

# MEMS 技術応用による光回折型音響センサ

Optical Diffraction Acoustic Sensor Applying MEMS Technology

鈴木 和拓 舟木 英之 成瀬 雄二郎

■ SUZUKI Kazuhiro

■ FUNAKI Hideyuki

■ NARUSE Yujiro

IT (情報技術) 機器への入力用途として、雑音の中から特定の音声だけを抽出して認識する收音システムが求められている。

東芝は、これに対応するため、振動板からの光回折パターンが音圧により変化することをフォトダイオード (PD : PhotoDiode) で検出するという新概念の音響センサ、“MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械装置) 光マイクロフォン”を開発している。今回、汎用の CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor : 相補型金属酸化膜半導体) プロセスとマイクロマシン技術を応用して試作したコンパクトな光マイクロフォンで、鋭い指向性、位相情報検出機能、ノイズ除去機能など、音声認識率の向上につながる諸機能が実現できることを確認した。

Intelligent acoustic sensors that can extract a specific voice in a noisy environment are required as a voice interface for IT equipment. Toshiba has proposed a novel acoustic sensor applying microelectromechanical systems (MEMS) technology, called the “MEMS optical microphone,” which detects the acoustic wave through changes in the optical diffraction pattern of a grating diaphragm. Using compact optical microphones fabricated with a complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) process and micromachining technology, we verified various functions useful for voice recognition such as directivity, phase detection, and noise suppression.

## 1 まえがき

近年、マイクロフォンは、携帯電話、パソコン、カーナビゲーションシステム、ロボットなどの IT 機器の入力デバイスとしても、大きな役割を担うようになってきている。このような用途では音声の認識率が重要であり、強い指向性や、周辺の雑音をキャンセルして必要な音だけを抽出する機能などが求められている。第3章で述べるように、指向性を得るためにはマイクロフォンの裏面が開放されている必要がある。現在、小型、低価格で消費電力も小さいコンデンサマイクロフォンが幅広く使われているが、音を振動板と対向電極の間の静電容量の変化として検出する仕組みのため、裏面が対抗電極でふさがれ、指向性を示さないのが一般的である。コンデンサマイクロフォンに指向性を持たせるためには、背面に気道を確保するためのパイプを増設したり、アレイ状に並んだマイクロフォン各々の位相差を検出するなどの措置をとる必要がある<sup>(1)</sup>。

一方、別のアプローチとして、音波を光学的に検出する音響センサの研究開発も行われている。例えば、光ファイバを用いて音圧到来時における伝搬光の反射率の変化を検出するもの<sup>(2)</sup>、干渉分光法を応用したもの<sup>(3)</sup>、ファブリペロー干渉を利用したもの<sup>(4)</sup>などが報告されている。しかし、指向性コンデンサマイクロフォンや前述の光検出による音響センサは、構造が複雑であったり、高精度の光学調整を必要とするなど、

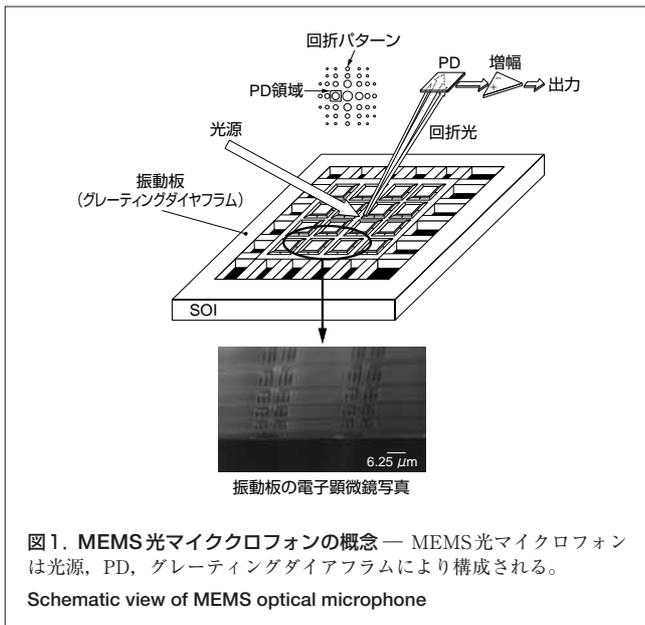
コスト、サイズ、使用上の制約などの点で課題が多かった。

そこで、東芝は新たに、振動板に直接レーザ光を照射し、振動板から自由空間へ放射される回折光パターンの変動から振動板の変位を検出する新構造の音響センサ、“MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械装置) 光マイクロフォン”を提案した。振動板は半導体のマイクロマシン技術によって形成されており、シンプルな構成でありながら高い機能を実現することができる。ここでは、MEMS 光マイクロフォンの基本概念と機能検証結果について述べる。

## 2 MEMS 光マイクロフォンの基本概念

当社が提案する MEMS 光マイクロフォンの概念を図1に示す<sup>(5)</sup>。この MEMS 光マイクロフォンは、光源、振動板、フォトダイオード (PD) の3点によって構成されている。回折格子が形成された振動板 (グレーティングダイアフラム) の面積は  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  で、図1に示すような格子が  $30 \mu\text{m}$  ピッチで  $130 \times 130$  個並び、モノリシックに集積化されている。今回の試作でターゲットとする、可聴域の音に対して機械的な応答が得られるよう設計されている。8インチの SOI (Silicon on insulator) ウェーハを用い、汎用の  $0.25 \mu\text{m}$  CMOS プロセスとマイクロマシン技術を併用して作製しているため、量産性に優れ、再現性も高い。

グレーティングダイアフラムにレーザ光を照射すると、図1の

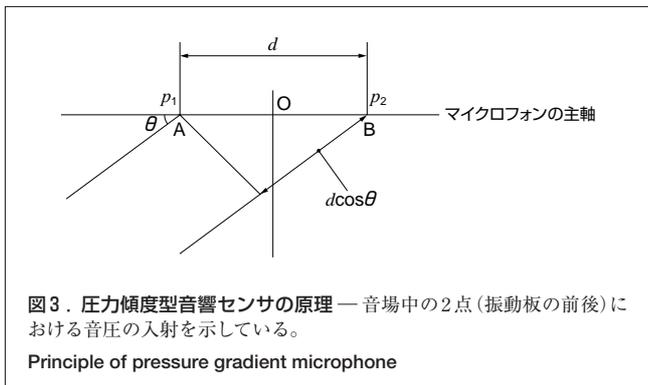


挿入図に示したような、アレイ状にスポットが並んだ回折光パターンが得られる。中心のスポットの強度が最大で、外側のスポットほど暗くなる。音が入力されてグレーティングダイヤフラムが振動すると、この回折光パターンが二次元的にシフトする。中心付近のスポットの一つに合わせて小型のPDを配置しておけば、グレーティングダイヤフラムの振動を受光強度の変化として感度よく検出することができる。回折の利用により、レンズなどの光学部品なしに微小スポットが得られるので、コンパクトでシンプルなシステムを構築できる。図2は、図1で示した概念に基づいたMEMS光マイクロフォンのプロトタイプである。



### 3 鋭い指向性を持つMEMS光マイクロフォン

振動板の変位を光学的に検出するMEMS光マイクロフォンでは、振動板の裏面を完全に開放することができ、その場合、振動板の表裏に加わる音圧の差を計測する圧力傾度型音響センサとして動作することになる。図3に示すように、厚さ  $d$  の振動板について、前面をA、後面をBとする。2点を結ぶ直線を  $x$  軸とし、2点間の中心を  $x$  軸の原点Oとする<sup>(6)</sup>。角度  $\theta$  の方向から平面進行波が入射する場合、原点Oの音圧を  $pe^{j\omega t}$  とすると、点A, Bの音圧,  $p_1, p_2$  はそれぞれ、(1), (2) 式で、それらの差  $\Delta p$  は (3) 式で表される。



$$p_1 = p \exp \left[ j(\omega t + k \frac{d}{2} \cos \theta) \right] \quad (1)$$

$$p_2 = p \exp \left[ j(\omega t - k \frac{d}{2} \cos \theta) \right] \quad (2)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = j2pe^{j\omega t} \cdot \sin \left( k + k \frac{d}{2} \cos \theta \right) \quad (3)$$

$\omega$  : 音圧の角速度  
 $k$  : 音波の波数 (= 角速度/音速)  
 $t$  : 時間

また (3) 式は、 $k(d/2) \cos \theta$  が十分小さいとき (4) 式で表される。

$$\Delta p \approx jpe^{j\omega t} \cdot kd \cos \theta \quad (4)$$

(4) 式から、 $\Delta p$  は方向依存性を持つことがわかる。MEMS光マイクロフォンの指向性検証実験では、光源として波長 670 nm, 出力 0.9 mW, ビームスポット径 2 mm の連続発振レーザダイオード (LD: Laser Diode) を用いた。回折光の検出には受光面積 0.66 mm<sup>2</sup> のPDを用い、検証音波として周波数 1 kHz のサイン波を導入した。

指向特性の測定結果を図4に示す。正面方向 (0° の位置) から 30° ずれると感度がほぼ半減した。この結果は、話者 (音源) の位置が定まっている場合、極めてめいりような音声

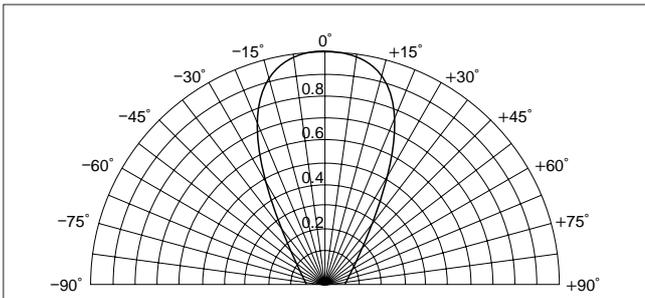


図4. MEMS光マイクロフォンの1 kHzの音波に対する指向特性 — 正面方向から30°ずれると感度がほぼ半減する鋭い指向特性が得られた。  
Directional characteristics of optical microphone at 1 kHz

(音波)の收音が可能であることを示している。

#### 4 励振機能を備えたMEMS光マイクロフォン

前章では、グレーティングダイアフラムの裏面を開放し、圧力傾度型音響センサとして動作させる指向性MEMS光マイクロフォンについて述べた。ここでは、それとは別のアプローチである、グレーティングダイアフラムに励振機能を備えた“アクティブMEMS光マイクロフォン”について述べる<sup>7)</sup>。

アクティブMEMS光マイクロフォンの基本概念を図5に示す。指向性MEMS光マイクロフォンでは、裏面への音波の到達を可能にするため、グレーティングダイアフラムの背面のシリコン(Si)基板をすべて除去していた。これに対し、アクティブMEMS光マイクロフォンでは、グレーティングダイアフラムとこれに対向して配置された基板が共振器を構成しているのが特徴である。グレーティングダイアフラムに相当する

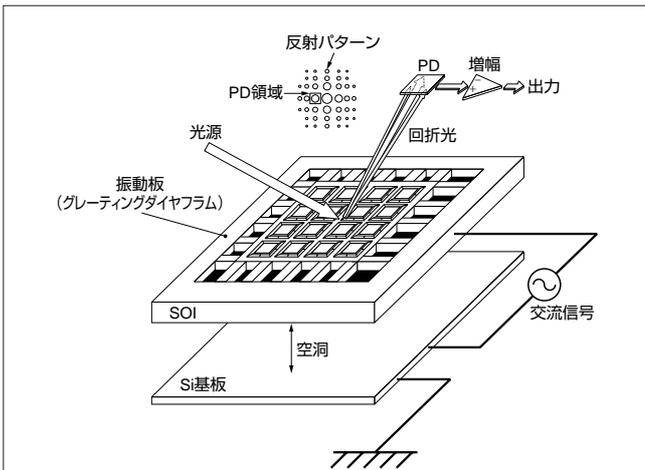


図5. アクティブMEMS光マイクロフォンの概念 — グレーティングダイアフラムと基板で電位をとり、交流信号を導入することで任意の周期で励振する。  
Schematic view of MEMS optical microphone with active grating diaphragm

領域にはアルミニウム(Al)が一面に配線されているため、バイアスを印加することで、グレーティングダイアフラムと基板間の空洞に静電気力を発生させることができる。ここに、特定の周波数成分を持つ交流信号を導入することで、この振動板を任意の周波数で励振させることができる。この原理は、静電スピーカと同じである。

音波によって生じたグレーティングダイアフラムの振動に、静電的な励振により生ずる振動を重畳することで、MEMS光マイクロフォンをアクティブな音響センサとして機能させることができる。同一の周波数成分を考えた場合、音波と励振が同相なら出力信号は増大し、逆相なら減衰するので、音波と励振の位相差が出力に反映されることになる。

図6は、400 Hzの周期でグレーティングダイアフラムを励振させた状態で、同じく400 Hzの音波を位相を変えながらスピーカから入力したときの、アクティブMEMS光マイクロフォンの感度変化の推移を示したものである。音波と励振の位相により、180°ごとに感度の極大と極小が現れているのがわかる。すなわち、アクティブMEMS光マイクロフォンを使えば、音源の位置特定に必須なパラメータの一つである位相情報を、コンパクトな単一の素子で検出できる。この技術は、将来、ホームロボットなどに搭載される音源の位置特定機能に必要な收音システムを、飛躍的に小型化するのに役立つものと期待できる。

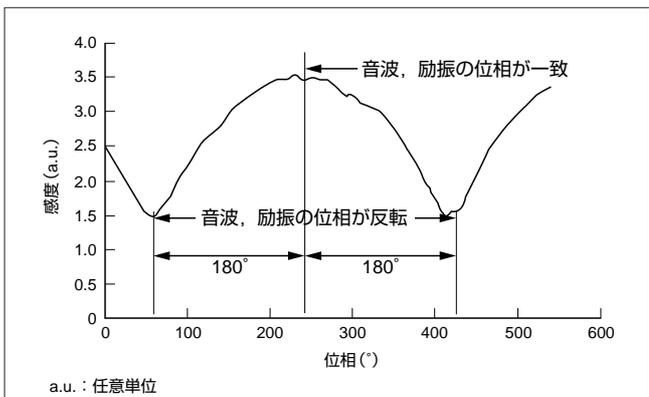


図6. 音波位相変化時のアクティブMEMS光マイクロフォンの感度推移 — 180°ごとに感度の極大、極小が交互に現れている。  
Change in sensitivity when sound wave changes phase

アクティブMEMS光マイクロフォンは、到来する音波の位相情報を検出できるだけでなく、この位相情報を積極的に活用して出力信号のレベルを様々に変えることもできる。例えば、必要な音波(音声)成分に励振の位相が一致するようにフィードバックをかければ、その信号を選択的に強調することができる。逆に、不要な周波数成分に逆相のフィードバックをかければ、その周波数成分をキャンセルすることが

できる。つまり、アクティブフィルタやノイズキャンセラの機能をセンサレベルで実現できることになる。

## 5 あとがき

0.25  $\mu\text{m}$  のデザインルールによる CMOS プロセスと、マイクロマシン技術を用い、音圧によるグレーティングダイアフラムの変位を照射光の回折光パターンの変化を介して検出する新しい音響センサ、MEMS 光マイクロフォンを開発した。

振動板上に形成された二次元回折格子状のグレーティングダイアフラムにより、セルフフォーカスされたドット状の回折スポットが得られるので、レンズなどを用いることなく高感度の光波の検出が可能である。また、背面電極が不要で、グレーティングダイアフラムの裏面を開放できるので、鋭い指向性を持ったマイクロフォンを実現できる。検証実験では、正面方向から  $30^\circ$  ずれると感度がほぼ半減する鋭い指向性を確認することができた。更に、グレーティングダイアフラムを強制的に振動させるアクティブ MEMS 光マイクロフォンにおいては、デバイス(センサ)レベルで信号を制御できる可能性を見いだすことができた。

IT 機器の小型で高機能な収音システムとして、今後の発展が期待される。

## 文献

- (1) Flanagan, J.L., et al. Computer-steered microphone arrays for sound transduction in large rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*. **78**, 5, 1985, p. 1508–1518.
- (2) Suzuki Y., et al. Theoretical investigation on a microphone using optical reflection on curved surface. *Acoustical Science and Technology*. **25**, 1, 2004, p.45–49.
- (3) Mei, S.H., et al. "An all fiber interferometric gradient hydrophone with optical path length compensation". *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1999. Baltimore, 1999-05, IEEE. p.432.
- (4) Deng, J., et al. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers. *Optics and Laser Technology*. **33**, 5, 2001, p. 305–311.
- (5) Suzuki K., et al. Optical sensing directional acoustic transducer with grating diaphragm using complementary metal oxide semiconductor compatible micromachining techniques. *Japanese Journal of Applied Physics*. **44**, 2005, p.3049–3054.
- (6) 古井貞熙. 音響・音声工学. 東京, 近代科学社, 1992, 254p.
- (7) Suzuki K., et al. "An optical diffraction microphone with active grating diaphragm". *MRS Spring Meeting J13.11*. San Francisco, 2005-03, Materials Research Society. MRS, 2005, p.J13.11.1–J13.11.6.



鈴木 和拓 SUZUKI Kazuhiro

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー。  
MEMS デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Advanced Electron Devices Lab.



舟木 英之 FUNAKI Hideyuki, D.Eng.

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー主任  
研究員, 工博。パワー半導体デバイス, 各種センサの研究・  
開発に従事。応用物理学会, IEEE 会員。  
Advanced Electron Devices Lab.



成瀬 雄二郎 NARUSE Yujiro, D.Eng.

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー研究  
主幹, 工博。MEMS 応用分野の研究・開発に従事。応用  
物理学会, IEEE 会員, 英国物理学会フェロー。  
Advanced Electron Devices Lab.