

Yasuyuki Kageyama

要

旨

振動型マイクロセンサデバイスの高性能・高集 積・低コスト化の実現のためには,表面マイクロ マシン技術を用い多結晶シリコン(ポリシリコン) 薄膜を構造材料とする表面型センサ形成プロセス の確立が必要である。この材料に要求される応力 状態の制御法を検討した。両持ち梁構造を実現す るために必要な引張応力状態を得るためには通常 のLSIプロセスにおける堆積条件は不適当であり, ジシランガスを原料として非晶質シリコン薄膜を 堆積の後,アニールにより多結晶化する方法が有 効であることが判明した。また,ポリシリコン薄 膜内部に存在する膜厚方向応力分布による片持ち 梁構造の反りを抑える必要がある。この応力分布 の測定法を考案し実測した結果,基板状態,表面 状態,およびリン導入の影響があることを確認し た。この結果をもとに反り制御法を考案し,表面 に存在する引張応力強化層を削除する方法,ある いは逆に酸素イオン注入後の結晶化により引張応 力を増加させた層を形成する方法で,センサ動作 に支障のない範囲に抑制できることを実証した。

Abstract

The establishment of a fabrication technique for surface-micromachined sensor devices constructed from polycrystalline silicon thin films is in urgent need for the production of resonating microsensor devices with higher performance and integration at lower cost. The method of controlling the stress condition needed to the polycrystalline silicon thin films is studied. It is found that a procedure of post-annealing process after deposition of amorphous silicon thin films from disilane gas is suitable for obtaining the tensile stress state of polycrystalline silicon thin films for use in doubly-supported-beam structures. To prevent a bending of cantilever beam caused by the non-uniform stress distribution in the surface normal direction, we analyzed the stress distribution in the films using a newly developed method. The stress distribution was proved to be influenced by the substrate condition, surface condition, and phosphorus doping. According to these results, some methods to restrict the bending are designed. One of the methods is to eliminate the surface layer with strong tensile stress from the polycrystalline silicon thin film. Another is to induce a tensile stress increase in a localized layer by the postannealing after oxygen ion implantation, which acts as a counter balance to compensate a bending momentum. These results prove their effectiveness in the restriction of the bending to the extent acceptable for a sensor operation.

キーワード ポリシリコン,薄膜,応力,分布,反り,酸素,リン

4

1.はじめに

加速度センサ,圧力センサに代表される自動車 用マイクロセンサデバイスの需要の高まりととも に,センサに対し小型高精度化,高信頼化,低価 格の要望が強まる。これまでセンサ作製に用いら れてきた単結晶シリコンを用いたバルク型マイク ロマシーニング技術では,LSIプロセス整合性が 低い等の理由から,上記要望に十分応えることが できないのが現状である。

近年,多結晶シリコン(ポリシリコン)を用い た表面型のマイクロマシニング技術が着目され, センサ開発が活発に行われている¹⁻⁴⁾。この手法 は,半導体デバイスの電極材として一般に用いら れるポリシリコン薄膜を微小力学センサの構造材 として用いるものである。一般の半導体プロセス に準じた方法で加工が可能なため,プロセスとの 整合性があり,集積化可能(高精度化),微細化 可能,従って安価に作製できるという特長があり, 今後のマイクロセンサデバイス作製の主流になり 得る手法と考えられる。ただし,単結晶シリコン に比べポリシリコンの機械物性の把握は不十分で あり,自動車用での使用環境を考えた場合,破壊 強度,疲労破壊等の信頼性,耐久性など,解決す べき課題は多い⁵⁾。

表面型センサ作製上,膜には,1)両持ち梁構造 の座屈を防ぐため引張応力か弱い圧縮応力である こと,2)膜厚方向の応力分布が原因で起こる片持 ち梁構造(ビーム)の反りを防ぐこと,の条件が 課せられる。著者らはこれまでに,作製条件検討 の結果,上記1,2)をクリアできる条件は見出し ている。しかし,一般的にも応力発生の機構に関 しては不明とされている点が多く,応力,反りの 発生メカニズムが根本的に解き明かされていると は言い難い^{6~9)}。本報告ではまず,引張応力膜の 形成条件の把握を試みた結果について記す。次に 膜厚方向の応力分布に関して,現状で判明してい る範囲での発生要因について述べる。そして,最 後に応力分布による膜の反り発生を抑制する方法 を検討した結果を報告する。

2.ポリシリコン薄膜中の応力

はじめに,著者らが試作したセンサ模擬構造を Fig. 1に示す。作製手順としては,まずシリコン ウエハ上にプラズマCVDによりSiO2薄膜を2µm堆 積し、さらにLPCVDによるポリシリコン薄膜 2µmを積層した。このポリシリコン薄膜をRIEに より加工した後に弗酸中に所定時間浸して、下地 SiO₂の一部のみを残してポリシリコン薄膜の大部 分が中空に浮遊した状態としたものである。ここ で示したものは,左右方向に伸びた2本の両持ち 梁の間に網目状マス部を有し,このマス部の外側 面に多数の片持ち梁からなる櫛形電極が張り出し た振動子と,これらの電極と噛み合う形で櫛形電 極を対向させて振動電極の両側面に配置された一 対の固定電極からなる構造体である。振動子は左 右の端部4点で保持され,図中では紙面左下-右 上方向に振動する。この振動時の固定電極との間 での電気容量変化を捉えて加速度の出力とする。

このように,センサ構造体には両持ち梁構造と なるケースが存在するが,この構造を実現するた めには弱い引張応力状態を構造体ポリシリコン薄 膜内に実現することが望まれる。LSIプロセスに おけるポリシリコン薄膜の形成方法は,1)シラン ガス (SiH₄)を原料としてLPCVD法によりポリシ リコン薄膜を堆積,2)このポリシリコン薄膜に導 電性を付与するためのリン拡散,の2段階による ものが代表的である。この2プロセスを経た結果 得られるポリシリコン薄膜が引張応力状態となる



Fig. 1 SEM image of a prototypical resonating microsensor.

必要があるが、通常のLSIプロセスで形成される いわゆるas depo.ポリシリコン(堆積時にすでに 多結晶化しているもの)の応力は, Table 1の第1 列に示すように圧縮応力状態になっている。この 圧縮応力状態のas depo.ポリシリコン膜に対して リン拡散アニールを種々の条件により行っても、 引張応力状態とすることは不可能であった。この ため、センサ構造体用のポリシリコン薄膜に関し ては通常のLSIプロセスとは異なる成膜条件での 膜堆積を行う必要がある。その一例としてTable 1 の第2列に示すようにシランガスを用いて通常よ りは低温の580 で成膜する方法がある。この方 法によれば応力に関してはノンドープ状態で引張 応力の膜が得られるが, 成膜速度が遅く実用的で はない。これに対してジシラン (Si₂H₆) を原料ガ スとして一旦非晶質(アモルファス)のシリコン 膜(a-Si膜)を成膜し、これを堆積後にアニール することで結晶化した場合の結果をTable 1第3列 に示す。非晶質状態での応力は300MPa程度の圧 縮応力であるが,結晶化アニール後には引張応力 へと変化した。この時,結晶化温度が1000°Cで応 力は約100MPaとなった。さらにこれらのポリシ リコン薄膜にリン拡散を施した後でも膜応力は10 ~ 50MPa程度の弱い引張の範囲内に留まっており センサ構造材料に適する状態であった。成膜速度 も十分実用可能と判断される値である。

- 3. 応力分布発生要因
- 3.1 応力分布の測定方法

ポリシリコン薄膜の内部に膜厚方向の応力分布 が存在すると,先のFig.1で示したようなデバイ スにおいてビームがこの応力分布を反映した形で 反りを生じるが,この反りは容量検出機能に対す る致命的な障害となる。実用とするためにはこの 反り量を片持ち梁の長さ500µm先端の変位で± 2µm程度に抑える必要がある。このような反りの 制御の第一歩として,薄膜内部に存在する応力分 布を測定する必要があり,これを行った。

応力分布測定は,膜を形成したウエハから膜厚 が数段階異なる試料をRIEにより作製して行っ た。膜厚を変えて応力分布を見積もる方法の概略 をFig. 2に示す。膜厚を表面側からRIEにより減 じた試料と減じていない試料とで片持ち梁の反り 量の変化を測定し,その変化が削除された部分の 応力分により与えられたとして計算する。まず, ビームの反り: δ と曲げモーメント:Mとの関係は $M = (Eh^3w\delta)/(6L^2)$ (1) E: ヤング率

h:ビーム厚み

- w:ビーム幅
- *L*:ビーム長さ

また,面内応力の膜厚方向分布: σ_z(t)と曲げモー

 Table 1
 Deposition conditions for polycrystalline silicon thin films.

	poly-Si(standard)	poly-Si(low T.)	a−Si
gas	SiH4	SiH₄	Si2H6
flow rate	200sccm	200sccm	300sccm
temperature	630°C	580°C	520°C
pressure	4Pa	4Pa	6Pa
deposition rate	74.7Å/min	34.8Å/min	103.7Å/min
stress(as depo.)*	~350MPa	225MPa	-317MPa
stress (annea led) *		·	95MPa
doping	850∼950°C	850°C	850°C
(P0C13)	30~120min	30 min	60~120min
activation	900°C, 30min	850°C, 30min	
stress(doped)*	-29∼-127MPa	-9.9MPa	8.1∼47MPa

* Stress values were calculated from the differences of the curvatures between the substrates with and without the silicon thin films. The silicon films were removed by alkaline solution. 6

$$M = w \int_{-h/2}^{h/2} t \sigma_{z}(t) dt$$
⁽²⁾

これら式(1)と式(2)から得られるモーメントが等 しいとおくことで,反り量から応力分布を得る。 初めに,最下層の応力分布を

 $\sigma_{e}(t) = \sigma_{0} + \alpha t$ (3) と直線で表されると仮定し,これを式(2)に代入 して $M \epsilon \alpha$ で表す。一方の式(1)によりこの厚さ t_{1} での反りの実測値からMの値が分かっているの で,式(1)の結果と式(2)の結果とを等しいとして 先の未知数である応力分布の傾き: α の値を得る。 この方法で,さらに上側の層内での α を図中の式 に示すようにして漸次もとめて,最終的に膜厚全 体の応力分布を折れ線で近似するものである。な お,ここでは平均の応力値を0として計算をして いる。応力絶対値の分布とするには,先に示した 方法で別途平均応力を求めておき加える必要があ る。ビームの反り量は光学顕微鏡の干渉微分モー ドにより分解能0.27 μ mで測定した。

3.2 下地酸化膜

下地となるシリコン酸化膜はプラズマCVDで 堆積しているが,熱酸化膜と比較して低温 (400°C)で形成されるために水酸基などの残留量 が無視できない。二次イオン質量分析法(SIMS) で分析した水素量は1×10²¹cm⁻³以上に達してい る。この直上に堆積されるポリシリコン薄膜の界 面近傍部分が結晶化アニール時に受ける影響が懸 念される。実際にこれを確認した結果をFig.3に



Fig. 2 Schematics of a layer-by-layer method for estimation of stress distributions.

示す。ここでは下地酸化膜をプラズマCVDで堆 積した後に窒素中において1000°Cで1時間アニー ルしてシリコン酸化膜中から水酸基等を放出した 基板,およびこの処理を行わなかった基板に各々 a-Siを堆積し、この両者を窒素中1000°C1時間の アニールで結晶化したもので応力分布を比較して いる。このグラフで両試料の界面側での応力に注 目すると,酸化膜に対するアニールの有無により 応力分布が異なっていることが分かる。すなわち, アニール無しの場合には界面側の応力分布がフラ ットであるのに対してアニールしたものでは界面 に近づくに従い引張応力が増加している。結晶化 アニール時において酸化膜からの水素,あるいは 酸素脱離が基板アニールのない場合に顕著となる ことを考えると,この結果はシリコンの結晶化時 における水素,あるいは酸素の存在が圧縮応力化 に寄与したと考えられる。

3.3 表面不純物

先のFig. 3からも分かるように,表面側での応 力勾配がむしろ急峻である様子が見て取れる。 Fig. 4にはポリシリコン薄膜の表面近傍の応力分 布をさらに細かいステップで測定した結果を示 す。Fig. 4(a)はこの時の梁の反り量を測定した値



Fig. 3 Stress distributions in polycrystalline silicon thin films deposited on PCVD silicon dioxides with (a) and without (b) stabilization annealing.

であり, Fig. 4(b)にはこれから算出された応力値 と,このポリシリコン膜中の膜厚方向不純物分析 を特に酸素の膜厚方向分布に関してSIMSにより 行った結果もあわせて示す。応力分布には, Fig. 3と同様表面の引張応力の強い層が見られるが, ステップを細かく設定したところその層厚は最表 面から0.1μm程度までの非常に薄い層であり,こ こに平均の応力よりも200MPa程度強い引張応力 が存在していることが分かる。それより膜の内部 においては±20MPa程度の範囲でほぼ一定のフラ ットな応力分布である。一方の酸素濃度分布もこ れと非常によく似た分布を示している。一般にSi が酸化されるとSi側には圧縮応力が生じるが、こ こでの結果は逆に最表面層での強い引張応力部分 と酸素濃度の高い領域とが一致している。a-Siで は表面酸素濃度はやはり高いものの必ずしも表面 層の引張応力は増加していなかった。これより、 結晶化時に酸素が共存することで酸化とは異なる



Fig. 4 Bending variation of catilever beams (a) and the estimated stress distribution and oxygen concentration (b) in a near surface region of the polycrystalline silicon thin film.

作用により引張応力が増加していると考えられ る。

3.4 リン拡散

ポリシリコンに導電性を付与するために不純物 をドープする必要がある。ここではオキシ塩化リ ン (POCl₃) を高温に保持したポリシリコン表面で 分解・堆積し固相拡散により膜内部までリンを導 入する方法で行っている。しかし,通常のLSIプ ロセスで配線電極として用いられる膜厚0.4μm程 度のポリシリコン薄膜と比較して,ここでは2µm と格段に膜厚が厚いためにLSI用の堆積温度(例 えば850) では膜厚方向に十分なリン供給が行 われない。この様子をFig. 5に示す。Fig. 5(a)は 0.4µm程度の薄いポリシリコン薄膜に対して各堆 積温度でリン拡散した場合に,膜の抵抗率と応力 との相関をプロットしたものである。リンはポリ シリコン薄膜中に導入されると圧縮応力源として 働くことが知られており⁸⁾, このため高濃度でド ープされた膜ほど圧縮応力が強くなっている。 Fig. 5(b)は1000°Cで結晶化したポリシリコン薄膜 と、これに対して通常のLSI配線用の条件でリン 堆積・拡散したものとの応力分布を示している。 この図から分かるように,850°Cでのリン堆積で は2µmの膜厚のポリシリコン薄膜に対しては表面 1µm以下の深さまでしか拡散が至らず,膜の内部 はドープされないまま残っている。この状態では



Fig. 5 Stress variation with phosporus doping (a) and stress distributions with and without shallow phosphorus doping (b).

ポリシリコン薄膜に十分な導電性が与えられない ばかりでなく,表面層のみ圧縮応力が増加するた め片持ち梁に下向きの反りが生じる。これを防ぐ ために高温かつ長時間のドープを行う必要がある が,過度のドープは膜応力の圧縮化につながるた め適量を選ぶ必要がある。

4. 応力制御方法

これまでの結果をもとに,ポリシリコン薄膜から形成したビームの反りを制御する方法を示す。 その一つとして,RIEにより最表面層を削除する 方法がある。膜最表面には強い引張応力層が存在 するが膜内部は比較的平坦な応力分布の場合,最 表面の強い引張応力層のみがビームの反りに寄与 すると予想される。実はすでにFig.4(a)にその結 果は示されてるが,この0.1µm厚の最表層をRIE により削除した結果,Fig.4(a)に示されているよ うに反り量が上向きに1.4µmへと減少しており実 用に十分に耐える値となっている。

上記の方法は,ポリシリコン薄膜の表面に生じ る応力の特異な層を削除する方法であるが,逆に 酸素を強制的に注入して引張応力が増加した層を ポリシリコン薄膜中に形成し,この効果を利用す る方法も検討した。先にFig.5(b)で示したように 表面層が強い引張応力を示したことから,酸素を 微量に含んだポリシリコン薄膜がどのような応力 を示すかを調べた結果をFig.6に示す。この実験

は、1µmの厚さのa-Si薄膜に対 して膜厚方向にほぼ均一に酸 素が分布するよう、エネルギ ーを数段階に変化させて酸素 イオン注入を行い、この後 1000 1時間のアニールで結晶 化した膜の応力を測定したも のである。酸素注入量は0.01 から1at%の範囲で変化させて いる。この結果、酸素濃度が 0.1at%以上では応力への影響 が確認された。この現象を利 用してシリコンビームの反り 制御を試みた結果をFig.7に示 す。ここで、初期状態のa-Si薄 膜は膜厚が1μmで,このまま結晶化した場合には ビームが下向きに反るものである。この試料の膜 厚方向応力分布をFig.7(a)に示す。これに対して, 表面層にのみ酸素イオン注入を行い,膜表面側に 引張応力の強い層を形成してこの反りの矯正を試 みた。このモデルをFig.7(b)に示す。矯正前の応 力分布を直線で示したように近似し,これに対し て表面に平行四辺形で近似的に示したような矯正 層を設ける。注入位置はイオンエネルギーにより 表面部に合わせ,また注入量はFig.6により必要



Fig. 6 Stress variation with implanted oxygen consentration in polycrystalline silicon thin films.



Fig. 7 Intricsic stress distribution in a polycrystalline silicon thin film (a) and schematics for compensation of bending moment by partial oxygen ion implantation into the film.

とされる応力増加分およびエネルギーで決まる注 入幅とを考慮に入れて決定した。この結果, 500µmの長さのビーム先端での反り量が注入を施 さなかった試料で下向き14µmであったのと比較 して,注入を行ったものでは上向きに反りが変化 し,かつ反り量も0.5µmと十分に抑制できた。

5.まとめ

ポリシリコン薄膜により微小センサ構造体を形 成した場合に要求される応力条件, すなわち低引 張応力および膜厚方向応力分布の低減を得るため に成膜条件の検討を行った。

また片持ち梁に発生する反り現象を解析するた め,シリコン薄膜内部の応力分布をRIEエッチン グ-梁先反り測定により評価した。その結果,膜 中の応力分布は下地界面および最表面において特 異な部分が存在し,ビームの反りに大きく影響す ることが判明した。

これらの結果を踏まえ,反りを矯正するための 方法として,表面層のみを削除する,あるいは部 分的な酸素イオン注入後に結晶化する方法が利用 できることを実証した。

参考文献

- Howe, R. T.: "Surface micromachining for microsensor and actuators", J. Vac. Sci. Technol., B6-6(1989), 1809
- Tang, W. C., et al : "Laterally driven polysilicon resonant microstructures", Sens. and Actuators, 20(1989), 25
- Lee, A. P., et al : "Polysilicon micro vibromotors", Proc. IEEE Micro Electro Mech. Workshop, Travemuende, Germany, (1992), 177
- Kobayashi, D., et al : "An integrated lateral tunneling unit", Proc. IEEE Micro Electro Mech. Workshop, Travemuende, Germany, (1992), 214
- Walker, J. A., et al : "Mechanical integrity of polycrystalline silicon films exposed to hydrofluoric acid solutions", Proc. IEEE Micro Electro Mech. Workshop, Napa Valley, CA, (1990), 56
- Koleshko, V. M., et al : "Mechanical Stress in Low Pressure Chemically Vapor Deposited Silicon Films", Thin Solid Films, 162(1988), 365
- Koleshko, V. M., et al : "Stress in thin polycrystalline silicon films", Thin Solid Films, 165(1988), 181
- Kamins, T. I. : "Design Properties of Polycrystalline Silicon", Sens. and Actuators, A21-A23(1990), 817
- 9) Sakata, J., et al : "Control of Intrinsic Stress Gradient in

Polycrystalline Si Films for Surface Micromachining", Proc. 8th Int. Congr. for Sens., Transducers and Sys., Nurnb., Germany, 3(1997), 83

著者紹介



景山恭行 Yasuyuki Kageyama
 生年:1959年。
 所属:集積化デバイス研究室。
 分野:ポリシリコン薄膜の物性研究およびセンサ・電子デバイスの開発。
 学会等:応用物理学会,American Vacuum Society 会員。