窒化アルミニウム薄膜を用いた箔状フレキシブル圧力センサ†

上野直広*・秋山守人*

池田喜一*・立山博*

A Foil Type Flexible Pressure Sensor Using Nitelide Aluminum Thin Film†

Naohiro UENO*, Morito AKIYAMA*,
Kiichi IKEDA* and Hiroshi TATEYAMA*

A foil type flexible pressure sensor based on piezoelectric of highly C-axis oriented nitelide aluminum (AlN) thin film deposited on an aluminum foil substrate was developed. The sensor is composed of two AlN thin films and three aluminum foils as electrodes which detect the electric charge generated by pressure acting on the AlN film. These components are alternately piled with each other. Therefore, the inner electrode is shielded from external unknown environment by the outer two electrodes. This laminated structure of electrodes contributes to avoid unexpected leakage of electric charge and induced electric charge by unknown external electric field. Furthermore, two AlN films generate double amount of electric charge in comparison with the case of single film. Experimental results using a prototype of the sensor shows excellent linearity of sensitivity. However, because of internal loss of the generated electric charge, the sensor cannot be directly applied to measurement of static pressure. We analyze the frequency response obtained experimentally, and construct transfer function of the sensor. We show that it is able to detect quasi-static pressure by using inversed transfer function with estimated parameters.

Key Words: pressure sensor, thin film, piezoelectric, nitelide aluminum

1. はじめに

薄いシート状のフレキシブルな圧力センサは、人間工学における接触圧の測定やシリコンウェハの研磨圧測定、ロボットの触覚センサ¹⁾など、その応用範囲はこれから広がっていくものである。これまでに、そのような圧力センサの研究開発はいくつも行なわれており、感圧導電ゴム、感圧抵抗塗料や、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) のような高分子圧電材料を用いたものが提案、一部は製品化されている^{2)~5)}。しかし、これらは有機材料を用いているため、耐久性や耐熱性に限界があり、その適用範囲は限定されている。無機材料ではチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) のような圧電材料を薄膜化し、これを圧力センサに適用する研究も行なわれているが⁶⁾、PZT の場合は原料として鉛が必要であること、薄膜化の方法や電極材料との化学的な反応による劣化など問題点も多い。また、キュリー温度が約 300℃であり、高温環境下では使用することができない。一方、圧電材料としてよく知られてい

る窒化アルミニウム (AlN) は、Table 1^{7)~9)}に示すように、PZT と比較して圧電定数こそ大きくないが、結晶化すると化学的に安定であり、特に 600℃以上の高温環境下でも圧電性を失わないと言われている。ただし、AlN は強誘電体ではないため、PZT のように分極処理を施して薄膜形成後に圧電性を付与することができない。AlN は薄膜形成過程において基板上で針状の結晶成長を行なうが、圧電性を発現させるためには、この結晶の C 軸が薄膜の厚み方向に高度に配向していることが必要である¹⁰⁾。一般的に多結晶体である構造材料上に単結晶または高配向性の薄膜を成長させることは、基板である構造材料の無配向性が薄膜中の結晶の配向性に影響するために非常に困難であり、AlN の場合はシリコン単結晶やサファイア上以外では高配向性薄膜を形成することは不可能であると考えられてきた。しかし秋山らは、スパッ

Table 1 Electrical and mechanical parameters

	AlN	PZT	PVDF
Specific inductive capacity	8.0-9.5	2000	13
Piezoelectric coefficient [pC/N]	3.4	400	20
Electromechanical coupling constant	0.75		
Young's modulus [GPa]	314		
Compressive strength [MPa]	3727		

† 第 40 回 SICE 学術講演会で発表 (2001・7)

* 産業技術総合研究所 鳥栖市宿町 807-1

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tosu

(Received September 3, 2001)

(Revised February 20, 2002)

Photo. 1 SEM photograph of cross sectional structure of AlN thin film

タリング法において、基板温度、基板/ターゲット間距離などのパラメータを最適化することにより、多結晶構造材料上に高C軸配向性AlN薄膜を作成することに成功し、圧電性の発現を確認した^{11)~13)}。Photo. 1は、窒化珪素(Si_3N_4)上に形成したAlN薄膜のSEM写真であり、基板である窒化珪素の結晶粒界と針状に配向成長したAlNの結晶を観察することができる。スパッタリングの場合、原子レベルで接合が発生するので、AlNの圧電性薄膜を電極となる金属上に直接形成すると互いに強固に結合し容易に剥がれることはない。元来AlNはセラミクスに分類されるものであるが、薄膜化によって非常に高い靱性を持つようになり、基板として金属箔を用いればフレキシブルな圧電性薄膜センサを容易に実現できる。有機材料系の薄膜では材料自体は柔軟性に優れるが、電極の形成は基本的に接着によるため機械的な強度が劣る。本論文では、フレキシブルな基板として市販のアルミ箔を採用し、その表面にスパッタリング法によって形成した高C軸配向性AlN薄膜を用いた、フレキシブルな箔状の圧力センサの構成法を提案し、圧力に対する応答の直線性、周波数特性を検証する。またセンサの等価回路モデルを与え、逆伝達関数から準静圧も検出可能であることを示す。

2. センサの構造と構成

圧電体の圧電性を動作原理とした圧力センサでは、印加圧力によって圧電体の表面に誘起された電荷を検出するために一对の電極が必要である。薄膜の場合には膜の表面と裏面に電極を形成するのが一般的であり、一種の平行平板型のコンデンサを形成することになる。電極上の電荷を正確に計測すれば印加圧力を計算することができるが、平行平板構造のままでは電極に蓄えられた電荷は外部環境へリークしてしまう恐れがある。通常は電極を絶縁膜によって保護するが、それでも電荷の外部へのリークを完全に阻止することはできない。また、外部環境の電位変化による電荷の誘起も無視できるものではない。この電荷の外部へのリークおよび外部環境の電位変化の影響を回避するために、ここでは一方の電極(内部電極)をもう一方の電極(外部電極)で完全に包み込み、内

Oriented AlN film

Fig. 1 Cross section of basic structure

部電極を外部環境から遮蔽するラミネート構造を採用した。Fig. 1に、その基本的な断面構造を示す。この構造によって内部電極上の電荷は外部環境から保護され、未知環境との接触による電荷の外部へのリークを避けることができる。さらに、外部電極を接地すると外部環境の電位変化の影響を考慮する必要がなくなる。また、上下の外部電極内面あるいは内部電極両面にAlN薄膜を形成すると、同じ圧力でも発生する電荷量は2倍になり、センサとしての感度向上に寄与する。

Photo. 2に試作したセンサのサンプルを示す。AlN自体は絶縁体であるが、アルミ箔上に形成された薄膜は、その稠密性がまだ完全には保証されていない。したがって現在のところ、スパッタリングや蒸着法でAlN薄膜の表面に直接電極を形成すると電氣的に短絡する率が高い。この点について現

Photo. 2 Photograph of developed sensor

Fig. 2 An exploded diagram of the sensor

在成膜方法の改良が行なわれているところであるが、試作したセンサでは AlN 薄膜表面に薄い絶縁層を付加して絶縁特性を確保することにした。Fig. 2 に示すように、市販の厚さ $12[\mu\text{m}]$ のアルミニウム箔上に、約 $1[\mu\text{m}]$ の厚さの AlN 薄膜を形成したものを外部電極とし、通常のアルミニウム箔（厚さ $12[\mu\text{m}]$ ）で作製した内部電極を包み込んだ。内部電極と外部電極の間には厚さ $6[\mu\text{m}]$ の塩化ビニルフィルムをはさみ、絶縁特性を確保している。全体は熱間でのプレスによって接着し、最終的なセンサの厚さは約 $50[\mu\text{m}]$ となった。内部電極へのアクセスは、外部電極の隅に設けたアクセスホールから行なう。

3. 感度直線性および周波数応答の測定

Photo. 2 の試作サンプルを用いて、センサの感度の直線性の検証と周波数応答の測定を 23°C の定温環境下で行なった。実験装置を Fig. 3 に示す。厚さ $1[\text{mm}]$ の緩衝用の合成ゴムシートにはさんだセンサを固定台上に配置し、これを上から押え板によって均等圧力をかける。印加圧力は電磁式の振動発生器によって生成し、そのシャフトと押え板を、歪みゲージを貼り付けた板バネを介して接続することにより圧力を計測した。センサの出力はチャージアンプで増幅し、電圧として記録する。振動発生器を駆動する信号に、それぞれ周波数が $5[\text{Hz}]$ と $0.5[\text{Hz}]$ の矩形波を使用した場合のセンサ出力を、Fig. 4 および Fig. 5 に示す。グラフ中の下の曲線が力センサで計測した印加圧力であり、上の曲線がセンサに発生した電荷である。特に Fig. 5 において、圧力が一定の状態になると、電極上に発生した電荷が時間と共に減少する現象が観察される。もちろん電極の遮蔽構造により外部への電荷のリークは考慮しなくてよいが、絶縁膜の設置によりセンサの内部抵抗は $100[\text{M}\Omega]$ 以上に保持されているものの電荷の内部漏洩を完全に防止することはできない。ただしこの内部漏洩はセンサの内部抵抗や静電容量等の外部環境に影響を受けないパラメータによって決まるため、あらかじめこの応答特性を計測し、そのパラメータを取得しておけば補正が可能である。

Fig. 6 および Fig. 7 は、それぞれ周波数が $5[\text{Hz}]$ と $0.5[\text{Hz}]$ の正弦波で振動発生器を駆動した場合のセンサ出力である。

Fig. 3 Experimental system

Fig. 4 Experimental result (rectangle $5[\text{Hz}]$)

Fig. 5 Experimental result (rectangle $0.5[\text{Hz}]$)

電極のラミネート構造の効果によって外部ノイズの影響が抑制されており、波形の歪もほとんどない。これらの図のように振動発生器の駆動信号に正弦波を用いて印加圧力と発生電荷の振幅の関係を測定すると、Fig. 8 の結果が得られた。鉛直軸が発生電荷、水平軸が印加圧力のそれぞれ振幅値である。駆動信号の周波数が $0.1[\text{Hz}]$ 、 $1[\text{Hz}]$ 、 $10[\text{Hz}]$ の場合についてそれぞれプロットしている。最小自乗法による直線近似によって求めたオフセット値は、各周波数の場合について $-0.07[\text{pC}]$ 、 $-0.09[\text{pC}]$ 、 $-0.16[\text{pC}]$ であり非常に微小な値となっている。また、直線近似誤差も非常に小さくセンサ感度の直線性は良好であると言える。Fig. 9 はセンサの周波数応

Fig. 6 Experimental result (sinusoid 5[Hz])

Fig. 7 Experimental result (sinusoid 0.5[Hz])

答をプロットしたものである。低周波数域ではゲインが急激に減少し、位相のズレも大きなものであるが、3[Hz]以上の高周波域ではゲイン特性はほぼフラットであり、位相のズレも小さい。なお、80[Hz]付近のゲインのピークや位相の急激な変動は実験装置の機械的な共振によるものである。

4. 電気特性モデルと準静圧の検出

Fig. 8に示したように、センサ感度の直線性は非常に良好であり、Fig. 9の周波数特性を与える線形モデルを構築することができる。

まず、平行平板型の電極を用いる場合、電極間距離を l 、力

Fig. 8 Linearity

Fig. 9 Frequency response

F の加わる電極面積（受圧面積）を A_P とすると発生電圧 V は、

$$\frac{V}{F} = g_{33} \frac{l}{A_P} \quad (1)$$

で与えられる¹⁴⁾。ここで g_{33} は出力電圧定数で、圧電体に固有の定数である。電極面積を A 、圧電体の誘電率を ϵ とすると静電容量は $C = \epsilon A / l$ であるから、圧力 P によって電極上に発生する電荷 q は、

$$q = \epsilon g_{33} A P = d_{33} A P \quad (2)$$

であり、圧電体の厚さに依存しない。ここで $d_{33} = \epsilon g_{33}$ は圧電定数である⁹⁾。

誘起された電荷はFig. 5に示した実験結果のようにセンサの電気的な内部構造にしたがって減衰する。通常、圧電素子の等価回路は抵抗とコンデンサの並列回路で取り扱われるが¹⁵⁾、このセンサの場合はFig. 9の周波数特性の実測値から、Fig. 10に示すように、さらにコイル素子を付加する必

Fig. 10 Equivalent circuit of the sensor

要がある。それぞれの回路素子の抵抗を R 、インダクタンスを L 、静電容量を C とし、分配される電荷を q_R , q_L , q_C とすると、電荷の保存から、

$$q = q_R + q_C + q_L \quad (3)$$

である。ただし、観測可能な電荷は q ではなく q_C であることに注意されたい。さらに、電圧の均衡から次式が成立する。

$$\frac{q_C}{C} = R \frac{dq_R}{dt} = L \frac{d^2 q_L}{dt^2} \quad (4)$$

(2) ~ (4) 式からつぎの微分方程式を得る。

$$d_{33}A \frac{d^2 P}{dt^2} = \frac{d^2 q_C}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dq_C}{dt} + \frac{q_C}{LC} \quad (5)$$

したがって入力圧力、出力を観測電荷とする伝達関数は次式となる。

$$H(s) = d_{33}A \frac{s^2}{s^2 + s/RC + 1/LC} \quad (6)$$

逆伝達関数は、

$$H^{-1}(s) = \frac{1}{d_{33}A} \left(1 + \frac{1}{RC} \frac{1}{s} + \frac{1}{LC} \frac{1}{s^2} \right) \quad (7)$$

である。 $d_{33}A$ は定数項であり、センサの周波数特性を決定するのは $1/RC$ と $1/LC$ の二つのパラメータである。Fig. 9 の周波数特性の実測値における低周波数域の位相の値から、これらのパラメータを推定すると、 $1/RC = 2.04$, $1/LC = 1.09$ となる。ちなみに、圧電定数 d_{33} の推定値は $3.4[\text{pC/N}]$ であった。Fig. 11 および Fig. 12 は、これらのパラメータ推定値を (7) 式の逆伝達関数に適用し、Fig. 4 および Fig. 5 の電荷の値から印加圧力を再現した結果である。グラフ中の上部の曲線が再現圧力、下部の曲線が歪みゲージ式力センサの出力から計算した圧力である。特に Fig. 12 において、矩形波状の圧力変動の一定部分がよく再現されており、この程度の準静圧では圧力センサとして十分機能しているといっていよう。ただし、(7) 式の逆伝達関数は二重の積分項を含むため、チャージアンプの DC 特性の安定性が不完全な場合は、そのために大きな誤差を生み出すこともありうる。したがって、完全な静圧状態ではチャージアンプの不安定性によって逆伝達関数による補正が正しく機能しないことも予想され、そのような状況への適用は、センサ以外の回路系について高特性のものを使用する必要がある。また、AIN は焦電体であり、その性質は温度の影響を受ける。この実験は定

Fig. 11 Reconstructed pressure signal (rectangle 5[Hz])

Fig. 12 Reconstructed pressure signal (rectangle 0.5[Hz])

温環境下で行なったが、温度変動の影響は考慮すべき課題である。

5. まとめ

金属箔表面に形成した高 C 軸配向性 AIN 薄膜を用いたフレキシブルな箔状圧力センサを開発し、その感度直線性の検証、周波数特性の測定を行なった。開発したセンサは、薄くかつ柔軟であることから、平面のみならず曲面への適用が可能である。動作原理として AIN の圧電性を用いるため、曲面上に設置しても平衡状態から計測すればオフセットが発生しない。たしかに静圧の検出には逆伝達関数による補正が必要

であるが、曲げによって大きなオフセットが発生する感圧抵抗塗料などと大きく異なる点である。

本論文では、実験装置の限界により 100[Hz] までの特性しか計測できなかったが、開発したセンサはさらに高周波数帯域での使用も可能であろう。したがって単に圧力センサとしてのみならず音響センサとしての応用も可能であると期待される。音響レーダーのような応用を考えると、スパッタリングによって大面積の薄膜を形成するのは容易であることから、今後の一つの課題はマトリクス化の実現である。また、はじめに述べたように、AlN 薄膜の稠密性の保証については現在改良が行なわれているところであり、本論文では絶縁性確保のため高分子の絶縁フィルムを用いている。AlN の特徴として耐熱性があり、この点では開発したセンサは AlN の、この特徴を活かしていない。今後は、薄膜形成法の改良を待つと共に、電極材料の吟味などにより高耐熱性の圧力センサの実現を目指したい。

参 考 文 献

- 1) V. Lumelsky, M. S. Shur and S. Wagner: Sensitive Skin, World Scientific (2000)
- 2) 関, 下条, 佐藤, 高橋: 高柔軟性をもつ把持圧分布センサの開発, 計測自動制御学会論文集, **31**-9, 1528/1530 (1995)
- 3) 八木俊治: 圧電素子分布触覚センサ, 日本ロボット学会誌, **7**-7, 906/907 (1991)
- 4) R.R. Reston and E.S. Kolesar: Robotic tactile sensor array fabricated from a piezoelectric polyvinylidene fluoride film, Proceedings of the IEEE 1990 National Aerospace and Electronics Conference, **3**, 1139/1144 (1990)
- 5) D. Setiadi, T.D. Binnie, A. Armitage, K. Benjamin and H. Weller: A comparative study of integrated ferroelectric polymer pyroelectric sensors, Integrated Ferroelectrics, **19**-1, 33/47 (1998)
- 6) E. Zakar, R. Polcawich, M. Dubey, B. Piekarski, G. McLane, J. Conrad, R. Piekarz, D. Wickenden, J. Champion, W.D' Amico, M.S.L. Hollis, K. McMullen and D. Porter: Fabrication and testing of a PZT thin film high-pressure sensor, Integrated Ferroelectrics, **41**-4, 1781/1788 (2001)
- 7) M.A. Dubois and P. Muralt: Measurements of the effective transe piezoelectric coefficient $e_{31,f}$ of AlN and Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ thin films, Sensors and Actuators, **77**, 106/112 (1999)
- 8) 染野, 平井: AlN 基セラミックスとその気相合成, 日本金属学会会報, **30**-11, 913/922 (1991)
- 9) 内野研二: 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版 (1986)
- 10) R.S. Naik, J.J. Lutsky, R. Reif, C.G. Sodini, A. Becker, L. Fetter, H. Huggins, R. Miller, J. Pastalan, G. Rittenhouse and Y.H. Wong: Measurements of the Bulk, C-Axis Electromechanical Coupling Constant as a Function of AlN Film Quality, IEEE Transactions of Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, **47**-1, 292/296 (2000)
- 11) M. Akiyama, K. Nonaka, K. Shobu and T. Watanabe: Crystal Orientation and Piezoelectricity of AlN Thin Films Prepared on Polycrystalline Substrates, J. of the Ceramic Society of Japan, **103**-10, 1093/1096 (1995)
- 12) M. Akiyama, H.R. Kokabi, K. Nonaka, K. Shobu and T. Watanabe: Influence of Substrate Temperature on Physical Structure of AlN Thin Films Prepared on Polycrystalline MoSi₂ by rf Magnetron Sputtering, J. of American Ceramic Society, **78**-12, 3304/3308 (1995)

- 13) M. Akiyama, T. Harada, C. Xu, K. Nonaka and T. Watanabe: Preparation of highly oriented AlN thin films on glass substrates by helicon plasma sputtering and design of experiments, Thin Solid Films, **350**, 85/90 (1999)
- 14) 一ノ瀬昇: 圧電セラミックス新技術, 53/57, オーム社 (1991)
- 15) 三谷, 山口, 宮口: 圧電素子を用いた 6 軸力覚センサの開発, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 953/954 (1993)

[著 者 紹 介]

上 野 直 広 (正会員)

1984 年, 九州大学理学部物理学科卒業。同年, 防衛庁技術研究本部第 5 研究所。85 年, 福岡県庁建築都市部。90 年, 通商産業省工業技術院九州工業技術試験所入所 (現独立行政法人産業技術総合研究所), 現在に至る。アクティブセンシング, 機能性材料のデバイス化の研究などに従事。IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会の会員。(博士 (工学))

秋 山 守 人

1993 年, 九州大学大学院総合理工学研究科材料開発工学専攻博士課程修了。同年, 通商産業省工業技術院九州工業技術試験所入所 (現独立行政法人産業技術総合研究所), 現在に至る。圧電体および蛍光体などの機能性セラミックスの研究などに従事。応用物理学会, 日本セラミックス協会の会員。(博士 (工学))

池 田 喜 一

1973 年, 日本大学理工学部数学科卒業。68 年, 通商産業省工業技術院機械技術研究所入所 (現独立行政法人産業技術総合研究所)。2001 年, 産業技術総合研究所産学官連携部門, 現在に至る。これまで, 4 本足, 6 本足歩行ロボット, 壁面歩行ロボット (極限作業ロボットプロジェクト), 荷重制御式歩行補助装置, 各種車椅子の研究開発に従事。日本ロボット学会, ライフサポート学会の会員。

立 山 博

1975 年, 東京教育大学理学研究科博士課程修了。77 年, 通商産業省工業技術院九州工業技術試験所入所 (現独立行政法人産業技術総合研究所), 現在に至る。ナノハイブリッド材の開発に従事。日本セラミックス協会, 日本粘土学会の会員。(理学博士)