

微小なマッハツェンダー干渉計による マイクロアクチュエータ制御用変位センサー

A Displacement Sensor for Control of Microactuators
using Mach-Zehnder Interferometer

斉 藤 秀 典*・藤 田 博 之*

Hidenori SAITO and Hiroyuki FUJITA

1. は じ め に

最近、半導体作製技術を用いたマイクロマシーニングにより静電モータやくし型アクチュエータ等さまざまなアクチュエータが作製されている。従来、これらのアクチュエータの制御はほとんどオープンループ制御でのみ使われており、簡単な位置制御の試みすら行われていない。しかし将来マイクロアクチュエータに所望の動作をさせるためにはアクチュエータの動きを検出するセンサーを用いてフィードバック制御を行う必要がある。

ここで微小な領域でどのくらいの分解能で変位を検出できるとどのような応用があるのか考えてみる。

マイクロアクチュエータの一つの応用例である STM (走査トンネル顕微鏡) ではトンネル電流を制御する探針を駆動する微動機構 (z 軸) の精度は 10pm, 試料表面の走査に必要な微動機構 (x, y 軸) の精度は 100pm 程度であるとされている¹⁾。また、くし型アクチュエータの可動範囲は数 μm であり、これを物体の把持や光コネクタの位置合わせなどに用いるためには数 10nm 程度の位置制御が必要になってくると考えられる。

このような精度を再現性良く得るためには、開ループ制御では、不十分である。したがって、STM などへマイクロアクチュエータを応用するためには、マイクロアクチュエータのフィードバック制御が不可欠になる。そこで、分解能が数 10nm でダイナミックレンジが数 μm 程度の集積化可能なセンサーが必要になる。一方、これまでに作製された変位センサーには、ダイナミックレンジを大きくとれない、ドリフトや温度補正が必要、などの難点があった。

本研究では、このような性能を持つセンサーを実現するために、3 次元光導波路を用いてマイクロアクチュエータと一体集積化可能な変位センサーの設計、試作を行った。

*東京大学生産技術研究所 第 3 部

また、このようなセンサーを実現するためには、マイクロマシーニングと微小光学を融合して、それぞれの技術を生かさなければならぬと考えられる。両者の結合により、マイクロメカノプティクスと呼ばれる新しい可能性が広がるであろう。

2. センサーの原理

今回試作した 3 次元光導波路を用いたマイクロアクチュエータのための変位センサーの原理について説明する。全体の概略図を図 1 に示す。

図のように光 (レーザー光) が 3 次元光導波路に入ってきて、分岐点で光導波路 (A) と (B) に分かれる。光導波路 (A) はマイクロアクチュエータによって引っ張られる両持ち梁 (基板から離れている) の内部を通る。光導波路 (B) は基板上に固定されている。両持ち梁はマイクロアクチュエータに引っ張られて歪み、その長さがわずかに変化する。このとき光導波路 (A) と (B) には光路差が生じる。光導波路 (A) と (B) は再び分岐点で結合し、干渉して光出力となる。したがって両持ち梁がまったく歪んでいないとき光出力は最大となり、両持ち梁の歪がちょうどレーザー光の光導波路中での波長の半分になると光出力は最小になる。よって、マイクロアクチュエータの変位 (歪) を光強度によって検出することができる。これはマッハツェンダー干渉計と同じ原理である。

マイクロアクチュエータの両持ち梁が理想的に歪むとしたとき、マイクロアクチュエータの変位 Δx と出力光の強度 I には、

$$I \propto \cos^2 \left(\frac{4(\Delta x)^2}{\lambda l} \right) \quad (1)$$

なる関係がある。

図 2 に予想されるマイクロアクチュエータの変位 Δx と

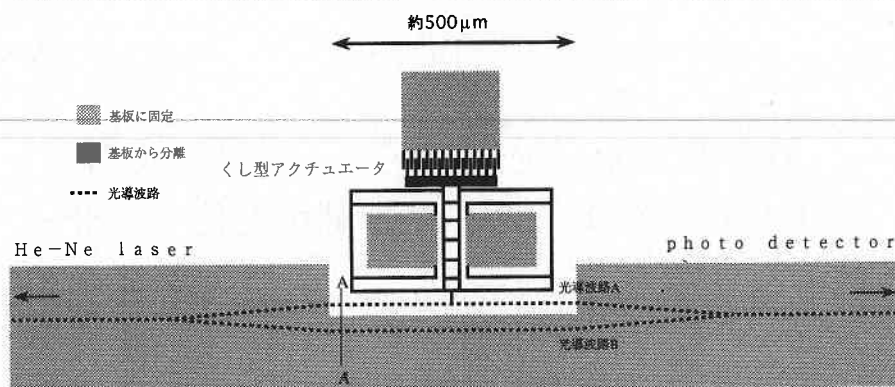


図1 センサーの概略図

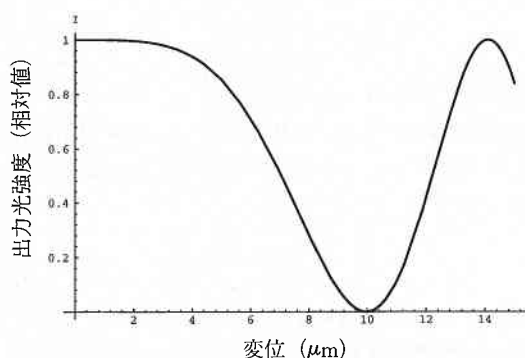


図2 マイクロアクチュエータの変位と出力光強度の関係(計算値)

出力光強度 I の関係を示した。この出力光強度を最大値の $1/100$ 程度の精度で測定できればマイクロアクチュエータの変位を数 10nm の分解能で測定することができる。

3. 光 導 波 路

3.1 SiON 光導波路の光学的特性

本研究では光導波路の材料として SiON (Silicon OxiNitride) を用いた。その理由として、

- ・ Si 系の材料であるので半導体マイクロマシーニングとコンパチブルなプロセスを行うことができる
- ・ SiON の O と N の組成を変化させることによって屈折率を制御することができる
- ・ スパッタ法によって簡単に成膜できる²⁾

などの利点を有するからである。

SiON はその O と N の組成 (比率) によって SiO_2 (屈折率 $n=1.46$) と Si_3N_4 ($n=2.0$) の間の屈折率になる。すなわち O が多いほど屈折率は 1.46 に近づき、N が多いほど 2 に近づく。

SiON のスパッタには高周波 (RF) スパッタリング法を用いた。反応ガスは Ar と N_2 である。反応ガスが Ar のみであると SiON 薄膜は不透明になってしまう。また

Ar と N_2 の分圧比を変えてスパッタした SiON 薄膜の屈折率を測定したところ、その分圧比によって薄膜の屈折率は変化した。これは、反応性スパッタリングが起きているためであると考えられる³⁾。

3.2 3次元光導波路の設計

3次元光導波路では導波層 (コア: 屈折率 n_f) のまわりを上下左右方向にクラッド (n_c) で覆い、光を厚み方向と、横方向にも閉じこめて導波させることができる。今回はこの3次元光導波路で干渉計を構成するため、3次元光導波路はただ1つのモードのみを導波させるようにしなければならない。それは多くのモードを導波する3次元光導波路を用いると、その光導波路内での光の波長が1つに定まらないことになるからである。これを光導波路のシングルモード化という。たとえば $n_f=1.52$, $n_c=1.47$, コア厚 $T=0.25\mu\text{m}$, コア幅 $W=2\mu\text{m}$ としたとき3次元光導波路はシングルモードとなる。

次に干渉計に不可欠な分岐光導波路の特性について考える。これにはパワーを分割したり、モードを整形したりする働きがある。分岐光導波路は分岐点での光パワーの損失があり、分岐角 θ により変化する。

前述のシングルモード3次元導波路では分岐角が $3 \sim 4$ 度付近で出力光パワーが最大になる。

以上のような計算によって今回試作した3次元光導波路の各パラメータを決定した。

4. マイクロアクチュエータ

本研究では変位測定の対象となるマイクロアクチュエータとして、表面マイクロマシーニングを用いて作製できるくし型アクチュエータを選んだ。

4.1 SiO_2 の内部圧縮応力の低減

本研究ではマイクロアクチュエータの構造材料として

SiO₂ を用いているが、SiO₂ 薄膜は圧縮性の内部応力が入る。一般に圧縮性の内部応力が入った材料で両持ち梁などの構造を作ると梁は座屈 (buckle) してしまう。したがってその圧縮応力を極力低減する必要があり、その低減法を試みた。

SiO₂ の成膜法によって圧縮応力の大きさが異なる。SiO₂ の成膜には、Si 基板を熱酸化する方法やスパッタによって堆積する方法などがある。この両者について圧縮応力の大きさを調べたところ、緻密な熱酸化膜に比べて多孔質的なスパッタ膜のほうが圧縮応力が入りにくいことを確かめた。

また、SiO₂ をスパッタにより成膜するときスパッタ中の反応ガス圧力が高いほど、圧縮応力が緩和される傾向があることを確認した。

これらの結果より、くし型マイクロアクチュエータの構造材料となる SiO₂ は、反応ガス圧を高くして (反応ガス: Ar, 圧力: 3×10^{-2} Torr 程度)、スパッタ法によって成膜することとした。また、スパッタ法によって成膜された SiO₂ 薄膜の光学的特性についてその屈折率を測定し、反応ガス圧を高くしてスパッタされた SiO₂ 薄膜についてもこれを光導波路のクラッドおよび基板として用いることができることを確認した。

4.2 マイクロアクチュエータのメタライゼーション

マイクロアクチュエータの構造材料は絶縁体 (SiO₂) であるので、これを静電力で駆動するためには、上面と側面を導電性の材料 (金属) で覆う必要がある。これをメタライゼーションという。側面にも薄膜を付着するには、スパッタ法が有効である。したがって、マイクロアクチュエータにリリース後、スパッタによって金属 (Cr/Cu) を堆積した。これにより、マイクロアクチュエータは導電性を持つようになり、静電力による駆動が可能になった。

5. 作製工程および試作結果

5.1 作製プロセス

図 3 にこのセンサーの作製プロセスを示す。これは図 1 の A-A' 断面の様子を表している。

- (a) スパッタにより Si 基板上に SiO₂, SiON を堆積する。
- (b) Ni を蒸着し、フォトレジスト (以下 P.R.) を塗布して、露光、現像する。Ni をエッチングし、P.R. を剥離する。
- (c) Ni をマスクにして SiON をすべてと SiO₂ の一部を RIE (反応性イオンエッチング) により異方性エッチング (エッチング断面が基板と垂直になる) する。

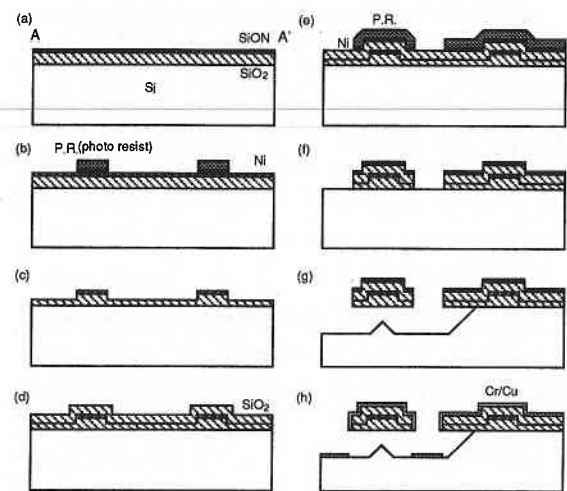


図 3 作製プロセス

(d) Ni を剥離して SiO₂ をスパッタにより堆積する。ここまでの工程で 3 次元光導波路が形成される。以下はマイクロアクチュエータを作製するためのプロセスとなる。

- (e) Ni を蒸着し、P.R. を塗布し、アライメント、露光、現像する。Ni をエッチングして P.R. を剥離する。
- (f) Ni をマスクにして SiO₂ を RIE で異方性エッチングする。
- (g) 基板の Si を RIE で等方性エッチング (結晶方位面等によらず一様に進むエッチング) し、リリース (構造物を基板から分離) する。
- (h) スパッタにより Cr/Cu を堆積する。Cr は後につける Cu の密着性をよくするためにつける。また Cu はマイクロアクチュエータに導電性を持たせるためにつける。

5.2 マイクロアクチュエータの製作および駆動特性

図 4 に製作したくし型マイクロアクチュエータの SEM 写真を示した。マイクロアクチュエータのサスペンション部分などは SiO₂ の内部圧縮応力のために撓んでいるのが

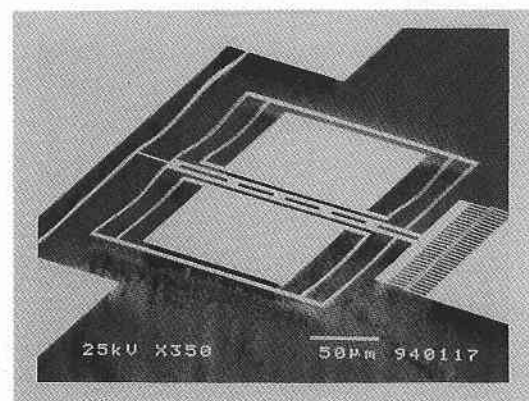


図 4 試作したマイクロアクチュエータ

研 究 速 報

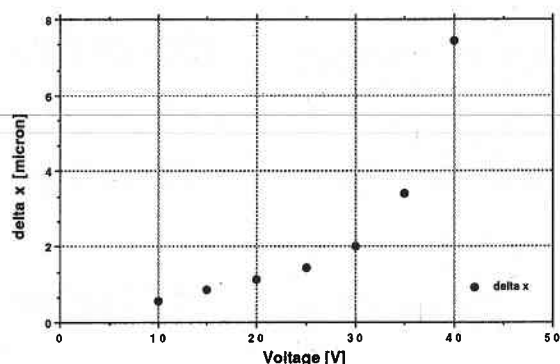


図5 マイクロアクチュエータの駆動電圧と変位の関係 (実測値)

わかる。

図5にマイクロアクチュエータの駆動電圧と変位の関係を示した。駆動電圧を上げると、急に変位が大きくなる。これはアクチュエータのサスペンションに内部圧縮応力が入っているために、そのばね定数が非線形になっているためと考えられる。

5.3 3次元光導波路の特性測定結果

3次元光導波路を作製して、その光学的な特性を測定した。測定はプリズム結合法を用いて行った。その結果、3次元光導波路を励振できた。その根拠は、

- ・3次元光導波路のパターンのストリークが観察された
- ・レーザビームの入射角を変化させると、角度に対して敏感にストリークが現れた
- ・光導波路の分岐点で輝点が観察された

である。しかし、出力プリズムを結合して、出力を検出するのは困難であった。その原因としては、

- ・プリズム表面が粗れている
- ・プリズムで光導波路を押えた時に3次元光導波路を破壊してしまう

などが考えられる。これを解決するためには、3次元光導波路の端面から光出力を得るのがよいと考えられる。

6. ま と め

従来の変位センサーのさまざまな問題点を解決するために、マイクロなマッハツェンダー干渉計を原理とする変位センサーを提案した。また、制御の対象はくし型静電マイクロアクチュエータとした。

光導波路に関して、

- ・光導波路の材料としては、Si半導体プロセスとコンパチブルなプロセスが行えるSiONを選んだ。
- ・SiON-SiO₂光導波路を作製し、その光学的特性を測定した。
- ・これをもとにして、シングルモード3次元光導波路、分岐光導波路を設計した。
- ・3次元光導波路を作製して、光を導波できることを確認した。

また、マイクロアクチュエータと光導波路を集積化したデバイスに関しては、

- ・両者を同時に作製できる材料とプロセスを選定し、デバイスの構造とプロセス条件を改善して、SiO₂の内部圧縮応力の問題を軽減した。
- ・マイクロアクチュエータの駆動特性を測定した。また、光導波路を歪ませることができることを確認した。

を挙げることができる。

謝 辞

光導波路の測定において、お世話になりました第3部藤井陽一教授および藤井研究室の近藤由紀子助手に深く感謝いたします。

(1994年4月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 竹内, 御子柴, トンネル現象の物理と応用, 培風館, 1987
- 2) J. Shimada, O. Ohguchi, R. Sawada, Applied Optics Vol. 31, No. 25 Sep. 1992 pp. 5230-5236
- 3) 金原, スパタリング現象, 東京大学出版会