素子加熱による MEMS 用 Si 酸化物カンチレバーの スティクション解消

非会員 小林 泰* 正員 伏信 一慶*

Stiction Recovery of Silicon Oxide Cantilevers with Heating Elements for MEMS

Yasushi Kobayashi*, Non-member, Kazuyoshi Fushinobu*, Member

Recovery of stiction-failed micro-cantilevers by using electrical heating has been proposed and confirmed for silicon oxide cantilevers. Micro-cantilevers with various lengths have been fabricated by surface micromachining process. Recovery of stiction-failed micro-cantilevers with heating elements is possible on cantilevers made of silicon oxide. By using a thermal model that considers the sum of elastic force and thermoelastic force as restoring force, the freestanding yield after heating is calculated. The theoretical results exhibit qualitative agreement with the experimental data of both silicon oxide and silicon cantilevers. The results suggest validity of the present model, and the feasibility of the proposed device.

キーワード：スティクション，Si 酸化物カンチレバー

Keywords : stiction, silicon oxide cantilever

1. はじめに

MEMS デバイスの近年の発展は目覚しいが、問題の一つにスティクション（付着故障）がある。スティクションとはカンチレバーやダイアフラムなどの微小な可動部が基板、周囲の構造物に付着する現象を言う（図 1 参照）。これらの微細構造物は、センサなどによく用いられる重要な構造物であるにも関わらず、製作過程のリンス液や、使用中の水分により容易に基板に付着し、その機能を失う。この対策として、洗浄工程における乾燥法の改善や、表面改質などが提案されている^{(1)~(3)}。

また、一度スティクションを生じたカンチレバーを修復する手法として、パルスレーザ照射による解消法が提案されている。これまでにフェムト秒レーザ、エキシマレーザをポリシリコン製カンチレバーに照射する手法や、それらの手法最適化のため、エキシマレーザを Si 酸化物製カンチレバーに照射することがなされている^{(4)~(7)}。ps 以下の超短パルスレーザ照射の場合、光励起脱着など複数の機構の存在が指摘される一方、ns 以上のパルスレーザ照射の場合、カンチレバーに生ずる温度分布に起因する熱応力が要因と考えられ⁽⁸⁾、熱応力による材料挙動に基づいたモデルも提案されている。このように短パルスレーザ照射がスティクシ

図 1 スティクション概念図

Fig. 1. The schematic of stiction.

ョン修復に有効であることが示されたが、レーザ照射によるスティクション解消は実用上困難な場合が多く、オンサイトでの解消を容易にする概念の提案が課題であった。

そこで本論文では、オンサイトでの解消を容易にするバイメタル構造を用いたデバイス構造を提案した。このデバイスは、近年よく研究されているカンチレバーを用いたデバイス⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾全般に応用できる可能性がある。ここでは、その有用性を実証し、理論との比較を行なうことでモデルの妥当性の検証を行い、更に適した構造の検討、提案を行なった。

2. サンプルの作製と実験系の構成

〈2・1〉 サンプルの作製 本研究で提案、作製したデバイスの SEM 写真と構成図を図 2 に示す。サンプルは、幅 25 μm 、厚さ 3 μm 、長さを 40 μm から 220 μm まで 20 μm ごとに变化させた 10 本の Si 酸化物カンチレバー上に Cr による幅 8 μm 、厚さ 0.3 μm の通電部を設置したものである。

* 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1
Tokyo Institute of Technology
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

図2 サンプルのSEM写真と模式図

Fig. 2. SEM image and schematic of cantilevers.

図3 サンプル作製プロセス

Fig. 3. A fabrication process of cantilevers.

サンプル作製手順を図3に示す。

- まず、15 mm 角に切り出された厚さ 200 μm の両面 Si 酸化膜付き Si ウェハの表面にスパッタによって、Si を堆積させる。
- CVD にて構造層 Si 酸化物を堆積させる。
- スパッタによって Cr を堆積させ、通電層パターンを転写、Cr をエッチングする。その後カンチレバーパターンを転写し、Si 酸化物をエッチングし加熱素子付きカンチレバーの形状を作製する。
- ウェハを TMAH に浸し、犠牲層 Si をエッチングし、除去する。

〈2・2〉 レーザ照射実験の実験系の構成 従来の研究との比較のため、上記によって作製したカンチレバーサンプルに、エキシマレーザを照射し、スティクション解消実験を行なった。図 4a に実験系の模式図を示す。エキシマレーザはラムダフィジックス社製 LPX-150 を用いた。実験では波長 $\lambda=193\text{ nm}$ 、パルス幅 25 ns の ArF レーザを用いた。繰り返し周波数 1 Hz、照射回数 20 回とし実験を行なった。フルエンスの値は照射面積とエネルギーメーターによる測定値から決定した。レーザ照射実験、通電加熱実験共に、実験前実験後サンプルを光学顕微鏡で観察し、それぞれの状態を比較することでスティクションの解消を確認している。

〈2・3〉 加熱素子実験の実験系の構成 上記によって作製したカンチレバーサンプルの通電層に電圧を印加し、

図 4a レーザ照射実験構成図

Fig. 4a. A schematic of laser experimental set-up.

図 4b 通電過熱実験構成図

Fig. 4b. A schematic of heating experimental set-up.

図5 カンチレバー上下面温度の時間履歴

Fig.5. Temperature of front and rear surface of cantilever.

それに伴う発熱による熱応力を利用したスティクション解消実験を行なった。実験では、通電部にパルス幅 50 ms、周波数 1 Hz、電圧 10 V の電圧を 20 回印加した。この条件では、大よそ 50 $^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が見込まれ、またそのような加熱を行うと、片持ち梁の曲げ問題として単純化したモデルから、160 μm のカンチレバーでは 1~2 μm 程度反ることが期待される。通電時の温度上昇については、サンプルに印加される電圧、流れる電流値をそれぞれオシロスコープにて計測し、通電部の抵抗値の温度依存性を別途計測し、適用することで見積もった(図 4b 参照)。

なお、本実験のパルス通電は、必要以上の加熱によるデ

パイスの破損を防ぐのが目的であり、レーザ実験における超短時間加熱によるカンチレバー厚さ方向の温度分布形成を意図するものではない。図 5 に示す通り、通電によるパルス加熱によるカンチレバー上下面と Cr の温度履歴の一次元非定常熱伝導計算によると、上下面の温度差は高々 1～2 °C のオーダーであることから、加熱による厚さ方向の熱膨張を考える場合、カンチレバーは全体として一様な温度に加熱されていると考えてよいことがわかる。したがって、梁縦方向の応力分布は構成する材質の線膨張係数の違いからのみ生じるものとする。

3. 実験結果

図 6 に通電前後のカンチレバーサンプルの光学顕微鏡写真を示す。基板に付着したカンチレバーに焦点を合わせるよう調節し、焦点の合う、合わないでスティクション、スティクション修復を判別した。写真から判るように通電後 $L=160\text{ }\mu\text{m}$ のカンチレバーがスティクション修復されてい

図 6 通電加熱実験前後のサンプルの様子
Fig. 6. Cantilevers before and after experiment.

ることが見てとれる。

また図 7 に示す通り、レーザ照射によるスティクション解消実験では、従来の報告と同様にフルエンス J の増大により解消率の増加が見られた。図 7 の説明については後述する。

4. 考 察

カンチレバーの弾性エネルギーと付着エネルギーとの関係でスティクションが決まるとする既存のモデル⁽⁴⁾を基に、本研究では多層のカンチレバー用に修正を加えたモデルを開発し、解消率の見積もりを行い、実験値と比較することによってモデルの検証を行なった。短パルスレーザ照射と今回開発したデバイスでは、カンチレバー厚さ方向の熱応力差を生じるメカニズムは異なるが、両者共にカンチレバー内に生じる熱応力によりスティクションが解消されると考えられるので、同様のモデル化が可能となる。

レーザ照射によるスティクション解消モデルの詳細は既報に記されているため、本報では通電加熱によるモデルを示すにとどめるが、本実験で使用したカンチレバーは、上面に金属による通電層があるため、その部分でレーザは全反射するものと仮定しモデルを適用した。

〈4・1〉 付着力の見積もり 固定端支持の片持梁の自由端先端に集中加重 W_0 がかかり、その変位がカンチレバーと基板との間隔 s に等しくなるとき、梁に蓄えられる弾性エネルギーは

$$U_{eo} = 3s^2 \sum_{i=1}^2 E_i I_i / 2L^3$$

但し、 E_1 : 通電層 Cr ヤング率 [Pa], E_2 : Si 酸化物ヤング率, I_1 : 通電層断面 2 次モーメント, I_2 : Si 酸化物断面 2 次モーメント, L : 梁長さ

で、与えられる。この弾性エネルギーが基板との付着エネルギー U_A よりも大きくなるときに付着を引き剥がして浮き上がるとする。実際にはカンチレバーの基板への付着エネ

図 7 レーザ照射後にカンチレバーが浮いている確率とレーザフルエンス

Fig. 7. The relation of freestanding yield after and fluence.

ルギーはある確率を持って発生するので、付着エネルギーが正規分布に従うばらつきを持つものと仮定する。このとき、 $U_{e0} > U_A$ の梁が浮いているとし、その確率が実験値と一致するよう平均値 $U_{A,mean}$ 、標準偏差 $U_{A,\sigma}$ の値を決定する。

各長さのカンチレバーが実験前に浮いていた確率により、付着エネルギーの平均値 $U_{A,mean}=72.7$ pJ、標準偏差 $U_{A,\sigma}=37.4$ pJ と決定した。

〈4・2〉 熱応力による解消機構の検討 通電加熱により、梁全体が均一に温度上昇し、通電層の材質とカンチレバー母材の線膨張係数の違いからモーメント M_{th} が新たに生じるとする。このとき、既報の考えに従うとカンチレバーに変形させる力が働き、付着部は根本より剥離し、スティクション解消にいたる。複合梁の考え⁽¹¹⁾に従うと、カンチレバーに蓄えられる弾性エネルギー U_e は、

$$U_e = \frac{1}{2 \sum_{i=1}^2 E_i I_i} \left(\frac{W_0^2 L^3}{3} + W_0 M_{th} L^3 + M_{th}^2 L^2 + M_{th}^2 L \right)$$

$$W_0 = \frac{3s^2 \sum_{i=1}^2 E_i I_i}{2L^3}$$

$$M_{th} = \frac{\sum_{i=1}^2 E_i i_i}{r}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{E_i A_i} \left[\frac{2 \sum_{i=1}^2 E_i I_i}{h} + \frac{h}{2 \sum_{i=1}^2 \frac{1}{E_i A_i}} \right]}$$

但し、 A_1 : 通電層断面積、 A_2 : Si 酸化物部断面積、 $1/r$: 梁の曲率、 h : 梁全体の厚さ、 α_1 : 通電層線膨張係数、 α_2 : Si 酸化物部線膨張係数となる。

図 8 通電加熱後にカンチレバーが浮いている確率と温度上昇見積もり

Fig. 8. The relation of freestanding yield after heating and estimation of temperature-rise.

図 7 にレーザ照射実験によるスティクション解消率のモデル計算と実験値との比較をしたものを示す。横軸にレーザのフルエンス J 、縦軸にレーザ照射後にカンチレバーが浮いていた確率 Y_{free} をとっている。図中実線及び点線は正規分布モデルから予想される Y_{free} を表す。これより本モデルを今回の通電層を設けたカンチレバーサンプルに適用すると、比較的長いカンチレバーで概ねよい一致を示すことがわかる。但し、本実験のサンプル製法では、アンダーカットが生じ、カンチレバー長さを設計図より長く扱うべきであるが、アンダーカットの定量的評価は現状では難しく、設計図の寸法を採用し検討を行った。比較的短いカンチレバーでモデル計算と実験値との差が大きくなっているのはその理由によるものと考えている。

図 8 は、通電過熱実験前後の温度上昇を見積もったものを横軸にとり、縦軸には通電加熱後においてカンチレバーが浮いていた確率 Y_{free} をとっている。図中実線及び点線は正規分布モデルから予想される Y_{free} を表す。実験値とやや異なるが、その原因としては確率を求める際の母数が少ないことが考えられる。また、各々のサンプルのサイズが完全に統一できていないことも要因として挙げられる。

5. 解消率向上へ向けた検討

今回開発したデバイス実用化に向け、更なる解消率向上を目指した検討を行なった。上記に記した実験結果とモデルを用いて、カンチレバーと通電層の材質のみを変更し、解消率の見積もりを行った。カンチレバー材質として、MEMS デバイスの構造体として広く用いられている Si、SiO₂、Si₃N₄、SiC、また通電層の材質として、同様によく用いられている Cr、Al、Ti をそれぞれ用いてスティクション解消率を見積もった。計算に用いた部材のヤング率、線膨張係数を表 1 に示す。

図 9 は上記の材質を用いてカンチレバーサンプルを作製したときのスティクション解消率 Y_{free} を計算により見積もったものである。上からカンチレバーの母材として Si、SiO₂、Si₃N₄、SiC を用いている。グラフが示すように、各材質によって解消率に大きい差異が見られる。モデルから予想される通り、カンチレバー母材上部通電層の線膨張係数差が大きいほど、また母材のヤング率が大きいほど大きなモーメントを生じることから解消率も高くなると考えら

表 1 計算に用いた物性値

Table 1. Physical properties used in calculations.

材質	線膨張係数 [K ⁻¹]	ヤング率 [Pa]
Cr	4.5×10^{-6}	2.79×10^{11}
Al	23.2×10^{-6}	0.703×10^{11}
Ti	8.7×10^{-6}	1.08×10^{11}
Si	2.6×10^{-6}	1.70×10^{11}
SiO ₂	0.57×10^{-6}	0.80×10^{11}
Si ₃ N ₄	3.3×10^{-6}	2.50×10^{11}
SiC	4.3×10^{-6}	3.03×10^{11}

図9 モデル計算によるスティクション解消率見積もり

Fig. 9. Stiction recovery yield by model.

れ、Alを用いた場合には温度差 30 K 以下、Ti の場合でも 80 K で解消率 100%を実現できると予測する。

6. まとめ

本研究によりオンサイトでのスティクション解消手法を開発し、既存のモデルを本研究に適応するよう改良し、適用することによって以下の知見を得た。

- (1) カンチレバー厚さ方向に生じる熱応力分布を利用した、スティクション修復機能を有するデバイスを提案し、その有用性を実証した。
- (2) 従来のモデルに本研究で提案したデバイスに適応する修正を加えることにより、スティクションの解消率を概ね予測することができる。
- (3) Alなどの線膨張係数の大きな材質で通電層を作製することにより、より高い解消率を実現するデバイス構築の可能性があることが示された。

謝 辞

サンプル作製に当たり、本学メカノマイクロ工学専攻のメカノマイクロプロセス室を使用した。関係者に深く謝意を表す。また、本学機械制御システム専攻佐藤・斉藤研究

室の関係者に謝意を表します。さらに、本研究遂行にあたり多大な助言を受けた中田将嗣氏に謝意を表します。なお、本研究の一部は倉田奨励金((財)倉田記念科学技術振興会)により行なわれました。ここに謝意を表します。

(平成 15 年 4 月 7 日受付, 平成 15 年 10 月 8 日再受付)

文 献

- (1) N. Fujitsuka and J. Sakata : "A new processing technique to prevent stiction using silicon selective etching for SOI-MEMS", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.97-98, pp. 716-719 (2002)
- (2) I. Jafri, H. Busta, and S. Walsh : "Critical Point Drying and Cleaning for MEMS Technology", *Proc. of SPIE, the international Society for Optical Engineering*, 3880, pp.51-58 (1999)
- (3) James W. Robert Ashurst, Christina Yau, Carlo Carraro, Christina Lee, G. Jonathan Kluth, Roger T. Howe, and Roya Maboudian : "Alkene based monolayer films as anti-stiction coatings for polysilicon MEMS", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.91, pp. 239-248 (2001)
- (4) M. Nakata, K. Fushinobu, and K. Okazaki : "Stiction Recovery of Silicon Oxide Cantilevers with Pulse Laser Irradiation for MEMS", *TIEE Japan*, Vol.122-E, No.3, pp.144-149 (2002-3) (in Japanese)

- 中田将嗣・伏信一慶・岡崎 健：「パルスレーザ照射による MEMS 用 Si 酸化物カンチレバーのスティクション解消」, 電学論 E, **122**, 3, pp.144-149 (2002-3)
- (5) K. Fushinobu : “Stiction Recovery of Micro-Cantilevers with Excimer Laser Irradiation”, *T.IEE Japan*, Vol.119-E, No.6, pp.340-345 (1999-6) (in Japanese)
伏信一慶：「エキシマレーザ照射によるマイクロカンチレバーのスティクションリカバリー」, 電学論 E, センサ・マイクロマシン準部門誌, **120**, 4, pp.340-345 (1999-4)
- (6) N. C. Tien, S. Jeong, L. M. Phinney, K. Fushinobu, and J. Boker : “Surface adhesion reduction in silicon microstructures using femtosecond laser pulses”, *Appl. Physics Lett.*, Vol.68, No.2, pp.197-199 (1996)
- (7) James W. Rogers : “Nanosecond Laser Repair of Adhered MEMS Structures”, *Journal of Heat Transfer*, Vol.124, pp.394-396 (2002)
- (8) K. Fushinobu : “Stiction Recovery of Microcantilevers with Excimer Laser Irradiation”, The 36th National Heat Transfer symposium of Japan, pp.759-760 (1999) (in Japanese)
伏信一慶：「エキシマレーザ照射によるマイクロカンチレバーのスティクションリカバリー」, 第 36 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.759-760 (1999)
- (9) T. Oguchi, M. Murakami, M. Hayase, and T. Hatsuzawa : “A proposal and a demonstrational study of an electrostatically driven surface output optical switching device with a sheet waveguide”, *T.IEE Japan*, Vol. 121-E, No.12, pp. 636-640 (2001-12) (in Japanese)
小口寿明・村上雅昭・早瀬仁則・初沢 毅：「シート型導波路による静電駆動面出力光スイッチの提案と動作確認」, 電学論 E, **121**, 12, pp.636-640 (2001-12)

- (10) Y. Zhao, M. Mao, and A. Majumdar : “APPLICATION OF FOURIER OPTICS FOR DETECTING DEFLECTIONS OF INFRARED-SENSING MICROCANTILEVER ARRAYS”, *Microscale Thermophysical Eng.*, Vol. 3, pp.245-251 (1999)
- (11) I. Nakahara : Strength of Materials, pp.152-153, YOKENDO, Tokyo (1965) (in Japanese)
中原一朗：材料力学(上巻)養賢堂, pp.152-153 (1965)

小林 泰

(非会員) 1979 年 7 月 14 日生。2002 年 3 月東京工業大学機械科学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻修士課程。

伏 信 一 慶

(正員) 1967 年 10 月 8 日生。1990 年 3 月東京工業大学機械物理工学科卒業。1994 年 9 月同大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻博士課程修了。現在, 同大学大学院助教授。熱工学, エネルギー工学とマイクロデバイスに関わる研究に従事。博士 (工学)。日本機械学会, 日本伝熱学会会員。