軟X線照射によるシリコンマイクロホン用エレクトレットの作製

Fabrication of Electret Using Soft X-ray Irradiation for Silicon Microphone

正会員 後藤 正英^{†1}, 正会員 萩原 啓^{†1}, 正会員 井口 義則^{†2}, 安野 功修^{†3},
児玉 秀和^{†3}, 樹 所 賢一^{†4}, 正会員 田島 利文^{†1}Masahide Goto^{†1}, Kei Hagiwara^{†1}, Yoshinori Iguchi^{†2}, Yoshinobu Yasuno^{†3},
Hidekazu Kodama^{†3}, Kenichi Kidokoro^{†4} and Toshifumi Tajima^{†1}

Abstract To develop an ultraminiature high-performance microphone for the next generation, we have been studying a silicon microphone. We previously fabricated a single-crystalline silicon microphone using original MEMS technology. The prototype microphone showed excellent acoustic characteristics such as high sensitivity and wide frequency range. Aiming at low-voltage operation, we have recently developed a novel electret charging technique using soft X-ray irradiation. This technique leads to removing the 48-V bias voltage. Experimental results show that an internal inorganic dielectric film keeps electric charges and has excellent heat resistance. This technique exhibits promise for developing a low-voltage operation silicon microphone for purposes ranging from broadcasting to consumer use.

キーワード：シリコンマイクロホン, エレクトレット, 軟X線, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

1. ま え が き

音を電気信号に変換する素子であるマイクロホンは、用途に応じてさまざまな形状や性能のものが作られている¹⁾。その中でも、放送用途のマイクロホンは、高感度、広帯域などの優れた音響特性を実現している。しかし、その作製には多数の部品の組立や高精度な調整などの工程が必要なため、マイクロホンの超小型化や量産化は困難であった。

一方で、近年、超小型化や量産化も可能なマイクロホンとして、半導体シリコンの微細加工技術により作製されるコンデンサ型のマイクロホン(シリコンマイクロホン、またはMEMSマイクロホン)の開発が行われ、携帯電話機向

けに量産が始まっている²⁾。これらは、超小型化や量産化のみならず、はんだリフローの実装工程にも適用可能な耐熱性を有することで注目を集めている³⁾。しかし、これまでの技術では、高い音響特性が得られる振動膜(音圧を受ける部分)やコンデンサ構造の形成が困難で、放送用途の高性能なマイクロホンは実現されていなかった。

われわれはこれまでに、放送で要求される高い音響特性を実現できるシリコンマイクロホンの検討を進め、振動膜などからなるマイクロホンの心臓部(マイクロホンエレメント)を、優れた機械的特性をもつ単結晶シリコン^{4) 5)}で一体構造として作製する独自のMEMS技術を開発し、これにより試作した放送用の超小型シリコンマイクロホンが優れた音響特性(感度: -42dB (0dB=1V/Pa), 周波数帯域: 30Hz~20kHz)を備えることと、熱や湿度に強い耐環境性能をもつことを確認した^{6)~9)}。一方、このマイクロホンは、48Vのバイアス電圧とよばれる直流電圧を印加することが必要であるため、放送用途としては、例えば、中継などの使用において機動性に課題があった。また、補聴器や車載等の民生用途への適用には、電圧の低減は必須の条件となる。

そこで今回、上記課題の解決に向けて、駆動電圧の大幅な低減が可能な電荷蓄積型シリコンマイクロホンの研究に取組み、本マイクロホンの作製に不可欠な、軟X線照射によるエレクトレット作製技術を開発した。

本論文では、シリコンマイクロホンの構造や動作原理に

2010年2月19日受付, 2010年4月20日採録

†1 NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3224)

†2 財団法人NHKエンジニアリングサービス

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-2411)

†3 財団法人小林理化学研究所

(185-0022 国分寺市東元町3-20-41, TEL 042-321-2841)

†4 リオン株式会社

(〒185-8533 国分寺市東元町3-20-41, TEL 042-359-7842)

†1 NHK Science & Technology Research Laboratories

(1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan)

†2 NHK Engineering Services, Inc.

(1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan)

†3 Kobayashi Institute of Physical Research

(3-20-41 Higashi-motomachi, Kokubunji-shi, Tokyo 185-0022, Japan)

†4 RION Co., Ltd.

(3-20-41 Higashi-motomachi, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8533, Japan)

ついて述べた後、開発した軟X線照射によるエレクトレット作製技術の原理と、この原理を検証するために行った実験により得られた諸特性について報告する。

2. シリコンマイクロホンの構造と動作原理

シリコンマイクロホンの構造と動作原理について述べる。なお、従来の48V直流電圧を印加する方式をバイアス型、現在開発中の方式を電荷蓄積型とよび区別している。

2.1 バイアス型シリコンマイクロホン

バイアス型シリコンマイクロホンの構造を図1に示す。このバイアス型は、後述する電荷蓄積型の基本となるものである。

本マイクロホンはコンデンサ型であり、その心臓部であるマイクロホンエレメント（以下、エレメント）は、振動膜と背面板とよばれる2枚の電極を近接して配置した構造で、両電極によりコンデンサを形成している。この電極間に48Vの直流電圧（バイアス電圧）が印加された状態で、音圧により振動膜が変位すると、コンデンサの静電容量が変化し、これが電圧の変化として現れ、音声信号が得られる。

われわれはこれまでに、このエレメントを単結晶シリコンで一体構造として作製するMEMS技術を開発した。本技術は、引っ張り強度の高い振動膜が平坦に形成できる、空隙部の長さが制御できる等の特長をもつため、前述のように優れた音響特性をもつ放送用の超小型シリコンマイクロホンの開発が可能となった^{6)~9)}。本マイクロホンは、単結晶シリコンの備える耐熱・耐湿性により、熱や湿度に強い耐環境性能を有する。また、作製工程がシンプルであるため、エレメントの量産化に適している。

2.2 電荷蓄積型シリコンマイクロホン

電荷蓄積型シリコンマイクロホンの構造を図2に示す。本マイクロホンもバイアス型と同様にコンデンサ型であり、動作原理は同一である。電荷蓄積型では、背面板の内側に、シリコンの酸化膜と窒化膜を積層した誘電体膜中に半永久的に電荷を蓄積した材料（エレクトレット）¹⁰⁾を設け、この膜にバイアス電圧に相当する電荷を蓄積して、電圧を保持させる。エレクトレットの搭載により、バイアス電圧を印加することは不要となり、マイクロホンに供給する電圧は増幅回路部分の数Vだけとなるため、駆動電圧の大幅な低減が可能となる。

従来のエレクトレットは、樹脂系の材料に電荷を蓄積したものがよく知られており、これらは樹脂を素材としたマイクロホンや集塵フィルタなどに適用されている。本マイクロホンでは、シリコン系の誘電体膜をエレクトレットとして用いるため、バイアス型と同様に、単結晶シリコンを基本としたMEMS技術によりエレメントを作製することが可能となる。また、振動膜ではなく背面板にエレクトレットを設けるため、マイクロホンの音響特性に大きく影響する振動膜は、従来と同じ材料および作製工程で形成することが可能である。これにより、バイアス型のもつ優れた音

図1 バイアス型シリコンマイクロホン
Schematic diagram of biased silicon microphone.

図2 電荷蓄積型シリコンマイクロホン
Schematic diagram of electret silicon microphone.

響特性を損なうことなく、マイクロホンに電荷蓄積の機能を付加することができる。

3. 軟X線照射によるエレクトレットの作製

電荷蓄積型シリコンマイクロホンの実現に必須となる、新しいエレクトレット作製技術を開発し、エレクトレットの作製を行った。以下に、エレクトレット作製技術の原理と、作製実験によって得られた諸特性を示す。

3.1 従来のエレクトレット作製法

従来、エレクトレットの作製には、コロナ放電により発生したイオンで電荷を蓄積するコロナ放電法が広く用いられている。樹脂系のエレクトレットを用いたマイクロホンでは、樹脂膜にコロナ放電で電荷を蓄積してエレクトレット化した後、この膜を組立ててマイクロホンを形成している。一方、本シリコンマイクロホンでは、エレメントをシリコン基板から一体構造として形成するため、エレメントの完成後に電荷を蓄積させる必要がある。ところが、従来のコロナ放電法では、イオンがエレメントを透過することはできないため、内部にある膜をエレクトレット化することが困難であった。今回、われわれはこの課題を解決するために、軟X線照射によるエレクトレット作製技術を開発した。

3.2 軟X線照射によるエレクトレット作製技術の原理

軟X線照射によるエレクトレット作製技術の原理を図3に示す。エレメントの上側から照射された軟X線は、厚さ $2\mu\text{m}$

図3 軟X線照射によるエレクトレット作製技術の原理
Operating principle of electret charging technique using soft X-ray irradiation.

図4 エレクトレット作製実験の構成
Configuration of electret charging experiment.

の振動膜を90%以上透過する。振動膜を透過した軟X線は、酸素や窒素など空気中の成分に吸収され、これらの成分をイオン化する。発生した正イオンと負イオンを、電極間に印加した電圧により図の上下方向に分離し、負イオンを誘電体膜に引き寄せて、マイナスの電荷を蓄積する。このように軟X線を用いることで、エレメントの内部にある膜をエレクトレット化することが可能となる。本技術によれば、図2に示す構造のマイクロホン形成の際、エレメントと増幅回路を実装した後に電荷蓄積を行うことが可能であるため、実装工程でのハンドリングによる放電のリスクを回避することができる。

3.3 エレクトレット作製実験

本作製技術の原理を検証するため、マイクロホンの構造を模擬した実験系を構成し、エレクトレットの作製実験を行った。図4に実験の構成図を示す。背面板には厚さ400 μ mの単結晶シリコンを用い、熱酸化法でシリコン酸化膜を形成した後、LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) でシリコン窒化膜を堆積した。振動膜は、厚さ400 μ mの単結晶シリコンをウェットエッチングにより加工して形成し、厚さを2 μ mとしている。バックライトのスペーサを用いて背面板と振動膜の間隔(ギャップ)を一

表1 エレクトレット作製実験の条件
Conditions of electret charging experiment.

背面板	単結晶シリコン(400 μ m)
エレクトレット	シリコン酸化膜(1 μ m) / シリコン窒化膜(200 nm) (積層)
振動膜	単結晶シリコン(2 μ m)
軟X線	管電圧 : 9.5 kV 管電流 : 300 μ A エネルギー : 3 ~ 9.5 keV 線量当量 : 91 Sv/h (距離 25mm)
ギャップ	400 μ m
線源-背面板距離	12 mm
印加電圧	50 V
照射時間	10 min.

(a) 常温保持特性

(b) 300°C 耐熱性

図5 実験結果

Experimental results.

(a) Charge storage characteristics at room temperature, (b) heat resistance characteristics of 300°C.

定に保ち、振動膜と背面板間に直流電圧を印加しながら、振動膜の上側から軟X線を照射した。線源には、フォトイオナイザL9490MOD (浜松ホトニクス製)を用いた。表1に実験の条件を示す。

3.4 実験結果

表面電位計ISOPROBE 244 (Monroe Electronics製)を用いて、作製したエレクトレットの電位を測定した。測定期間中、背面板を常温(22°C, 50%RH)で保管し、経過時間に対する表面電位の変化を調べた。結果を図5(a)に示す。

120時間の経過で表面電位の変化は数V以内に留まり、この膜が優れた電荷保持特性を有することを確認した。

300℃での耐熱性を調べた結果を図5(b)に示す。エレクトレットを形成した背面板をホットプレートで300℃に加熱し、経過時間に対する表面電位の減衰を調べた。表面電位は、50分の加熱で-3dB以内の変化に留まっている。初めの30秒での減衰が大きい(-1.4dB)が、これはエネルギーの低い準位に捕獲された電荷が抜けやすいためと考えられる。今後、軟X線の線量やエネルギーを増大して、電荷をエネルギーの高い準位に効率良く蓄積させることで、さらに耐熱性を向上できると考えている。従来、エレクトレットとして用いられている樹脂膜では、およそ250℃で電荷がほとんど消失してしまうのに対し³⁾、このシリコン誘電体膜のエレクトレットは、はんだリフローの実装工程で求められる260℃以上の高温領域において、優れた耐熱性を有することを確認した。

4. む す び

電荷蓄積型シリコンマイクロホンの実現に向けて、軟X線照射によるエレクトレット作製技術を開発し、マイクロホン内部に形成したシリコン系の誘電体膜をエレクトレット化できることと、この膜が優れた電荷保持特性および耐熱性をもつことを確認した。今後は、この膜を搭載した電荷蓄積型シリコンマイクロホンの試作を行い、放送用のみならず補聴器等の民生用途にも適用可能な機動性の高いシリコンマイクロホンの実現をめざす。

〔文 献〕

- 1) 高柳：“マイクロホンテクニカルハンドブック”，兼六館出版（1998）
- 2) 日経マイクロデバイス，2008年10月号，pp.53-60（2008）
- 3) 小倉：“MEMSマイクロホン”，Matsushita Technical Journal, 52, 1, pp.69-73（2006）
- 4) 江刺，藤田，五十嵐，杉山：“マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス”，培風館（1992）
- 5) M. エルベンスボーク，H.V. ヤンセン：“シリコンマイクロ加工の基礎”，Springer-Verlag, Tokyo（2001）
- 6) 田島，西口，斎藤，千葉，盛田，谷岡：“超小型・高性能シリコンマイクロホンの開発”，音響誌，60, 8, pp.461-465（2004）
- 7) 後藤，田島，井口，小野，安藤，谷岡，武子，松永，安野：“放送用コンデンサ型シリコンマイクロホンの試作”，電学E総研資，MSS-05-21, pp.1-5（2005）
- 8) Y. Iguchi, T. Tajima, M. Goto, M. Iwaki, A. Ando, K. Tanioka, F. Takeshi, S. Matsunaga and Y. Yasuno: "New Fabrication Process for High-performance Silicon Condenser Microphone with

Monocrystalline Silicon Diaphragm and Backplate", 17th IEEE International Conference MEMS2004 Technical Digest, pp.601-604（2004）

- 9) M. Goto, Y. Iguchi, K. Ono, A. Ando, F. Takeshi, S. Matsunaga, Y. Yasuno, K. Tanioka and T. Tajima: "High-Performance Condenser Microphone with Single-Crystalline Silicon Diaphragm and Backplate", IEEE Sensors Journal, 7, 1, pp.4-10（2007）
- 10) G.M. Sessler: "Electrets", 1, 3rd ed., Laplacian Press, Morgan Hill, CA（1998）

後藤 正英 2000年，東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年，NHKに入局。放送技術研究所に勤務し，現在に至る。固体撮像デバイス，シリコンマイクロホンの研究開発に従事。正会員。

萩原 啓 1995年，千葉大学工学部画像工学科卒業。同年，NHKに入局。富山放送局を経て，1998年より，放送技術研究所に勤務。大型ディスプレイ（PDP, FED），シリコンマイクロホン，エナジーハーベスティングの研究開発に従事。正会員。

井口 義則 1991年，早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。2001年，NHKに入局。放送技術研究所に勤務。2008年より，NHKエンジニアリングサービスに出向。シリコンマイクロホンの研究開発に従事。正会員。

安野 功修 1973年，電気通信大学応用電子工学科卒業。同年，松下電器産業（株）に入社。2007年より，（財）小林理学研究所圧電応用研究室主任研究員。音響変換器，エレクトレット材料応用の研究開発に従事。博士（工学）。

児玉 秀和 1999年，東京理科大学理学研究科化学専攻博士課程修了。同年，リオン（株）に入社。2002年より，（財）小林理学研究所圧電応用研究室研究員。圧電材料やエレクトレットを中心とした有機機能材料の基礎研究ならびにデバイス開発に従事。理学博士。

樹所 賢一 1991年，工学院大学工学部生産機械工学科卒業。同年，リオン（株）に入社。生産技術部門配属から研究開発部を経て，現在，聴能技術部勤務。聴能技術部において，補聴器用トランスデューサに関する業務に従事。

田島 利文 東京電機大学機械工学科卒業。1971年，NHKに入局。同年より，放送技術研究所にて，PDP，固体撮像デバイス，マイクロマシンセンサの研究開発に従事。現在，同所（撮像・記録デバイス研究部）主任研究員。正会員。