薄膜ダイヤフラムを有する マイクロ圧力センサの感度解析

正員 田畑 修 (立命館大学)
非会員 島岡 敬一 ((株)豊田中央研究所)

Sensitivity Analysis of a Micro Pressure Sensor
Having Thin Film Diaphragm

Osamu Tabata, Member (Ritsumeikan University)
Keiichi Shimaoka, Non-Member (Toyota Central Research & Development Labs., Inc.)

A theoretical expression to calculate the strain on a circular diaphragm fixed at the circumference and the center has been derived to predict the sensitivity of a micro-diaphragm pressure sensor. Young's modulus and internal stress of several thin films used for the diaphragm of the sensor and their layered structures were measured. Using the measured data, it was confirmed that Young's modulus and internal stress for layered thin film structure can be calculated by a composite law. Two sensors were fabricated to verify the validity of the derived equations, and their sensitivity was measured and calculated. The measured and calculated sensitivities showed good agreement.

キーワード：マイクロ圧力センサ、薄膜、機械的物性、ダイヤフラム、感度

1. はじめに

自動車を始めとする多くの産業分野において、システムの性能を決めるキーデバイスとしてのセンサの重要性がますます高まっている。同時にセンサへの要求仕様は一層厳しくなりつつある。これらの要求に応え得るセンサとして最も期待されているのが、LSIの製造で培った半導体プロセス技術と特殊なエッチング加工技術等を組み合わせたシリコンマイクロマシニング技術を応用して、シリコン基板上にセンシング部を製作するシリコンセンサである。シリコンマイクロマシニング技術の応用により、

- (1) 処理回路との集積化による高性能化・高機能化、
- (2) ミクロンオーダーからナノオーダーの加工精度によるセンサのマイクロ化、
- (3) パッチプロセス・プリアセンブルによる低コスト化、

が期待できる。これらの特徴の相乗効果によってシリコンセンサのコストパフォーマンスは1980年代初期から目覚ましい向上を遂げた。今後、さらにコストパフォーマンスを向上させるためには性能向上とコスト低減の両面に新しいアプローチが必要である。性能向上にはセンサとアクチュエータを集積化した「能動型センサ」の実現が、コスト低減にはマイクロマシニングによるオンチップパッケージの実現が有望なアプローチであると考えられる⁽¹⁾。

圧力センサにおけるオンチップパッケージ実現への第1段階として、我々はサーフェスマイクロマシニングを用いて基準真空圧力室をシリコン基板内に形成した圧力センサ（以下、マイクロ圧力センサと記す）の研究を進めている^(2,3)。この圧力センサは、従来行っていた真空室を形成するためのセンサチップと台座との接合工程が不要となるために、パッケージおよび組み立てコストが低減できる。従来のパッケージおよび組み立て工程の一部をウエハプロセスに取り込んだオンチップパッケージの第1段階である。さらに、両面アライメントを必要としないため、ダイヤフラムサイズが従来のシリコン圧力センサの1/10以下の100 μm と非常に小型となり、チップサイズの縮小によるセンサコストの大幅な低減が実現できるという特徴を有する。

マイクロ圧力センサのダイヤフラムは、5層の薄膜よりなる厚さ約1~2 μm の積層構造である⁽³⁾。ダイヤフラムは周辺と中央で固定されている。ダイヤフラム中央には、ウエハプロセスの途中段階で、ダイヤフラム下部の犠牲層をエッチングするためのエッチング孔が形成されている。このエッチング孔をウエハプロセスの最終段階で封止することにより固定部が形成される。このような固定条件のダイヤフラム上の応力を求める一般的な理論解はない。また、ダイヤフラムに用いている各薄膜およびそれらを積層した多層膜のヤング率、内部応力等の機械的物性は不明であっ

図1 マイクロ圧力センサの外観

Fig. 1. The schematic of a micro-pressure sensor.

た。そのため従来はダイヤフラム材料の機械的物性がマイクロ圧力センサの感度に与える影響をあらかじめ解析で予測することは不可能であった。

薄膜の機械的物性がセンサ特性に与える影響を解析により予測することができれば、

第1ステップ：薄膜の機械的物性を考慮したマイクロ圧力センサのパターン設計およびプロセス設計、

第2ステップ：薄膜の機械的物性を成膜条件、熱処理等のプロセス条件により制御可能な物理量であると捉え、センサ特性を改善するために薄膜の機械的物性を積極的に制御したセンサ設計、

が可能となる。

本論文では、まずダイヤフラムを構成する薄膜の機械的物性が周辺と中央固定ダイヤフラムを用いたマイクロ圧力センサの感度に与える影響を予測するために必要な解析式を導出する。次に、ダイヤフラムの構成材料が異なる2種類のセンサを試作し、その感度と感度比を実測すると同時に提案した解析式を用いて感度比を求め、両者を比較して解析式の有用性を検証する。

2. マイクロ圧力センサの構造

図1にマイクロ圧力センサの外観を示す⁽³⁾。直径100μm、厚さ1.7μmの円形のダイヤフラムには2μm幅の多結晶シリコンのひずみゲージが4個形成されており、アルミニウム配線によりフルブリッジ接続されている。

図2にダイヤフラム部の断面構造を示す。2層目はひずみゲージ材料、1、3層目はひずみゲージ保護材料、4、5層目はエッチング孔部の封止材料として機能する。各層はその役割に応じ課せられる種々の要求を満足しなければならない。1層目、3層目には(1)電気的な観点からは、ダイヤフラム上に形成される複数のひずみゲージを相互に電気的に絶縁分離できること、(2)機械的な観点からは、応力

図2 マイクロダイヤフラムの断面構造

Fig. 2. The cross-sectional view of a micro-diaphragm.

一ひずみ特性が線形でクリープ等がない良好な弾性材料であること、(3)化学的な観点からは、ダイヤフラム下部の犠牲層を除去するためのエッチング液に対して耐性を有すること、が要求される。これらの条件を満足させるため、ひずみゲージ保護材料には減圧CVD法で成膜したシリコン窒化膜(Si_3N_4)を選択した。2層目のひずみゲージ材料にはLSIプロセスとの適合性が要求される。そこで、ひずみゲージ材料には減圧CVD法で成膜した多結晶シリコンを選択した。 $3 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ のボロンイオンを注入したp型多結晶シリコンのピエゾ抵抗係数とその温度係数、および抵抗温度係数は、それぞれ $1.7 \times 10^{-10}/\text{Pa}$ 、 $-0.13\%/^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.03\%/^{\circ}\text{C}$ である⁽⁴⁾。4層目、5層目の封止材料にはエッチング孔部のダイヤフラムとシリコン基板とのギャップを気密性良く埋めるために、緻密度と良好なステップカバレッジが要求される。また、アルミ配線形成後に封止を行うため、封止材料形成温度は400℃以下でなければならない。そこで、4層目、5層目の封止材料にはプラズマCVDにより成膜するシリコン窒化膜および減圧CVDにより成膜する低温酸化膜(Low Temperature Oxide: LTO)を選択し、これらの2層構造とした。

3. ダイヤフラムのたわみ解析

ダイヤフラムを構成する各薄膜のヤング率と内部応力が感度に与える影響を明らかにするための解析式を導出する。

まず、積層膜のヤング率(E)、内部応力(σ)はこの積層膜を構成する各薄膜の E 、 σ から次の(1)、(2)式で示される複合則により求められると仮定する。この仮定は各薄膜の機械的物性が等方で、かつポアソン比が等しい場合に成立する⁽⁵⁾。ダイヤフラムに使用している各薄膜の機械的物性はほぼ等方性であると考えられるが、ポアソン比については未知であり、この仮定の妥当性については4章の実験に

図3 解析に用いたダイヤフラムのたわみモデル
Fig. 3. The model used for the analysis.

より確認する。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n t_i E_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2)$$

ここで i は積層した薄膜の層番号、 t_i は積層膜を構成する i 番目の薄膜の厚さである。

次に、積層膜の E 、 σ を用いて周辺および中央固定の円形ダイヤフラムにおける印加圧力とたわみの関係を解析的に求める。解析にはひずみエネルギー法を用いた⁶⁾。図3に解析に用いたダイヤフラムのたわみモデルを示す。座標系には極座標(r , θ)を用い、中央固定部は点であるとして解析した。等分布荷重円板におけるたわみの近似公式を基に

6)、圧力(P)が印加されたときのダイヤフラム上の点における垂直方向変位 w を(3)、(4)式、半径方向変位 u を(5)、(6)式で与える。

$$w = w_0 \left\{ 1 - \left(\frac{a-2r}{a} \right)^2 \right\}^2 \quad \left(0 \leq r \leq \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

$$w = w_0 \left\{ 1 - \left(\frac{2r-a}{a} \right)^2 \right\}^2 \quad \left(\frac{a}{2} \leq r \leq a \right) \quad (4)$$

$$u = r \left(\frac{a}{2} - r \right) (C_1 + C_2 r) \quad \left(0 \leq r \leq \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

$$u = (a-r) \left(r - \frac{a}{2} \right) (C_1 + C_2(a-r)) \quad \left(\frac{a}{2} \leq r \leq a \right) \quad (6)$$

ここで、 a はダイヤフラムの半径、 t は積層膜ダイヤフラム全体の厚さ、 w_0 はダイヤフラムの最大たわみ、 C_1 、 C_2 は定数である。 w_0 が t に比べて十分小さいときは、ダイヤフラム中立面の伸びによるひずみエネルギーは無視できるため、曲げによるひずみエネルギーと内部応力によるひずみエネルギーを考慮すれば十分である。曲げと内部応力によるひずみエネルギーはそれぞれ(7)、(8)式によって求めることができる⁶⁾。

$$\frac{D}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^a \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \frac{2\nu}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) \right\} r dr d\theta \quad (7)$$

$$\frac{D}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^a (t\sigma\epsilon_r + t\sigma\epsilon_t) r dr d\theta \quad (8)$$

ここで ν は多層膜全体としてのポアソン比、 D は平板の曲げ剛性、 ϵ_r および ϵ_t は(9)、(10)式によって計算される半径方向のひずみおよび接線方向のひずみである。

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \quad (9)$$

$$\epsilon_t = \frac{u}{r} \quad (10)$$

(7)、(8)式に P が印加されたときの仕事を加えて系の全エネルギーを求める。最後に仮想変位の原理を用いて定数を決定すれば、 P と w_0 の関係を示す(11)式が求められる。

$$P = 16 \frac{w_0 t}{a^2} \left\{ \frac{7E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a} \right)^2 + \frac{4}{7} \sigma \right\} \quad (11)$$

ピエゾ抵抗型圧力センサの感度はダイヤフラム上で発生

表1 ダイアフラムに用いられている薄膜材料のヤング率と内部応力の測定値

Table 1. Measured Young's modulus and internal stress of the thin films used for the diaphragm.

Deposition equipment	Material	Young's modulus (GPa)	Internal stress (GPa)
LPCVD	Si ₃ N ₄	212	0.90
LPCVD	poly-Si	117	-0.16
plasma-CVD	SiN	139	0.02
LPCVD	LTO	39	-0.19

するひずみに比例する。そこで(11)式からダイアフラムの中立面から垂直方向に距離 z の位置の点における半径方向のひずみ ϵ'_r および接線方向のひずみ ϵ'_t を求めると、(12)、(13) 式が得られる。

$$\epsilon'_r = -z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = -P \left(\frac{z}{r} \right) \left\{ \frac{1 - 3 \left(\frac{a-2r}{a} \right)^2}{\frac{7E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a} \right)^2 + \frac{4}{7} \sigma} \right\} \quad (12)$$

$$\epsilon'_t = \frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = P \left(\frac{z}{r} \right) \left\{ \frac{1 - \left(\frac{a-2r}{a} \right)^2}{\frac{7E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a} \right)^2 + \frac{4}{7} \sigma} \right\} \quad (13)$$

これより、 ϵ'_r および ϵ'_t はいずれも印加圧力に比例すると共にダイアフラムの中立面からの垂直方向距離 z に比例することがわかる。また、 ϵ'_r および ϵ'_t は、 σ が零の時は E に反比例し、 σ の増加に伴って減少する。 σ/E が

$$\frac{\sigma}{E} \geq \frac{0.4}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a} \right)^2 \quad (14)$$

のとき、 σ の影響により10%以上感度が低下する。

4. ダイアフラム構成材料の機械的物性測定

解析には積層ダイアフラムを構成する薄膜材料の E と σ が必要である。そこで図2に示したダイアフラムを構成する4種類の薄膜の E と σ を圧力-たわみ測定法⁶⁾を用いて測定した。同時に、マイクロ圧力センサのプロセス工程に従って薄膜を2層から5層まで積層した積層膜試料を順次作製し、その E と σ を圧力-たわみ測定法により測定した。いずれの測定においても被測定薄膜のポアソン比は0.25と仮定した。各薄膜の E と σ の測定結果から積層膜の E と σ を(1)、(2)式を用いて求め、これを測定して求めた積層膜の E と σ の値と比較することによって(1)、(2)式の妥当性を検討した。

表1に各薄膜の E と σ の測定結果をまとめて示す。減圧CVD法により成膜したSi₃N₄の σ は0.9GPaと非常に強い引張である。一方、ひずみゲージ材料のpoly-Siの σ は

図4 積層膜のヤング率と内部応力の測定結果

Fig. 4. The measured Young's modulus and internal stress for layered thin films.

0.16GPaの圧縮である。プラズマCVD法で成膜したSiNは減圧CVD法で成膜したSi₃N₄に比べ E と σ 共に小さい値であった。減圧CVD法により成膜したLTOの E は39GPaと他の材料に比べ1/3~1/5程度と低く、 σ は0.19GPaの圧縮であった。

図4に圧力-たわみ測定法を用いて測定した多層膜の E と σ の測定結果を示す。横軸は試料の種類を示す。破線は表1に示した各薄膜材料の E と σ から(1)、(2)式に基づいて計算した多層膜の E と σ を示す。測定値と計算値がほぼ一致していることから、マイクロ圧力センサで使用している薄膜においては(1)、(2)式を用いることの妥当性が確認できた。

5. センサ感度の実験値と解析値の比較

3章で求めた解析式(10)、(11)の有用性を検証するために、2種類の異なるダイアフラム断面構造を有するセンサを試作し、提案した解析式を用いて両センサの感度比を求め、実験結果と比較した。2種類のセンサとしてダイアフラムを構成する4層目の膜にプラズマCVDで成膜したSiN、5層目の膜に減圧CVDで成膜したLTOを用いたセンサNo.1と、ダイアフラムを構成する4層目と5層目の膜の両方にプラズマCVDで成膜したSiNを用いたセンサNo.2を製作した。

(1)、(2)式の複合則よりセンサNo.1の E と σ はそれぞれ131.3GPa、169.9MPa、センサNo.2の E と σ はそれぞれ153.5GPa、204.8MPaと計算された。一方、この E を(14)式に代入すれば、センサNo.1、センサNo.2において感度低

表2 ダイアフラム断面構造の異なる2種類のセンサにおけるひずみ比の計算値と測定値

Table2. The ratio of the measured sensitivity and the calculated strain values.

Sensor		No.1	No.2
Layer	1st	LPCVD Si ₃ N ₄ (100nm)	←
	2nd	LPCVD poly-Si (200nm)	←
	3rd	LPCVD Si ₃ N ₄ (300nm)	←
	4th	plasma-CVD SiN (620nm)	←
	5th	LPCVD LTO (370nm)	plasma-CVD SiN (490nm)
Measured Sensitivity ratio (Sensitivity (μV/VkPa))		1 (12.7)	0.80 (10.1)
Calculated Strain ratio		1	0.77

下が10%以上となる σ はそれぞれ63.7MPa、86.2MPaと計算できる。従って、センサNo.1、センサNo.2においてはいずれも内部応力が感度を10%以上低下させている。(12)式よりセンサNo.1、センサNo.2における内部応力による感度低下を計算するとそれぞれ22.7%、20.8%となり、センサNo.1の方がわずかに内部応力の影響が大きいことが明らかとなった。

表2にセンサNo.1とセンサNo.2における感度比の実測値と(12)式より求めたひずみ比の計算値を示す。ひずみ比の計算においては(12)式と(13)式は同一の結果を与える。ひずみ比は圧力センサの感度比に等しい。センサNo.1の感度に対するセンサNo.2の感度の比は、実測値では0.80、計算

値では0.77であり、両者はほぼ一致した。センサNo.2における積層ダイアフラムのヤング率・内部応力がセンサNo.1に等しいと仮定し、ダイアフラム厚の違いとダイアフラム中央からひずみゲージ形成面までの距離 z のみを考慮して計算した場合の感度比は0.90となり、実測値と大きく異なる結果となる。これより、(1)、(2)式とひずみエネルギー法を用いて求めた(12)、(13)式を用いれば、ダイアフラム半径およびダイアフラムを構成する薄膜の厚さ・ヤング率・内部応力から、ダイアフラム上の任意の位置に発生する半径方向と接戦方向のひずみを計算することができ、ダイアフラム材料の機械的物性がマイクロ圧力センサの感度に与える影響を予測できることが確認できた。

6. 考 察

まず、内部応力の低減による感度向上の可能性について検討する。センサNo.1、センサNo.2に圧力100kPaを印加した場合にダイアフラム中心から25μmの位置のひずみゲージ形成面に生ずるひずみを、内部応力をパラメータとして計算した結果を図5に示す。ポアソン比は0.25と仮定した。センサNo.1、センサNo.2の σ はそれぞれ169.9MPa、204.8MPaであり、これより定まるセンサNo.1、センサNo.2の特性を○印で示す。積層ダイアフラムの内部応力に最も影響を与えている薄膜は減圧CVD法により成膜したSi₃N₄であり、その σ は0.9GPaと非常に強い引張である。このSi₃N₄膜の引張応力の低減手法として、我々が提案しているイオン注入法が適用できる。イオン注入法を用いてSi₃N₄膜の引張応力を制御すれば、poly-Si膜の圧縮応力と相殺させることで積層ダイアフラムの内部応力を零にすることが可能である。プロセスのばらつき等を考慮すれば実現可能な応力は10MPa程度と考えられるが、それでも内部応力の影響をほぼ無視できるようになる。さらに感度を向上させるためにはゲージ保護材料として E が小さい材料を検討する必要があるが、同時にこの材料は先に述べたゲージ保護材料に求められる多くの要求を

図5 ダイアフラム上の発生ひずみの内部応力依存性

Fig. 5. The calculated strain with various internal stress for the applied pressure.

図6 解析式で用いたダイヤフラムのたわみ曲線と
FEM解析により求めたダイヤフラムのたわみ曲線

Fig. 6. The deflection curve of the diaphragm used for energy minimization analysis and the deflection curve derived from FEM analysis.

満足する必要があるため、実現は容易ではない。

次に、(12)、(13)式の解析精度について検討する。ひずみエネルギーを用いたダイヤフラム解析においては、圧力印加によって生ずるダイヤフラム上の各点の変位を仮定するため、解析式にはこの変位の仮定による誤差が含まれる。この誤差は本論文で行ったような感度比あるいはひずみ比を用いた相対的な比較においては問題とならなかった。しかし、定量的な感度の予測を行う場合には、より正確な解析式が求められることになると予測される。より正確な解析としては有限要素法（FEM）を利用するのが一般的である。しかし有限要素法ではセンサ設計上の各パラメータがセンサ特性に与える影響を見通しよく与えることはできない。従って解析と有限要素法は互いに相補的に用いるべきものである。ここでは解析式の定量性についての知見を得ることを目標として、有限要素法による周辺および中央固定のダイヤフラムのたわみ解析を行い、3章で導いた解析式の結果と比較した。有限要素解析ではダイヤフラムを単一材料から構成される単層膜として扱い、シェル要素を用いてモデル化した。FEM解析結果の一例として、ダイヤフラム半径100μm、ダイヤフラム厚さ1.7μm、ダイヤフラム全体としてのヤング率150GPa、内部応力100MPa、印加圧力100kPaの条件において、有限要素法によって求めたダイヤフラムのたわみの計算結果を図6に示す。ポアソン比は0.25と仮定した。さらに図6には、(9)式より求めたダイヤフラム中央部のたわみ量を(3)、(4)式に代入して求めたダイヤフラムのたわみ曲線を示す。FEMで求めたたわみ曲

線では、半径方向における最大たわみの位置が解析解より3μm内側で、最大たわみはFEMの方が約20%大きい結果となった。

7. まとめ

マイクロ圧力センサのダイヤフラム固定条件である周辺および中央固定の円形ダイヤフラムに発生するひずみを求める理論式を導いた。ダイヤフラムを構成する各薄膜のヤング率 E 、内部応力 σ を測定し、各薄膜の E 、 σ から複合則を用いて、積層膜の E 、 σ が求められることを確認した。そして、2種類のセンサを製作し、センサの感度比を実験および解析式から求めた。その結果、実験結果と解析結果はほぼ一致した。これより、解析手法の有用性が確認でき、ダイヤフラム材料のヤング率 E 、内部応力 σ がマイクロ圧力センサの感度に与える影響を解析することが可能になった。

(平成8年2月2日受付)

文 献

- (1) S. Sugiyama, O. Tabata, K. Shimaoka and R. Asahi : "Micromachined Sensors Realized with IC Process Technology", Proc. of IEDM, p.127(1994)
- (2) S. Sugiyama, T. Suzuki, K. Kawahata, K. Shimaoka, M. Takigawa and I. Igarashi : "Micro-Diaphragm Pressure Sensor", Proc. of IEDM, p.184(1986)
- (3) K. Shimaoka, O. Tabata and S. Sugiyama : "Micro-diaphragm Pressure Sensor using Polysilicon Sacrificial Layer Etch-Stop Technique", Tech. Digest of the 7th Int. Conf. on Solid-State Sensor and Actuators, p.632(1993)
- (4) G. Shuwen, T. Songshen & W. Weiyuan : "Temperature Characteristics of Microcrystalline and Polycrystalline Silicon Pressure Sensor", Proc. of the 5th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, p. 133 (1989)
- (5) O. Tabata, K. Kawahata, S. Sugiyama and I. Igarashi : "Mechanical Property Measurements of Thin Films using Load-Deflection of Composite Rectangular Membranes", Sensors & Actuators, 20, 135(1989)
- (6) S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger : "Theory of Plates and Shells", McGRAW-HILL (1959)
- (7) 田畑 修、杉山 進、瀧川 光治、五十嵐 伊勢美 : 「イオン注入法による圧力センサ用窒化シリコン薄膜の機械的物性制御」、Trans. IEE of Japan, Vol. 110-C, No.4, Apr., 228(1990)

田畑 修 (正員) 1956年9月21日生。1981年3月名

古屋工業大学大学院修士課程終了。同年(株)豊田中央研究所入社。1996年4月立命館大学理工学部機械工学科助教授。主として、マイクロマシニング、薄膜の機械的物性計測、シリコンマイクロセンサ、集積化センサの研究に従事。1987年日本ME学会研究奨励賞、1991年度電気学会論文発表賞、1993年R&D100Award受賞。日本機械学会、IEEE会員。工学博士。

島岡 敬一 (非会員) 1960年8月8日生。1984年名古屋

工業大学機械工学科卒業。1979年(株)豊田中央研究所入社。半導体ひずみゲージ、拡散型圧力センサの研究に従事。60年以降シリコンマイクロセンサ、マイクロマシニングの研究を行う。精密工学会会員。