(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2015-45657
(P2015-45657A)
(43)公開日　平成27年3月12日(2015.3.12)

(51)Int.Cl.		F I		テーマコード（参考）
G01L 1/18	(2006.01)	G01L 1/18	A	

審査請求 有　請求項の数 3　ＯＬ　（全 36 頁）

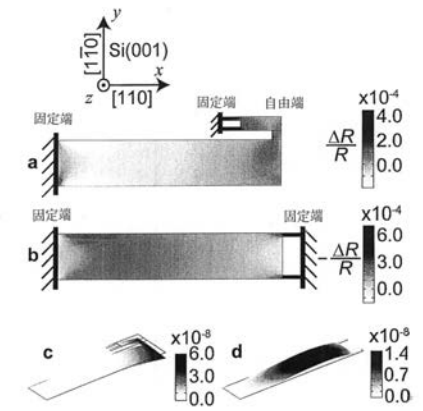
(21)出願番号	特願2014-226301 (P2014-226301)
(22)出願日	平成26年11月6日 (2014.11.6)
(62)分割の表示	特願2012-517210 (P2012-517210)の分割
原出願日	平成23年5月9日 (2011.5.9)
(31)優先権主張番号	特願2010-118859 (P2010-118859)
(32)優先日	平成22年5月24日 (2010.5.24)
(33)優先権主張国	日本国(JP)

(71)出願人　301023238
独立行政法人物質・材料研究機構
茨城県つくば市千現一丁目２番地１
(74)代理人　100093230
弁理士　西澤　利夫
(74)代理人　100190067
弁理士　纐纈　成朗
(72)発明者　吉川　元起
茨城県つくば市千現一丁目２番地１　独立行政法人物質・材料研究機構内
(72)発明者　ハインリッヒ　ローラー
茨城県つくば市千現一丁目２番地１　独立行政法人物質・材料研究機構内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】表面応力センサ

(57)【要約】
【課題】センサ表面上に印加された一様な応力に対して高い感度を持つ、ピエゾ抵抗表面センサの新規な構造を提供する。
【解決手段】本発明の表面応力センサは、表面に表面応力が印加され、少なくとも二対の固定端を有する平坦部材を備え、前記対の各々の固定端は前記平坦部材の周辺に対向した配置され、前記平坦部材は平坦部材本体と少なくとも一つの固定端側の細幅部分を含み、前記固定端側の細幅部分は前記平坦部材本体と前記固定端の一つとの間に配置され、前記少なくとも一つの固定端側の細幅部分はピエゾ抵抗部材を含み、前記平坦部材上の表面応力によって前記固定端側の細幅部分に引き起こされた撓みが前記ピエゾ抵抗部材の抵抗値に変化を起こすことを特徴としている。
【選択図】図４



【特許請求の範囲】
【請求項１】
表面に表面応力が印加され、少なくとも二対の固定端を有する平坦部材を備え、
前記対の各々の固定端は前記平坦部材の周辺に対向した配置され、
前記平坦部材は平坦部材本体と少なくとも一つの固定端側の細幅部分を含み、前記固定端側の細幅部分は前記平坦部材本体と前記固定端の一つとの間に配置され、
前記少なくとも一つの固定端側の細幅部分はピエゾ抵抗部材を含み、前記平坦部材上の表面応力によって前記固定端側の細幅部分に引き起こされた撓みが前記ピエゾ抵抗部材の抵抗値に変化を起こすことを特徴とする表面応力センサ。
【請求項２】
前記平坦部材は２つの前記固定端の対及び４つの前記固定端側の細幅部分を有し、前記４つの固定端側の細幅部分は夫々前記固定端に関連付けられ、前記固定端側の細幅部分の各々はピエゾ抵抗部材を有し、
前記固定端の各々は前記固定端側の細幅部分のうちの関連付けられたものによって前記平坦部材本体に接続され、
前記平坦部材の中の前記ピエゾ抵抗部材のピエゾ抵抗率は、前記撓みの起こる方向によって変化し、
前記固定端側の細幅部分の前記ピエゾ抵抗部材のうちで隣接するものが接続され、前記ピエゾ抵抗部材がフルホイートストンブリッジを形成するとともに、前記ピエゾ抵抗部材が前記フルホイートストンブリッジの４つの辺を形成することを特徴とする請求項１に記載の表面応力センサ。
【請求項３】
前記平面部材はシリコン単結晶の膜であり、前記平坦部材の一部である前記ピエゾ抵抗部材はｐ型でありかつ前記平坦部材のうち前記平坦部材本体はｎ型であり、前記膜の表面は前記単結晶の（００１）面であり、
前記２つの固定端の対の一対は前記単結晶の［１１０］方向に、前記対の他の一対は前記単結晶の［１－１０］方向に配置されることを特徴とする請求項２に記載の表面応力センサ。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は従来のピエゾ抵抗カンチレバー型センサに比べてはるかに高い感度を有するピエゾ抵抗表面応力センサ（surface stress sensor、ＳＳＳ）に関する。
【背景技術】
【０００２】
カンチレバーアレイセンサは、その実時間性や無標識検出（label-free detection）（非特許文献１）のような多様な長所により、広範な関心を集めてきた。カンチレバーアレイを使用した、電気鼻（非特許文献２及び３）、化学的及び生物学的検出（非特許文献４～９）を含むアプリケーションが発表されてきた。そのような研究の多くはカンチレバー表面で反射されたレーザを使った光学読取りを採用しているが、この手法は本技術の実際の応用に関していくつかの重大な問題を内包している。第１には、読取りのためのレーザ及びその周辺機器は高価でありまた小型化が困難である。その上、光学読取り法で血液などの不透明な液体中の対象分子の検出を行おうとしても、信号の大きな減衰と屈折率の重大な変化のために使用不可能である。
【０００３】
これらの問題に対する最も有望な解決策の一つがピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサ（非特許文献１０）である。カンチレバーセンサでは、カンチレバー表面に予め作製された受容体層（receptor layer）に検体が吸着することによって表面応力が誘起され、それによってカンチレバーが撓む。従って、この撓みを検出することによって検体を検出することができる。図１はピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサの構造の例を示している。本

図はカンチレバーの固定端に近い部分の断面図を示している。この例では、ピエゾ抵抗部材がカンチレバー表面に組み込まれて、窒化膜によって保護されている。従って、カンチレバー表面上の応力によるカンチレバーの上向き／下向きの撓みはピエゾ抵抗部材に圧縮／伸びひずみを引き起こし、これがピエゾ抵抗部材の抵抗を変化させる。このような表面応力に起因するピエゾ抵抗部材の変化は、図２に概略的に示されるような電気回路を使って検出される。同図に示されるように、４つの辺、つまり図１に示すような測定カンチレバーのピエゾ抵抗部材、基準カンチレバー及び他の２つの抵抗がブリッジを構成し、１つの辺、つまり測定カンチレバー中のピエゾ抵抗部材の抵抗の変化は、ブリッジの１対のコーナーに電圧を印加した状態での他の対向するコーナー対の電圧に基づいて検出できる。

【０００４】

上述の動作原理からわかるように、ピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサは光学読み取りに関係する複雑でかさばった周辺機器は必要としない。また、相補型金属酸化膜半導体（CMOS）と同様の行程で作製可能であるため、大量生産による低価格化が可能であり、超小型化によって携帯電話など既存の半導体デバイスへの集積化も可能である。その上、このセンサは任意の不透明な液体中での検出に使用可能である。ピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサのこれらの魅力的な長所にもかかわらず、この種のセンサはまだ十分な最適化がなされていない。

【０００５】

ピエゾ抵抗カンチレバーの感度を向上させるため、いくつかの方策がこれまでに提案された。非特許文献１１はアニール時間、ドーピングレベル及び測定周波数のような多様な要因に関心を向けて、ほぼ１０倍の信号対雑音比（Ｓ／Ｎ）を得た。各層中の残留応力を利用した多層カンチレバーはより良好な屈曲性（curvature）及び感度を持っていることが示された（非特許文献１２）。パターン化された表面や受容体層のさまざまな位置などの多様な形状が検討され、数１０％の感度の改善が得られた（非特許文献１３）。しかしながら、これらの研究は皆自由端を持つ通常のカンチレバー形状に基づいており、ピエゾ抵抗カンチレバーの本質的な問題、すなわち集中せず一様に分布する、検体に起因する表面全体の応力に対して感度が低いという問題が残されたままである。

【０００６】

検出アプリケーション、つまり検体起因表面応力の検知、に向けてピエゾ抵抗カンチレバーを最適化する方策は、通常の原子間力顕微鏡（ＡＦＭ）あるいは光学読取りカンチレバーに向けた方策と同一ではない。ＡＦＭ用のセンサは「点力(point force)」、すなわち走査用カンチレバーの自由端に位置する探針に印加される力に基づいている。これとは対照的に、カンチレバーセンサはカンチレバー全表面上に一様に誘起される「表面応力」に基づいている（非特許文献１４、１５）。表面応力により、カンチレバーの各部分は等しく曲がり、その結果、自由端に向けて変位が集積するため、自由端で変位が最大となる。光学読取りシステムでは、通常、カンチレバーの自由端でレーザを反射させる。従って、カンチレバー上に誘起された表面応力全体が効率的に検知できる。

【０００７】

一方、ピエゾ抵抗カンチレバーの信号は自由端の変位ではなくピエゾ抵抗に誘起された応力に依存する。点力が自由端に印加される走査用カンチレバーの場合には応力は固定端付近に集中するが、カンチレバーセンサの場合には検体に起因する応力のうちの一部しかピエゾ抵抗で検知することができない。それは、この応力が全表面に一様に分散しているからである。従って、ピエゾ抵抗部分でもっと大きな応力を獲得してより高い感度をもたらすためには、ピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサに対する別の最適化方策が必要とされる。

【０００８】

非特許文献１６は感度向上のために垂直方向に積層されたカンチレバー構成を示しているが、この設計では二重積層構造が必要とされ、作製が非常に困難であった。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【０００９】
【非特許文献１】Lang, H. P., Nanomechanical Cantilever Array Sensors. In Springer Handbook of Nanotechnology, Bhushan, B., Ed. 2007; p 443.
【非特許文献２】Lang, H. P.; Baller, M. K.; Berger, R.; Gerber, C.; Gimzewski, J. K.; Battiston, F. M.; Fornaro, P.; Ramseyer, J. P.; Meyer, E.; Guntherodt, H. J. Anal. Chim. Acta 1999, 393, 59.
【非特許文献３】Baller, M. K.; Lang, H. P.; Fritz, J.; Gerber, C.; Gimzewski, J. K.; Drechsler, U.; Rothuizen, H.; Despont, M.; Vettiger, P.; Battiston, F. M.; Ramseyer, J. P.; Fornaro, P.; Meyer, E.; Guntherodt, H. J. Ultramicroscopy 2000, 82, 1.
【非特許文献４】Fritz, J.; Baller, M. K.; Lang, H. P.; Rothuizen, H.; Vettiger, P.; Meyer, E.; Guntherodt, H. J.; Gerber, C.; Gimzewski, J. K. Science 2000, 288, 316.
【非特許文献５】McKendry, R.; Zhang, J. Y.; Arntz, Y.; Strunz, T.; Hegner, M.; Lang, H. P.; Baller, M. K.; Certa, U.; Meyer, E.; Guntherodt, H. J.; Gerber, C. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2002, 99, 9783.
【非特許文献６】Arntz, Y.; Seelig, J. D.; Lang, H. P.; Zhang, J.; Hunziker, P.; Ramseyer, J. P.; Meyer, E.; Hegner, M.; Gerber, C. Nanotechnology 2003, 14, 86.
【非特許文献７】Backmann, N.; Zahnd, C.; Huber, F.; Bietsch, A.; Pluckthun, A.; Lang, H. P.; Guntherodt, H. J.; Hegner, M.; Gerber, C. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2005, 102, 14587.
【非特許文献８】Zhang, J.; Lang, H. P.; Huber, F.; Bietsch, A.; Grange, W.; Certa, U.; McKendry, R.; Guentherodt, H.-J.; Hegner, M.; Gerber, C. Nat. Nanotechnol. 2006, 1, 214
【非特許文献９】Watari, M.; Galbraith, J.; Lang, H. P.; Sousa, M.; Hegner, M.; Gerber, C.; Horton, M. A.; McKendry, R. A. J. Am. Chem. Soc. 2007, 129, 601.
【非特許文献１０】Yoshikawa, G.; Lang, H.-P.; Akiyama, T.; Aeschimann, L.; Staufer, U.; Vettiger, P.; Aono, M.; Sakurai, T.; Gerber, C. Nanotechnology 2009, 20, 015501.
【非特許文献１１】Yu, X. M.; Thaysen, J.; Hansen, O.; Boisen, A. J. Appl. Phys. 2002, 92, 6296.
【非特許文献１２】Choudhury, A.; Hesketh, P. J.; Thundat, T.; Hu, Z. Y. J. Micromech. Microeng. 2007, 17, 2065.
【非特許文献１３】Privorotskaya, N. L.; King, W. P. Microsyst Technol 2008, 15, 333.
【非特許文献１４】Rasmussen, P. A.; Hansen, O.; Boisen, A. Appl. Phys. Lett. 2005, 86, 203502.
【非特許文献１５】Sader, J. E. J. Appl. Phys. 2001, 89, 2911.
【非特許文献１６】Yang, S. M.; Yin, T. I.; Chang, C. Sens. Actuators B 2007, 121, 545.
【非特許文献１７】Kanda, Y. IEEE Trans. Electron Devices 1982, 29, 64.
【非特許文献１８】Kanda, Y. Sens. Actuators A 1991, 28, 83.
【非特許文献１９】Pfann, W. G.; Thurston, R. N. J. Appl. Phys. 1961, 32, 2008.
【非特許文献２０】Stoney, G. G. Proc. R. Soc. London, Ser. A 1909, 82, 172.
【非特許文献２１】Aeschimann, L.; Meister, A.; Akiyama, T.; Chui, B. W.; Niedermann, P.; Heinzelmann, H.; De Rooij, N. F.; Staufer, U.; Vettiger, P. Microelectron. Eng.2006, 83, 1698.
【非特許文献２２】Aeschimann, L.; Goericke, F.; Polesel-Maris, J.; Meister, A.; Akiyama, T.; Chui, B.; Staufer, U.; Pugin, R.; Heinzelmann, H.; Rooij, N. F. d.; King, W. P.; Vettiger, P. J. Phys. 2007, 61, 6.

【非特許文献２３】Binnig G, Quate C F and Gerber C 1986 Atomic Force Microscope Phys. Rev. Lett. 56 930-3
【非特許文献２４】Drake B, Prater C B, Weisenhorn A L, Gould S A C, Albrecht T R, Quate C F, Cannell D S, Hansma H G and Hansma P K 1989 Imaging Crystals, Polymers, and Processes in Water with the Atomic Force Microscope Science 243 1586-9
【非特許文献２５】Rugar D, Mamin H J and Guethner P 1989 Improved Fiber-Optic Interferometer for Atomic Force Microscopy Appl. Phys. Lett. 55 2588-90
【非特許文献２６】Martin Y, Williams C C and Wickramasinghe H K 1987 Atomic Force Microscope Force Mapping and Profiling on a Sub 100-a Scale J. Appl. Phys. 61 4723-9
【非特許文献２７】Yoshikawa G, Lang H-P, Akiyama T, Aeschimann L, Staufer U, Vettiger P, Aono M, Sakurai T and Gerber C 2009 Sub-ppm detection of vapors using piezoresistive microcantilever array sensors Nanotechnology 20 015501
【非特許文献２８】Tortonese M, Barrett R C and Quate C F 1993 ATOMIC RESOLUTION WITH AN ATOMIC FORCE MICROSCOPE USING PIEZORESISTIVE DETECTION Appl. Phys. Lett. 62 834-6
【非特許文献２９】Vettiger P, et al. 2002 The "millipede" - Nanotechnology entering data storage IEEE Trans. Nanotechnol. 1 39-55

【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【００１０】
本発明の課題は、従来技術のピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサに比べて劇的に高い感度を与える、新規かつ単純な構造の表面応力センサを提供することにある。
【課題を解決するための手段】
【００１１】
上記課題を解決するため、本発明によれば、表面に表面応力が印加され、少なくとも二対の固定端を有する平坦部材を備え、前記対の各々の固定端は前記平坦部材の周辺に対向した配置され、前記平坦部材は平坦部材本体と少なくとも一つの固定端側の細幅部分を含み、前記固定端側の細幅部分は前記平坦部材本体と前記固定端の一つとの間に配置され、前記少なくとも一つの固定端側の細幅部分はピエゾ抵抗部材を含み、前記平坦部材上の表面応力によって前記固定端側の細幅部分に引き起こされた撓みが前記ピエゾ抵抗部材の抵抗値に変化を起こすことを特徴とする表面応力センサが提供される
【００１２】
第２には、上記第１の発明において、前記平坦部材は２つの前記固定端の対及び４つの前記固定端側の細幅部分を有し、前記４つの固定端側の細幅部分は夫々前記固定端に関連付けられ、前記固定端側の細幅部分の各々はピエゾ抵抗部材を有し、前記固定端の各々は前記固定端側の細幅部分のうちの関連付けられたものによって前記平坦部材本体に接続され、前記平坦部材の中の前記ピエゾ抵抗部材のピエゾ抵抗率は、前記撓みの起こる方向によって変化し、前記固定端側の細幅部分の前記ピエゾ抵抗部材のうちで隣接するものが接続され、前記ピエゾ抵抗部材がフルホイートストンブリッジを形成するとともに、前記ピエゾ抵抗部材が前記フルホイートストンブリッジの４つの辺を形成することを特徴とする表面応力センサが提供される。
【００１３】
第３には、上記第２の発明において、前記平面部材はシリコン単結晶の膜であり、前記平坦部材の一部である前記ピエゾ抵抗部材はｐ型でありかつ前記平坦部材のうち前記平坦部材本体はｎ型であり、前記膜の表面は前記単結晶の（００１）面であり、前記２つの固定端の対の一対は前記単結晶の［１１０］方向に、前記対の他の一対は前記単結晶の［１－１０］方向に配置されることを特徴とする表面応力センサが提供される。
【発明の効果】
【００１４】

本発明の表面応力センサは、複雑及び／または作製困難な構成を導入することなく、従来のカンチレバーベースの表面応力センサよりもはるかに高い感度を提供する。本発明のある実施例による表面応力センサは、自由端を廃した構造であるため、センサ周囲の振動、流体の運動、またそれに類するもののような機械的外乱に対する耐性により、従来構成よりもはるかに安定して表面応力の検出を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１】ピエゾ抵抗カンチレバーアレイセンサのカンチレバーの断面図の主要部を示す図である。

【図２】カンチレバー表面上に設けられたピエゾ抵抗の変化をどのように検知するかを示すための概略回路図である。

【図３】固定端側の細幅部分がある場合とない場合のカンチレバー表面のΔＲ／Ｒ分布の計算結果を示す図である。

【図４】（ａ）及び（ｂ）は二重カンチレバー構成の表面のΔＲ／Ｒ分布を示す図であり、（ｃ）及び（ｄ）は変形の変位をｍ（メートル）の単位で表した場合の、（ａ）及び（ｂ）の夫々の変形した形を示す図である。

【図５】フルブリッジ構成の表面応力センサのホイートストンブリッジ構成等価回路図である。

【図６】ｐ型単結晶Ｓｉ（００１）に基づくフルブリッジ構成表面応力センサの概略図である。

【図７】図６に示すフルブリッジ構成表面応力センサの透視図である。

【図８】平均相対抵抗変化（ΔＲ／Ｒ｜$_{ave}$）の吸着部のサイズ（Ｌ）への依存性を示すグラフである。

【図９】（ａ）は作製した膜型表面応力センサ（ＭＳＳ）アレイチップの写真に電気接続の回路図を付加した図であり、差込み図はピエゾ抵抗検出ビーム部（R_3）の拡大像である。（ｂ）はこのアレイ中のＭＳＳからのセンサ出力信号（V_{out}）を示すグラフである。

【図１０】表面応力センサの作成例の要部断面図及び平面図である。

【図１１】各種の形状における歪増幅を比較した図である。

【図１２】点力の場合の、所与の変位に対する固定端側の細幅部分による歪増幅を示す図である。

【図１３】吸着カンチレバーの表面上に印加された所与の表面応力についての、二重レバー形状の場合のひずみ増幅を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【００１６】

本発明の表面応力センサには「吸着カンチレバー」と「センサカンチレバー」が設けられ、両者が同一面内でそれらの自由端で結合されている。この形状を用いることで、実際の微細加工で達成可能な構成で、「吸着カンチレバー」上に誘起された表面応力の全体を点力に集約してこれをピエゾ抵抗「センサカンチレバー」の端部に印加できるようになる。

【００１７】

本発明の表面応力センサではピエゾ抵抗カンチレバーセンサについての新たなスケーリング則が実現される。つまり、吸着カンチレバーが大きくなると、感度が高くなる。単結晶シリコンの異方性高ピエゾ抵抗係数を利用したフルブリッジ構造を用いることで、同一寸法のピエゾ抵抗素子を使った通常のカンチレバーに比べて吸着レバー、あるいは吸着膜の大きさに応じて、３桁以上の劇的な感度増大が得られる。吸着部上に５００×５００μｍ^{2}の表面を有する現実的な設計でさえも、走査目的に設計されたピエゾ抵抗カンチレバーに比べて１００倍を超える高いＳ／Ｎを示す。本願発明者はすでに、走査型顕微鏡用に設計されたこのカンチレバーを使用して、最高の感度（サブｐｐｍレベルの揮発性有機化合物の検出）を実証した（非特許文献１０）ので、この新たなセンサ、すなわち本発明の

表面応力センサ（ＳＳＳ）は、医療診断、遺伝子及び環境研究、及び低コストで移動できる装置を使用して少量の目的物を検出するための高い感度を必要とするあらゆるセンサアプリケーションに多くの可能性を提供することが期待される。

【００１８】

＜理論的背景＞

ピエゾ抵抗の抵抗値（Ｒ）及びその相対抵抗変化（ΔＲ／Ｒ）は以下で与えられる：

【００１９】

【数１】

$$R = \rho \frac{l}{wt} \qquad (1)$$

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \rho}\Delta\rho + \frac{\partial R}{\partial l}\Delta l + \frac{\partial R}{\partial w}\Delta w + \frac{\partial R}{\partial t}\Delta t \qquad (2)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta t}{t} = (\pi_x\sigma_x + \pi_y\sigma_y + \pi_z\sigma_z) + \varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z \qquad (3)$$

【００２０】

ここで、ρ、ｌ、ｗ及びｔは夫々ピエゾ抵抗の抵抗率、長さ、幅及び厚さ、σ及びεはピエゾ抵抗に誘起される応力及び歪、またπはピエゾ抵抗定数である。ここで、添え字は方向を示し、ｘ、ｙ及びｚは夫々カンチレバーの長手方向、横方向及び法線方向に対応する。歪と応力の関係は一般化されたHookeの法則から導くことができる：

【００２１】

【数２】

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right]$$
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\right] \qquad (4)$$
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right]$$

【００２２】

ここで、Ｅ及びνは夫々カンチレバーのYoung率及びPoisson比である。従って、平面応力である（つまりσ$_z$＝０）と仮定すれば、相対抵抗変化は以下のように記述できる：

【００２３】

【数３】

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_x\left(\frac{1+2\nu}{E} + \pi_x\right) + \sigma_y\left(-\frac{1}{E} + \pi_y\right) \qquad (5)$$

【００２４】

ここにおいて、大きな信号を獲得し、シリコンの高いピエゾ係数を最大限利用するために、単結晶Ｓｉ（００１）で作られてｐ型ピエゾ抵抗を有するカンチレバーを検討する。ピエゾ抵抗係数は以下の関係によって決定される（非特許文献１７～１９）：

【００２５】

【数４】

$$\pi_x = \frac{1}{2}\left(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}\right)$$
$$\pi_y = \frac{1}{2}\left(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}\right) \qquad (6)$$

【００２６】
ここで、π_{11}、π_{12}及びπ_{44}は結晶の基本ピエゾ抵抗係数である。ｘ方向及びｙ方向が夫々［１１０］及び［１－１０］に整列したｐ型Ｓｉ（００１）の場合は、π_{11}、π_{12}及びπ_{44}が、10^{-11}Ｐａ$^{-1}$を単位として、夫々＋６．６、－１．１及び＋１３８．１である。従って、ピエゾ抵抗係数π_x及びπ_yは７１．８×10^{-11}Ｐａ$^{-1}$及び－６６．３×10^{-11}Ｐａ$^{-1}$と、それぞれ計算される。またＥ及びνは１．７０×10^{11}Ｐａ及び０．２８である。π_x＞＞（１＋２ν）／Ｅ、π_y＞＞－１／Ｅ及び$\pi_x - \pi_y \approx \pi_{44}$／２であるので、式（５）は以下のように近似できる：

【００２７】
【数５】

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_x - \sigma_y) \qquad (7)$$

【００２８】
従って、ピエゾ抵抗の信号（つまりΔＲ／Ｒ）は主にσ_xとσ_yの差によって決まる。

【００２９】
＜有限要素解析＞
COMSOL Multiphysics 3.5aによる有限要素（ＦＥ）解析、あるいは、有限要素解析（ＦＥＡ）を使用して、カンチレバー及びＳＳＳの構造を評価し最適化した。各々の構造を５０００～３００００個の要素のメッシュに分割したが、これは本形状にとって十分な分解能を与えるものである。

【００３０】
有限の厚みを持った受容体膜に、等方的に加わる三次元的な「圧力（単位Ｎ／ｍ^3）」は、次式を元に、二次元的な「表面応力（単位Ｎ／ｍ）」で表すことができる：
「表面応力（Ｎ／ｍ）」＝「圧力（Ｎ／ｍ^2）」×「膜厚（ｍ）」
つまり、Ｎ／ｍの単位をもつ力は、三次元的な圧力を膜厚方向に積算したものと考えることもできる。ここで受容体膜の膜厚が非常に小さい場合、この受容体膜は、ほとんど二次元（表面）とみなすことができる。例えば、１０ｎｍの受容体膜に１０ＭＰａの圧力が加わっている場合、１０×10^6［Ｐａ］×１０×10^{-9}［ｍ］＝０．１［Ｎ／ｍ］の表面応力が加わっているとみなすことができる。すなわち、表面応力（ｓ）は表面に関するものなので、二次元の量と仮定してＮ／ｍで定義される。しかしながら、面内応力が印加されるどのような現実の事例でも、この「表面」は厳密には二次元ではなく、何層かの原子層に広がっている。これにより、表面は有限の厚さ（t_{surf}）を有し、これにより表面応力ｓを以下のように三次元の「バルク」応力σとして記述することができる（非特許文献１５）：

【００３１】

【数６】

$$s = \sigma \cdot t_{surf} \qquad (8)$$

【００３２】

ＦＥ解析では、初期応力を持つ薄い金の膜をカンチレバーの表面上に置いて、検体によって誘起される表面応力をシミュレートする。注意しなければならないのは、任意の他の材料を「表面応力発生層」として使用することができるが、過度に硬いあるいは過度に柔らかい材料、換言すれば過度に大きなあるいは過度に小さなYoung率を有する材料では、解析結果とかなりの食い違いのある結果となるということである。本発明で論じられる全ての実施例においては、金の膜の厚さ（１０ｎｍ）及び印加される初期応力（１．０×１０^{7}Ｐａ）は０．１Ｎ／ｍの表面応力をもたらし、これは概ね、タンパク質の吸着のような、検体によって誘起される表面応力の報告された典型的な値であると判断される。このシミュレートされた表面応力の妥当性は、計算された変位の値をStoneyの方程式（非特許文献２１）及びSaderによって改良されたこの方程式（非特許文献１５）に基づく解析的な解と比較することによって検証される。解析的モデルからのずれは、Stoneyの方程式について約１０％、Saderのモデルについては約１％であり、妥当な精度のシミュレーションであることが示される。

【００３３】

＜結果及び考察＞

ａ）点力と一様な応力

カンチレバー上の応力分布は印加される力のタイプに非常に依存する。ピエゾ抵抗の信号、つまりΔＲ／Ｒはσ_x及びσ_yによって決定されるので、式（７）から判るように、ｘ方向とｙ方向の間のより大きな差を伴う、より大きな応力が誘起される場所に、ピエゾ抵抗を設置することが重要である。図３は自由端における点力によってあるいは一様に分散した応力によって生起したΔＲ／Ｒの分布の計算結果を夫々示す。前者（ａ）及び（ｂ）は走査プローブ顕微鏡の場合であり、後者（ｃ）及び（ｄ）はカンチレバーセンサの場合である。個々で計算したカンチレバーの長さ、幅及び厚さは夫々１３５μｍ、３０μｍ及び１μｍであり、（ｂ）及び（ｄ）の２つの固定端側の細幅部分は長さが４５μｍで幅が８μｍで厚さが１μｍである。これは、元々平行走査用に最適化したものではあるが（非特許文献２１及び２２）、本願発明者がその高感度（揮発性有機化合物に対するサブｐｐｍの感度）と選択性（同族列中の個々のアルカンの識別）を以前に実証したピエゾ抵抗カンチレバーと同じ形状である（非特許文献１０及び２１）。図３の（ａ）及び（ｂ）から明確に判るように、応力は固定端から近い領域に集中し、従って点力（丸印）の場合にはこの領域でより高いΔＲ／Ｒが得られる。固定端における固定端側の細幅部分により、信号が効果的に増大する。全ての場合に自由端で変位が同じになる（約２３ｎｍ）ように点力を印加していることに注意されたい。従って、ピエゾ抵抗部を固定端から近くに、あるいは固定端側部分に置くことで、印加された点力をピエゾ抵抗の抵抗変化により効果的に読み出せるようになる。これとは対照的に、カンチレバーセンサの場合には、検体によって誘起された応力はカンチレバー表面全体の上に一様に分布する。固定端での非対称性の効果によりいくつかの領域ではΔＲ／Ｒがわずかに大きくなるが、固定端側部分においてさえも顕著な応力集中はなく、これによってΔＲ／Ｒが相対的に小さなものとなる。更に、ピエゾ抵抗部をどこに置いても、大きな信号を得ることは殆ど不可能である。というのも、ΔＲ／Ｒはσ_xとσ_yの差によって決まるが、これらは図３の（ｃ）及び（ｄ）に示すように、殆どの領域で表面全体に一様かつ等方的に印加される、すなわち$(\sigma_x - \sigma_y) \approx 0$だからである。図３の（ｃ）及び（ｄ）では面内応力（in-plane stress）（－０．１Ｎ／ｍ）が表面全体に一様に印加される。

【００３４】

ｂ）二重カンチレバー形状による応力集中

この重大な問題を解決してセンシング用途のためのピエゾ抵抗カンチレバーの性能を向上するため、本願発明者は、もう一つのカンチレバーを導入することによって一様に分布する表面応力を特定の領域に集中するという新たな方策を提案する。すなわち、「吸着カンチレバー」に対して、ピエゾ抵抗部を有する別のカンチレバーを「センサカンチレバー」と呼ぶ。センサカンチレバーと吸着カンチレバーの自由端同士は同じ平面内で接続されているが、これは簡単に作製することができる。

この形状の例を図４（ａ）に示す。上側の小さい方のカンチレバーがセンサカンチレバー（１３５×３０×１μｍ^3；図３（ｄ）中のものと同一寸法）であり、下側の大きな方のカンチレバーが吸着カンチレバー（５００×１００×１μｍ^3；例として任意の形状）である。この設計の基本的な考え方は二重である。すなわち、１）吸着カンチレバー表面全体に一様に分布した全表面応力を、変位の形でその自由端に集積すること；２）この変位をセンサカンチレバーの自由端に印加される点力としてセンサカンチレバーに移行すること。カンチレバーに沿った各々の部分に誘起される表面応力は当該カンチレバーの対応する部分の屈曲を引き起こすので、この屈曲は自由端に集積される。従って、カンチレバーの自由端の変位は吸着カンチレバーの表面全体に誘起された全ての表面応力の合計とみなすことができる。センサカンチレバーは、吸着カンチレバーとの機械的な結合を通してその自由端に点力を受ける。センサカンチレバーにおけるこの状況は、自由端に印加された点力を検出する走査用に動作するカンチレバーと同様である。図３の（ａ）及び（ｂ）に示すように、自由端に印加される点力は固定端から近い領域に集中された応力を誘起し、ここで固定端側の細幅部分がこの応力を効果的に増強することができる。従って、この二重カンチレバー形状により、吸着カンチレバー表面に励起された応力全体をセンサカンチレバーの固定端型近くにある領域に集中することができる。この応力集中領域に埋め込まれたピエゾ抵抗部は、吸着カンチレバーに印加された表面応力全体を効果的に検出することができる。この応力集中、従ってより大きなΔＲ／Ｒは、図４（ａ）の固定端側の細幅部分に見ることができる。この二重カンチレバー形状の変形した形状は図４（ｃ）に示されている。定量的な比較のため、相対抵抗変化の平均値（ΔＲ／Ｒ｜$_{ave}$）が以下のように計算される：

【００３５】

【数７】

$$\left.\frac{\Delta R}{R}\right|_{ave} = \frac{1}{A_R}\int_0^{A_R}\frac{\Delta R}{R}dA \qquad (9)$$

【００３６】

ここで、A_Rはピエゾ抵抗部の面積である。二重カンチレバー構成（図４（ａ））におけるセンサカンチレバーの固定端側の細幅部分のΔＲ／Ｒ｜$_{ave}$は２．８５×１０$^{-4}$であるが、通常のカンチレバー（図３（ｄ））のこの値はわずかに２．４７×１０$^{-5}$である。これにより、二重カンチレバーによれば、同一の寸法のセンサカンチレバーを使って１０倍を上回る大きさの信号を得ることができることが示される。しかしながら、この形状では、非対称の形状によるバランスの取れていない応力に加えて、接続部で幾分かの力の損失が出る。この問題を回避するため、センサカンチレバーを吸着カンチレバーにその横軸に沿って直接に接続する方がよい。センサカンチレバーの剛性は最小にすべきであることに注意しなければならない。なぜならば、この剛性が吸着カンチレバーに反作用を引き起こし、吸着カンチレバーからの力の伝達に悪影響をもたらすことになるからである。解析的な計算によって、センサカンチレバーの本体部分（つまり、固定端側の細幅部分以外の部分）は、幅が広い方がΔＲ／Ｒの値が増加していき、吸着カンチレバーと同じ幅で、その増加はほぼ飽和する。また、センサカンチレバーの本体部分の幅が、吸着カンチ

レバーの幅よりも大きくなると、接続の部分での力の伝達において、損失を招くことになる。これらの問題を計算に入れると、最も効率的な形状は図４（ｂ）のようなものとなる。つまり、センサカンチレバーの幅が、吸着カンチレバーの幅と同じになる構造である。この構造により、吸着カンチレバーに、センサカンチレバーの固定端側の細幅部分が直接接合されたような構造になる。これによって、力の損失は最小限に抑えることができる。また、固定端側の細幅部分におけるバランスの取れた応力の分布によって、吸着カンチレバーからの力の損失はほとんどない。図４（ｂ）の固定端側の細幅部分におけるΔＲ／Ｒ$|_{ave}$は、４．２９×１０$^{-4}$であることがわかるが、これはつまりピエゾ抵抗部材の寸法が同じである場合の通常のカンチレバーと比べてほとんど２０倍大きい値である。双固定式形状（double-clamped geometry）（図４（ｄ））の場合は、たとえ同じ圧縮応力（０．１Ｎ／ｍ）が図３及び図４の他の形状のものに印加されていても、変位の方向が反対（上向き）になり、ΔＲ／Ｒの値が負となることに注意しなければならない。

【００３７】

ｃ）フルブリッジ形状による更なる信号の増強

シリコンの単結晶の特性を利用することで、信号を更に増強することができる。多くの場合、ΔＲ／Ｒは、図５に示すようなホイートストンブリッジを使って、出力電圧（V_{out}）変化として測定される。

【００３８】

【数８】

$$V_{out}=\frac{V_B}{4}\frac{\Delta R}{R} \qquad (10)$$

【００３９】

ここで、V_Bはブリッジに印加されるバイアス電圧である。圧力センサに対して通常適用されるように、ホイートストンブリッジ中の４つの抵抗（R_1、R_2、R_3及びR_4）全てをセンサの一部として利用できる。この場合、合計出力は以下のようにして定めることができる：

【００４０】

【数９】

$$V_{out}=\frac{V_B}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}-\frac{\Delta R_2}{R_2}+\frac{\Delta R_3}{R_3}-\frac{\Delta R_4}{R_4}\right) \qquad (11)$$

【００４１】

これは、反対方向に抵抗値が変化する２つの抵抗の組の組み合わせにより４倍大きなV_{out}信号が得られることを意味している。式（７）のすぐ上の段落で説明したように、電流がｐ型シリコン単結晶の（００１）表面上で［１１０］方向に電流が流れると、［１１０］方向と［１－１０］方向のピエゾ抵抗率の符号は互いに反対向きとなる。シリコン単結晶表面上のピエゾ抵抗率のこの性質を利用することによって、上述の基本的な長所は図６及び図７に示すようなフルブリッジ方策で実現することができる。電流は全ての抵抗中でｘ方向（すなわち［１１０］方向）に沿って流れるから、これらの相対抵抗変化は皆式（７）で与えられる。R_1及びR_3では支配的応力はσ_x、またR_2及びR_4ではσ_yである。これにより、抵抗の組の各々で相対抵抗変化についての符号が反対向きとなる。つまり、この構成では、隣接する２つのピエゾ抵抗（例えばR_1対R_2）は、夫々σ_x、σ_yが各ピエゾ抵抗中で支配的であるため、ΔＲ／Ｒが反対の符号となる。この挙動は、図６に示す有限要素解析を使って確認される。５００μｍの辺を有する正方形膜は図３及び図６同じ寸法、つまり４５×８×１μｍ^{3}の固定端側の細幅部分によって支持されている。R_2及びR_4の長さはR_1及びR_2の長さの２倍（９０μｍ）であり、電流について

同等の面積（９０×８μｍ^{2}、Ｒ$_{1}$とＲ$_{3}$は２つの４５×８μｍ^{2}の直列になったものを有する）を持つことに注意されたい。これらの抵抗の計算された値は、ΔＲ$_{1}$／Ｒ$_{1}$｜$_{ａｖｅ}$＝ΔＲ$_{3}$／Ｒ$_{3}$｜$_{ａｖｅ}$＝－６．９５×１０$^{－４}$またΔＲ$_{2}$／Ｒ$_{2}$｜$_{ａｖｅ}$＝ΔＲ$_{4}$／Ｒ$_{4}$｜$_{ａｖｅ}$＝４．３９×１０$^{－４}$である。従って、合計の相対抵抗変化はΔＲ$_{ｔｏｔａｌ}$／Ｒ$_{ｔｏｔａｌ}$｜$_{ａｖｅ}$＝ΔＲ$_{1}$／Ｒ$_{1}$｜$_{ａｖｅ}$－ΔＲ$_{2}$／Ｒ$_{2}$｜$_{ａｖｅ}$＋ΔＲ$_{3}$／Ｒ$_{3}$｜$_{ａｖｅ}$－ΔＲ$_{4}$／Ｒ$_{4}$｜$_{ａｖｅ}$＝２．２７×１０$^{－３}$となり、これは同様な寸法の細幅となったピエゾ抵抗部を持つ通常のカンチレバーに比べてほとんど１００倍も大きな値である。表面応力センサの上述した構成は、本願明細書中で時には膜型表面応力センサ、あるいはＭＳＳ（Membrane-type Surface Sensor）と呼ばれる。これは、膜がその周辺の辺の数箇所で固定されているからである。

【００４２】

このフルブリッジ構成は通常のカンチレバーと比べた場合に追加の利点をもたらすということを注意しておく価値がある。第１に、ホイートストンブリッジを構成する４個の抵抗は、抵抗率の温度依存性など、ほとんど同一の物理的特性を有している。それは、これらの抵抗が同一の微細製造プロセスで作製されるからである。従って、熱ドリフトなどの外部ノイズは回路中で相殺されるため、信号中の雑音が小さくなる。第２に、このフルブリッジ構成（全固定式形状）には自由端が存在しない。従って、この形状によって測定の間、とりわけ試料がセンサアレイ上を流れる環境において、はるかに高い安定度がもたらされる。カンチレバーアレイセンサの主要な問題のひとつが、その自由端での非常に柔軟な形状がもたらすところの安定性の欠如であったのだから、フルブリッジ構成あるいは双固定式構成は、非常に高い感度に加えて、安定性についての重大な改善も達成する。

【００４３】

４つの固定端側の細幅部分によって支持されているシリコン膜は本実施例では正方形であるが、これは別の形状であってもよいことに注意しなければならない。具体的には、正方形形状膜のコーナー領域上の応力は固定端側の細幅部分の抵抗の変化にはほとんど貢献しないため、これらコーナー領域は除去してもよい。実際に、ＦＥＡでの計算によると、丸い形状の膜でさえも、正方形形状の膜の出力に比べて高々数％の違いがあるに過ぎない。

【００４４】

ｄ）究極の感度に向けてのサイズ依存性

通常のカンチレバーと、双固定式あるいはフルブリッジ形状との最も重要な相違は、信号のサイズ依存性である。誘起された応力は全て、双固定式あるいはフルブリッジ形状におけるピエゾ抵抗部に集中させることができるので、これによりいかなる通常のピエゾ抵抗カンチレバー形状でも原理的に達成不能であるところの、「より大きな吸着カンチレバーはより高い感度をもたらす」という新たなスケーリング則が実現される。図８は、各種の形状における相対抵抗変化についてのサイズ依存性を示す。各形状の性質は表１にまとめられている。このスケーリング則はフルブリッジ及び双固定式形状で明確に認められるが、通常のカンチレバーではほとんど一定レベルの｜ΔＲ／Ｒ｜が与えられる。ここで提示されている２０００μｍまでの寸法範囲の中で、３桁を越える増幅率が達成されることは注目に値する。

【００４５】

ｅ）信号対雑音比

センサの実際の性能は信号対雑音比（Ｓ／Ｎ）で決まる。ピエゾ抵抗の場合、Johnson雑音（Ｖ$_{ｊ}$）及びHooge（１／ｆ）雑音（Ｖ$_{Ｈ}$）の２つの主要な雑音がある。これらの雑音は以下の式で見積もることができる：

【００４６】

【数１０】

$$\overline{V_J^2} = 4k_B T \frac{l}{wt\mu qp}(f_{max} - f_{min}) \qquad (12)$$

$$\overline{V_H^2} = \frac{\alpha V_B^2}{lwtp} \ln\left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right) \qquad (13)$$

【００４７】

ここで、ｌ、ｗ及びｔはピエゾ抵抗の長さ、幅及び厚さ、μ及びρはキャリア移動度及びキャリア濃度、k_B、Ｔ及びｑはBoltzmann定数、温度及び電子の電荷、f_{max}及びf_{min}は最大測定周波数及び最小測定周波数、またαはHooge定数である。Ｌ＝５００μｍという現実的な寸法の場合の各形状について、ある典型的な条件下で見積もったＳ／Ｎを以下の表１にまとめた（当該典型的な条件の諸パラメータの値は以下の通り：ｌ＝１０あるいは９０μｍ、ｗ＝２あるいは８μｍ、ｔ＝０．１μｍ、μ＝５１$cm^2V^{-1}s^{-1}$、ρ＝$10^{20}cm^{-3}$、k_B＝$1.38\times10^{-23}JK^{-1}$、Ｔ＝３００Ｋ、ｑ＝$1.60\times10^{-19}C$，$f_{max}$＝５Ｈｚ、$f_{min}$＝１Ｈｚ、α＝$10^{-6}$、$V_B$＝１．５Ｖ）。

【００４８】

【表１】

	構成	ピエゾ抵抗の面積	吸着部の幅	Ｌ＝500μｍでの$\lvert\Delta R/R\rvert_{ave}$	Ｌ＝500μｍでのＳ／Ｎ
A	フルブリッジ[1)]	$10\times2\ \mu m^2$	L (正方形)	1.3×10^{-2} (591)	16300 (107)
B	フルブリッジ[1)]	$90\times8\ \mu m^2$	L (正方形)	2.3×10^{-3} (105)	15900 (105)
C	双固定式[2)]	$10\times2\ \mu m^2$	100 μm	2.0×10^{-3} (91)	2500 (16)
D	双固定式[2)]	$90\times8\ \mu m^2$	100 μm	4.9×10^{-4} (22)	3390 (22)
E	通常のカンチレバー[3)]	$90\times8\ \mu m^2$	100 μm	2.2×10^{-5} (1)	152 (1)
F	通常のカンチレバー[3)]	$10\times2\ \mu m^2$	100 μm	2.0×10^{-5} (0.91)	29 (0.19)

１）図６参照

２）図４（ｂ）参照

３）図３（ｄ）参照

【００４９】

フルブリッジ形状では、通常のカンチレバーよりも１００倍を上回る高いＳ／Ｎが見積もられる。これらのＳ／Ｎ値は大まかな近似であって、実際の事例の場合には、局所的な電流の流れ、熱消費、更にはキャリア濃度とピエゾ抵抗ファクター、キャリア移動度その他の間の逆比例関係のような、各種の問題やトレードオフを考慮する必要があることに注意されたい。何れの場合でも、より大きなΔＲ／Ｒは常により高いＳ／Ｎをもたらすので、双固定式あるいはフルブリッジ形状は、表面応力に基づくセンシングアプリケーションについて、むしろ単純な構成でありながら、ピエゾ抵抗カンチレバーアレイにはるかに高

い性能を提供する。

【００５０】

＜結論＞

表面応力集中に基づいた、センシングアプリケーションのためのピエゾ抵抗カンチレバーの最適化のための新規な形状を提案した。双固定式及びフルブリッジ構成を含む二重カンチレバー形状により、検体によって誘起された表面応力全体をピエゾ抵抗部に集中することができる。有限要素解析により、同一寸法のピエゾ抵抗部を使って通常のカンチレバーに比べて数１０倍から数１００倍も高い感度をもたらす、効率的な集中が検証された。これらの形状により、吸着部が大きくなると感度が高くなるという新たなスケーリング則が実現される。これによって、吸着部の寸法を変更するだけで、通常のカンチレバーよりも数桁以上高い感度の、各々の目的に適合した任意の感度を有する表面応力センサを設計できる。これはもはや双固定式やフルブリッジ形状の「カンチレバー」ではなく、単に「表面応力センサ（ＳＳＳ）」と呼ぶべきものである。

【実施例】

【００５１】

その高い感度、またサイズ依存性を実験的に示すため、図９（ａ）に示すＭＳＳアレイを作製した。正方形ではなく丸い形状の膜を採用した。これはシミュレーションによれば、正方形形状に比べてわずかに（約３％）感度が低いが、丸い形状の膜はインクジェット・スポッティング法を使用して液体試料を簡単にコーティングできる、膜の周りの大きな開口により試料の流れが良好になる、などのいくつかの実際的な利点を有する。図９（ａ）の同一のアレイ中に５００μｍと３００μｍの直径を有する２通りのサイズの膜を作製して同一条件下で評価した。比較目的で、図３（ｄ）に示すものと同一の寸法を有する標準的なカンチレバーも試験した。ＭＳＳのセンサビーム（sensor beam）のｘ及びｙ方向の長さは、図６及び図７に示す構成では、R_1及びR_3については１０μｍ及び１６μｍ、R_2及びR_4については５μｍ及び３６μｍである。

【００５２】

これらのＭＳＳは以下に説明するようにして作製された。図１０の断面図（下側の図）及び平面図（上側の図）を参照しながら説明する。ｎ型デバイス層（約４μｍ厚、約１０Ωｃｍ）１１を持つ４インチのシリコン・オン・インシュレータ（ＳＯＩ）ウエハーを用意した。このウエハーを洗浄した後、熱酸化により７００ｎｍの酸化膜１２を形成した。フォトリソグラフィーとバッファードフッ酸（ＢＨＦ）中でのエッチングにより、ピエゾ抵抗形状をこの酸化膜１２中にパターン形成した。化学気相成長（ＣＶＤ）により、ボロンドープした酸化膜の上にドーピングされていない酸化膜を持つ二重膜１３（６５０ｎｍ厚）を堆積した。９５０度で３０分間、ボロンの拡散を行った。この工程において、ボロンは上記の熱酸化膜１２を通してウエハーまで拡散することはなく、ピエゾ抵抗形状に開口された部分のみに選択的に拡散が行われ、ピエゾ抵抗部１４が形成された。低圧ＣＶＤによって、ウエハー表面全体に窒化ケイ素膜１５を堆積した。フォトリソグラフィーの後、プラズマ及びＢＨＦエッチングによってコンタクトホール１６を開口した。このステップで、ＫＯＨエッチングのためのウエハーの裏面上の開口も形成した。９００ｎｍのアルミニウム膜をデバイス側に蒸着した。描画されたフォトレジストマスクを用い、アルミニウム膜を化学エッチング液中でエッチングしてデバイス電極１７を形成した。デバイス動作において電極を検体から分離するため、プラズマ増強ＣＶＤを行って７００ｎｍ厚の酸化膜１８を形成した。フォトリソグラフィーと化学エッチングにより、パッド開口を作製した。次に、フォトグラフィーとエッチングによって、ウエハーのデバイス層を加工して膜を形成した。このウエハーを機械式チャックにマウントして４０重量％、６０℃のＫＯＨ中に浸漬して、裏面から大きな開口を形成した。エッチングはＳＯＩの埋込み酸化膜（ＢＯＸ）１９で自動的に停止した。最後に、ＢＨＦ中でこのＢＯＸをエッチングして、膜（メンブレン）２０を完成させた。

【００５３】

インクジェットスポッティング技術によって、この膜と標準的なカンチレバーをポリエ

チレンイミン（ＰＥＩ）層２１でコーティングした。ＭＳＳ（及び、以下で説明するように行われるＭＳＳとの比較のために使用される標準的なカンチレバー）の上側表面を、カスタマイズされたインクジェットスポッティングシステム（Microjet Model 'LaboJet 500SP'）によってコーティングした。濃度１ｇ／ｌのＰＥＩ溶液を堆積して、１μｍ厚のＰＥＩ層２１をこの表面上に形成した。堆積プロセスの間、実時間側面モニタリングによって、表面からのあふれがないことを確認した。従って、当然、上側表面だけがＰＥＩ層２１でコーティングされることになり、これによって、表面応力を効率的に誘起できるが、両側のコーティングは、両側からの競合する力のためにほとんど信号を発生しないこととなる。なお、図中２２はバルク基板、２３は熱酸化膜、２４は窒化ケイ素膜、２５はセンサカンチレバーである。

【００５４】

これらの試験品を、純窒素キャリアガス中に２０％の水蒸気が入ったものに、流量１００ｍｌ／分で５分間、純窒素でパージングを行う間隔を５分間取りながら、３回曝露した。システム全体を、２９３．００±０．０５Ｋに維持された恒温槽中にセットした。純窒素ガスをマスフローコントローラ（Fujikin FCST1005C-4F2-F1L-N2）経由で純水蒸気で満たされた試料ボトルに導入して、混合された試料ガスを全体で１００ｍｌ／分のレートで測定チャンバに送り込んだ。測定を開始する前に、最低１０分間純粋窒素ガスが流れている状態に保持して、ＰＥＩ層からの不純物分子のパージングあるいはピエゾ抵抗の熱ドリフトが飽和した状態となるようにする。

【００５５】

図９（ｂ）はこれらＭＳＳ及び標準的なカンチレバーの獲得された出力信号を示す。両信号は、両方の場合において－１．５Ｖのバイアス電圧のかかった同一の電気的設定で測定した。図中高さの低い信号が標準的なカンチレバーのデータ、高さの高い実線の信号が直径５００μｍのＭＳＳのデータ、高さの高い破線が直径３００μのＭＳＳのデータである。直径５００μｍと３００μｍの膜は標準的なカンチレバーよりも夫々約２２倍及び約１５倍大きな信号を示した。この実験結果により、顕著に増大した感度、また膜のサイズ依存性を明確に確認できた。獲得された信号は有限要素法で計算した値（製造された寸法が５００μｍと３００μｍの膜について夫々約４６倍及び約３１倍）よりも幾分小さいが、これらはドーパントの拡散深度、エッチングプロセスによって引き起こされた表面プロファイルなどのような、計算で無視したいくつかのパラメータによると思われる。標準的なカンチレバーの厚さ（１～１．５μｍ）に比べてＭＳＳの膜及びビームがやや厚め（３．２μｍ）にもかかわらず、かなり増強された感度を得た。厚さを減らすと、膜の剛性が減るため、有限要素法によれば、直線的な感度上昇をもたらすため、標準的なカンチレバーと同じ厚さ（１～１．５μｍ）を有するＭＳＳでは、感度の増幅度を更に３倍大きくすることができる。

【００５６】

＜付記＞

理論的な面から本発明に更に裏づけを与えるため、本発明の上述の説明に対する付記として、カンチレバー偏位のピエゾ抵抗ひずみ検出についての機械歪増幅の枠組みの代数学的モデルを提示し、所与の条件、とりわけ作製の制約の下での最適な形状を得るための一般的な方策を提供する。このモデルは有限要素解析によって検証した。カンチレバーの自由端に印加される力に基づく走査については、固定端における固定端側の細幅部分が歪増幅器としてうまく機能する。吸着によって誘起される応力の検出の場合は、歪増幅は、両者の自由端で結合されたセンサカンチレバーと吸着カンチレバーの２つのカンチレバーで構成される「二重レバー」形状によって実現される。この形状では、検体によって誘起された吸着カンチレバー上の表面応力は、力を受けるセンサカンチレバーの固定端での表面歪に振り替えられる。

【００５７】

Ａ）はじめに

カンチレバー変位の検出は、カンチレバーを使用した多くの走査アプリケーション及び

センシングアプリケーションの鍵となる要素である。最初の原子間力顕微鏡（ＡＦＭ）（非特許文献２３）では、変位はトンネル電流で測定された。そのすぐ後、多様な光学的検出方式が使用されるようになった（非特許文献２４～２６）。雑音が小さいことから、光学的検出は魅力的である。その一方で、これは集積化されたカンチレバー配列における個々のカンチレバーの変位検出が困難であり、また、時間のかかる、カンチレバー上での光の反射位置あわせなどの調整がチップを交換する度に必要である。しかしながら、これら両局面、つまり、集積化されたカンチレバーの変位検出と、光の位置あわせ無しでのチップの交換は、「大きな空間」が手に入らない多くのタイプのナノシステム、例えばカンチレバーアレイ（特に２次元アレイ）、リモートセンシング、生物学的アプリケーションでしばしば必要とされるところの血液などの不透明な液体中での測定など、では必須である。

【００５８】

統合された検出に対する最も見込みのある解決策のひとつが、TortoneseとQuateによって導入されたカンチレバー変位のピエゾ抵抗検知である（非特許文献２７）。この技術はどのようなカンチレバーサイズにでも簡単に小型化でき、また光学読取りのようなかさばる周辺機を使用せず、血液などの不透明な液体中で測定を行うことができる。他方では、Millipedeで使用されている熱検出（非特許文献２９）のような、他の専用の統合検知方式が成功裏に適用されてきた。

【００５９】

ピエゾ抵抗検出は、その応用上極めて重要になる、集積化が可能という特徴にもかかわらず、まだ広く使用されてはいない。その理由として以下の点が挙げられる。

ａ）信号対雑音比が光学的検出の場合よりも低い。

ｂ）この方式は、大量生産が可能であるため、実際の応用・製造の際にさらに重要になる。

信号対雑音比を稼ぐため、ピエゾ抵抗歪検出の多様な機械的増幅方式が提案されてきた。

例えば：

ａ）点力が印加されるレバーの場合に適しているところの、カンチレバーの固定端側の細幅部分。

ｂ）応力が印加されるカンチレバーの場合に適切であるところの、二重レバーシステム。後者の例が、吸着物で覆われることによる表面応力あるいは温度変化検出のためのバイモルフタイプのレバーによって引き起こされる歪の検出である。

【００６０】

以下では、歪増幅についての代数的表現が与えられ、通常の製造上の制約及び要求されるレバーの性質の範囲内で、各種の機械的増幅方式の設計を簡単かつ迅速に行う事が可能な方策が議論される。矩形のレバー部品だけが検討され、また設計のガイドラインをあまり変えないことが有限要素解析（ＦＥＡ）によって裏付けられたところの、多様な単純化の仮定がなされる。従来の大量生産可能な微細加工プロセスについて４０倍までの歪増幅を得ることができるはずであり、この増幅は、ピエゾ抵抗検出を、一般的な光学的方法と同じレベルの感度あるいはもっと上まで引き上げるだろう。

【００６１】

Ｂ）基本式

ニュートラルラインから距離ξで曲げられた矩形カンチレバーの歪は、曲率半径Ｒによって以下のように与えられる：

【００６２】

【数１１】

$$\varepsilon(x,\xi)=\frac{\xi}{R(x)} \qquad (14)$$

【００６３】
ここで、ｘはレバーの軸に沿った座標であり、固定端でｘ＝０である。この歪は以下の曲げモーメントM_B（ｘ）を引き起こす。
【００６４】
【数１２】

$$M_B(x)=\int\int E(x)\varepsilon(x,\xi)\xi\,d\xi\,dw=\frac{E(x)}{R(x)}\int\int\xi^2 d\xi\,dw=\frac{E(x)I(x)}{R(x)} \qquad (15)$$

【００６５】
ここで、Ｅ（ｘ）はYoung率であり、また、所与の位置ｘにおいてＩ＝［ｗ（ｘ）ｔ（ｘ）^{3}］／１２は慣性の面積モーメント（area moment）、ｗ（ｘ）及びｔ（ｘ）は夫々幅及び厚さである。Ｅ（ｘ）は所与の断面上で一様であると仮定する。平衡状態ではM_Bはレバー上で働く「負荷」モーメントM_Lと等しい。小さな曲げでは、以下の関係が得られる。
【００６６】
【数１３】

$$\frac{1}{R}\sim\frac{d^2z(x)}{dx^2}=M_L(x)H(x) \qquad (16)$$

ここで、Ｈ（ｘ）＝１／［Ｅ（ｘ）Ｉ（ｘ）］とする。位置ｘにおける、レバーのｚ方向（レバー表面に対して垂直方向）の変位ｚ（ｘ）は適切な境界条件を守って式（１６）を積分することから得られる。レバーの位置ｘにおける表面歪は、表面位置（ξ＝ｔ（ｘ）／２）を、式（１６）を用いて式（１４）へ代入することによって得られる。
【００６７】
【数１４】

$$\varepsilon\left(x,\frac{t(x)}{2}\right)=\frac{t(x)}{2}M_L(x)H(x) \qquad (17)$$

【００６８】
Ｃ）力が負荷されたレバー
１）固定端側の細幅部分なし（単純なレバー）
ｗ（ｘ）、ｔ（ｘ）、Ｅ（ｘ）、従ってＨ（ｘ）＝１２／｛ｗ（ｘ）ｔ（ｘ）Ｅ（ｘ）｝が全て定数であると仮定して、単純なレバーを最初に議論する。このレバーの自由端における力Ｆは負荷モーメント（load moment）M_L（ｘ）＝Ｆ（ｌ－ｘ）を引き起こし、従ってこの歪は固定端（ｘ＝０）において最も大きい。M_L（ｘ）についてのこの式を式（１６）に代入し、境界条件ｄｚ（ｘ）／ｄｘ$|_{x=0}$＝０及びｚ（０）＝０を守って式（１６）を連続して積分することで、変位についての周知の式が得られる。
【００６９】
【数１５】

$$z(x)=F\left(\frac{1}{2}lx^2-\frac{1}{6}x^3\right)H \qquad (18)$$

【００７０】
式（１７）により、固定端の歪は以下のように書くことができる。
【００７１】
【数１６】

$$\varepsilon_F = \frac{t}{2} M_L(0) H = \frac{t}{2} (Fl) H \qquad (19)$$

【００７２】
これは「与えられた力によって誘起された歪」を表す。しかしながら、多くの場合（たとえば、力顕微鏡（force microscopy）には、自由端における所与の変位によって誘起された歪ε_zの方に関心がある。ε_zについての式を得るため、式（１８）からの自由端（ｘ＝ｌ）における変位ｚ（ｌ）＝（１／３）Ｆｌ^{3}Ｈを使って式（１９）中の力Ｆを消去して、以下の式を得る。
【００７３】
【数１７】

$$\varepsilon_z = \frac{3}{2} \frac{tz}{l^2} \qquad (20)$$

【００７４】
２）固定端側の細幅部分有り
式（１７）により、歪はＨ（ｘ）に比例し、この値は１２／｛Ｅ（ｘ）ｗ（ｘ）ｔ^3（ｘ）｝に等しい。従って、小さな値の幅（ｗ）、厚さ（ｔ）、またYoung率（Ｅ）によって大きな値のＨが得られる。本発明の表面応力センサでは、センサカンチレバーの個体端の近傍部である固定端側部分の幅を局所的にへらす構成をとっているが、これにより大きな値のＨがもたらされる。前述の例では、幅（ｗ）を小さな値に設定したが、厚さ（ｔ）を小さくすることによってもＨの値を大きくすることができる。固定端側の細幅部分を固定端側に設けることで、大きな歪を得るために最も効率的に機能する。それは、M_Lがその位置で最も大きくなるからである。
【００７５】
固定端側の細幅部分を持つレバーにおいて、自由端での変位は、固定端側の細幅部分から完全なレバーへの接合部での傾斜と変位が連続的であるという境界条件を守って、傾斜と第１段階では０からl_C（固定端側の細幅部分の長さ；図１１（ｂ））、次いでl_Cからｌ（レバー本体部分の長さ；図１１（ｂ））へと、式（１６）を２段階で積分することによって得られる。その結果得られる自由端ｚでの偏位、レバーの剛性Ｓ、所与の力での歪ε_{FC}、所与の変位ｚにおける歪ε_{ZC}についての式は以下の通りである。
【００７６】

【数１８】

$$z=\frac{1}{3}HFl^3\left\{1+3\left(\frac{1}{\alpha}-1\right)\left(\lambda-\lambda^2+\frac{1}{3}\lambda^3\right)\right\}=\frac{1}{3}HFl^3(1+\zeta) \quad (21)$$

$$S=\frac{F}{z}=\frac{3}{Hl^3(1+\zeta)} \quad (22)$$

$$\varepsilon_{F_c}=\frac{t_c}{2}M_L(0)H_c=\frac{t_c}{2}(Fl)H_c \quad (23)$$

$$\varepsilon_{z_c}=\frac{3}{2}\frac{t_c z}{\alpha(1+\zeta)l^2} \quad (24)$$

【００７７】

ここにおいて、ζ＝３［｛（１／α）－１｝｛λ－λ^2＋（１／３）λ^3｝］。α＝Ｈ／Ｈ$_C$、λ＝ｌ$_C$／ｌである。係数（１＋ζ）は、式（２２）に従って、固定端側の細幅部分によるレバー剛性Ｓの減少とみなされる。ここでもまた、式（２１）を使用して式（２３）中の力Ｆが消去される。αとλの両方が＜＜１である場合を議論しているので、ζ　３λ／αと近似でき、従って以下の議論で（１＋ζ）　（１＋３λ／α）及びα（１＋ζ）　α＋３λと近似できる。式（１９）、（２３）並びに（２０）、（２４）から、所与の力Ｆ及び所与の変位ｚにおける、固定端側の細幅部分による歪増幅ν$_F$、ν$_{z,l}$は、以下のように表すことができる。

【００７８】

【数１９】

$$\nu_F=\frac{\varepsilon_{Fc}}{\varepsilon_F}=\frac{t_c}{t}\frac{H_c}{H}=\tau\frac{w}{w_c}\frac{E}{E_c}\frac{t^3}{t_c^3}=\frac{\tau}{\beta\eta\tau^3}=\frac{\tau}{\alpha} \quad (25)$$

$$\nu_{z,l}=\frac{\varepsilon_{zc}}{\varepsilon_z}=\frac{\tau}{\alpha}\frac{1}{(1+\zeta)}\sim\frac{\tau}{\alpha+3\lambda}=\frac{\tau}{\beta\eta\tau^3+3\lambda} \quad (26)$$

【００７９】

ここにおいて、ｗ$_c$、ｔ$_c$及びＥ$_c$は固定端側の細幅部分のパラメータであり、β＝ｗ$_c$／ｗ、τ＝ｔ$_c$／ｔ、η＝Ｅ$_c$／Ｅ及びα＝βηγ^{3}である。式（２５）から判るように、所与の力に対して歪はτ／α倍だけ増幅されるが、所与の変位についての歪増幅はこれに対応してレバー剛性の係数（１＋ζ）倍だけ減少する。ν$_{z,l}$（α，λ）は所与のτに対して最大値を持たない。ν$_{z,l}$は、３λ＜＜αに対するν$_{z,l}$＝τ／αから３λ＞＞αに対するν$_{z,l}$＝τ／（３λ）まで単調に変化する。ことばで表現すれば、αあるいはλの一方だけを非常に小さくすれば、他方のパラメータに主に依存するようになり、その結果、歪増幅には非効率的な固定端側の細幅部分となる。従って、αとλの両者を小さくして、図１２で明確に観察されるように、αを３λと同程度とすることが重要である。図１２は、点力の場合の、所与の変位に対する固定端側の細幅部分による歪増幅を示す図である。固定端側の細幅部分の長さの比及び幅の比（ｌ$_C$／ｌ$_{UC}$、ｗ$_C$／ｗ$_U$）への依存性が示される。付記の式（１０）によって得られた値が、０．０１≦ｌ$_C$／ｌ$_{UC}$≦０．２５かつ０．０１≦ｗ$_C$／ｗ$_U$≦０．２５の範囲で濃淡付きワイヤーフレームとして、一方、ＦＥＡによって計算した結果は灰色のボールとして示されている。他方ν$_{z,l}$（τ）＝τ／（βητ^3＋３λ）は所与のβ、η及びλについて以下で極大となる。

【００８０】

【数２０】

$$\tau_{Max}=\left(\frac{3\lambda}{2\beta\eta}\right)^{1/3} \quad (27)$$

【００８１】
これは
【００８２】
【数２１】

$$\partial\nu_{z,l}(\tau)/\partial\tau=0$$

【００８３】
から決まる。このτ_{Max}により増幅度は以下のようになる。
【００８４】
【数２２】

$$\nu_{z,l,\tau}=\frac{2^{2/3}}{3^{5/3}\lambda^{2/3}(\beta\eta)^{1/3}}=\left(\frac{4}{3^5\lambda^2\beta\eta}\right)^{1/3} \quad (28)$$

【００８５】
２β＜３λの場合、高い増幅度を得るには厚さについてτ＞１となることが要求される。
【００８６】
孤立した固定端側の細幅部分、すなわちβ＝η＝１は、λ＝０．００６について極大の増幅度$\nu_{z,l,\tau}=(2^2/3^5)^{1/3}/\lambda^{2/3}$ ７．７をもたらす。（例示のレバーとして、以下のものを使用する：Ｓ＝１Ｎ／ｍ、ｔ＝２μｍ、ｗ＝８０μｍ、ｌ＝３２０μｍ。これは$w_C=l_C=2\mu m$として、α＝β＝０．０２５（η＝τ＝１）及びλ＝０．００６となる。）固定端側の細幅部分の幅と組み合わせると、所与のβ及びλについて、増幅度にいくらかの利得がある。しかしながら、それは比較的控えめである。それは、$\nu_{z,l,\tau}\propto 1/(1+\zeta)\propto\alpha$により剛性もまた減少し、増幅度$\nu_{z,l,\tau}$が減少するからである。固定端側の細幅部分のパラメータがλ＝０．００６でβη＝０．０２５の場合、$\nu_{z,l}$＝２３（τ＝１）との比較で、$\nu_{z,l,\tau}$＝２６（τ_{Max}＝０．７１）を得る。
【００８７】
ここまでは所与の変位及び所与のレバー長での固定端側の細幅部分による増幅$\nu_{z,l}$を取り扱ってきたが、しかしながら増幅度$\nu_{z,l}$それ自体には関心はなく、レバー全体及び固定端側の細幅部分のパラメータの各々についての極大歪を求めることに関心がある。所与の変位での歪はレバー長の減少とともに増大する（式（２４））が、剛性の減少とともに減少し（$\varepsilon_{zc}=t_c z HIS/2\alpha$、式（２２）及び（２４）より）、従って、剛性が失われるのをレバーを短くすることでバランスさせれば、歪をかなり増大させることができる。歪を全体的に最大化するための手元にあるパラメータは固定端側の細幅部分のパラメータw_C、t_C、E_C及びl_C、製造プロセスによって与えられた短縮された（reduced）固定端側の細幅部分のラメータα、β、η、τ及びλであり、応用方法に応じて剛性及びバンド幅、あるいはレバー応答時間が決まる。最初に、固定端側の細幅部分を持たないレバーの寸法ｗ、ｔ、ｌ及びＥを選び、剛性及びバンド幅の要件を満たす。良好

な増幅度を得るため、３λがα＝βητ^{3}と同等でなければならず、ｔは固定端側の細幅部分をより薄くするための余裕を持っていなければならない。上で選択した例示のレバーは出発点としての良好な例である。固定端側の細幅部分を短く、広く、あるいは厚くすることで、固定端側の細幅部分による柔軟化を補償することができる。以下では、レバーを短くすることを選択する。それは、この選択がレバーの幅を広くするよりも効率的だからである。更に、固定端側の細幅部分の厚さについて増幅度を最大化するというオプションも確保しておきたい。

【００８８】

最初にα＝βη、すなわちτ＝１である固定端側の細幅部分を考える。固定端側部分が細幅となっていないレバーの寸法を、下付き添え字ｕで表せば、式（２２）の剛性Ｓ$_u$＝Ｆ／ｚについて以下を得る（ここで、固定端側部分が細幅となっていないレバーについてλ＝０であることからζ＝０）。

【００８９】

【数２３】

$$S_u = \frac{E_u w_u t_u^3}{4 l_u^3} = \frac{Y}{4 l_u^3} \qquad (29)$$

【００９０】

Ｓ$_u$を短縮されたレバーの剛性に等しいとセットし、ｌ$_1$＝ｕｌ$_u$として、Ｓ$_1$＝Ｙ／［４ｌ$_1^3$（１＋３λ$_1$／βη）］＝Ｙ／［４ｌ$_1^3$（１＋３λ／ｕβη）］となり（α＝βηはレバー短縮によっては変化しないが、λはλ$_1$＝λ／ｕとなることに注意）、以下に至る。上記においてｕは短縮係数、Ｙ＝ｗ$_A$／ｗである。

【００９１】

【数２４】

$$u^3\left(1+\frac{3\lambda}{u\beta\eta}\right)=1 \qquad (30)$$

【００９２】

短縮係数ｕは１に近いと仮定するので、これを１－δとおいて式（３０）に代入し、δ^{2}までの項を考慮に入れて計算を行うことでδの値を求め、このδの値を１－δに代入することで、以下を得る。

【００９３】

【数２５】

$$u = 1 - \frac{\lambda}{\beta\eta + \lambda} \qquad (31)$$

【００９４】

また増幅度については以下を得る。

【００９５】

【数２６】

$$\nu_{z,S} = \frac{1}{u^2\left(\beta\eta + \frac{3\lambda}{u}\right)} \qquad (32)$$

【００９６】

増幅度は、固定端側の細幅部分を更に薄くすることにより、$\tau_{Max}=(3\lambda_2/2\beta\eta)^{1/3}$によって更に増加することができる（式（２７）を参照されたい）。$l_2=u_\tau l_0$、$\lambda_2=\lambda/u_\tau$、及び$\alpha=\beta\eta\tau_{Max}{}^3=3\lambda_2/2$として、$S_u$を$S_2=Y/[4l_2{}^3(1+3\lambda_2/\alpha)]=Y/[4l_2{}^3(1+2)]$に等しいとセットし（$\tau_{Max}$、従ってαは短縮されたレバーの実際の細長の固定端部分の長さ$\lambda_2=\lambda/u_\tau$によって与えられることに注意）、短縮係数について$u_\tau{}^3=1/3$を得て、また増幅度は以下のようになる。

【００９７】

【数２７】

$$\nu_{z,S,\tau} = \frac{\varepsilon_{zc,S,\tau}}{\varepsilon_z} = \left(\frac{t_c}{t}\right)\frac{1}{\left(\beta\eta\tau_{Max}{}^3+3\lambda_2\right)u_\tau{}^2} = \frac{\tau_{Max}}{\left(\frac{9}{2}\frac{\lambda}{u_\tau}\right)u_\tau{}^2} = \left(\frac{4}{3^5\beta\eta\lambda^2u_\tau{}^4}\right)^{1/3} \qquad (33)$$

【００９８】

剛性Ｓ＝定数に維持することによる増幅度増大は、τ＝１とすれば控えめだが、τ_{Max}ではかなりのものとなりえる。式（２６）及び（３２）から、以下を得る（τ＝１であることに注意）

【００９９】

【数２８】

$$\frac{\nu_{z,S}}{\nu_{z,l}} = \frac{\beta\eta+3\lambda}{u^2\left(\beta\eta+\frac{3\lambda}{u}\right)} \qquad (34)$$

【０１００】

これは例示のレバーについて約１．４４をもたらす。式（１５）及び（２０）から以下を得る。

【０１０１】

【数２９】

$$\frac{\nu_{z,S,\tau}}{\nu_{z,l,\tau}} = u_\tau{}^{-4/3} \qquad (35)$$

【０１０２】

これは一般に約１．６３をもたらす。Ｓ＝定数に維持すると、増幅度は$\nu_{z,l}$＝２３から$\nu_{z,S}$＝３２へ、また$\nu_{z,l,\tau}$＝２６から$\nu_{z,S,\tau}$＝４２へと、夫々増加する。

所与の力と所与の剛性において、増幅度について同一の方針で進む。τ_{Max}は存在せず、また固定端側の細幅部分の厚さが$\alpha=\beta\eta\tau^{3}$に含まれるいかなる厚さであっても、短縮係数ｕが式（２９）から得られる。増幅度はｕによって低減され、以下で与えられる。

【０１０３】

【数３０】

$$\nu_{F,S}=\frac{\tau}{\alpha}u \qquad (36)$$

【０１０４】

Ｄ）二重レバー

一様な応力が表面上に与えられる「単一」の吸着カンチレバーの変位ε_Aは以下で記述される。

【０１０５】

【数３１】

$$\varepsilon_A=\frac{1}{2}t_A M H_A \qquad (37)$$

【０１０６】

図１１に、各種の形状における歪増幅を比較して示す。ｘ方向の歪は濃淡で表現している。点力（１０ｎＮ）が（Ａ）及び（Ｂ）中の個々のカンチレバーの右端にある縁で示される点に印加される。（Ｃ）及び（Ｄ）では異方性表面応力（０．１Ｎ／ｍ）がカンチレバー全体の表面に誘起されるが、他方（Ｅ）及び（Ｆ）のカンチレバーでは破線で囲まれている領域である吸着レバーの表面上に誘起される。（Ｂ）及び（Ｆ）では歪は固定端側の細幅部分で効果的に増強されている。（Ｂ）及び（Ｆ）が印加されている点力あるいは表面応力によって変形した形状は差し込み図中に示される。本図に使用されている値は以下の通りである（μｍ単位）。（Ａ）から（Ｄ）についてはl_{UC}＝５００、l_C＝１５０、w_U＝１００、w_C＝３０。（Ｅ）及び（Ｆ）についてはw_A＝１００、l_{UC}＝１５０、l_C＝３０、w_U＝５０、w_C＝１０。また、全ての場合につき、厚さ＝１、Young率＝１７０Ｇｐａである。

【０１０７】

また、図１２に、吸着レバーの表面上に印加された所与の表面応力についての、二重レバー形状の場合の歪増幅を示す。吸着レバーとセンサレバーの長さの比及び幅の比（l_{UC}/l_A、w_U/w_A）への依存性が示される。付記の式（１７）によって得られた値が濃淡付きワイヤーフレームとして与えられる。ＦＥＡによる結果が灰色のボールによってプロットされる。幅についての比の値が大きくなると常に増幅度が高くなるが、任意の所与のw_U/w_Aに対してある値のl_{UC}/l_Aの位置に最大値が存在する。

【０１０８】

一様応力によって誘起される曲げモーメントは定数であるので、点力についての歪（式（１）、図１１（Ａ），（Ｂ））とは対照的に、ε_Aは、図１１（Ｃ）、（Ｄ）に示すように、事実上位置には依存しない。一様な応力についてのこの歪を増幅するため、センサ

カンチレバーと吸着カンチレバーの２つのカンチレバーから構成され、これらが自由端同士で結合された、二重レバー形状（図１１（Ｅ）、（Ｆ））を論じる。二重レバー形状の場合は、センサカンチレバーへの結合は吸着カンチレバーの変位を作用－反作用力F_Rだけ低減して、以下の式が得られる。

【０１０９】

【数３２】

$$z_A = \frac{1}{2}MH_A l_A^2 - \frac{1}{3}F_R H_A l_A^3 \qquad (38)$$

【０１１０】

吸着カンチレバーによって力が誘起され、また固定端側の細幅部分を有するセンサカンチレバーの変位（ｚ）は、式（２１）のように記述できる。吸着カンチレバーとセンサカンチレバーの両者の端点は固く接続されているため、z_Aはｚに等しい。従って、式（２１）及び（３８）からF_Rを消去して以下のように変位を求めることができる。

【０１１１】

【数３３】

$$z_A = z = \frac{MH_A l_A^2}{2\left(1+\frac{H_A l_A^3}{Hl^3(1+\zeta)}\right)} \qquad (39)$$

【０１１２】

センサカンチレバーの固定端における歪ε_Cは、式（１９）に従って以下のように求めることができる。

【０１１３】

【数３４】

$$\varepsilon_C = \frac{3MH_A t_C}{4\alpha}\frac{1}{(1+\zeta)\lambda_A^2+\frac{\alpha_A}{\lambda_A}} \qquad (40)$$

【０１１４】

最後に、二重レバー形状中の吸着カンチレバーと同一の寸法の「単一」の吸着カンチレバーと比較される増幅度（$\varepsilon_A = t_A MH_A / 2$）を得る。

【０１１５】

【数３５】

$$\nu = \frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_A} = \frac{3\tau_A \tau}{2\alpha}\frac{1}{(1+\zeta)\lambda_A^2+\frac{\alpha_A}{\lambda_A}} \qquad (41)$$

【０１１６】

かくして、所与の形状についての歪増幅度を計算することができる。しかしながら、増幅度を最大にするため、各部分、すなわち吸着カンチレバー、センサカンチレバー及び固定端側の細幅部分、の組み合わせが最適化されなければならない。ｄν／ｄλ$_{A}$＝０より、以下を得る。

【０１１７】

【数３６】

$$\lambda_{A,Max}=\left(\frac{\alpha_A/2}{1+\zeta}\right)^{1/3} \quad 、 \qquad (42)$$

【０１１８】

このλ$_{A,Max}$を式（４１）中のλ$_{A}$に代入することにより、以下の式を得る。

【０１１９】

【数３７】

$$\nu_{Max}=\frac{\tau_A\tau}{2\alpha}\left(\frac{\alpha_A}{2}\right)^{-2/3}(1+\zeta)^{-1/3} \qquad (43)$$

【０１２０】

＜用語集＞

・ｌ、ｗ、ｔ、Ｅ　二重レバー構成中のカンチレバーまたはセンサレバーの長さ、幅、厚さ及びYoung率

・ｌ$_{C}$、ｗ$_{C}$、ｔ$_{C}$、Ｅ$_{C}$　レバーの固定端側の細幅部分についての上と同じ値。ここでｌ$_{C}$はｌの一部であることに注意

・ｌ$_{A}$、ｗ$_{A}$、ｔ$_{A}$、Ｅ$_{A}$　一様表面応力負荷、つまり吸着物で覆われたレバーについての同上の値

・Ｈ、Ｈ$_{C}$、Ｈ$_{A}$　＝１２／Ｅｗｔ^{3}、添え字Ｃ、Ａ付きも同じ

・λ、λ$_{A}$　＝ｌ$_{C}$／ｌ、ｌ／ｌ$_{A}$

・β、η、τ　＝夫々ｗ$_{C}$／ｗ、Ｅ$_{C}$／Ｅ、ｔ$_{C}$／ｔ

・α、α$_{A}$　＝夫々Ｈ／Ｈ$_{C}$＝βητ^{3}、Ｈ$_{A}$／Ｈ$_{S}$

・ε$_{F}$、ε$_{M}$　夫々、所与の力におけるｘ方向の表面応力、負荷モーメント

・ε$_{z}$　所与のレバー変位ｚにおける同上の値

・ε$_{Fc}$、ε$_{Mc}$、ε$_{zc}$　固定端側の細幅部分における同上の値

・ν$_{z}$、ν$_{A}$　夫々、固定端側の細幅部分による歪増幅度と二重レバーによる歪増幅度

・ｚ（ｘ）、ｚ　位置ｘにおけるレバーの変位であり、夫々自由端及びセンサレバーと吸着レバーとの間の「接続」位置における変位

・Ｆ　カンチレバーの自由端あるいはセンサレバーと吸着レバーとの間にある「接続」位置に印加される力

・Ｍ$_{L}$　力または一様な表面応力による負荷モーメント

・Ｘ　＝ｌ$_{A}$／ｌ

・Ｙ　＝ｗ$_{A}$／ｗ

【産業上の利用可能性】

【０１２１】

小型、低価格、レーザーアラインメント不要、不透明液体中で使用可能等の、実際のアプリケーション向けの多様な利点により、通常のカンチレバーに比べて数桁の感度増幅がおこなわれる最適化されたＳＳＳは医学診断、遺伝子及び環境研究、及び微量のターゲッ

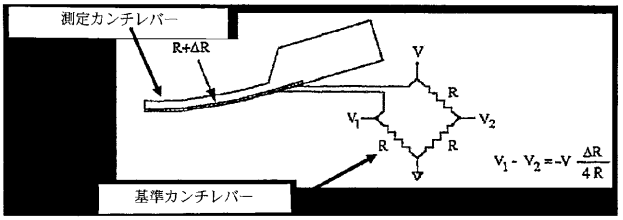
ト分子を検出する他のあらゆるアプリケーションの新たな時代のドアを開くことであろう。また、多くの場合構造的変化によって誘起される表面応力の機械的検出はカンチレバーセンサの非常にユニークな特徴であることに注意することは重要である。これにより、ここに提供したＳＳＳは、構造変化の観測が原理を見出すために本質的である多様な現象の解明に重大な貢献をなし、新たな解析方法たる「ナノ応力解析」を確立する。

【符号の説明】

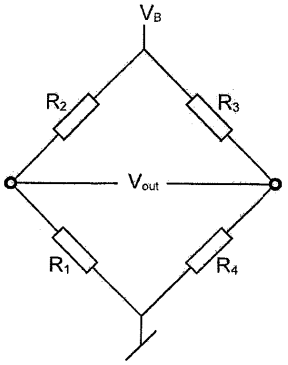
【０１２２】

１１　デバイス層
１２　酸化膜
１３　二重膜
１４　ピエゾ抵抗部
１５　窒化ケイ素膜
１６　コンタクトホール
１７　デバイス電極
１８　酸化膜
１９　埋込み酸化膜（ＢＯＸ）
２０　膜（メンブレン）
２１　ポリエチレンイミン（ＰＥＩ）層
２２　バルク基板
２３　熱酸化膜
２４　窒化ケイ素膜
２５　センサビーム

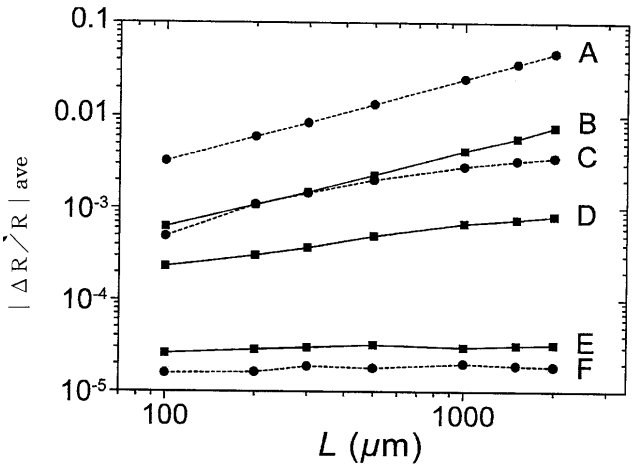
【図２】



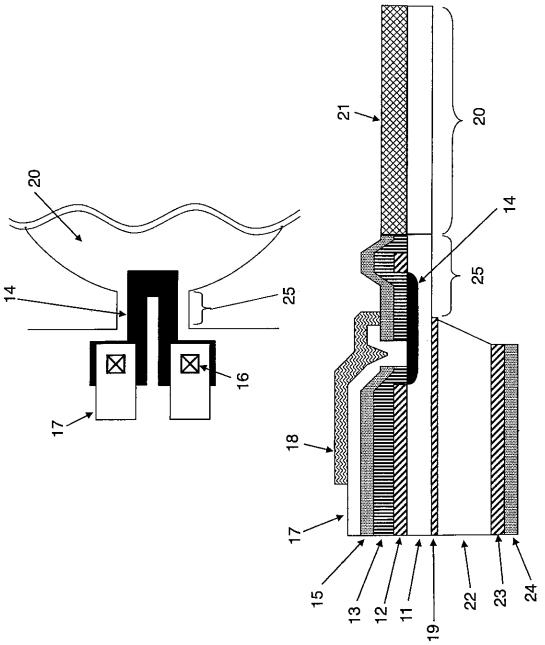
【図５】



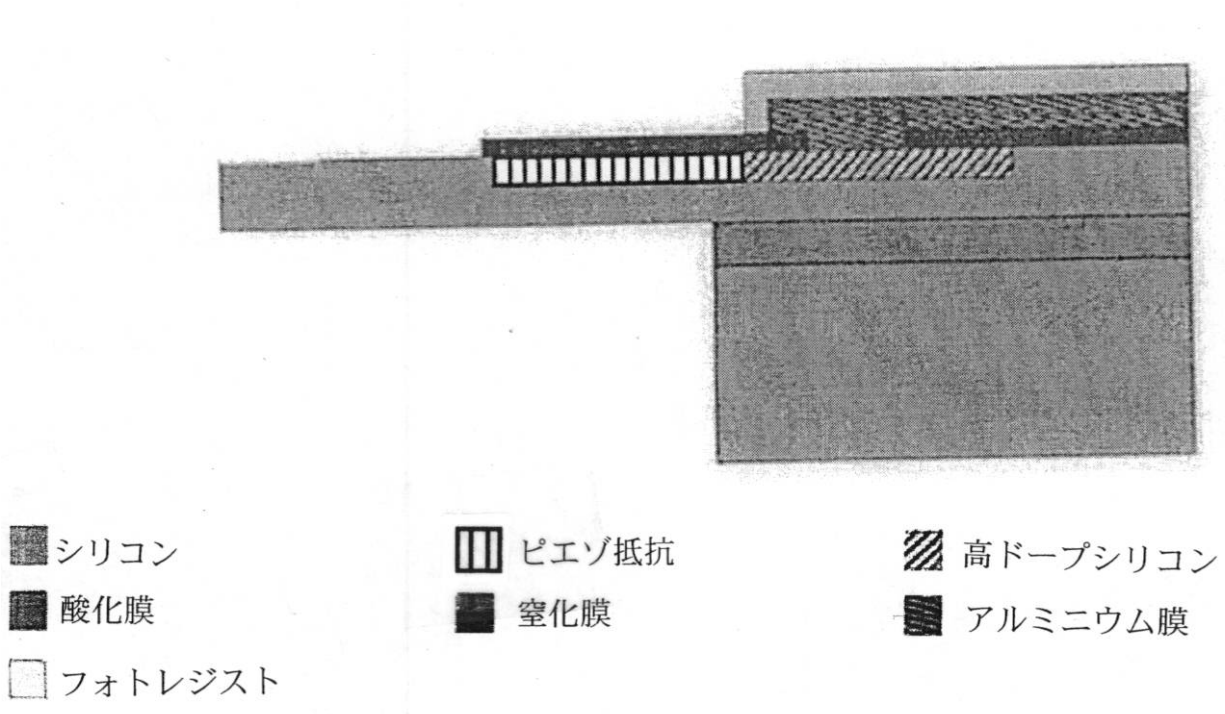
【図８】



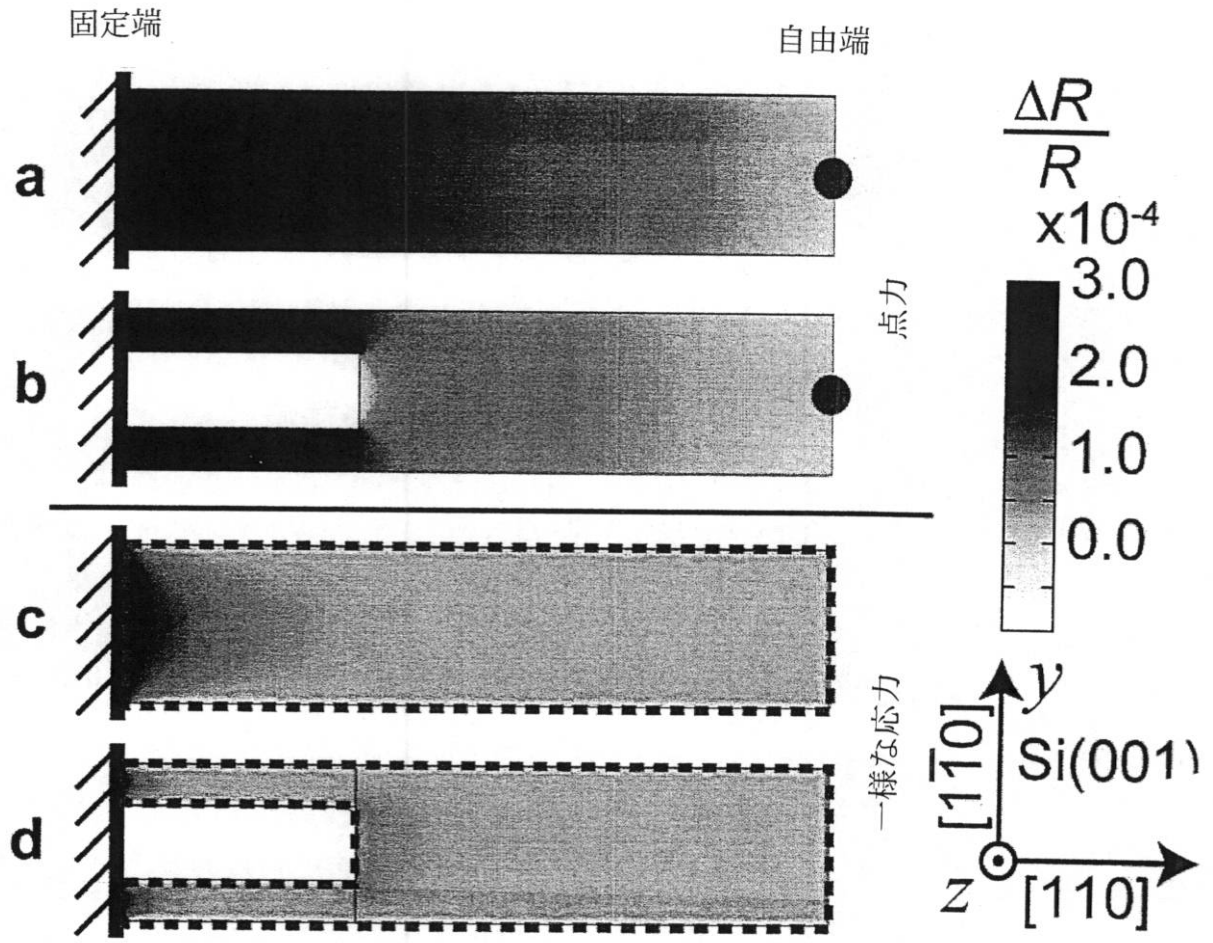
【図１０】


20
14
25
16
17
21
20
14
25
18
17
15
13
12
11
19
22
23
24

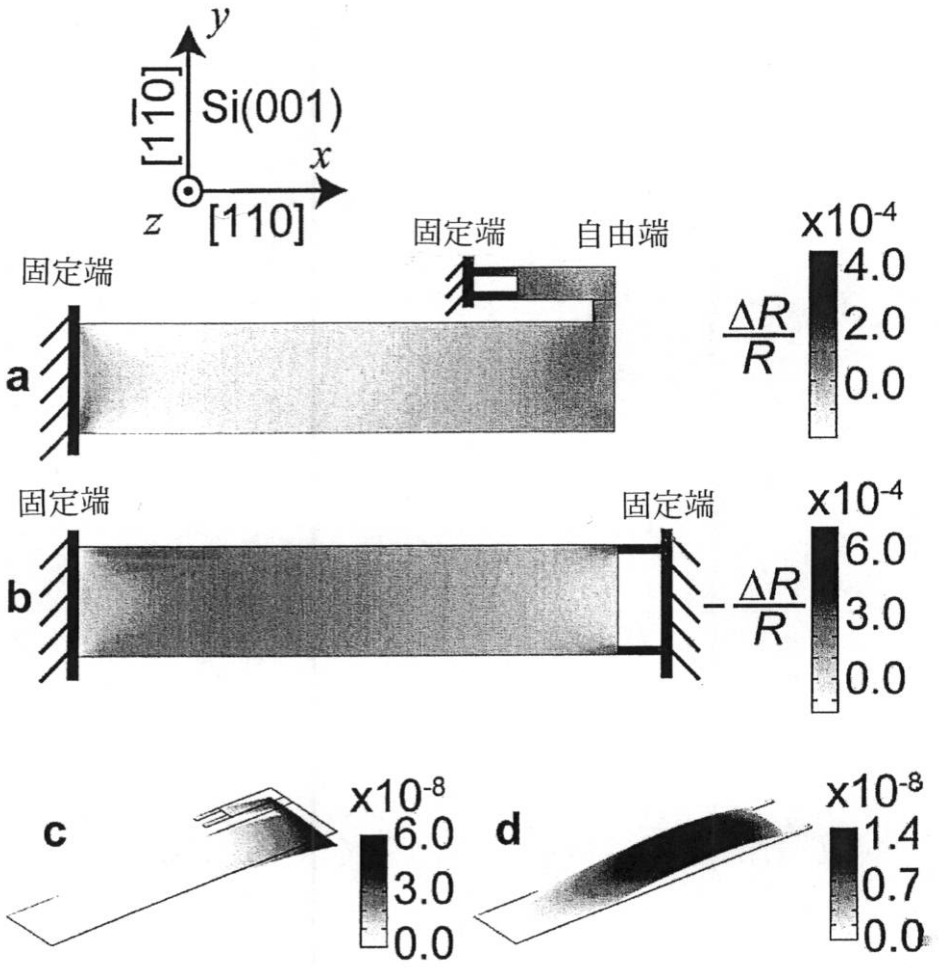
【図１】


シリコン
酸化膜
フォトレジスト
ピエゾ抵抗
窒化膜
高ドープシリコン
アルミニウム膜

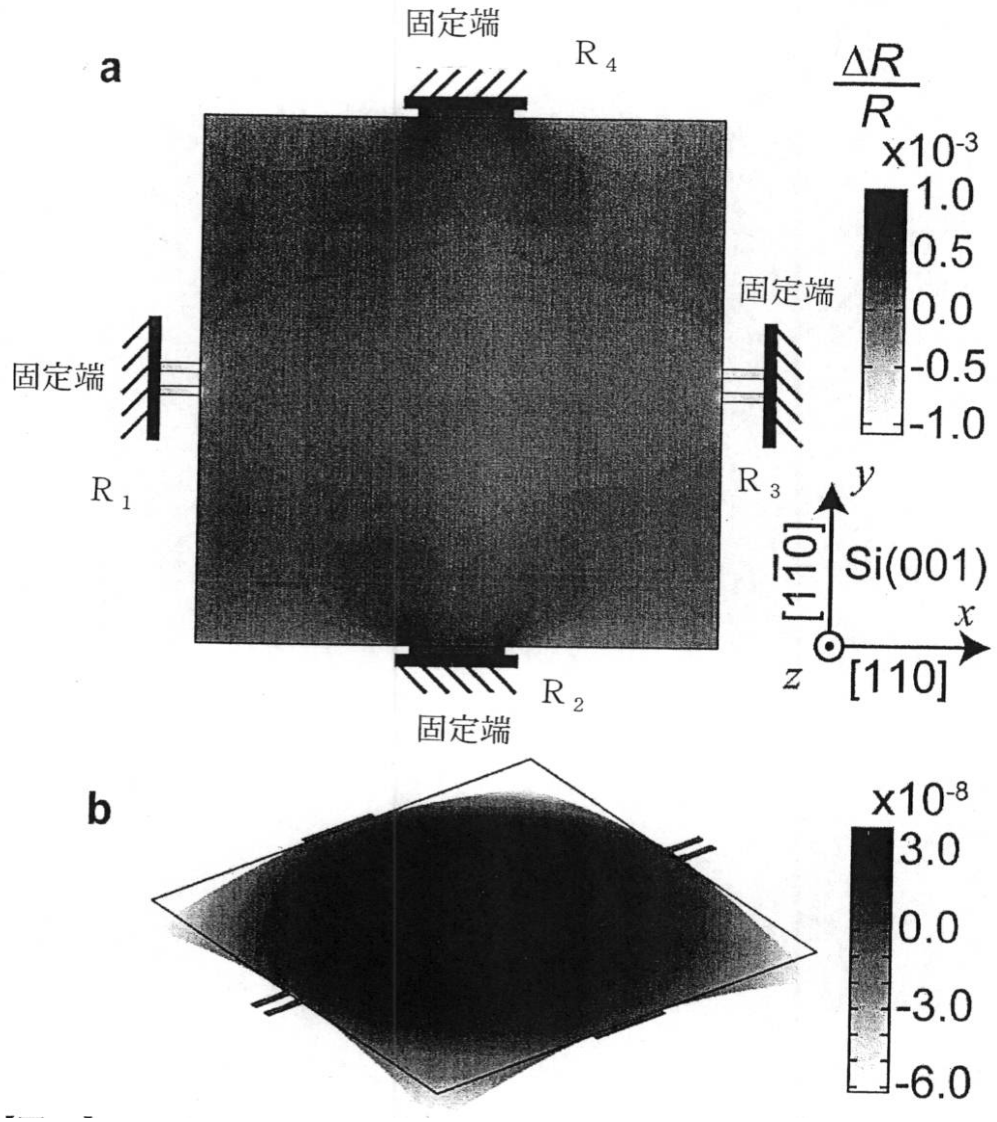
【図３】



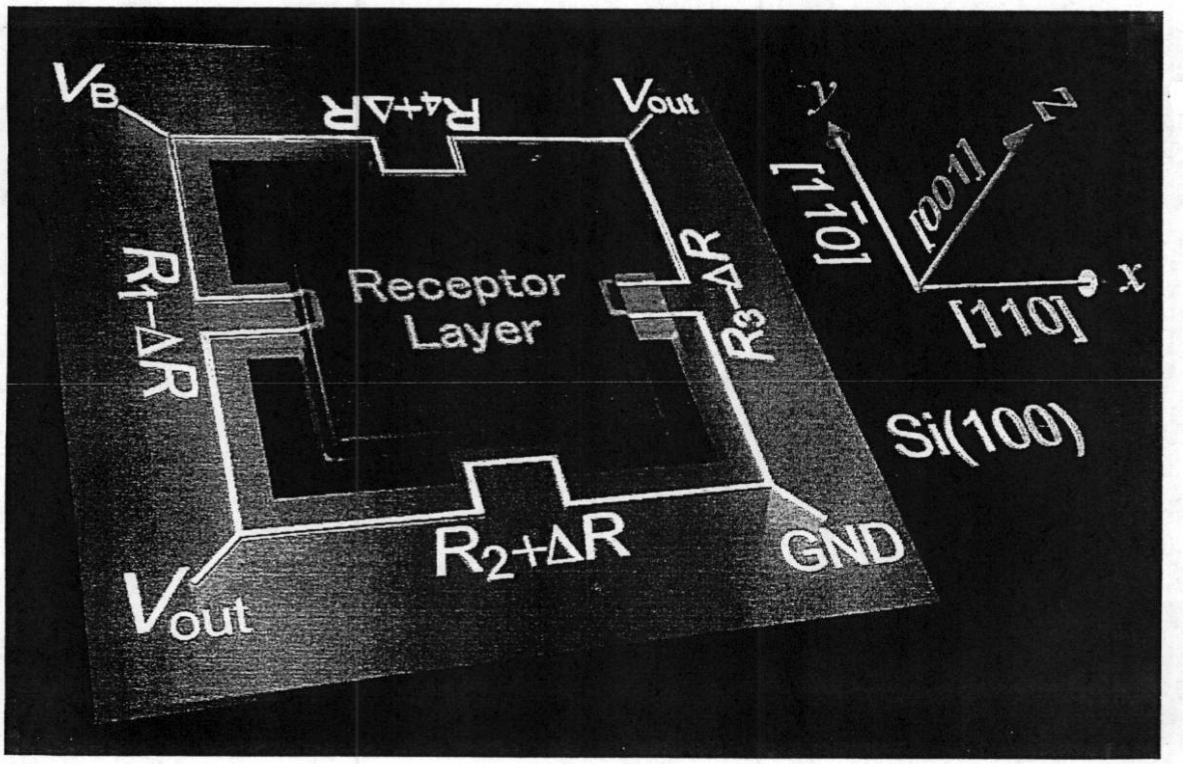
【図４】


y
[1$\bar{1}$0]
Si(001)
x
z
[110]
固定端
自由端
固定端
a
x10-4
4.0
2.0
0.0
ΔR/R
固定端
固定端
b
x10-4
6.0
3.0
0.0
−ΔR/R
c
x10-8
6.0
3.0
0.0
d
x10-8
1.4
0.7
0.0

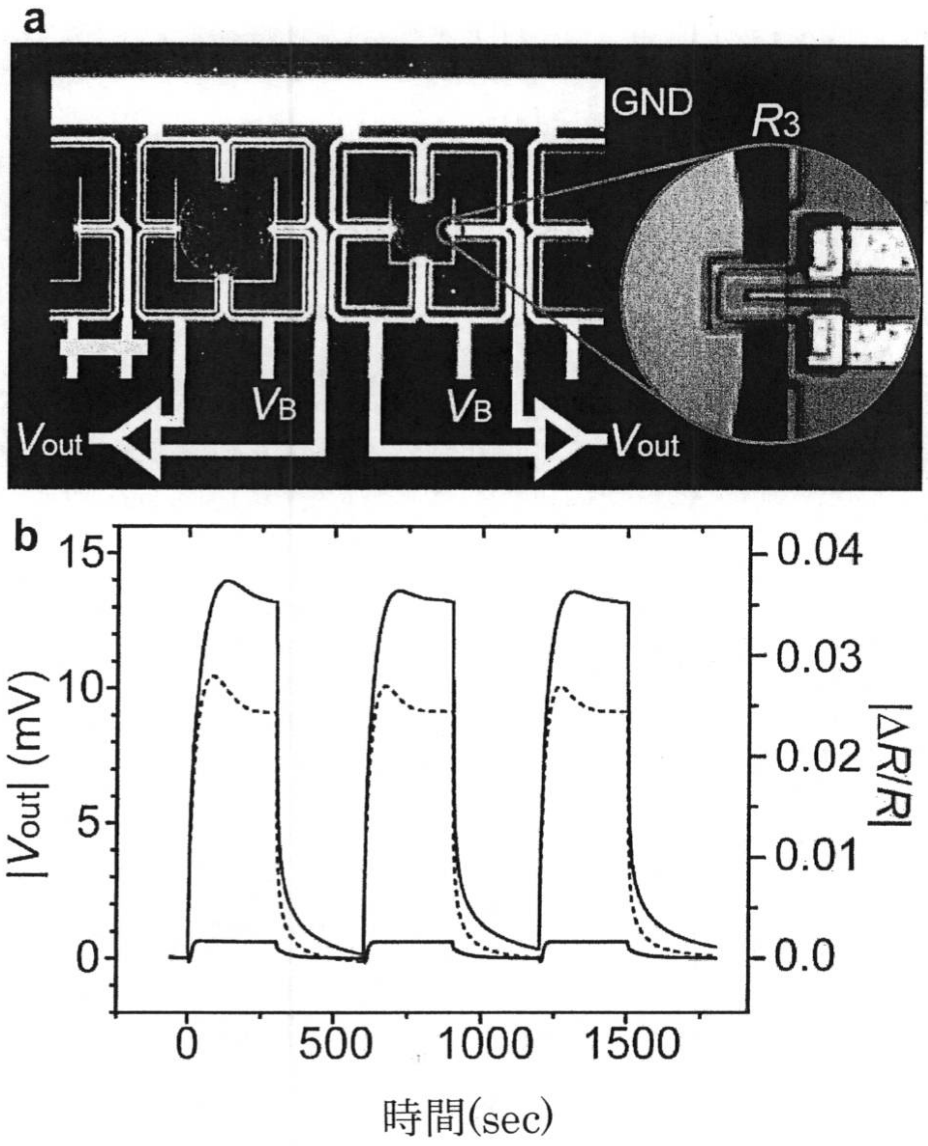
【図６】


a
固定端
R4
ΔR/R
x10-3
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
固定端
固定端
R1
R3
y
[1$\bar{1}$0]
Si(001)
x
z
[110]
R2
固定端
b
x10-8
3.0
0.0
-3.0
-6.0

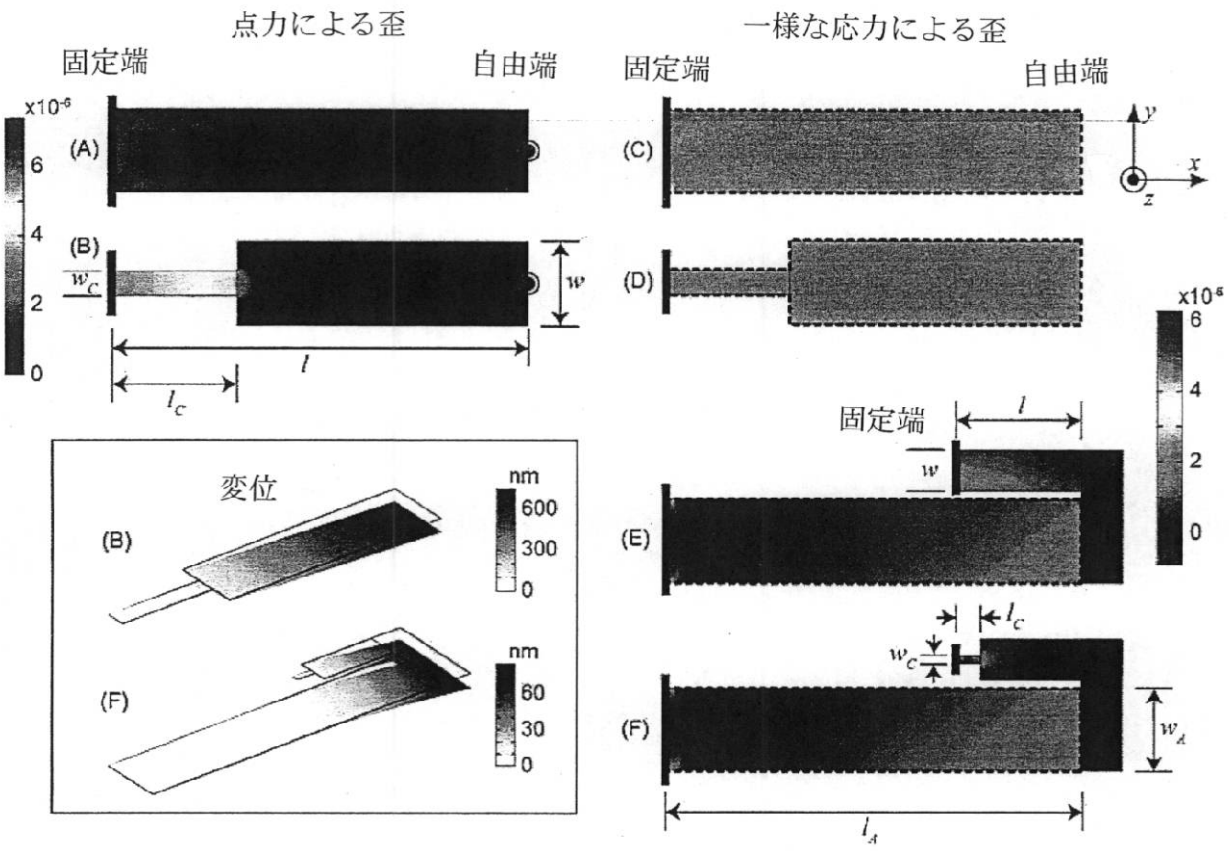
【図７】


V_B
$R_4+\Delta R$
V_{out}
$R_1-\Delta R$
Receptor Layer
$R_3-\Delta R$
$R_2+\Delta R$
GND
V_{out}
y
z
[001]
[1$\bar{1}$0]
x
[110]
Si(100)

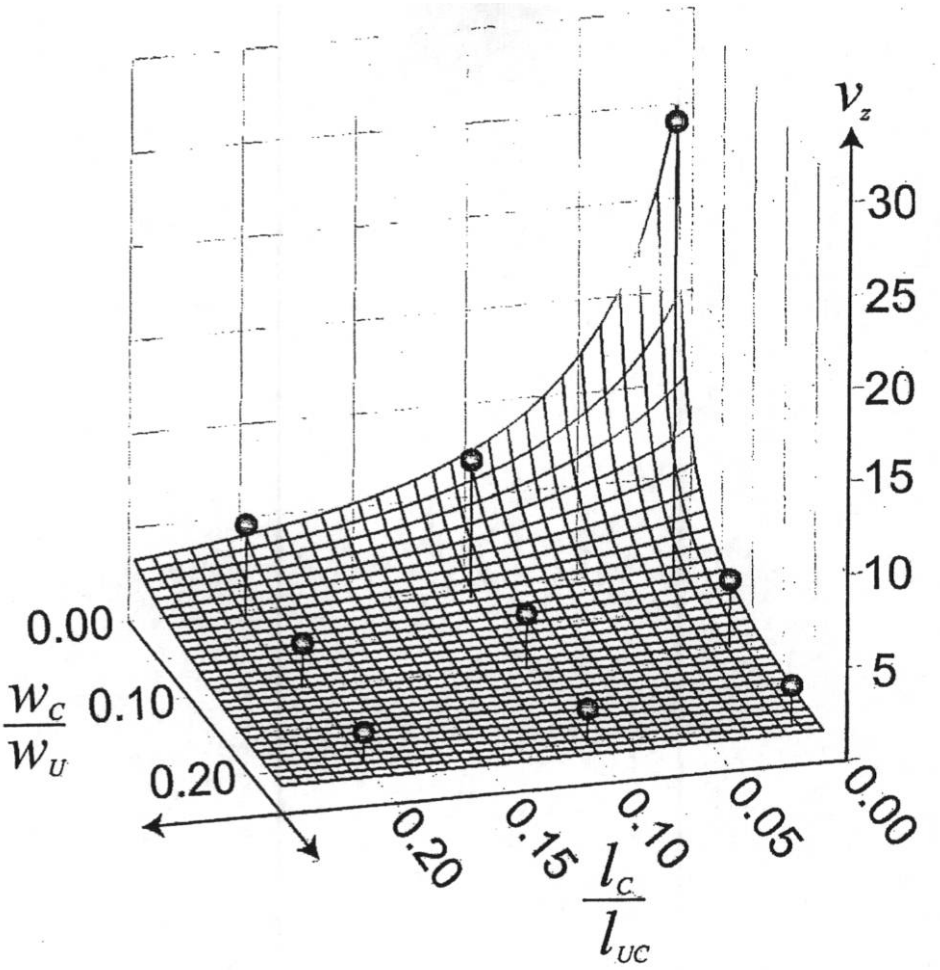
【図９】


a
GND
R3
VB
VB
Vout
Vout
b
15
10
5
0
|Vout| (mV)
0.04
0.03
0.02
0.01
0.0
|ΔR/R|
0
500
1000
1500
時間(sec)

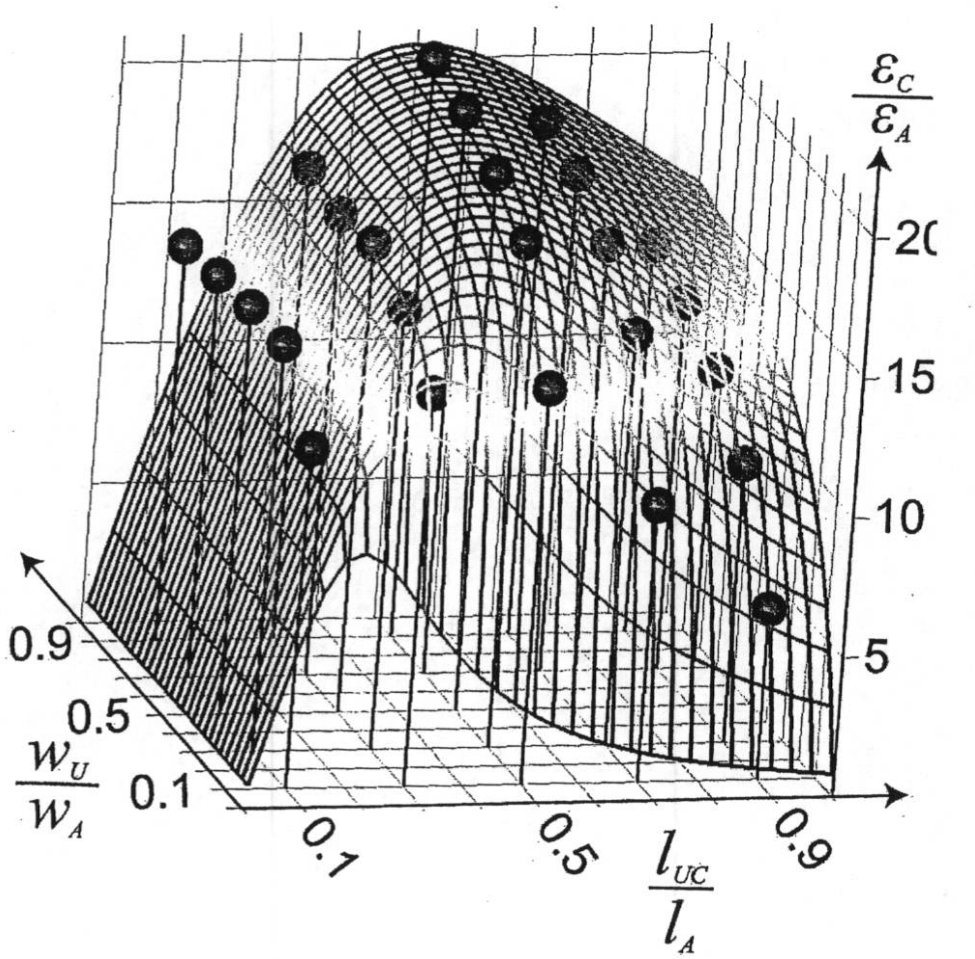
【図１１】


点力による歪
固定端
自由端
x10⁻⁶
6
4
2
0
(A)
(B)
w_c
w
l
l_c
変位
(B)
nm
600
300
0
(F)
nm
60
30
0
一様な応力による歪
固定端
自由端
(C)
(D)
y
x
z
x10⁻⁶
6
4
2
0
固定端
l
w
(E)
l_c
w_c
(F)
w_A
l_A

【図１２】


v_z
30
25
20
15
10
5
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
$\frac{l_c}{l_{UC}}$
0.00
0.10
0.20
$\frac{w_c}{w_U}$

【図１３】


$\frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_A}$
20
15
10
5
0.9
0.5
0.1
$\frac{w_U}{w_A}$
0.1
0.5
0.9
$\frac{l_{UC}}{l_A}$

フロントページの続き

(72)発明者　秋山　照伸
ヌーシャテル　セアシュ－２００２、ルー・ジャック・ドロー１、エコール・ポリテニク・フェデラール・ド・ローザンヌ、インスティチュート・オブ・マイクロエンジニアリング内
(72)発明者　ピーター　フェッティガー
ヌーシャテル　セアシュ－２００２、ルー・ジャック・ドロー１、エコール・ポリテニク・フェデラール・ド・ローザンヌ、インスティチュート・オブ・マイクロエンジニアリング内