

銅／二酸化ケイ素／銅構造の微小片持ち梁の作製

菅原 智明, 田谷 嘉浩, 下野 功

Fabrication of Micro Beam with Cu/SiO₂/Cu Structure

Tomoaki Sugawara, Yoshihiro Taya and Isao Shimono

要 旨

半導体製造プロセスに用いられている微細加工技術を応用し、微小な片持ち梁を作製した。モデルを用いて銅／二酸化ケイ素／銅構造の片持ち梁の動作解析を行った結果、片持ち梁の最大印加電圧は、1.1Vであることが示された。片持ち梁に電圧を印加して電気抵抗を測定すると、電圧が2.2Vで電気抵抗は急激に減少した。この電気抵抗測定結果によると最大印加電圧は2.1Vであった。電圧印加前に片持ち梁を走査型電子顕微鏡観察したところ、僅かではあるが、梁は先端に行くほど基板から離れており、このことが計算値に比べ実験値が大きくなった原因の一つと考えられる。電気抵抗は2.2Vで低下した後、電圧を0Vまで減少させても元の抵抗値に復帰しなかった。この原因として、2.2Vで梁の先が基板に接触し、その時に生じた放電のために梁と基板が接着したことが考えられる。

近年、半導体技術の急速な発展によって、微細な構造や複雑なメカニズムを持った1mm以下の小さな機械（マイクロマシン）の作製が可能となっており、マイクロマシンに関連した研究開発が活発に行われている^{1)~3)}。マイクロマシンを用いることで、細い配管の検査や真空装置のような狭い場所での作業が簡単になり、また医療分野においては、例えば錠剤程度の大きさでコードレスの胃カメラも作製可能と考えられる。マイクロマシンは、一般の産業用機械と比較して付加価値が高く、将来有望な産業分野であるため、道南地域の新しい技術シーズを開発する上でも、マイクロマシンに関する基礎的研究は有益であると考えられる。

マイクロマシンの作製には、半導体製造プロセスに用いられている微細加工技術が応用されている。これはシリコンウエハに何層も膜を堆積させた後、写真を焼き付ける要領で表層の感光膜にパターンを形成（パターンニング）し、不要部分を溶かす（エッチング）プロセスを何度も繰り返すことによって集積回路を作製する方法である。マイ

クロマシンの研究では、マイクロな世界特有の問題や基礎的データの不足などの課題も多く、これらを解決するための新しい要素技術が必要とされている。本研究では、アクチュエータへの応用を想定し、電圧の大きさによって梁と基板との距離を可変できるような微小な片持ち梁を作製して、その特性を評価した。

片持ち梁の概略図を図1に示す。梁は幅50 μ m、長さ200 μ mとした。また、梁への電圧印加のため、その一端には2500 \times 2500 μ mの電極を設けた。図2に、銅／二酸化ケイ素／銅構造の片持ち梁の作製手順を示す。ガラス基板上に銅膜（A）、二

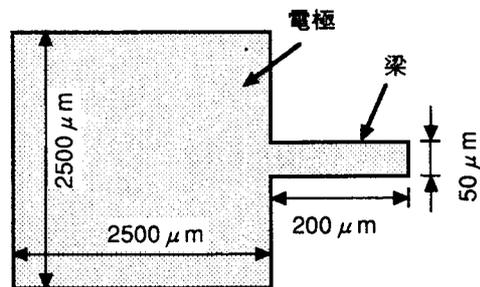


図1 片持ち梁の概略図

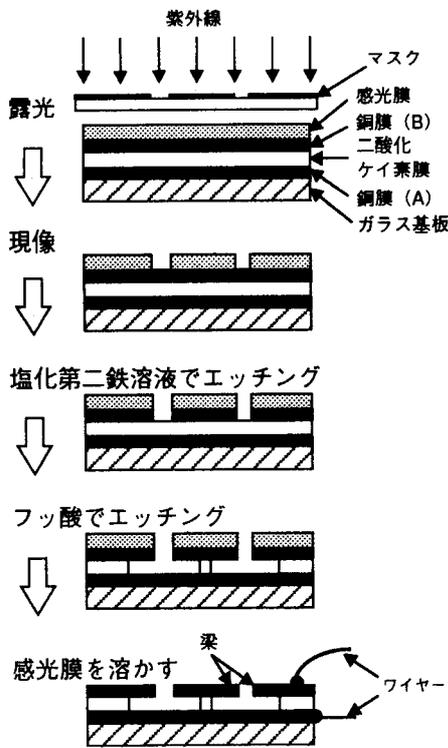


図2 片持ち梁の作製手順

酸化ケイ素膜、銅膜 (B)、感光膜を順次形成し、その上に片持ち梁のパターンを描画したマスクをのせて紫外線露光をした。この感光膜を現像すると銅膜 (B) の上に片持ち梁のパターンが形成される。その後、銅膜 (B) を塩化第二鉄溶液でエッチングすると、銅膜 (B) が片持ち梁の形状にパターンニングされる。これをフッ酸でエッチングすると、二酸化ケイ素だけが溶けるため、銅膜 (B) の梁の部分は支えがなくなり、浮いた状態となる。最後に感光膜を溶剤で溶かし、電圧を印加するためのワイヤーを付けた。なお、梁および二酸化ケイ素膜の厚さは共に $1 \mu\text{m}$ とした。銅膜、二酸化ケイ素膜の堆積には高周波スパッタリング装置を用いた。スパッタガスには純度 99.999% のアルゴンガスを使用した。銅膜のスパッタ条件はアルゴンガス圧力を 1 mTorr 、高周波電力を 100 W 、ターゲット-基板間距離を 50 mm とし、スパッタを 11 min 行った。二酸化ケイ素膜はアルゴンガス圧力を 8 mTorr 、高周波電力を 200 W 、ターゲット-基板間距離を 50 mm とし、 50 min スパッタを行った。感光膜は、粘度が 25 cP のポジ型レジストを用い、スピンコート法により $500 \text{ rpm} \times 10 \text{ s} + 3000 \text{ rpm} \times 30 \text{ s}$ の塗布条件で作製した。

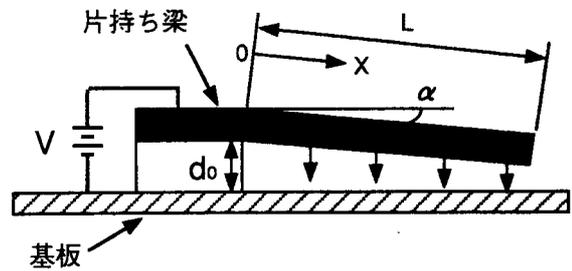


図3 動作解析用モデル

初めに片持ち梁の動作を簡単なモデルを用いて解析した。片持ち梁に電圧を印加すると、梁は静電力のためガラス基板方向に吸引され、静電力と梁の復元力とがバランスする位置で静止すると考えられる。片持ち梁の動作解析用モデルを図3に示す。モデルは、片持ち梁と基板との間に電圧 V を印加したとき、片持ち梁が根元から角度 α で曲がるものとした。このモデルを使って片持ち梁に働く静電力の大きさを算出する。梁-基板間の電界を平等電界、初期ギャップを d_0 とすると、梁の根元から距離 X における電界の大きさは、

$$E = V/d = V/(d_0 - X \sin \alpha) \quad [\text{V/m}] \quad \dots \quad (1)$$

と表される。したがって単位面積あたりに働く静電力は、

$$f = (1/2) \epsilon_0 E^2 = (1/2) \epsilon_0 V^2 / (d_0 - X \sin \alpha)^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad \dots \quad (2)$$

となる。梁の幅 b 、長さ L として梁全体に働く静電力を求めると、

$$F = \int f b dx = (1/2) \epsilon_0 V^2 b L / \{d_0 (d_0 - L \sin \alpha)\} \quad [\text{N}] \quad \dots \quad (3)$$

となる。一方、片持ち梁に荷重 W を加えたときの最大たわみは、

$$\delta_{\text{MAX}} = \beta W L^3 / (EI) = L \sin \alpha \quad [\text{m}] \quad \dots \quad (4)$$

と表される。ここで E は材料の縦弾性係数、 I は断面二次モーメント、 β はたわみの係数である。式(4)に $W = F$ を代入して変形すると、

$$(1/2) \beta \epsilon_0 V^2 L^3 / (d_0 EI) = (d_0 - L \sin \alpha) \sin \alpha \quad \dots \quad (5)$$

が得られる。この式(5)の右辺は $\sin \alpha = d_0 / (2L)$ のとき最大値となる。したがって片持ち梁が安定に動作するのは、梁の先端の位置が初期ギャップ

の $1/2$ までと考えられる。また最大印加電圧は、 $V = \{(EId_0^3)/(2\beta\epsilon_0bL^4)\}^{1/2}$ [V] …… (6) となる。この式(6)に、本実験で試作した片持ち梁のパラメータの値として $\beta = 1/3$, $b = 50$ [μm], $L = 200$ [μm], $E = 13 \times 10^{10}$ [N/m^2], $I = (1/12)bt^3 = 4.2 \times 10^{-24}$ [m^4] (t は梁の厚さ), $d_0 = 1$ [μm] を代入することにより、片持ち梁への最大印加電圧は 1.1V と計算される。すなわち、このモデルを用いた解析によると、電圧が 1.1V を越えると梁は安定性を失い、基板に接触すると予想される。

次に、試作した片持ち梁を用いて、動作の評価を行った。電圧印加時の梁-基板間距離の測定は、試作した片持ち梁の初期ギャップが $1\mu\text{m}$ と小さいために困難であった。そのため本研究では、片持ち梁-基板間の電気抵抗を測定した。図4に電気抵抗の変化を示す。この図から、電圧を増加させると 2.2V で電気抵抗が急激に減少することが分かる。また、最大印加電圧は 2.1V であり、こ

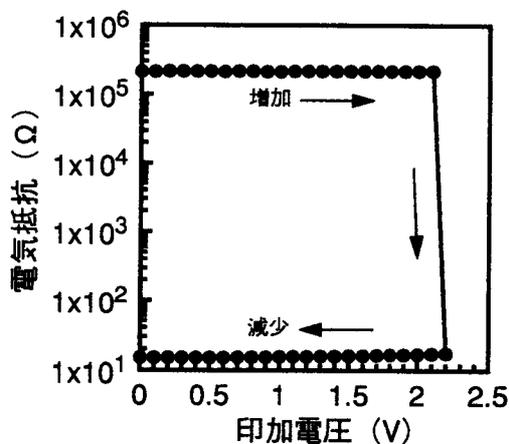


図4 片持ち梁-基板間の電気抵抗

の値はモデルを用いて計算した電圧値 1.1V よりも大きい。電圧印加前に片持ち梁を走査型電子顕微鏡観察したところ、僅かではあるが、梁は先端に行くほど基板から離れており、このことが計算値に比べて実験値が大きかった原因の一つと考えられる。また、本研究で用いたモデルは、片持ち梁の特性を知る上で有効と考えている。図4から、電気抵抗が 2.2V で低下した後、電圧を 0V まで減少させても元の抵抗値に復帰しないことも分かる。この原因として、 2.2V で梁の先が基板に接触し、その時に生じた放電のために梁と基板が接着したと考えられる。

今後は本研究で得られた知見をもとに、マイクロマシンに関連した応用研究への展開を図る所存である。

謝 辞

本研究を推進するにあたり、御指導、御助言頂いた信州大学助教授 小西 哉 先生に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス (培風館), (1992)
- 2) 藤田博之: マイクロマシンの世界 (工業調査会), (1992)
- 3) マイクロアクチュエータ研究会: ミクロをめざすニューアクチュエータ (工業調査会), (1994)