

柳谷隆彦研究室

ScAlN厚膜から成るMEMS技術を用いず作製した空中超音波トランスデューサ

1. まえがき

pMUT (Piezoelectric micromachined ultrasonic transducer) は、空気や水媒質との音響インピーダンス整合に優れたデバイスとして注目されている。ScAlN薄膜は圧電性が大きく、非鉛のpMUT材料として有望で、これまでにScAlNを用いたpMUTが多数報告されている[1]。これまでに報告されているpMUTは主にMEMS技術を用いて作製されている。MEMS技術はpMUTアレイを大量生産する場合には便利な手法であるが[2]、多品種少量生産には不向きである。そこで本研究では、MEMS技術を用いず作製した、 $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ 厚膜を用いたpMUT[3, 4]を提案する。

2. pMUTの作製と特性評価

2.1 $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ の成膜

本報告で作製したpMUTの構造を図1に示す。pMUTの $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ 膜(10 μm)を平行平板型RFマグネトロンスパッタ法により作製した。ターゲットにはScAl合金を用いた。基板の加熱は行わず成膜を実施した。基板には厚さ50 μm のステンレス箔を使用した。上部電極には真空蒸着法により成膜した金電極を用いている。

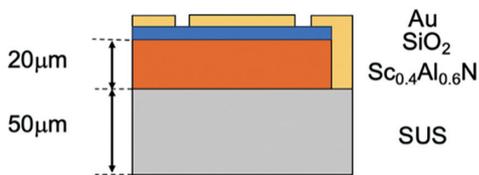


図1 作製したpMUTの構造

2.2 結晶配向性の評価

作製した $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ の結晶配向性をX線回折装置(X'Pert PRO, PANalytical)により評価した。 ω 走査ロックンクカーブを図2に示す。 ω 走査ロックンクカーブ半値幅は1.9°であり、良好な結晶性を有していることがわかる。

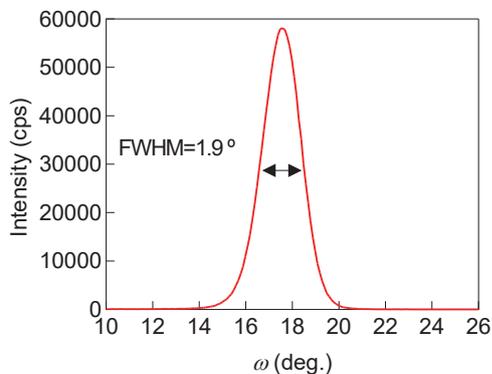


図2 $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ の ω 走査ロックンクカーブ

2.3 ネットワークアナライザを用いたアドミタンス測定

低周波用と高周波用の2種類のネットワークアナライザ(P9370A, Keysight, VNWA3E, SDR-Kits)を用いて20 kHzから900 MHzの範囲で作製したpMUTの反射係数 S_{11} を測定した。

20 kHzから1 MHzまでのアドミタンスの絶対値および10 MHzから900 MHzまでのアドミタンス実部、インピーダンス実部の測定結果を図3、図4に示す。図3より、作製したpMUTの主共振の共振周波数は743 kHzであることがわかる。pMUTの屈曲振動の実行的電気機械結合係数 k_{eff}^2 は共振周波数 f_0 と半共振周波数 f_a を用いて

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{f_a^2 - f_0^2}{f_a^2} \quad (1)$$

で表されることから、主共振の k_{eff}^2 は6.3%と算出された。

図4から高周波域の測定では、厚み縦モードの共振も観測された。共振スペクトル法(共振子全体質量と薄膜質量を用いて実効的電気機械結合係数から薄膜の電気機械結合係数を算出する方法)[5]を用いて k_t^2 を算出した結果、3.0%と見積もられた。

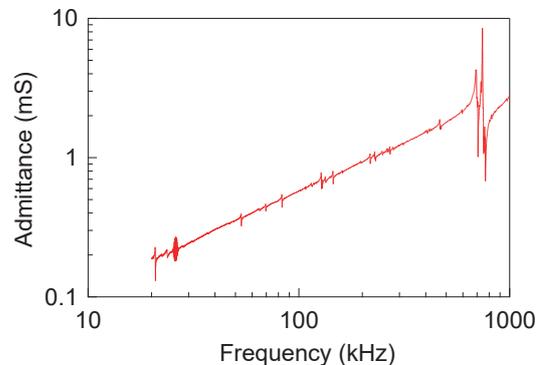


図3 低周波帯20 kHz-1 MHzでのアドミタンス絶対値の周波数特性

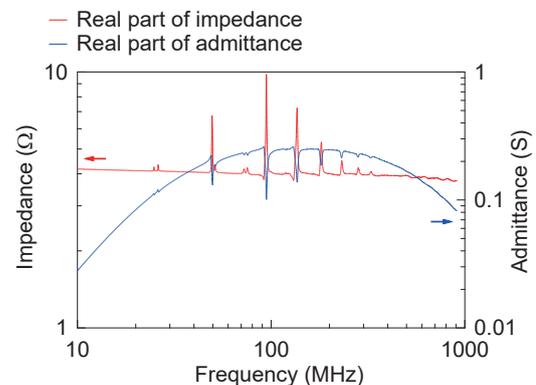


図4 高周波帯10 MHz-1 GHzでのインピーダンス実部およびアドミタンス実部の周波数特性

2. 4 オシロスコープによる受波測定

作製したpMUTに対してファンクションジェネレータ (AFG2021, Tektronix) から周波数20 Hz, 電圧の大きさ $4 V_{pp}$ のパルス波形を印加し, その立ち上がり信号を利用することで, pMUTを励振させた。そしてpMUTから22 mm離れた位置で共振周波数40 kHzの市販の空気中用トランスデューサを用いてオシロスコープ (DLM2024, YOKOGAWA) により受波信号を観測した。

観測された受波信号を図5に示す。空気中を伝搬することによる受波信号の遅れが明瞭に観測されていることがわかる。

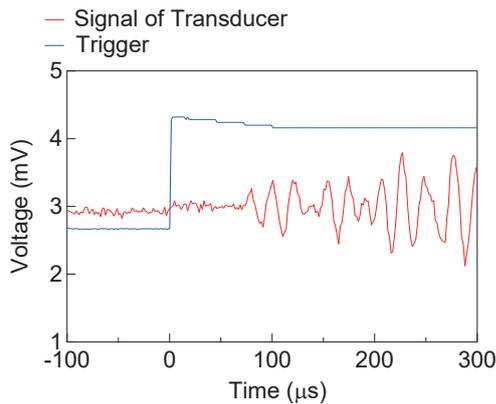


図5 オシロスコープで観測した受波信号

3. まとめ

RFマグネトロンスパッタ法で $Sc_{0.4}Al_{0.6}N$ 厚膜を成膜しpMUTを作製した。また, pMUTの反射係数 S_{11} と受波の測定を行った。得られたアドミタンス特性から共振周波数は743 kHz, k_{eff}^2 は6.3%であることがわかった。

参考文献

- [1] Y. Kusano, I. Ishii, T. Kamiya, A. Teshigahara, G. L. Luo, "High-SPL Air-Coupled Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers Based on 36% ScAlN Thin-Film," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 66, no. 9, pp. 321-333 (2019).
- [2] F. Akasheh, T. Myers, J. D. Fraser, S. Bose, A. Bandyopadhyay, "Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers," *Sensors and Actuators, A*, vol. 111, pp. 275-287, (2004).
- [3] T. Yanagitani, M. Suzuki, "Electromechanical coupling and gigahertz elastic properties of ScAlN films near phase boundary," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 23, pp. 082911, (2014).
- [4] K.-H. Sano, R. Karasawa, T. Yanagitani, "ScAlN thick film ultrasonic transducer in 40-80 MHz," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 65, no. 11, pp. 2097-2102, (2018).
- [5] Y. Zhang, Z. Wang, J. D. N. Cheeke, "Resonant Spectrum Method to Characterize Piezoelectric Films in Composite Resonators," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 50, no. 3, pp. 321-333, (2003).

著書・論文

<p>S. Kinoshita, R. Karasawa, and T. Yanagitani “High-overtone mode piezoelectric transformer based on c-axis zigzag ScAlN multilayer for wake-up receiver applications” AIP Adv., vol. 15, 045010 (2025).</p>
<p>S. Kinoshita, R. Karasawa, Y. Shimano, M. Matsumura, and T. Yanagitani “Zig-zag ScAlN 12-layer for shear mode BAW transformer application in rectenna” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr., vol. 72, no. 4, pp. 547-554 (2025).</p>
<p>Y. Shimano, M. Suzuki, and T. Yanagitani “k_{33}^2 Estimation of thin films via piezoelectric stiffening using ultrasonic reflectometry” IEEE Open J. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr. 5, pp. 6-10, (2025).</p>
<p>S. Kinoshita, H. Kishi, K. Izumi and T. Yanagitani “GHz voltage amplification in a stack of piezoelectric ScAlN and non-piezoelectric SiO₂ layers” Appl. Phys. Express 17 116501 (2024).</p>
<p>K-H. Sano, Y. Ono, R. Tobinaga, Y. Imamura, Y. Hayashi, and T. Yanagitani “Atmospheric gas-phase catalyst etching of SiO₂ for deep microfabrication using HF gas and patterned photoresist” ACS Appl. Mater. Interfaces, (2024).</p>
<p>J. Jia, D. Kishi, N. Bai, T. Okajima, F. Lesari, T. Yanagitani “Enhanced electromechanical coupling from cation local structures in (Mg, Zn) O” Phys. Rev. B, vol. 109, 134101, (2024).</p>
<p>A. Hanai, Y. Shimano, and T. Yanagitani “Polarization-Inverted Growth of ScAlN Thin Film by Si doping” Proc.The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium, pp. 1-3.</p>
<p>Z. Lai, Y. Shimano, I. Endo, J. Jia, and T. Yanagitani “Development and Characterization of a Concave Lens-Based Piezoelectric Transducer for Acoustic Wave Imaging” Proc.The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium, pp. 1-4.</p>

講演・発表

<p>柳谷隆彦 「分極反転 ScAlN 薄膜を用いた高次モード BAW 薄膜共振子」 電子情報通信学会 超音波研究会, 2025年 2月19日 【招待講演】</p>
<p>T. Yanagitani “Polarization inverted piezoelectric film BAW filters” Asia-Pacific RF & Antenna Forum, 2025年 1月20日 【招待講演】</p>
<p>T. Yanagitani “Ferroelectric ScAlN thin films for periodically polarization inverted BAW resonators” 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium 【招待講演】</p>
<p>T. Yanagitani “Polarization Inverted ScAlN Multilayer BAW Resonators” IEEE MTT-S Microwave Acoustics & Mechanics (IC-MAM) 【招待講演】</p>
<p>柳谷隆彦 「BAW/SAW フィルタの最近の研究開発動向」 システムデバイスロードマップ産学連携委員会 (SDRJ), 2024年11月15日 【招待講演】</p>
<p>柳谷隆彦 「ScAlN および LiNbO₃ エピタキシャル圧電薄膜の BAW フィルタ応用の現状」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会, 2024年 9月16日 【招待講演】</p>
<p>K. Ekida, S. Kinoshita, Y. Shimano, T. Yanagitani “Broadband Piezoelectric Thin Film Transformer for Terrestrial Digital Band Rectenna Applications” IEEE IMAS 2024</p>
<p>S. Matsumura, Y. Shimano, T. Yanagitani “SAW Excitation by Periodically Polarization Inverted Structure for Novel RF Filter” IEEE IMAS 2024</p>

<p>H. Uchida, K. Ekida, Y. Shimano, T. Yanagitani “Electromechanical Coupling Coefficient Evaluation Method Using RLC Electric Resonance in the GHz Band” IEEE IMAS 2024</p>
<p>Y. Shimano, T. Yanagitani “Evaluation of GHz Band Q Factor of ScAlN and AlN Films by Pulse-Echo Technique for RF MEMS Device” IEEE IMAS 2024</p>
<p>A. Katsumata, Y. Shimano, T. Yanagitani “Electric field-induced piezoelectricity of epitaxial YSZ and YHfO₂ thin films” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>M. Suzuki, Y. Shimano, T. Yanagitani “Extraction of Mechanical Properties of Acoustic Bragg Reflector in 5.8 GHz Range by GHz Pulse Echo Technique” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>M. Matsumura, S. Shibata, T. Yanagitani “Double Mode Type BAW (DMB) Filter based on Polarization-Inverted ScAlN Multilayers SMR” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>Y. Shimano, T. Yanagitani “New Method for Evaluating Intrinsic Mechanical Q Factor of ScAlN, AlN, and ZnO Films Using Attenuation Estimation by Pulse-Echo Technique” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>S. Kinoshita, Y. Shimano, M. Matsumura, T. Yanagitani “Broadband Piezoelectric Transformer based on 12-layer ScAlN Polarization Inverted Multilayer” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>A. Hanai, Y. Shimano, T. Yanagitani “Polarization-Inverted Growth of ScAlN Thin Film by Si doping” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>M. Tomioka, S. Tokai, T. Yanagitani “lanar sputtering with rectangular cathode for large area growth of AOGs less Sc_{0.4}Al_{10.6}N thin film” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>K. Ekida, Y. Shimano, T. Yanagitani “Planar sputtering with rectangular cathode for large area growth of AOGs less Sc_{0.4}Al_{10.6}N thin film” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>W. Shimoyama, Y. Shimano, T. Yanagitani “Acoustic Bragg Reflector Type Resonator using Epitaxial PbTiO₃ Thin Film” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>Z. Lai, Y. Shimano, I. Endo, J. Jia, T. Yanagitani “Development and Characterization of a Concave Lens-Based Piezoelectric Transducer for Acoustic Wave Imaging” The 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium</p>
<p>M. Matsumura, S. Shibata, T. Yanagitani “Double Mode Type BAW (DMB) Filter Based on ScAlN Multilayers SMR Using Polarization-Inversion or Intermediate-Electrodes” IEEE International Conference on Microwave Acoustics & Mechanics 2024</p>
<p>A. Hanai, Y. Shimano, T. Yanagitani “Ferroelectric Hysteresis Properties of Non-Doped AlN SMR” IEEE International Conference on Microwave Acoustics & Mechanics 2024</p>
<p>M. Tomioka, S. Tokai, T. Yanagitani “SMR With Epitaxial Top and Bottom Metal Acoustic Bragg Reflectors as Thick Electrodes” IEEE International Conference on Microwave Acoustics & Mechanics 2024</p>
<p>K. Sano, S. Nagai, Y. Ono, Y. Hayashi, T. Yanagitani “Development of Directly Bonded LiNbO₃ Plates and Microfabricated Quartz Crystal Structures” IEEE International Conference on Microwave Acoustics & Mechanics 2024</p>
<p>J. Jia, T. Yanagitani “Enhanced Electromechanical Coupling Near the Phase Boundary in Wurtzite (Mg, Zn) O and (Sc, Al) N” IEEE International Conference on Microwave Acoustics & Mechanics 2024</p>

<p>島野耀康, 柳谷隆彦 「超音波パルスエコー法を用いたScAlN, AlN, ZnO膜の機械的Qm値評価手法」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会</p>
<p>大橋雄二, 楠引淳一, 戸津健太郎, 花井彩香, 勝又彩馨, 柳谷隆彦, 竹野広晃, 伊東孝洋 「直線集束ビーム超音波材料解析システムによるScAlN薄膜の評価」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会</p>
<p>松村桃佳, 柴田真之, 柳谷隆彦 「ScAlN薄膜を用いた分極反転多層構造SMRによる二重モード型BAWフィルタ (DMB)」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会</p>
<p>内田拓希, 浴田航平, 島野耀康, 柳谷隆彦 「誘電率ϵ_Tとϵ_Sの差を用いた圧電薄膜の電気機械結合係数k_{33}^2の抽出」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会</p>
<p>浴田航平, 島野耀康, 柳谷隆彦 「GHz帯RLC電気共振を用いた圧電薄膜の電気機械結合係数k_{33}^2の測定」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会</p>
<p>富岡美咲, 柳谷隆彦 「電極抵抗低減に向けて上下電極にエピタキシャル金属ブラッグ反射器を採用したSMR」 第85回応用物理学会 秋季学術講演会</p>
<p>島野耀康, 柳谷隆彦 「RFフィルタ用圧電薄膜のGHz帯音響摩擦の評価手法」 電子情報通信学会 マイクロ波研究会</p>
<p>浴田航平, 木下紗里那, 島野耀康, 柳谷隆彦 「地デジ帯レクテナ応用に向けた広帯域圧電薄膜トランス」 電子情報通信学会 マイクロ波研究会</p>
<p>内田拓希, 浴田航平, 島野耀康, 柳谷隆彦 「GHz帯RLC電気共振を用いた圧電薄膜の電気機械結合係数k_{33}^2の測定」 電子情報通信学会 マイクロ波研究会</p>
<p>下山 航, 島野耀康, 柳谷隆彦 「GHz帯RFフィルタに向けたチタン酸鉛エピ薄膜共振子」 電子情報通信学会 マイクロ波研究会</p>
<p>島野耀康, 浴田航平, 柳谷隆彦 「多重エコー集約および誘電率の比を用いた基板付き圧電薄膜の電気機械結合係数推定法」 電子情報通信学会 超音波研究会</p>
<p>鈴木元嗣, 島野耀康, 柳谷隆彦 「GHz帯パルスエコー法による音響多層膜単体の縦波および横波機械的通過損失の抽出」 電子情報通信学会 超音波研究会</p>
<p>下山 航, 島野耀康, 柳谷隆彦 「エピタキシャルPbTiO₃薄膜を用いたSMR型BAW共振子」 電子情報通信学会 超音波研究会</p>
<p>松村理司, 花井彩香, 柳谷隆彦 「ScAlN薄膜と純AlN薄膜のGHz帯ヒステリシス特性」 電子情報通信学会 超音波研究会</p>
<p>内田拓希, 柳谷隆彦 「オフ角基板を用いたc軸傾斜エピタキシャルLiNbO₃薄膜SMR」 電子情報通信学会 超音波研究会</p>
<p>内田拓希, 浴田航平, 島野耀康, 柳谷隆彦 「誘電率ϵ_Tとϵ_Sの差を用いた基板付き薄膜共振子のk_{33}^2推定」 第53回EMシンポジウム</p>
<p>頼 展域, 島野耀康, 遠藤 樹, 柳谷隆彦 「20-90 MHz帯域幅のScAlN厚膜平凹レンズトランスデューサ」 第53回EMシンポジウム</p>

鈴木基嗣, 島野耀康, 遠藤 樹, 柳谷隆彦

「反射率測定を用いた音響電気効果による薄膜の電気機械結合係数の推定」
第53回EMシンポジウム