マイクロマシンの光デバイスへの応用

Micro-machines Application to Optical Devices

上西 祐司*

1. はじめに

電子回路がトランジスタの発明とともに LSI 化の道を辿り、半導体レーザ (LD) の出現により光デバイスの集積化が進展してきた。さらに現在、機構部品の LSI 化がマイクロマシン技術として実現し、その研究開発が精力的に行われている。

マイクロマシンは、LSI 技術を用いて文字どおり微小機械をウェハ上に実現しようとするものである。シリコン (Si) を用いてマイクロ機構部品を作製する試みは、まず電子回路と同一ウェハ上に機構部品を集積化したセンサーを実現しようとする研究から始まった^{1),2)}。こうしたシリコンウェハ上への機構部品作製技術はマイクロマシニング技術と呼ばれ、パッシブな機構部品のみならず、アクティブなマイクロアクチュエータも作製されるようになり、1980年代末に UC バークレイ大とマサチューセッツ工科大から静電マイクロモータが相次いで発表され^{3),4)}、マイクロマシン研究ブームが訪れ、これまでにさまざまなタイプのマイクロマシンが発表されている⁵⁾。

マイクロマシンは一般に発生力が小さく、その変位量も高々数 μm と微量である。しかし、そのマイクロなサイズと高精度な動きは微小な変位量が要求される光波の制御には好都合である。同時に Si は LD などの光デバイス実装基板としても広く用いられており、実装基板上にマイクロマシンを集積化することにより、各種光システム・モジュールなど

の大幅な小型化と多機能化、さらに低価格化が期待できる。

本報告では、こうしたマイクロマシンを光デバイスに応用した微小光機構デバイスとして、Si のバルクマイクロマシニング技術で作製した微小光学素子およびニッケルマイクロマシニング技術で作製したマイクロミラーについて紹介する。

2. シリコンマイクロマシニングによる微小光学素子⁶⁾

水酸化カリウム (KOH) 溶液を用いた (110) Si ウ

Fig.1 Silicon micromachined optical components for free-space micro-optics.

* Yuji Uenishi

日本電信電話(株)光エレクトロニクス研究所/ Opto-electronics Research Laboratories. NTT

Fig.2 SEM photo of a high-aspect silicon plate.

Fig.3 Micro Mach-Zehnder interferometer.

エハの異方性エッチングは他に類を見ないほどの垂直かつ高アスペクトな形状が得られ、そのエッチング側面である(111)結晶面は非常に平滑な面となる^{7),8)}。この特長を生かしてマイクロ素子としては比較的大面積(100平方ミクロン以上)な垂直鏡面を持つSiプレートが作製できる。このSiプレートは単独で、あるいはいくつかを組み合わせることにより、Fig.1に示すようなフリースペース用の微小光学素子への応用が考えられる。こ

Fig.4 Schematic drawing of tunable laser diode with silicon micromirror.

れらのプレートの側面は全て結晶軸<111>方向に揃っているため、完全な平行性を保っており、面倒な手動での平行調整は不要である。このような平行性はエタロンなどの光学素子においては大変重要である。

Fig.2は作製したSi基板上的のハーフミラーの走査電子顕微鏡(SEM)写真である。板厚は約1μm、高さは約200μmである。板厚が薄いため、写真では向こう側の構造物の稜線が影となって見えている。Fig.3はSiプレートをマッハ・ツェンダー干渉計状に配置したものである。1枚の板の厚さは約7μm、高さが約150μm、長さが500μmである。レーザビームが透過・反射している様子が観察できる。

この(110)Siウェハの異方性エッチングによる高アスペクト加工により、たとえばmmオーダーの基板横方向に柔らかい片持ち梁が作製でき、この構造を利用して低電圧駆動の静電アクチュエータが実現できる。ここでは(110)Siウェハの異方性エッチングに加え、Siとガラス基板の静電接合技術を用いて実現したLD外部共振器用静電駆動マイクロミラーを紹介する。

LD実装した静電駆動型マイクロミラーの模式図をFig.4に示す。長さ約1mmの片持ち梁を挟むように固定電極ブロックが配置されている。この電極と可動梁との間に電圧を印加することにより、可動梁が静電力で曲げられる。電極の上隣にはストッパーが設けられ、片持ち梁と電極ブロックとが電氣的にショートしないようにしている。この片持ち梁の(111)側面が外部ミラーとなる。変位量が小さいので、ほぼLD劈開面に平行なままミラー面が駆動する。また、レンズを用いないため、LDはミラーに近接してボンディングする。

デバイスのSEM写真をFig.5に示す。可動ミラーである片持ち梁は長さ約1,200μm、幅8μm、高さ130μmで、アクチュエータ電極間ギャップは7μmである。ま

Fig.5 SEM photo of the tunable LD with silicon micromirror.

Fig.6 Si mirror deflection as a function of the driving voltage.

Fig.7 Wavelength tunability of the LD with silicon micromirror.

た、LD 端面と外部ミラー面との距離は約 $10\mu\text{m}$ である。

マイクロミラー変位量と電圧との計算結果を Fig.6 に示す。図は典型的な平板電極型のアクチュエータ特性を示している。LD 端面とミラーとの間隔である外部共振器長の変分は $0\sim 0.5\mu\text{m}$ の範囲で連続制御でき、電圧

がしきい電圧 (V_{th} =約 13V) 以上になると静電力が急激に増え、梁は電極に完全に引き付けられる。この時の外部共振器長の変分は計算値で $1.43\mu\text{m}$ となる。

マイクロミラーの変位に伴い LD 発振波長が変化する様子を Fig.7 に示す。ここでは LD 端面に無反射コートを施していないため、LD の両劈開面で構成された共振器長 (約 $340\mu\text{m}$) で決まるファブリペローモード間隔 (0.3nm) ごとの離散的な縦モード変化が得られた。そのトータルの波長可変範囲は約 3nm となった。 0.3nm ごとの波長選択が行えるので、外部ミラーの変位精度としては少なくとも 40nm 以下と見込まれる。

3. ニッケルマイクロマシニング技術によるマイクロ駆動ミラー

Si ウェハ表面上に微小光学素子を実現するためには、基板表面と平行方向に走る光ビームを扱うのに十分広い側面を持つ高アスペクトな構造体が必要である。めっき技術はこうした厚膜を比較的容易に形成できる技術のひとつである。めっき技術による構造体の作製法としては基板上にレジストなどで鋳型を作製し、その鋳型にめっき膜を堆積後、鋳型部分を取り除くという手法が一般的である。さらに構造体となる金属が Si などに比べ光学的にも高い反射率が得られることから、ミラー系の微小光学素子に適している。

Ni マイクロミラーの構成を Fig.8 に示す。ミラーはチップ中心部の先端にあり、Ni 梁 (パネ) で両側に支えられている。駆動部には櫛形電極を持つ静電駆動マイクロアクチュエータ¹⁰⁾を採用している。櫛形電極静電駆動マイクロアクチュエータの特長は電圧の二乗に比例した変位が得られ電圧制御が容易なこと、櫛の長さに見合った変位が得られること、ヒステリシスがないなどがあげられる。

作製したマイクロミラーの SEM 写真を Fig.9 に示す。

Fig.8 Schematic drawing of the nickel micromirror.

Fig.9 SEM photo of the nickel micromirror.

Fig.10 Ni mirror displacement as a function of the squared driving voltage.

ミラーの大きさは縦 $20\mu\text{m}$ ×横 $50\mu\text{m}$ 、梁の長さは全長約 1.5mm 、櫛の長さが $20\mu\text{m}$ である。ミラーの変位特性をFig.10に示す。横軸が電圧の二乗ではほぼこれに比例した変位となり、 $\pm 25\text{V}$ で約 $10\mu\text{m}$ の変位量が得られた。また、電圧を細かく制御することによりナノメートルオーダーの変位精度が見込める。

4. ま と め

マイクロマシンの高精度な動きを積極的に光波制御に応用した例として、Si マイクロマシニングによるフリースペース用微小光学素子とNi マイクロマシニングによるマイクロミラーを紹介した。Si 基板上に直接こうした光学素子を作り込むことにより光学系特有の細かい光軸調整が不要になるだけでなく、光システムとしての集積度の大幅な向上と可動素子による多機能化が図れる。今後の課題としては構造物の厚膜化、高アスペクト化による大面積化、ミラー面の平滑化、そして光学素子を制御するアクチュエータの高性能化があげられる。

マイクロマシニング技術の登場により、Si が半導体材料としてだけでなく、機構部品材料、さらに光学材料

としてもその用途が広がりつつあり、文字どおり定盤の光学系が全て指先に載るようなSi 基板上の微小光学システムの実現が期待される。

参 考 文 献

- 1) "Special issue on three-dimensional device structures," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-25, No. 10, (1978).
- 2) "Special issue on solid-state sensors, actuator, and interface electronics," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-26, No.12, (1979).
- 3) L. S. Fan, Y. C. Tai, and R. S. Muller: "IC-Processed Electrostatic Micro-Motors," in Technical Digest, IEEE Int. Electron Device Meeting, San Francisco, CA, (Dec. 1988), pp. 666~669.
- 4) M. Mehregany, S. F. Bart, L. S. Tavrow, J. H. Lang, S. D. Senturia, and M. F. Schlecht: "A Study of Three Microfabricated Variable-Capacitance Motors," Transducer '89 (June 1989), 講演番号 B5. 3.
- 5) たとえば、「動くシリコンへ、Si マイクロマシニング技術」, 日経エレクトロニクス, 1989年8月21日号, No. 480, pp. 125~155.
- 6) Y. Uenishi, M. Tsugai, and M. Mehregany: "Micro-opto mechanical devices fabricated by anisotropic etching of (110) silicon," J. Micromech. Microeng., Vol. 5, (1995), pp. 305~312.
- 7) D. L. Kendall: "Vertical etching of silicon at very high aspect ratios," Ann. Rev. Mater. Sci., (1979), pp. 373~403.
- 8) H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, and H. Baumgartel: "Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions," J. Electrochem. Soc., Vol. 137, No. 11, (1990), pp. 3612~3626.
- 9) Y. Uenishi, M. Tsugai, and M. Mehregany: "Hybrid-integrated micromirror of laser-diode fabricated by (110) silicon micromachining," Electroniocs Letters, Vol. 31, (1995), pp. 965~966.
- 10) W. C. Tang: "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," Sensors and Actuators, Vol. 20, (1989), pp. 25~32.

【執筆 者 紹 介】

上西祐司 (うえにし ゆうじ)

1984年、大阪大学・工学研究科修士課程了。同年、電電公社(現 NTT)に入社。現在、光マイクロマシンの研究開発に従事。IEEE, 応用物理学会会員。