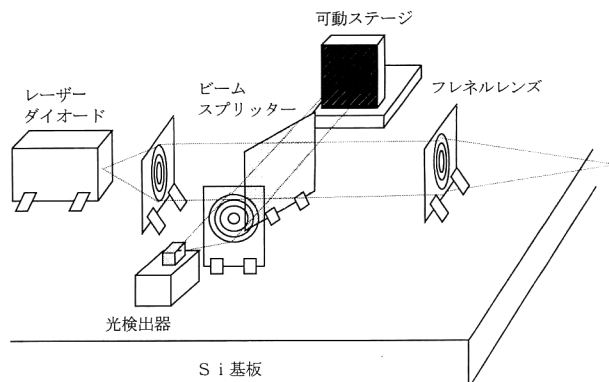


図1 マイクロ光学ベンチの概念。

近年マイクロマシンングにより製作した立体的な微小光学部品とアクチュエーターを集積して、自由空間の光学システムをウェハー上に一体製作する方法が提案されている⁴⁾(図1)。自由空間でマイクロミラーを動かせば、300 nm程度のわずかな移動により反射光の位相を反転できる。このようなシステムには、光軸合わせの機械的な構造もマイクロアクチュエーターと共に組み込めるので、精密機器で問題となる組み立て行程の煩雑さが解決できると期待される。

3. 具体的な特性

3.1 シリコンの機械強度

シリコンの可動構造は、梁の弾性たわみを利用するケースが多い。シリコンの機械定数を表1に示す⁶⁾。破壊にいたるまでに約0.3%の伸びに耐えられるので、大きな変形も実現できる。降伏強度はステンレスの3.5倍である。たとえば2 mm×2 mmの大きさで厚さ2 μ mのシリコン片持ち梁の構造の光スキャナーを考えると、 $\pm 10^\circ$ の走査範囲では、先端が約0.23 mm変位し、最大応力は 3.3×10^7 N/m²となり、ひずみは0.02%である。このとき、内部応力により鏡面のたわみが生じる場合がある。

また、ダイアフラム構造を製作するには、降伏応力より低い引っ張り応力で膜が支持される必要がある。LPCVD(低圧気相成長法)のSi₃N₄薄膜の場合、シリコン基板上

表1 シリコンなどの機械定数。

材 料	ヤング率 (10^{11} N/m ²)	降伏強度 (10^9 N/m ²)	密 度 10 ³ kg/m ³	熱伝導率 (10 ² W/mK)	熱膨張率 (10 ⁻⁶ /K)
Si	1.3[100] 1.9[111] (poly Si 1.6)	7.0	2.3	1.57	2.33
Si ₃ N ₄	3.85 (LPCVD 2.9) (プラズマCVD 2.1)	14.0	3.1	0.19	0.8
ステンレス	2.0	2.1	7.9	0.33	17.3

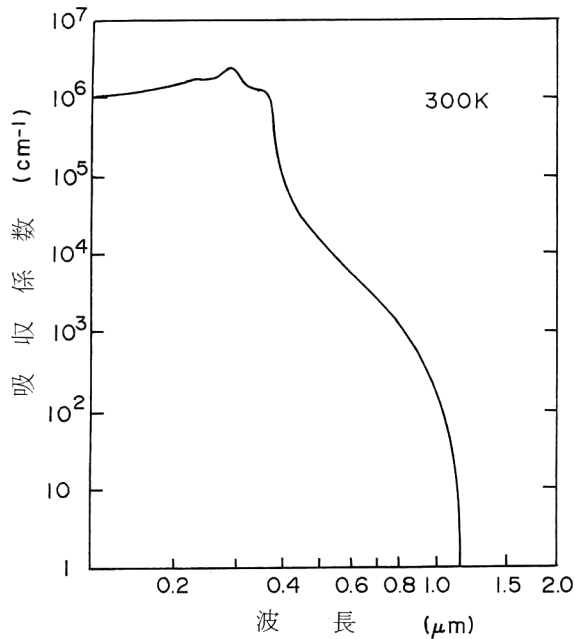


図2 Siの吸収係数の波長依存性.

に堆積させると $1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 程度の引っ張り応力となる。降伏応力が $1.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ であるので、シリコンを取り除いた後、たわみのない自立薄膜が製作できる。

3.2 シリコンの光学特性

図2にシリコンの透過率の波長依存性を示す⁷⁾。吸収係数が $s(\lambda)$ (λ :波長)で厚さが L の物体を透過する光の強度 $I(\lambda)$ は

$$I(\lambda) = I_0 \exp\{-s(\lambda)L\} \quad (2)$$

により与えられる。ここで I_0 は入射光の強度である。近赤外でシリコンはウェハ厚さに対して十分透明である(波長 $1.1 \mu\text{m}$ の赤外線では $s=1.0/\text{cm}$)。したがって、近赤外域用のレンズなどの光学素子として利用できる。たとえば、多層のエッチングにより集光性を向上した赤外線検出用シリコンフレネルレンズが製作されている⁸⁾。一方、可視域に近くなると吸収係数が大きくなる。たとえば波長 700 nm においては $2 \times 10^4/\text{cm}$ である。この波長域で50%以上の透過率を得るためには、シリコンの厚さは $3.5 \mu\text{m}$ 以下となる。シリコンの薄膜化については異方性エッチングの技術を用いて実現できる。実際に、薄膜化された光検出器などが製作されている⁹⁾。

3.3 静電気による駆動

光マイクロマシンにおいても、他のマイクロマシンと同様に静電気、磁気、熱のマイクロアクチュエーターが用いられる。加えて、小さい力であるが、微粒子の補足、移動、回転に光圧力が用いられる。静電気による引力は、光マイクロマシンにおいても最もよく用いられる力である。2つの平行平板型アクチュエーターに働く力は

$$F = \frac{\epsilon A V^2}{2d^2} \quad (3)$$

により与えられる。ここで、 d , A , V , ϵ はそれぞれ間隙、面積、電圧、誘電率である。たとえば光スキャナーの鏡として、大きさ $100 \mu\text{m}$ 角でミラーと電極の間隙を $10 \mu\text{m}$ とすると、 10 V の電圧で $4 \mu\text{gf}$ となる。アクチュエーターは種々の応用に対していくつかのタイプが発達している。詳細については文献10)を参照していただきたい。

3.4 光圧力

光が物質に吸収されるときと屈折されるときには光子運動量が保存されるため、光の放射圧が発生し、光圧力となる¹¹⁾。レーザー光の鏡による反射を考えると、光子の運動量 p が $p=h/\lambda$ (h :プランク定数)であるので、1個の光子の反射により入射光の運動量の2倍 ($2h/\lambda$) の運動量が鏡に与えられる。光の出力 W の場合、働く力 F は単位時間あたりの光子数より

$$F = \frac{2h}{\lambda} \frac{W\lambda}{hc} = \frac{2W}{c} \quad (4)$$

で与えられる。 c は光速である。たとえば強度 1 mW のレーザー光の場合、 6.6 pN の力を鏡に与える。光圧力は微小であるが、細胞レベルや分子レベルの操作に用いられている。

3.5 マイクロミラーの共振周波数

マイクロミラーは弾性ヒンジにより支えられたねじれ振動子の構造となる。応答速度や繰り返し周波数の上限は共振周波数により与えられる。シリコンマイクロミラーについて、そのばね定数と共振周波数の関係を調べてみよう。弾性ヒンジ部分の質量を無視した場合、共振周波数 f は

$$f = \frac{t}{Lc} \sqrt{\frac{3aBG}{W\rho LcL_T}} \quad (5)$$

により与えられる。ここで厚さ t , ミラーの幅 W , 長さ Lc , ヒンジの長さ L_T , ヒンジの幅 a , 剛性率 G , 密度 ρ とする。 B はヒンジ部の厚さと幅により決まるねじればね定数で、その比が1のとき $B=0.14$ である。図3にシリコンマイクロミラーのばね定数と共振周波数の関係を示す。図中の破線はヒンジ部分の長さ L_T を変えて式(5)より求めた結果である。100 kHz以上の高い共振周波数が得られている。ヒンジ部の質量を考えると共振周波数は低下するが、その影響も考慮し、数値計算ソフトで求めた結果を図中に実線で示す。

3.6 可動ファブリー・ペロー構造

自立した構造が製作できるので、空隙と微細構造の屈折率差を利用した素子や自立構造の弾性変形を利用した素子が実現できる。図4の空隙のあるブリッジ構造はファブリー

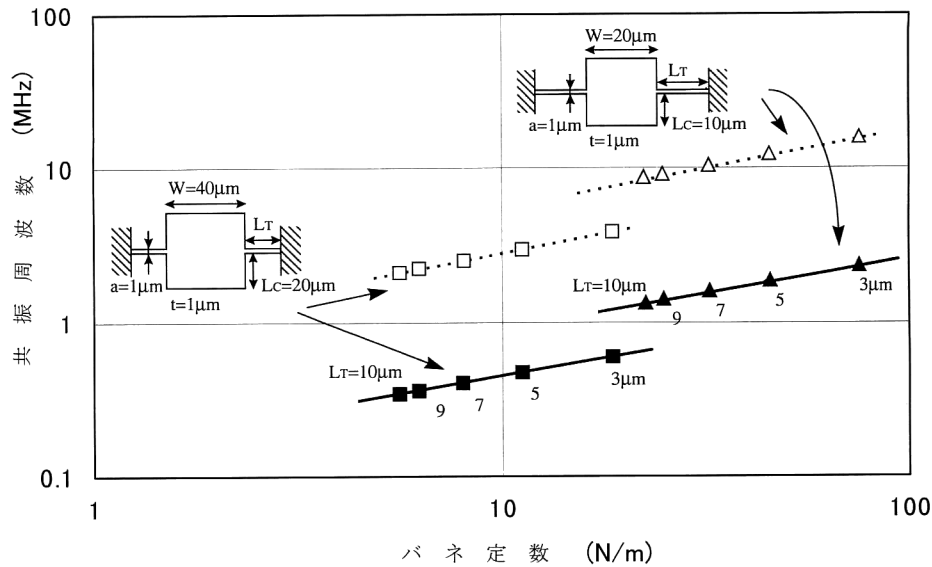


図3 マイクロミラーのばね定数と共振周波数の関係 (ヒンジ部の長さ L_r をパラメータとした)。

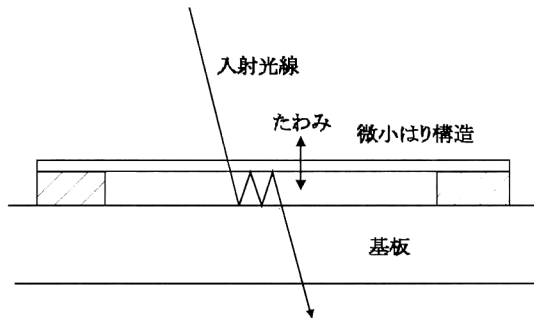


図4 マイクロファブリー・ペロー構造。

ー・ペロー形の波長フィルター、光スイッチ、変調器として提案されている。空隙部分はエッチングの選択性を利用して薄膜を重ねて堆積した後、犠牲層エッチングにより取り除かれる。光強度反射率 R 、透過率 T の反射鏡で構成されるファブリー・ペロー共振器の透過率は、透過光の強度を I_T 、入射光の強度を I_0 として、

$$\frac{I_T}{I_0} = \left(\frac{T}{1-R} \right)^2 \frac{1}{1+F \sin^2(\phi)} \quad (6)$$

で与えられる。ここで $F=4R/(1-R)^2$ 、垂直入射で $\phi=4\pi d/\lambda$ である (d は空隙)。空隙 d を変えることで透過率を変化させる。空隙を変えるための駆動方法としては静電引力が用いられる場合が多い。機械的な構造であるが、サイズが数十 μm であるので 10 MHz 近くの機械共振周波数となる。したがって 1 MHz オーダーの光変調を行うことができる。この構造は面発光半導体レーザーの発振波長の制御方法としても期待されている。

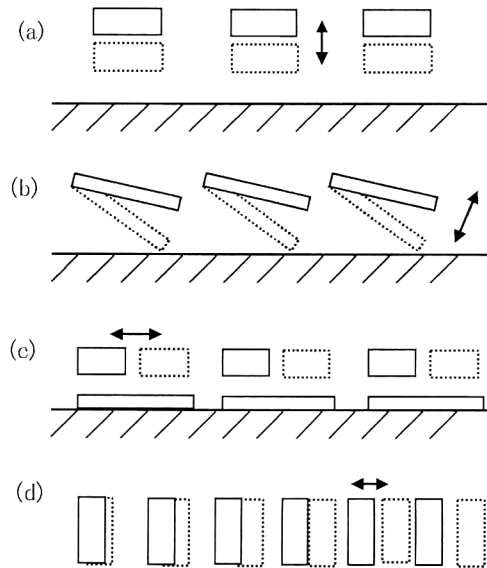
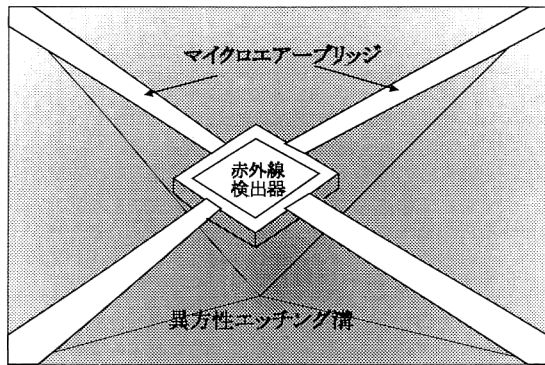


図5 可変回折格子の構造。(a) 空隙可変、(b) 傾き可変、(c) 面内変位、(d) 周期可変。

3.7 可変回折格子

アクチュエーターを組み込んだ光学素子のひとつとして可変回折格子が提案されている。図5にいくつかのタイプの格子断面形状を示す。反射型格子の場合、位相格子として動作する。位相差は格子の高さにより生じる。(a)は格子の高さを変化して回折効率に変化する¹²⁾。(b)では反射鏡の傾きが変化し¹³⁾、(c)では格子の面内変位により回折効率を変える¹²⁾。(d)では格子の周期を変えて透過型格子の透過帯域や回折角を変える¹⁴⁾。反射型位相格子の位相分布を $\phi(x)$ とすると、周期関数 (周期 p) であるのでフーリエ級数に展開できて



シリコン基板

図6 熱型赤外センサーの基本構造。

$$\Phi(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} C_j \exp(i\Pi jx/p) \quad (7)$$

で表現できる。反射直後の光波の空間分布は $\exp(i\phi(x))$ で与えられ、 m 次回折光の振幅 U_m は反射波のフーリエ係数で与えられる。

$$U_m = \int_{-p/2}^{p/2} \exp(i\Phi(x)) \exp(-i2\Pi mx/p) dx \quad (8)$$

回折格子の形状変化が C_k の変化となり U_m を変える。

3.8 ノイズと位置決め精度

図1に示したような自由空間の光学システムをマイクロ化した“マイクロ光学ベンチ”が提案されている⁴⁾。構造を小さくすることは、集積化システムを一体製作できることに加えて、光学においてはさらに有利な点がある。マイクロ化してサイズを小さくすることができると、共振周波数が高くなるので振動に応答する帯域も高くなり、低周波ノイズの伝達特性が低下する。したがって床からの機械振動ノイズを低減できる。また、熱膨張は長さに比例するので、従来の光学系のサイズより1桁以上小さいマイクロマシンの構造では、熱膨張の影響もその割合で小さくすることができる。

これらのシステムの位置決め精度はリソグラフィ加工の精度に依存する。リソグラフィ加工の絶対的な誤差は小さいが、構造も小さいので相対的な誤差は必ずしも小さくない。弾性ヒンジを利用する光スキャナーでは、位置や角度の誤差はサイズに比例して小さくできる。大きな回転角や変位を発生するため、リンク型ヒンジの構造や回転軸を用いる構造では、最小寸法がリソグラフィのマスク精度や犠牲層薄膜の厚さで決まる。したがってリンク型のヒンジでは、サイズの縮小により角度を決める精度が劣化する。しかし、マイクロアクチュエーターにより予圧をかける構造や機械的なラッチを用いれば改善できる。位置決め精度に関しては接触部分の表面粗さが問題となる。表面粗

さが大きいと位置決めの接触点の高さが変わり、光学系の光軸誤差を発生させる。この問題については、まだ十分な検討がなされておらず、今後の研究が期待される。

きわめて小さい機械構造においては、外乱からのノイズがなくとも熱ゆらぎにより位置誤差が発生する。片持ち梁の振動ノイズによるエネルギー $k_c \langle X_{AB}^2 \rangle / 2$ と熱エネルギー $k_B T / 2$ が等しいとにおいて

$$\langle X_{AB}^2 \rangle = k_B T / k_c \quad (9)$$

ここで $\langle X_{AB}^2 \rangle$, k_c , k_B , T はそれぞれ熱振動振幅の2乗平均値、片持ち梁のばね定数、ボルツマン定数、絶対温度である。シリコンの片持ち梁構造で長さ $500 \mu\text{m}$ 、幅 $500 \mu\text{m}$ 、厚さ $1 \mu\text{m}$ の場合、室温で振動振幅は約 0.15 nm となる。

3.9 熱絶縁と赤外線センサー

熱型赤外線センサーの基本的な構造を図6に示す。熱型赤外線センサーにおいては、感度の向上のため素子を小さくし、かつ熱絶縁をよくすることが重要である。角周波数 ω で変化する発熱 $W = W_0 \exp(i\omega t)$ に対して温度変化 ΔT は

$$\Delta T = \frac{2W_0}{G\sqrt{1+\tau^2\omega^2}} \quad (10)$$

となる¹⁵⁾。ここで $\tau = C/G$ 、 C は素子の熱容量、 G は熱コンダクタンスである。センサーの感度向上と高速応答のためには、 C を小さくし、 G をいっそう小さくする必要がある。熱絶縁には空隙を用いた立体構造が用いられる。自立薄膜によりセンサー部の上下方向への熱伝導を抑える。また横方向への熱伝導は細いブリッジ構造のサスペンションにより支持し、熱伝導を抑える。さらにこれらの構造はガラスとシリコンの陽極接合技術などにより、真空中に封じられる。シリコンの $10 \mu\text{m}$ 厚さの自立薄膜構造の場合、裏面への熱の拡散時間はおおよそ $0.4 \mu\text{s}$ となる。マイクロ化により速い熱応答が得られる。

4. おわりに

本稿では光マイクロマシンの背景にある力学的な物理について説明した。実際に小さい構造を製作すると、水分の吸着により構造が壊れたり、落としても意外に丈夫であるなど、スケール則から予測される現象に出会う。物理的な特性をよく考慮した設計に基づき、新しい能動的な光学システムが開発されることを期待したい。

文 献

- 1) L. S. Fan, Y.-C. Tai and R. S. Muller: "IC-processed electrostatic micromotors," Sens. Actuators, **20** (1989) 41-48.

- 2) 「電気学会誌」特集：マイクロマシン, **177** (1997) 823-842.
- 3) 下山 勲：“マイクロシステムの物理学”, 電気学会誌, **177** (1997) 840-842.
- 4) L. Y. Lin, S. S. Lee, M. C. Wu and K. S. J. Pister: “Micromachined integrated optics for free space interconnections,” *IEEE MEMS Workshop* (1995) pp. 77-82.
- 5) F. Chollet, M. de Labachellerie and H. Fujita: “Electromechanically actuated evanescent optical switch and polarization independent attenuator,” *IEEE MEMS Workshop* (1998) pp. 476-481.
- 6) 五十嵐伊勢美：“シリコンの物性”, マイクロオプトメカトロニクスハンドブック, 五十嵐伊勢美, 江刺正喜, 藤田博之編 (朝倉書店, 1997) p. 182.
- 7) S. M. Sze: *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, New York, 1981) p. 42.
- 8) K. Fujikawa, G. Hirakawa, T. Shiono and K. Nomura: “Optical properties of a Si binary optic microlens for infrared ray,” *IEEE MEMS Workshop* (1997) pp. 360-365.
- 9) M. Sasaki, H. Takebe and K. Hane: “Transparent Si photodiode,” *Tech. Dig. of Int. Conf. Opt. MEMS (MOEMS 97)* (1997) pp. 62-66.
- 10) “マイクロアクチュエータ”, マイクロオプトメカトロニクスハンドブック, 五十嵐伊勢美, 江刺正喜, 藤田博之編 (朝倉書店, 1997) pp. 253-320.
- 11) 日暮栄治：“マイクロ光アクチュエーター”, *O plus E*, **20** (1998) 43-49.
- 12) D. E. Sene, J. W. Grantham, V. M. Bright and T. H. Comtois: “Development and characterization of micro-mechanical gratings for optical modulation,” *IEEE MEMS Workshop* (1996) pp.222-227.
- 13) D. M. Burns and V. M. Bright: “Micro-electro-mechanical variable blaze gratings,” *IEEE MEMS Workshop* (1997) pp. 55-60.
- 14) T. R. Ohnstein, J. D. Zook, H. B. French, H. Guckel, T. Earles, J. Klein and P. Mangat: “Tunable IR filters with integral electromagnetic actuators,” *1996 Solid-State Sensor and Actuator Workshop* (1996) pp.196-199.
- 15) 木村光照：“熱型赤外線センサー”, オプトロニクス, **129** (1992) 104-111.

(1998年2月13日受理)