

デジタル式アコースティックエミッションセンサの開発

武藤 一夫[†]・川島 貴弘^{††}・永井 萌土^{†††}・柴田 隆行^{††††}

Development of Digital Detection Sensor for Characterization of Acoustic Emission Signals

Kazuo MUTO[†], Takahiro KAWASHIMA^{††}, Moeto NAGAI^{†††} and Takayuki SHIBATA^{††††}

ABSTRACT

Detection of acoustic emission (AE), which is defined as transient elastic waves within a material caused by the rapid release of a strain is essential for applications in in-situ and nondestructive monitoring of various conditions in materials. The objective of this research is to develop a digital AE sensor composed of an array of piezoresistive cantilevers having different resonant frequencies for dividing AE signals into each frequency domain and characterizing the signals. This paper reports fabrication of an array of Si cantilevers and integration of piezoresistive elements based on a silicon-on-insulator substrate for the digital detection of AE waves.

Key Words: *acoustic emission, digital detection sensor, piezoresistive cantilever array*

キーワード: アコースティック・エミッション, デジタル検出式センサ, ピエゾ抵抗カンチレバー

1. はじめに

アコースティック・エミッション (AE, 音響放射) とは, 材料が外力によって変形あるいは破壊に至る際に, 材料に蓄えられたひずみエネルギーを放出することで, 材料内部を伝播する弾性波 (圧力波) となる. そのAEを材料表面に張り付けたセンサにて材料中を伝搬してきた音として検出することによって, 材料中で生じる現象を非破壊でモニタリングすることを可能とする. そのため, モノづくりの現場で使われる

CNC工作機械における軸受の初期破損や余寿命の推定や, 日常社会に入り込んだ自動車・鉄道などで用いられる各種金属材料の塑性変形中のリアルタイムモニタリング, あるいは原子炉やロケットなどの高压容器の耐圧試験における破壊予知あるいは欠陥部の位置同定など, 材料モニタリングをInSituかつ非破壊で実現することを可能とする. 一般的に市販されている従来のAEセンサは, PZTのような圧電材料を用いたものが主であり^{1, 2)}, 近年では高い圧電効果が得られるピエゾポリフッ化ビニリデン (PVDF) も用いられているが^{3, 4)}, 計測したデータに対して周波数解析をする必要があるなど, 信号処理装置を含め大がかりな装置構成を必要とする. 一方, AEの高感度計測に向けて, 電氣的ノイズの影響が少ない光ファイバ型センサも提案されているが, 有線である必要があり, 光学系などを含め同様に装置が大掛かりとなる⁵⁻⁸⁾. そうした中, 半導

平成 26 年 12 月 2 日 受付

平成 27 年 2 月 18 日 受理

[†] 工学部機械情報技術学科・准教授

^{††} 豊橋技術科学大学機械工学系・准教授

^{†††} 豊橋技術科学大学機械工学系・助教

^{††††} 豊橋技術科学大学機械工学系・教授

体製造技術を基盤としたMEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いることで小型化した容量型検出部を有するAEセンサの開発も行われている⁹⁾。これはCVD法を用いた表面マイクロマシニング技術を用いて受音部が形成されていることから、機械的特性の安定性などに課題がある。そこで、本研究では、MEMS技術を用いてSOI基板上にAEの周波数特性を広帯域でデジタル的に分解・検出可能とするための機械構造体および電気的検出素子を集積化したデジタル式AEセンサの開発を行っている。本論文では、カンチレバーの設計、試作、共振特性¹⁰⁾について述べ、電気的検出部となるピエゾ抵抗素子の形成および電気的特性評価を行い、デジタル式AEセンサの試作を行った。

2. デジタル式AEセンサ

図1に開発するデジタル式AEセンサの概略図を示す。本研究で提案するAEセンサは、機械共振器となる構造体としてカンチレバーおよび電気的検出部となるピエゾ抵抗素子から構成される。異なる共振周波数（長さにより制御）を有した複数のカンチレバーをシリコン基板上にアレイにて配置することで、AEに含まれる周波数成分は、それと一致する共振周波数を有したカンチレバーのみを振動させることとなる。そのため、AEの周波数特性をアレイ化したカンチレバーにて分解することが可能となる。また、各カンチレバーの根元部にはピエゾ抵抗素子を形成しており、カンチレバーが変位することによって根元部に応力が生じてピエゾ抵抗素子の抵抗値が変化するため、その後段に配置するブリッジ回路によって抵抗変化を計測することで、振動しているカンチレバーを電気的に検出することが可能となる。このような構造により、入力されたAEの周波数特性をデジタル的に分解し、検出を可能とするものである。一般的にAEの周波数帯域は、数十kHz～数MHzの帯域（金属材料では～1MHz、コンクリートでは～数百kHz）に及ん

でいるが、本研究では、基礎特性の評価を行うため、対象とする周波数帯域を100 k～500 kHzとし、50 kHzステップでの検出を目標とした。

本研究で提案するデジタル式AEセンサの作製プロセスを図2に示す。使用する基板は、Si層の面方位を(100)面とした4インチSOIウェハ（デバイス層：p型Si, 20 μm / BOX層：酸化膜層, 厚さ2 μm / ハンドル層：p型Si, 厚さ250 μm ）を用いる。デバイス層側にイオン注入を用いて、n型Si層を形成した後、熱酸化を行い、基板両面に酸化シリコン (SiO_2) 膜を形成する（図2a）。SOI基板のデバイス層の SiO_2 をフォトリソグラフィと反応性イオンエッチング (RIE) によってパターンニングし、オーミックコンタクト用拡散層およびピエゾ抵抗素子部をイオン注入のプロセスにより形成する（図2b）。その後、基板表面に絶縁膜を再形成し、Siの深堀りエッチング

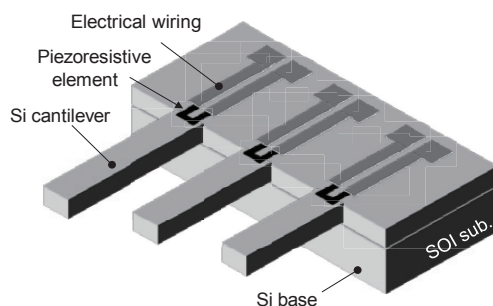


図1 デジタル式AEセンサの概要

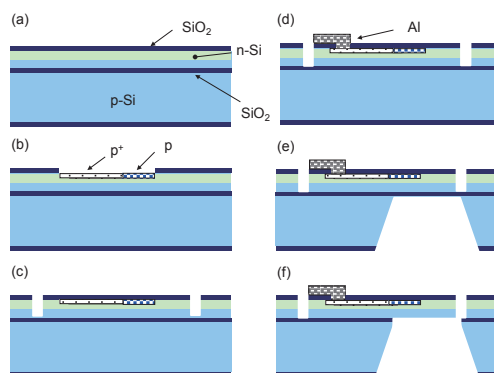


図2 作製プロセス

（DRIE）によってデバイス層にカンチレバー構造を形成する（図2c）．次に，スパッタリング法により成膜したAl膜をパターニングすることでAl配線部を形成する（図2d）．最後に，ハンドル層側から，TMAH（Tetra Methyl Ammonium Hydroxide）を用いた異方性ウェットエッチングによってSiの選択エッチングを行い，カンチレバー下部のSi層を除去する（図2e）．最後に，バッファード・フッ酸（BHF）によるBOX層のSiO₂膜を除去することによって，圧電抵抗素子を一体化したSi製カンチレバー構造を自立させ（図2f），AEセンサは完成となる．

3. カンチレバー構造の形成

3.1 設計

カンチレバーの共振周波数の設計は，理論式およびFEM（有限要素法）解析を用いて行った．理論式を（1）式に示す．

$$f = \frac{0.356}{2\pi} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

ここで， l はカンチレバーの長さ， E はヤング率， I は断面2次モーメント， ρ は密度， A は断面積であり，断面形状は長方形とした．この理論式をもとに所望する共振周波数におけるカンチレバーの長さを決定するため理論計算を行った．図3に共振周波数とカンチレバーの長さの関係を示す．図中の●印はFEM解析の結果を示す．

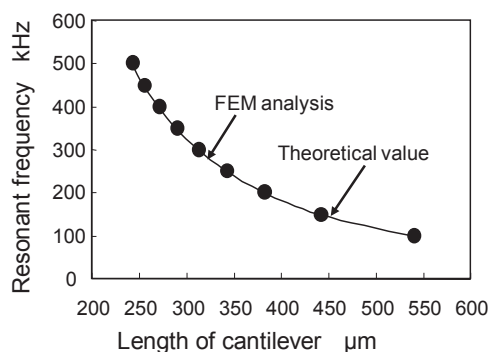


図3 カンチレバー長さと共振周波数の関係

FEM解析にはANSYS Work benchを用い，Siの物性値は $E=190\text{GPa}$ ， $\rho=2331\text{kg/m}^3$ とし，カンチレバーの長さ h は $20\text{ }\mu\text{m}$ ，幅 w は $30\text{ }\mu\text{m}$ とした．その結果，理論式をもとに描いた理論曲線（実線）にほぼ一致していることがわかった．これらの結果より，目標とする周波数分解を可能とするために必要となるSi製カンチレバーの長さは，理論式を用いて算出することでデジタル式AEセンサの基本構造となるSi製カンチレバーアレイの設計を行うことが可能となる．

3.2 作製したカンチレバー

前節の設計に基づき，図2に示すデバイスのプロセス（a，c，e，fのプロセスを実施）に従ってフォトリソの作製を行い，カンチレバーの作製を行った．作製したカンチレバーアレイの一例を図4に示す．図4aにSEM画像を，図4bにカンチレバー部の拡大図を示す．この結果より，長さの異なるSi製カンチレバーをアレイ化したデバイスを作製することができた．また，カンチレバーをハンドル層側（裏側）から観察すると，カンチレバー支持部のハンドル層が約 $16\text{ }\mu\text{m}$ エッチングされていることがわかったため，カンチ

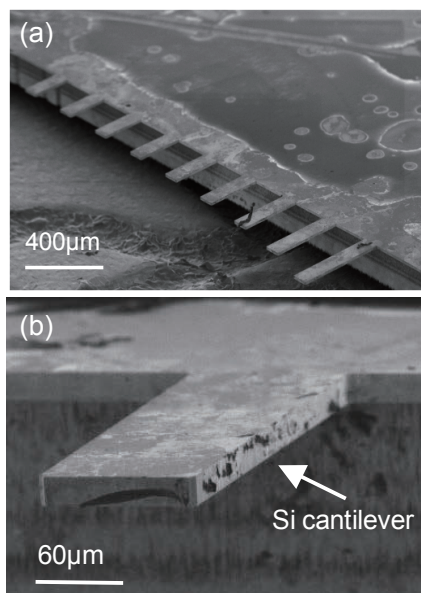


図4 作製したカンチレバーアレイ

レバーは突き出した支持部を含めた形状となっていることがわかった。このようになった原因は、デバイス作製プロセスにおいて裏面のパターニングを行う際のアライメント誤差であると考えられる。今後、デバイス作製プロセスの最適化を行って改善を図る。

3.3 共振特性の評価

ピエゾ素子を用いて振動させたカンチレバー先端にレーザー光を照射し、それを反射させることで変位を計測する光てこ方式を用いて、作製したカンチレバーの共振周波数を評価した。

図5に共振周波数の設計値を100～500 kHzとして作製したカンチレバーについて、共振周波数を実測した結果とカンチレバー長さの関係を示す。

(1) 式に代入し得られる理論値を図中の点線として示す。また、評価したカンチレバーの高さをSEM観察にて評価した結果、約18 μm となっていたことから、共振周波数の理論式を用いて再計算を行った結果を図中実線で示し、実際のカンチレバーの長さも16 μm 長くなったものとみなしてプロットした共振周波数の実測値を図中■で示す。その結果、点線で示す共振周波数の理論値からは再計算値は低下しており、低周波領域においては実測値に近づく結果となり、作製したデバイスの長さや厚さといった寸法精度のさらなる改善が必要であることがわかった。さらに、実際に作製するセンサにおいては、絶縁膜となる SiO_2 層を形成するなど積層複合構造となる。そのため、実際のセンサにおける共振特性

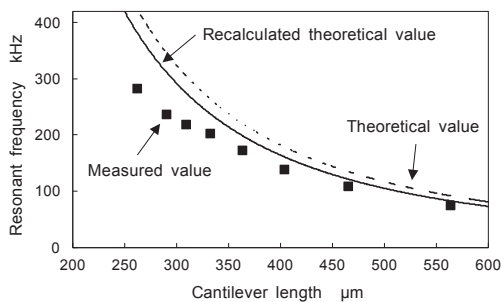


図5 共振周波数と長さの関係

の設計に際しては、有限要素法を用いた積層複合構造の解析も行う必要がある。しかしながら、実測した共振周波数の測定結果から、長さに応じて共振周波数が変化することがわかった。

4. ピエゾ抵抗素子の形成

4.1 設計

ピエゾ抵抗素子の不純物拡散プロファイルは、加速電圧、アニール時間、アニール温度、ドーズ量など種々のパラメータに依存する。そこで、Synopsys社のSentaurusを用いて不純物拡散シミュレーションを行い、Bの不純物濃度が $1\sim 2\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ となるプロセス条件の検討を行った。解析条件としては、Si基板 (p型Si, 抵抗率 $10\Omega\cdot\text{cm}$) に不純物P (リン) をドーズ量 $6\times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、加速電圧60 keV、アニール温度1000 $^{\circ}\text{C}$ (H_2O ガス, 1 atm)、アニール時間5 hと設定し、p型Si層の表層部にn型Si層の形成を行う。その後、不純物Bをドーズ量 $6\times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、加速電圧40 keV、アニール温度1000 $^{\circ}\text{C}$ (N_2 ガス, 1 atm) とし、アニール時間を1～3 hとしシミュレーションを行った。

図6に基板表面からの深さ—不純物濃度曲線を示す。アニール時間を長くすることで、 $1\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 付近の濃度領域が形成できており、アニール時間を3hとすることで、厚さ約0.3 μm のB拡散層を均一に形成できることが確認できた。以上より、ピエゾ抵抗素子の作製条件を決定した。

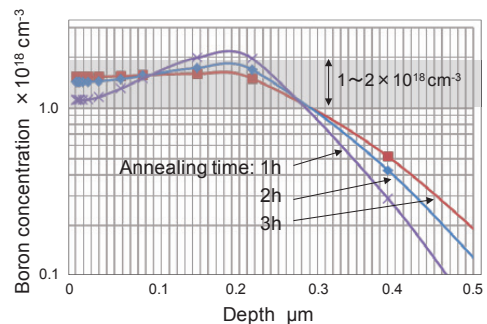


図6 不純物拡散プロファイル

4.2 ピエゾ抵抗素子の作製と電気的評価

決定したピエゾ抵抗素子の作製条件に基づき、n 型 Si ウェハ（不純物：P，電気抵抗率：3～4 Ωcm ）をベース基板としてピエゾ抵抗素子の作製および評価を行った．作製したピエゾ抵抗素子を図 7a に示す．評価したパターン形状はコ字型とし，素子を構成する一辺のライン長さ μm ／幅 μm をそれぞれ 70／10，80／20，90／30 とした．ピエゾ抵抗素子の電気抵抗の評価結果を図 7b に示す．電気抵抗の理論値（図中の□）は，不純物拡散シミュレーションから， $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の濃度領域が基板表面から約 $0.3 \mu\text{m}$ の深さまで形成される結果となっている．そこで，この拡散濃度から Irvin curve を用いて抵抗率を決定し，拡散深さおよびマスクの設計値をもとに(2)式から抵抗値 R を算出した．

$$R = \rho_s \left(\frac{l}{w} + \eta \right) \quad (2)$$

ここで， l ， w は素子の長さ，幅とし， ρ_s はシート抵抗（ $=\rho/d$ ， ρ は体積抵抗率， d は素子の厚さ）， η は形状による補正項で，配線の折れ曲がり一つにつき 0.5 とした．なお，シート抵抗は，抵抗率を厚さで除算したものであり，配線の l/w 比を積算することで抵抗値がえられることから，任意の大きさをもつ配線の正方領域あたりの抵抗値と捉えることができ，単位は Ω/\square として表現される．再計算値（△）は，実際に作製した基板におけるシート抵抗値およびピエゾ抵抗素子部分の形状寸法をもとに算出し，実測値は●で示す．その結果，理論値は，実測値および計算値と比較して約 3 倍大きい結果となった．これは，作製した基板のシート抵抗が $0.78 \text{ k}\Omega/\square$ であったのに対し，理論値の計算で用いたシート抵抗が $2.0 \text{ k}\Omega/\square$ と約 2.6 倍であったことに起因していると考えられる．これは，作製したデバイスのシート抵抗より， $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の濃度領域が，シミュレーションにより求められた値の 2.6 倍の深さとなる約 $0.77 \mu\text{m}$ の深さまで拡散している可能性が考えられ，今後は不純物の拡散深さを考慮したプロセスの最適化が必要となる．

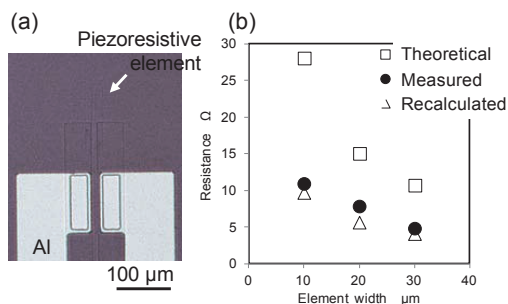


図 7 作製したピエゾ抵抗素子および電気的測定結果

5. デジタル式AEセンサの試作

これまでに設計してきた条件に基づき，図2に示すプロセスでデジタル式AEセンサの試作を行った．作製したデジタル式AEセンサを図8に示す． $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ の SOI 基板上に TEG（Test Element Group）領域とともに複数の AE センサを形成した．カンチレバー根元部にはピエゾ抵抗素子が形成できており，ピエゾ抵抗素子を有するカンチレバーをアレイにて集積化した AE センサが，提案するプロセスにて形成可能であることを示した（図9）．しかしながら，カンチレバーの先端部分が直方体形状ではなく丸みを帯びた形状になっていたことから，図 2e に示す裏面からの TMAH を用いた Si エッチングにおいて，TMAH によるオーバーエッチが原因だと考えられる．そ

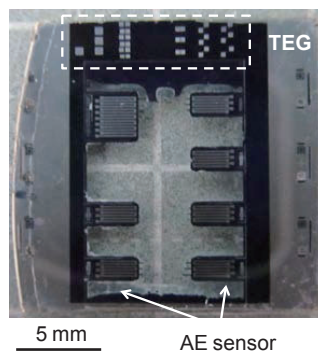


図 8 SOI 基板上に形成したデジタル式 AE センサ

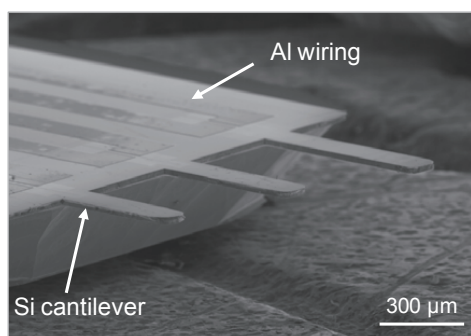


図9 ピエゾ抵抗を搭載したカンチレバーアレイ

のため、裏面からのエッチングプロセスにおいて、アライメント精度向上を含めたプロセスの最適化が必要ながわかった。

6. おわりに

本研究では、AEの周波数特性を広帯域で分解・検出可能とするデジタル式AEセンサの開発を目的として、カンチレバーの設計、試作、共振特性の評価を行った。さらに、電気的検出部となるpiezo抵抗素子の設計を行い、Bの不純物濃度を $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とするためのプロセス条件を明らかにし、素子の作製および電気的評価を行った。これらの検討の結果、デジタル式AEセンサを作製するためのプロセス条件を決定し、試作

を行い、提案するデバイスを実現可能であることを報告した。今後は、個々のデバイスの最適化や線論としての計測性能の評価を行う。

参考文献

- 1) H. Aburatani et al., "Acoustic emission (AE) measurement technique in piezoelectric ceramics," Jpn. J. Appl. Phys., 1996; 35: L516-L518.
- 2) K. Ito et al., "Acquisition and analysis of continuous acoustic emission waveform for classification of damage sources in ceramic fiber mat," Mater. Trans., 2007; 48: 1221-1226.
- 3) S.W. Or et al., "P(VDF-TrFE) copolymer acoustic emission sensors," Sens. Act. A, 2000; 80: 237-241.
- 4) G.H. Feng et al., "Acoustic emission sensor with structure-enhanced sensing mechanism based on micro-embossed piezoelectric polymer," Sens. Act. A, 2010; 162: 100-106.
- 5) M. Watanabe et al., "Fracture behavior of ceramic coatings during thermal cycling evaluated by acoustic emission method using laser interferometers," Mater. Sci. Eng., 2003; A359: 368-374.
- 6) T. Matsuo et al., "Optical fiber acoustic emission system for monitoring molten salt attack," Sci. Technol. Adv. Mater., 2006; 7: 104-110.
- 7) J.H. Zhao et al., "Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement," Opt. Laser Tech., 2008; 40: 874-880.
- 8) J.R. Lee et al., "A novel fiber Bragg grating acoustic emission sensor head for mechanical tests," Scripta Materialia, 2005; 53: 1181-1186.
- 9) D. Ozevin et al., "Resonant capacitive MEMS acoustic emission transducers," Smart Mater. Struct., 2006; 15: 1863-1871.
- 10) T. Kawashima et al., "Fabrication of Acoustic Emission Sensor Integrated with Cantilever Array for Detection of Signals Divided into Frequency Domain," Key Eng. Mater., 2012; 523-524: 575-580.

要 旨

本報では、AEの周波数特性を広帯域で分解・検出可能とするデジタル式AEセンサの開発を目的として、試作したデジタル式AEセンサについて報告を行う。カンチレバー部は、理論式に基づいて設計を行い、試作したデバイスの共振特性の評価を行なった結果、長さに応じた共振特性がえられることがわかった。電気的検出部となるpiezo抵抗素子部は、p型の素子とするために、Bの不純物濃度を $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とするためのプロセス条件をシミュレーションにより決定し、作製した素子を用いて電気的評価を行った。これらを検討した結果、設計したプロセス条件にて、デジタル式AEセンサの試作を行い、提案するデバイスを実現可能であることを報告した。

キーワード : アコースティック・エミッション, デジタル検出式センサ, piezo抵抗カンチレバー