

薄膜ダイヤフラム型マイクロ圧力センサの感度解析

島岡敬一

Sensitivity Analysis of a Micro-Pressure Sensor Having Thin Film Diaphragm

Keiichi Shimaoka

要 旨

マイクロ圧力センサのダイヤフラムは、5層の薄膜よりなる積層構造であり、ダイヤフラムの固定は周辺と中央である。センサ特性はダイヤフラムを構成する薄膜材料のヤング率、内部応力、ポアソン比等の機械的物性に大きく依存する。薄膜材料の機械的物性がセンサ特性に与える影響を解析により求めることができれば、機械的物性を考慮したセンサ設計が可能となる。

本研究では、まず、周辺および中央固定の円形ダイヤフラム上に発生するひずみを求める理論式を導いた。次に、ダイヤフラムを構成する各薄膜と、これらを順次積層した積層膜のヤング率と内

部応力をそれぞれ測定し、各薄膜のヤング率、内部応力の測定値から複合則を用いて積層膜のヤング率と内部応力が求められることを確認した。最後に、ダイヤフラムを構成する薄膜材料と厚さが異なる2種類のセンサを作製し、2種類のセンサの感度比を実験および理論式から求めた。その結果、実験および理論式から求めた感度比は、それぞれ0.80および0.78となり、よく一致した。これより、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解析する手法の有用性が確認できた。

Abstract

A micro-pressure sensor with a circular diaphragm has been studied. The diaphragm has a layered structure consisting of five thin films and is fixed along its circumference and at its center. Sensor characteristics strongly depend on the mechanical properties such as the Young's modulus, internal stress and Poisson's ratio of thin films utilized as the constructional material of a diaphragm. If the influence of the mechanical properties of the thin films on sensor characteristics is analyzed, an optimum design is realized to improve the sensitivity.

In this study, theoretical expressions to calculate the strain on a circular diaphragm fixed along the circumference and at the center has been derived to predict the sensitivity of a micro-pressure sensor. The

Young's modulus and internal stress of each thin film and the layered thin film structures were measured, and the validity of a composite law to calculate the sensor properties were confirmed. Two types of micro-pressure sensors having diaphragms of different layered thin film structures were prepared, and their sensitivities were measured and calculated. The measured sensitivity ratio was 0.80, whereas the calculated sensitivity ratio was 0.78. Consequently, it is concluded that the influence of the mechanical properties of the diaphragm on the pressure sensitivity of the micro-pressure sensor is analyzed using these expressions and measurement techniques.

キーワード

マイクロ圧力センサ, 薄膜, ダイヤフラム, 機械的物性, 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)ミクロンオーダからナノオーダの加工精度によるセンサのマイクロ化、
 - (2)バッチプロセス・プリアセンブルによる低コスト化、
 - (3)処理回路との集積化による高性能化・高機能化、
- 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、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 と非常に小型となるばかりでなく、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、製作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製作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。

本稿では、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

Fig. 1にマイクロ圧力センサの外観を示す³⁾。直径100 μm 、厚さ1.7 μm の円形のダイヤフラムには2 μm 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。

Fig. 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氣的に絶縁分離できること，(2)機械的な観点からは，応力-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，1，3層目の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°C 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 から次の式(1)，(2)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性で，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

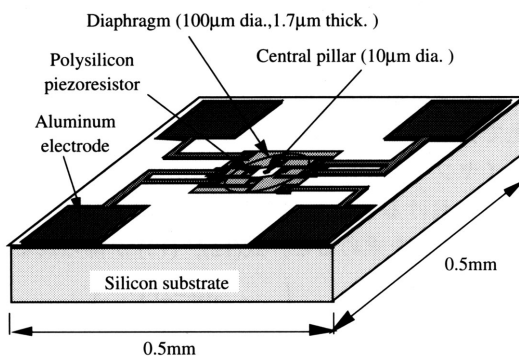


Fig. 1 The schematic of the micro-pressure sensor.

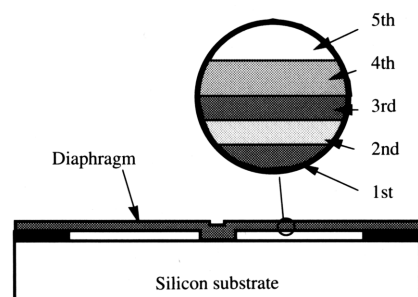


Fig. 2 The cross-sectional view of the micro-diaphragm.

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⁾。Fig. 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 を式(3)、(4)、半径方向変位 u を式(5)、(6)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式(7)、(8)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 は式(9)、(10)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。

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

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

式(7)、(8)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 の関係を示す式(11)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するひずみに比例する。そこで式(11)からダイヤフラムの中立面から垂直方向に距離 z の位置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、式(12)、(13)が得られる。

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

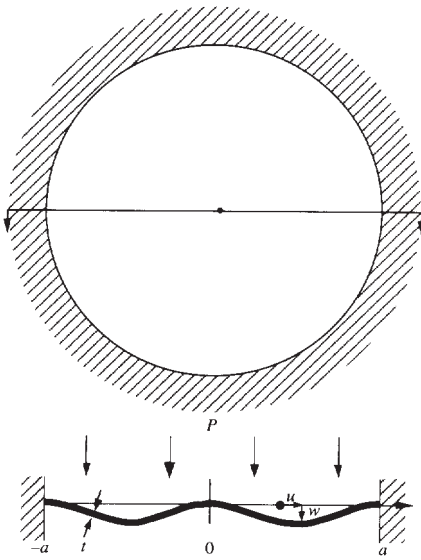


Fig. 3 The model used for the analysis.

$$\varepsilon'_t = -\frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = P \left(\frac{z}{r} \right) \left(\frac{1 - \left(\frac{a-2r}{a} \right)^2}{\frac{7E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{z}{a} \right)^2 + \frac{4}{7} \sigma} \right) \quad (13)$$

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ヤ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

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

のとき、 σ の影響により10%以上感度が低下する。

4. ダイヤフラム構成材料の機械的物性測定

解析には積層ダイヤ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、Fig. 2に示したダイヤフラムを構成する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 を式(1)、(2)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式(1)、(2)の妥当性を検討した。

Table 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 Si_3N_4 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0.16GPaの圧縮である。プラズマ

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

Material	Deposition equipment	Young's modulus (GPa)	Internal stress (GPa)
Si_3N_4	LPCVD	212	0.90
poly-Si	LPCVD	117	-0.16
SiN	plasma-CVD	139	0.02
LTO	LPCVD	39	-0.19

CVD法で成膜したSiNは減圧CVD法で成膜した Si_3N_4 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。

Fig. 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Table 1に示した各薄膜材料の E と σ から式(1)、(2)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式(1)、(2)を用いることの妥当性が確認できた。

5. 感度の実験値と計算値の比較

3章で求めた解析式(10)、(11)の有用性を検証するために、積層ダイヤフラム材料の異なる2種類のセンサを試作し、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ヤフラムを構成する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、ダイヤフラムを構成する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

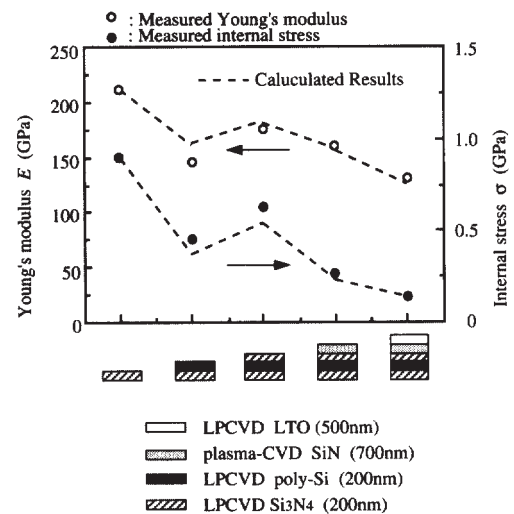


Fig. 4 The measured Young's modulus and internal stress for layered thin films.

製作した。

式(1), (2)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。式(12)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。

Table 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式(12)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式(12)と式(13)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0.78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, 式(1), (2)とひずみエネルギー法を用いて求めた式(12), (13)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線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25 μ m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Fig. 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

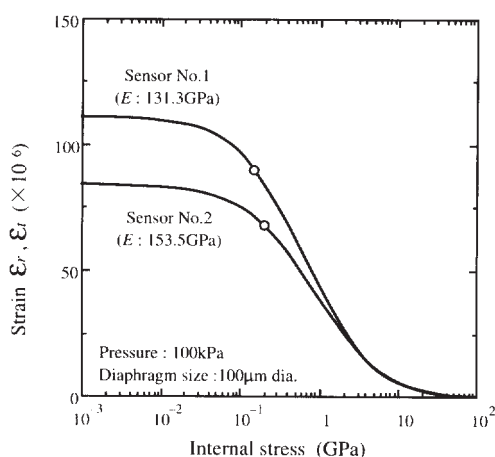


Fig. 5 The calculated strain with various internal stress for the applied pressure.

Table 2 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	0.78

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 Si_3N_4 であり、その σ は0.9GPaと非常に強い引張である。この Si_3N_4 膜の引張応力の低減手法として、イオン注入法が適用できる⁷⁾。そこで、イオン注入による E 、 σ の変化を測定し、マイクロ圧力センサの感度を予測した。Fig. 6に試料の断面構造を示す。試料の構造はFig. 2に示すマイクロ圧力センサの1層目から3層目に相当し、1層目、3層目の Si_3N_4 膜にリンイオンを注入した⁷⁾。イオン注入時の加速電圧は130keVである。イオン注入は薄膜材料の成膜直後に行っているため、1層目の Si_3N_4 膜にはイオン注入後に2層目のpoly-Si成膜時の630°Cおよび3層目の Si_3N_4 成膜時の790°Cが熱処理として加わっている。Fig. 7にイオン注入による E 、 σ の変化を示す。 σ はリンドーズ量の増加に伴い減少する。一方、 E はイオン注入による変化は少ないことがわかった。センサNo.1の1層目、3層目の減圧CVDにより成膜した Si_3N_4 膜にリンイオンを $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 注入した場合、センサNo.1の感度に対して1.29倍高くなる計算結果が得られた。



Fig. 6 The cross-sectional view of a sample.

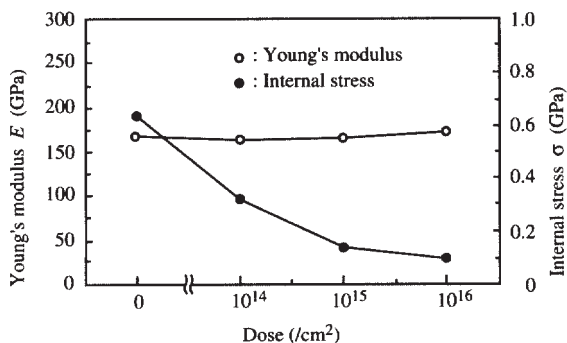


Fig. 7 Young's modulus and internal stress dependencies on phosphorus ion concentrations.

次に、式(12)、(13)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。この誤差は本稿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 $50\mu\text{m}$ 、ダイヤフラム厚さ $1.7\mu\text{m}$ 、ダ

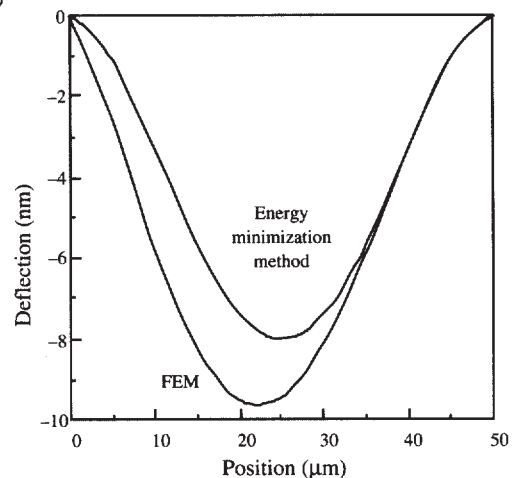


Fig. 8 The deflection curve of the diaphragm used for energy minimization analysis and the deflection curve derived from FEM analysis.

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Fig. 8に示す。ポアソン比は0.25と仮定した。さらに, Fig. 8には, 式(9)より求めたダイヤフラム中央部のたわみ量を式(3), (4)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 $3\mu\text{m}$ 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. おわりに

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。

最後に, 本研究を進めるにあたり, ご協力, ご指導いただきました立命館大学理工学部機械工学科田畑修助教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) Sugiyama, S., Tabata, O., Shimaoka, K., and Asahi, R. : "Micromachined Sensors Realized with IC Process Technology", Proc. of IEDM, (1994), 127
- 2) Sugiyama, S., Suzuki, T., Kawahata, K., Shimaoka, K., Takigawa M. and Igarashi I. : "Micro-Diaphragm Pressure Sensor", Proc. of IEDM, (1986), 184
- 3) Shimaoka, K., Tabata O. and Sugiyama S. : "Micro-diaphragm Pressure Sensor using Polysilicon Sacrificial Layer Etch-Stop Technique", Tech. Digest of the 7th Int. Conf. on Solid-State Sensor and Actuators, (1993), 632
- 4) Shuwen, G., Songshen, T. and Weiyuan, W. : "Temperature Characteristics of Microcrystalline and Polycrystalline Silicon Pressure Sensor", Proc. of the 5th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, (1989), 133
- 5) Tabata, O., Kawahata, K., Sugiyama, S. and Igarashi, I. : "Mechanical Property Measurements of Thin Films using Load-Deflection of Composite Rectangular Membranes", Sensors & Actuators, 20(1989), 135
- 6) Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S. : "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. IEEE of Japan, Vol. 110-C, No.4, Apr., (1990), 228

著者紹介



島岡敬一 Keiichi Shimaoka

生年：1960年。

所属：センサ研究室。

分野：シリコンマイクロセンサ, マイクロマシニングの研究開発。

学会等：精密工学会会員。