

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13974

研究課題名(和文) 極性反転多層構造の巨大圧電性薄膜を用いたGHz帯高分解能超音波プローブの実現

研究課題名(英文) Ultrasonic probe using polarity inverted piezoelectric layer

研究代表者

柳谷 隆彦 (Yanagitani, Takahiko)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：10450652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：極性反転構造トランスデューサは高次モードで共振し、ハイパワー動作に適している。これまで通常のスputタ法で成膜した場合、ScAlN薄膜はAl極性(0001)、ZnO薄膜は(000-1)となることを発見している。そこで、我々はScAlNとZnOを交互に成膜することで、(0001)/(000-1)の極性反転構造が簡単に得られるのではないかと考え実験を行った。単層のScAlNとZnO薄膜の極性はプレステストにより測定した。さらに実際に石英バッファロッド上にAl極性ScAlN/O極性ZnOの極性反転構造を作製しトランスデューサを作製した。縦波変換損失も測定し、良好な2次モードでの共振を達成した。

研究成果の概要(英文)：Polarity inverted multilayered transducers are attractive for high order mode excitation and high power operation. The control of the polarity in ScAlN and ZnO films by ion beam irradiation during film growth were reported. We found that the usual ScAlN and ZnO films grown by a standard planar sputtering possess (0001) Al-polarity and (000-1) O-polarity, respectively. In this study, we considered that the polarity inverted (0001)/(000-1) multilayer can be easily obtained by depositing usual (0001) Al-polar ScAlN film on usual (000-1) O-polar ZnO film. The polarities of the layers were determined by a press test using an oscilloscope. 2nd mode excitations were clearly observed in the longitudinal wave conversion loss in the transducers.

研究分野：超音波デバイス

キーワード：圧電薄膜 超音波プローブ

1. 研究開始当初の背景

図 1(a)のように、圧電薄膜が単層構造の超音波トランスデューサは基本モードで共振する。一方で、図 1(b)のような極性反転構造のトランスデューサは高次モードで強く共振する。そのため、同じ膜厚のトランスデューサを形成した場合、極性反転構造トランスデューサは単層構造のものに比べて高周波で共振することになる。また、同じ周波数で動作させた場合、極性反転構造トランスデューサは単層構造のものに比べて膜厚を厚くすることができ、耐電力性に優れる[1]。

次に、極性反転構造のトランスデューサを超音波顕微鏡へ応用する場合を考える。空間分解能を上げるには共振周波数を高くする必要があり、膜厚を薄くしなくてはならない。トランスデューサの持つキャパシタンス  $C$  は、圧電体の持つ誘電率  $\epsilon$  と膜厚  $d$ 、トランスデューサの面積  $S$  を用いて表すと、 $C = \epsilon S / d$  と表される。周波数  $f$  において、トランスデューサと計測器系間の  $50 \Omega$  インピーダンスマッチングを取ると、 $50 = 1 / 2\pi f C$  を満たす必要がある。そのため、単層構造トランスデューサを高周波で共振させる場合、電極面積を小さくせざるを得ない(図 2(a))。ここで、極性反転構造を用いると膜厚を厚くすることができ、電極面積を大きく取ることができる。そのため広い範囲で音波を発生させることが可能となり、音響レンズで収束させる際に、測定対象物での音圧を大きくすることができる。これにより、通常の単層構造トランスデューサと比較すると S/N 比が向上すると考えられる[1]。

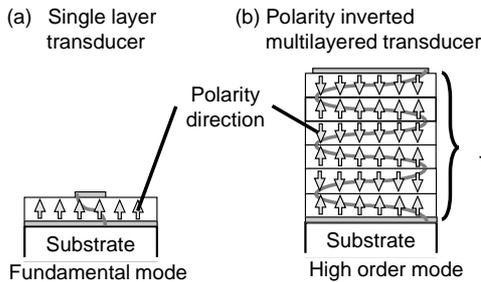


図 1 (a)単層構造と(b)極性反転構造のトランスデューサを同一周波数で共振させた場合の膜厚と電極面積の違い

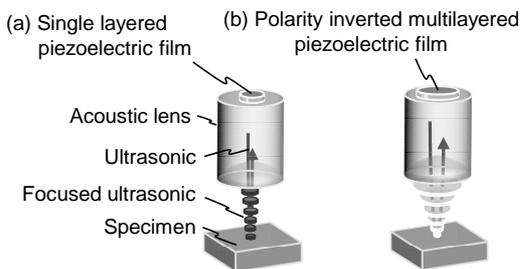


図 2 (a)単層構造と(b)極性反転構造トランスデューサを超音波顕微鏡へ応用した場合の比較

2. 研究の目的

これまで報告者は ZnO と ScAlN 薄膜の極性方向制御について報告してきた。それらの研究で ZnO 薄膜の場合、基板温度の調整により極性制御ができることを見出した[2]。ターゲットからのイオン照射をさけるため、プラズマ外で成膜すると、基板温度が  $150^\circ\text{C}$  以下の場合には Zn 極性に、基板温度が  $200^\circ\text{C}$  以上の場合には O 極性となり、容易に極性

制御ができる。一方で、ScAlN 薄膜の場合は、成膜中に基板への RF バイアス印加や、ターゲットに酸化物粒を置くなどのイオン照射制御をすることで極性制御を達成している[3]。その手法を用いた極性反転を使って高次モード薄膜共振子の実現している。これらの研究の中で、イオン照射を行わず成膜した場合(通常のスパッタ) ScAlN 薄膜は Al 極性、ZnO 薄膜は O 極性となることを発見した。そこで通常のスパッタ法を用いて Al 極性 ScAlN 薄膜、O 極性 ZnO 薄膜を交互に成膜することで図 3 に示すような極性反転構造がより簡単に形成できるのではないかと考えた。

本研究では通常のスパッタ法を用いて、ScAlN 薄膜、ZnO 薄膜を交互に成膜してトランスデューサを作製した。それらの圧電特性を評価し、図 3 のような極性反転構造の形成を試みた。

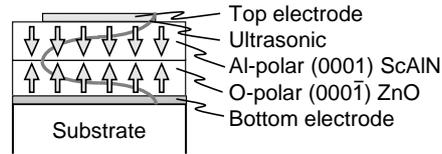


図 3 Al 極性 ScAlN/O 極性(000-1)ZnO 極性反転構造トランスデューサ

3. 研究の方法

極性反転構造の形成

まず 1 層目として、スパッタ源からのプラズマ外に基板を設置し、ZnO 薄膜を成膜した。ZnO 薄膜の基板配置図を図 4 に示す。ZnO ターゲットを用いており、成膜圧力  $1.0 \text{ Pa}$  ( $\text{Ar}/\text{O}_2=3$ )、基板温度は  $350^\circ\text{C}$  程度である。次に 2 層目として、スパッタ源からのプラズマ内に基板を設置し、c 軸が垂直に配向した ScAlN 薄膜を成膜した。ScAlN の成膜装置図を図 5 に示す。ターゲットには ScAl 合金( $\text{Sc}42-43\%$ )を用いており、成膜圧力  $0.75 \text{ Pa}$  ( $\text{Ar}/\text{N}_2=2$ )、基板温度は室温である。なお、基板には、石英ガラス ( $25 \times 50 \times 0.55 \text{ mm}^3$ ) 上に下部電極として DC スパッタ成膜した(0001)高配向 Ti 薄膜(ロッキングカーブ半値幅  $2.0^\circ-3.0^\circ$ )を成膜したものをを用いている。また、ScAlN と ZnO 薄膜の極性方向を評価するために、同一基板の上に単層の ScAlN と ZnO 薄膜も成膜した。

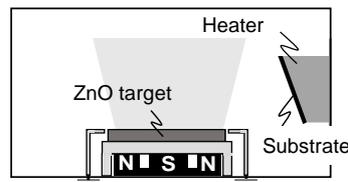


図 4 O 極性 ZnO 薄膜成膜装置内の基板配置

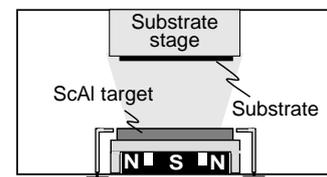


図 5 Al 極性 ScAlN 薄膜成膜装置内の基板配置

結晶配向性評価

図 6(a)に作製した試料の XRD パターンと(0002)ScAlN と(0002)ZnO の  $\omega$  走査ロッキングカーブを示す。 $34^\circ$  付近に(0002)ZnO のピークが、 $36^\circ$  付近に(0002)ScAlN のピークが観測された。図 6(b)

に示すように、 $\omega$  走査ロックアップカーブ半値幅は ZnO が  $1.6^\circ$ 、ScAlN が  $2.8^\circ$  となっており、良好な配向性を示している。

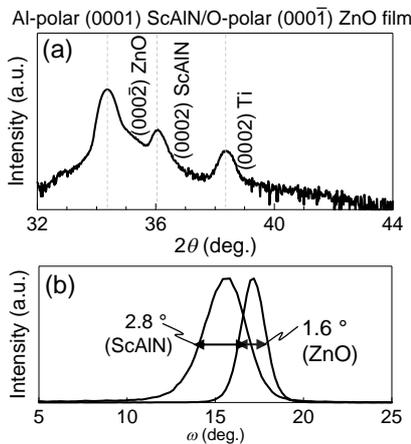


図 6 ScAlN/ZnO/Ti 薄膜の(a)XRD パターンと(b) $\omega$  走査ロックアップカーブ

#### 4. 研究成果 極性方向評価

次に、単層の ScAlN と ZnO 薄膜の極性方向評価をプレステスト[4]により行った。Au 上部電極を抵抗加熱蒸着して、そこへオシロスコープに接続したプローブで応力を印加する。その際に発生する圧電応答の電圧の正負から極性方向を評価した。図 7 に単結晶 ZnO のプレステストによる圧電応答波形を示す。O 極性は応力印加時に正電圧が、Zn 極性は負電圧が観測される。図 8 に作製した試料のプレステストによる圧電応答波形を示す。1 層目の ZnO 薄膜は応力印加時に正電圧が観測されたため、O 極性であることが判る。一方で 2 層目の ScAlN 薄膜は応力印加時に負電圧を観測したため、Al 極性であることが判る。これらの結果から、ScAlN と ZnO 薄膜の極性は反転していることが確認できた。

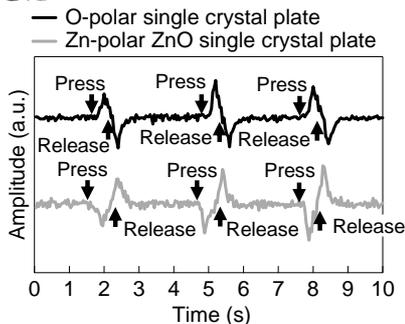


図 7 c 面単結晶 ZnO 板のプレステストによる圧電応答波形

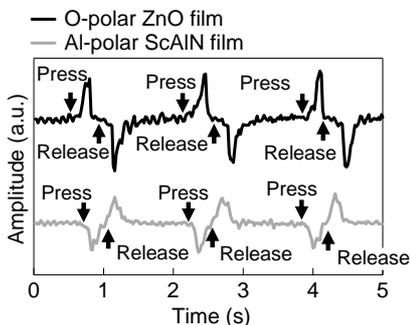


図 8 単層の ZnO および ScAlN 薄膜のプレステストによる圧電応答波形

#### 圧電特性評価

作製したトランスデューサに、ネットワークアナライザ(E5071C, Agilent Technologies)を用いて交流電界を印加し、縦波変換損失を測定した。さらに、Mason の等価回路モデルによる理論変換損失曲線との比較から、電気機械結合係数  $k_t$  と極性反転構造が形成されたかを評価した。

図 9 に単層 ZnO トランスデューサの縦波変換損失曲線を示す。0.68 GHz で基本モード共振しており、2 次モードは抑制されている。最小変換損失は 4.8 dB であり、 $k_t$  は 0.21 と決定された。この  $k_t$  は単結晶 ZnO ( $k_t=0.28$ ) の 75% の値である。

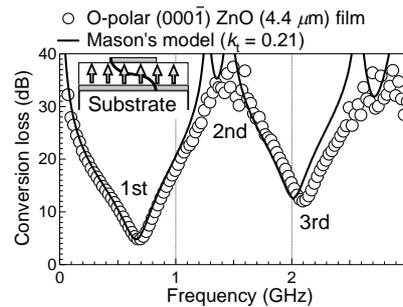


図 9 単層 O 極性 ZnO トランスデューサの縦波変換損失

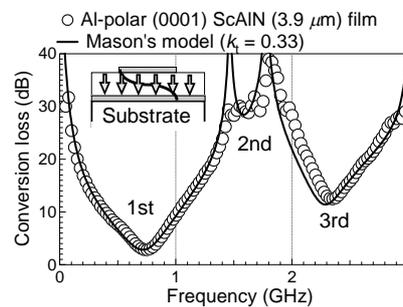


図 10 単層 Al 極性 ScAlN トランスデューサの縦波変換損失

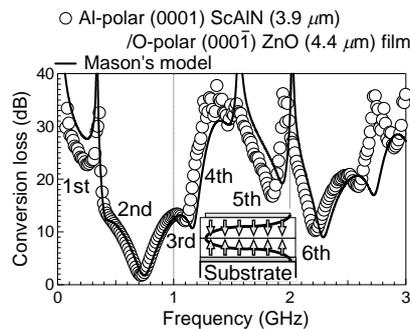


図 11 2 層構造 Al 極性 ScAlN/O 極性 ZnO トランスデューサの縦波変換損失

図 10 に単層 ScAlN トランスデューサの変換損失曲線を示す。基本モードの 0.74 GHz で基本モード共振、単層 ZnO と同様に 2 次モードは抑制された。最小変換損失は 2.8 dB、 $k_t$  は 0.33 と決定された。この  $k_t$  は単結晶 AlN ( $k_t=0.25$ ) の 132% の値である。

図 11 に Al 極性 ScAlN/O 極性 ZnO の 2 層構造トランスデューサの縦波変換損失を示す。基本、3 次モードは抑制され、0.72 GHz 付近で 2 次モード共振していることが観測された。また、極性反転の影響を考慮にいれた Mason の等価回路モデルの

理論変換損失曲線とよく一致している．このことより，Al 極性 ScAlN/O 極性 ZnO の極性反転構造が形成されたことが確認できた．

### Al 極性 ScAlN 薄膜上に ZnO 薄膜を成膜

O 極性 ZnO 薄膜上に通常のスパッタ法で ScAlN 薄膜を成膜した場合，極性反転構造が形成されることが分かった．今後さらなる多層化を目指す際には Al 極性 ScAlN 薄膜上に O 極性 ZnO 薄膜を成膜する必要がある．そこで Al 極性 ScAlN 薄膜上に通常のスパッタ法で ZnO 薄膜を成膜した．1 層目の単層 ScAlN トランスデューサは 0.96 GHz 付近で基本モード共振し，2 次モードは抑制された．図 12 に 2 層目の ZnO 薄膜を成膜したトランスデューサの変換損失曲線を示す．極性反転構造が形成されていれば 2 次モードで共振するはずであるが，実際には 0.50 GHz 付近で基本モード共振をし，2 次モードは抑制されている．極性が反転していない場合と，した場合の理論変換損失曲線との比較からも極性反転していないと分かった．これは予想に反して 2 層目の ZnO が 1 層目の ScAlN の極性を引き継いで同じ極性となったためと考えられる．

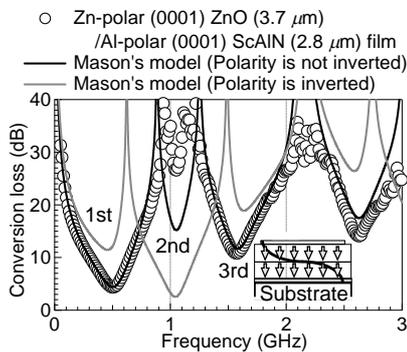


図 12 1 層目が Al 極性 ScAlN で 2 層目に ZnO を成膜したトランスデューサの縦波変換損失

ここで，2 層目の ZnO が 1 層目の ScAlN の極性の影響を受けないようにするため 1 層目を成膜後に SiO<sub>2</sub> バッファ層を成膜し 2 層目の ZnO を成膜した．その際の変換損失曲線を図 13 に示す．バッファ層のない場合より 2 次モードで強く共振しているが，基本や 3 次モードより弱いため，SiO<sub>2</sub> バッファ層上の ZnO の  $k_t$  値は非常に小さいと考えられる．

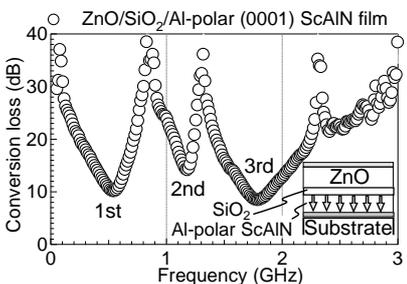


図 13 1 層目が Al 極性 ScAlN 薄膜であり SiO<sub>2</sub> バッファ層成膜後 2 層目の ZnO 薄膜を製膜したトランスデューサの縦波変換損失

次に，バッファ層として多結晶 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を使用し，その際の変換損失曲線を図 14 に示す．2 次モードは完全に抑制され，基本や 3 次が強く出ている．そこから Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> がバッファ層であっても極性反転構造は形成されない結果となった．

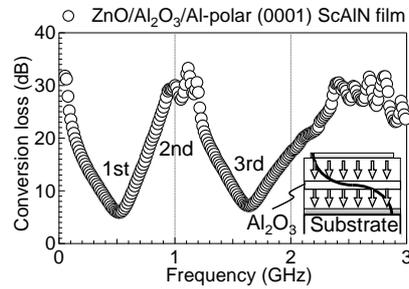


図 14 1 層目が Al 極性 ScAlN 薄膜であり，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層成膜後 2 層目の ZnO 薄膜を成膜したトランスデューサの縦波変換損失

なぜバッファ層を挿入しても，極性反転構造が形成されないかを調べるために，図 15 に示すように，これまでと同様に石英ガラス上に高配向 Ti 下部電極をスパッタ成膜した基板を用意し，SiO<sub>2</sub> および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜をスパッタ成膜して，さらに通常の ZnO 薄膜を成膜した際の圧電特性を確認した．バッファ層に SiO<sub>2</sub> を用いた場合は予想通り ZnO 薄膜が配向しないため音波がほとんど出ず，これでは ScAlN 薄膜上に成膜した場合に，2 次モードが強く出ない．

バッファ層に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いた場合の圧電特性は， $k_t = 0.19$  と若干の劣化が生じるもののほぼ同程度であった．そこで，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層上での ZnO 薄膜の極性を調べるため，プレステストを行った．結果を図 16 に示す．応力印加時に負電圧を観測したため，予想に反して Zn 極性で成長することを発見した．バッファ層を用いた極性反転では，サファイア基板上に分子線エビタキシで ZnO 薄膜を成膜する際に，CrN バッファ層を用いることで，Zn 面になるという報告もある[5]．今回の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層を用いた Zn 極性成長の詳細なメカニズムは不明だが，このような現象はおそらくエビタキシャル成長を使わない多結晶薄膜では，初めての発見であり，この技術を使えば O 極性成長の条件で Zn 極性成長が可能となる． $k_t$  も同程度のため，今後応用が期待できる．

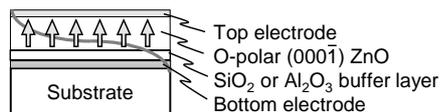


図 15 SiO<sub>2</sub> と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層上に通常のスパッタで ZnO 成膜の際の予想図

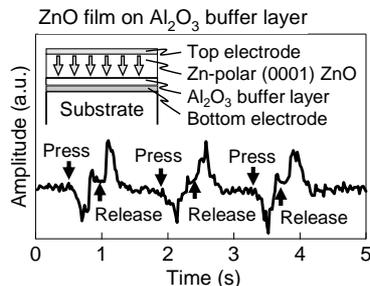


図 16 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層上 ZnO 薄膜のプレステストによる圧電応答波形

最後に石英ガラスバッファロード遅延線に本課題の Al 極性 ScAlN 薄膜/O 極性 ZnO 薄膜極性反転構造を作製し，実用的なトランスデューサを作製した．その際の変換損失の周波数特性を図 17 に示す．平板基板上作製した際と同様に良好な 2 次モード共振が観測されていることがわかる．また電極面積と容量性インピーダンスも 15 電極で 35 Ω 程度と大きな放射面積で良好なインピーダンス整合を得た．

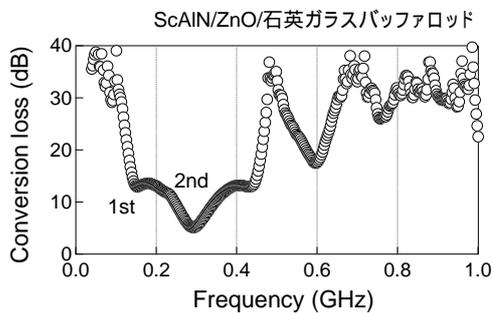


図 17 石英ガラスバッファロッド遅延線上に作製した Al 極性 ScAlN 薄膜/O 極性 ZnO 薄膜極性反転構造トランスデューサの変換損失周波数特性

## まとめ

通常のスパッタ法で成膜した際に形成される Al 極性 ScAlN 薄膜と O 極性 ZnO 薄膜を交互成膜することで簡単に極性反転構造を形成することに成功した。さらに、本課題の目標どおり 2 次モード共振を確認した。今回発見した、Al 極性 (0001)ScAlN/O 極性 ZnO 薄膜や ZnO 薄膜が ScAlN 薄膜の極性を引き継いで成長すること、 $Al_2O_3$  バッファ層上では ZnO は Zn 極性で成長することを利用した新たな極性反転構造のデバイス応用への展開が期待される。

また、最後に実際に石英ガラスバッファロッド遅延線に本課題の Al 極性 ScAlN 薄膜/O 極性 ZnO 薄膜極性反転構造を作製し、2 次モード励振を用いて 15 電極で 35  $\Omega$ 程度と大きな放射面積で良好なインピーダンス整合を得た。

## 参考文献

- [1] 柳谷隆彦, 鈴木雅視, 高柳真司, "非破壊検査用の高分解能超音波プローブ", 日本音響学会誌 vol. 71, no. 5, pp. 230-238, 2015.
- [2] R. Hashimoto, T. Yanagitani, R. Ikoma, S. Takayanagi, M. Suzuki, H. Odagawa, and M. Matsukawa, "Polarity control of c-axis oriented ZnO films and application to polarity-inverted ZnO multilayer resonators", IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS3-H-6, 2013.
- [3] M. Suzuki, T. Yanagitani, and H. Odagawa, "Polarity-inverted ScAlN film growth by ion beam irradiation and application to overtone acoustic wave (000-1)/(0001) film resonators", Appl. Phys. Lett., vol. 104, pp. 172905-1-172905-4, 2014.
- [4] J. F. Rosenbaum, Bulk Acoustic Wave Theory and Devices, pp. 136-137 (Artech House, Boston, 1988).
- [5] J. S. Park, S. K. Hong, T. Minegishi, S. H. Park, I. H. Im, T. Hanada, M. W. Cho, T. Yao, J. W. Lee, and J. Y. Lee, "Polarity control of ZnO films on (0001)  $Al_2O_3$  by Cr-compound intermediate layer," Appl. Phys. Lett., Vol. 90, pp. 201907-1-201907-3.

## 5. 主な発表論文等

### 【雑誌論文】(計 10 件)

#### 【解説記事】

- [1] 森 剛志, 柳谷隆彦  
「Al 極性 ScAlN と O 極性 ZnO 薄膜を用いた多層構造の高効率超音波トランスデューサ」  
超音波テクノ(日本工業出版) vol. 29, pp. 84-87, (2017).
- [2] 柳谷隆彦, 鈴木雅視, 高柳真司  
「非破壊検査用の高分解能超音波プローブ」  
日本音響学会誌 vol. 71, no. 5, pp. 230-238 (2015)

#### 【査読付学術論文】

- [3] S. Tomita, T. Yanagitani, S. Takayanagi, H. Ichihashi, Y. Shibagaki, H. Hayashi, and M. Matsukawa, "Evaluation of the acoustoelectric effect in the thickness direction of c-plane ZnO single crystals by Brillouin scattering," J. Appl. Phys. vol. 121, (2017). in press

- [4] S. Matsukawa, T. Makino, S. Mori, D. Koyama, S. Takayanagi, K. Mizuno, T. Yanagitani, and M. Matsukawa, "Effect of anisotropy on stress-induced electrical potentials in bovine bone using ultrasound irradiation," Appl. Phys. Lett. vol. 110, pp.143701 (2017).
- [5] H. Ichihashi, T. Yanagitani, M. Suzuki, S. Takayanagi, M. Kawabe, S. Tomita and M. Matsukawa "Acoustic wave velocities and refractive indices in an m-plane GaN single crystal plate and c-axis oriented ScAlN films measured by Brillouin scattering techniques," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr. vol. 63, no.5 pp. 717-725, (2016).
- [6] S. Takayanagi, M. Matsukawa, T. Yanagitani, "Effects of energetic negative ions generated from sputtering targets on ScAlN film growth," Proc. IEEE Ultrason. Symp. pp. 1-4, (2016).
- [7] M. Kawabe, Y. Shibagaki, M. Matsukawa, T. Yanagitani, M. Suzuki, S. Takayanagi, "Rapid and simultaneous measurement of longitudinal and shear wave velocities by Brillouin scattering from artificially induced phonons," Proc. IEEE Ultrason. Symp. pp. 1-4, (2016).

#### 【査読なし学術論文】

- [8] 森剛志, 鈴木雅視, 柳谷隆彦, 「ScAlN/ZnO 極性反転圧電薄膜を用いた 2 次モード励振超音波トランスデューサ」電子情報通信学会技術研究報告 vol. 116, no. 5, US2016-1, pp.1-6, (2016).
- [9] 森剛志, 鈴木雅視, 柳谷隆彦, 「GHz 帯で純横波超音波を高効率励振する c 軸平行 ZnO 薄膜トランスデューサ」電子情報通信学会技術研究報告 vol. 116, no. 5, US3026-1, pp.7-12, (2016).
- [10] 寺田浩士朗, 西川宏明, 田中陽平, 小田川裕之, 柳谷隆彦, 長康雄, 「走査型非線形形誘電率顕微鏡法による極性反転層状構造圧電膜の層厚の定量測定」電子情報通信学会技術研究報告 vol. 115, no. 246, pp.23-26, (2015).

#### 【学会発表】(計 48 件)

##### 【招待講演】

- [1] Takahiko Yanagitani, "Electromechanical coupling hysteresis curves of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> epitaxial films determined by GHz ultrasonic method using film/substrate structure," 13th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators & Energy Conversion Materials and Devices 2016, 2016 年 8 月 22 日, 韓国
- [2] 柳谷隆彦「超音波顕微鏡プローブ用の新しい圧電薄膜材料」第 8 回ハイオ超音波顕微鏡研究会, 2016 年 7 月 2 日, 東北大学東京分室
- [3] 森剛志, 鈴木雅視, 柳谷隆彦, 講演奨励賞受賞記念講演「極性反転構造の ZnO 及び ScAlN 圧電薄膜の形成と弾性波デバイス応用」第 63 回応用物理学学会学術講演会 2016 年 3 月 20 日, 東工大岡山キャンパス
- [4] T. Yanagitani and M. Suzuki, "Polarization Control of ScAlN and ZnO films: Application to polarization Inverted Multilayer," 2015 International Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2015 年 11 月 24 日, 千葉大学
- [5] K.Wasa, H.Hanzawa, S.Yoshida, T. Yanagitani, and S.Tanaka, "High Performance Piezoelectric Thin Films Beyond PZT," 2015 International Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2015 年 11 月 24 日, 千葉大学

##### 【国際会議】

- [6] S.Takayanagi, S.Hirayama, M.Matsukawa, T. Yanagitani, "Liquid loading characteristics of multiple SH-wave roundtrip in c-axis parallel oriented ZnO film/silica glass pipe" 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016 年 11 月 29 日, ハワイ
- [7] Y. Shibagaki, M. Kawabe, S. Takayanagi, K. Mori, T. Yanagitani, M. Matsukawa, "Rapid wave velocity measurement by Brillouin scattering using artificially induced phonon" 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016 年 11 月 29 日, ハワイ
- [8] Takeshi Mori, Yui Yamakawa, Rei Karasawa, Ko-hei Sano, Takahiko Yanagitani, Shinji Takayanagi, "c-axis tilted ScAlN shear wave acoustic Bragg reflect resonator for gigahertz viscosity measurement" 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016 年 11 月 29 日, ハワイ
- [9] Ko-hei Sano, Takeshi Mori, Rei Karasawa, Takahiko Yanagitani, "Temperature stable liquid gigahertz viscosity sensors by combining shear mode piezoelectric ScAlN thin film and AT-cut quartz crystal plate" 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016 年 11 月 29 日, ハワイ
- [10] S. Takayanagi, M. Matsukawa, T. Yanagitani, P3-B2-1 "High electromechanical coupling of Sezawa mode SAW in c-axis-parallel-oriented ScAlN film/high-velocity substrate structures", 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016 年 9 月 19 日, ツール
- [11] T. Mori, M. Suzuki, S. Takayanagi, T. Yanagitani, "Electromechanical coupling hysteresis curves of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> and

PbTiO<sub>3</sub> epitaxial films determined by ultrasonic measurement using film/substrate structure" 2016 IEEE Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[12] T. Mori, M. Suzuki, T. Yanagitani, 6H-1 "The frequency switchable resonator consisting of polarity inverted Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>/PbTiO<sub>3</sub> epitaxial multilayer" 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[13] R. Iwanaga, S. Takayanagi, Y. Watanabe, M. Matsukawa, T. Tsuchiya, T. Yanagitani 6H-2 "Evaluation of viscous liquid using resonance and anti-resonance of thickness shear mode resonator consisting of c-axis parallel oriented ZnO film", 2016年9月19日, ツール

[14] S. Takayanagi, M. Matsukawa, T. Yanagitani, 6H-3 "Effects of energetic negative ions generated from sputtering targets on ScAlN film growth" 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[15] K. Mori, S. Takayanagi, M. Matsukawa, T. Yanagitani, 6H-4 "Improvement of electromechanical properties in c-axis parallel oriented ZnO film by RF magnetron sputtering with negative ion bombardment" 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[16] M. Kawabe, T. Yanagitani, S. Takayanagi, Y. Shibagaki, M. Suzuki, M. Matsukawa, 6K-1 "Rapid and simultaneous measurement of longitudinal and shear wave velocities by Brillouin scattering from artificially induced phonons" 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[17] S. Matsukawa, S. Mori, Isao Mano, T. Yanagitani, K. Mizuno, S. Takayanagi, M. Matsukawa, 4K-2 "Anisotropic behavior of induced electric potentials in bone by ultrasound irradiation" 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[18] S. Tomita, T. Yanagitani, S. Takayanagi, H. Ichihashi, M. Matsukawa, P5-C2-4 "Brillouin scattering study on piezoelectric stiffening effect in the thickness direction of c-plane ZnO single crystal" 2016 IEEE International Ultrason. Symp, 2016年9月19日, ツール

[19] Takahiko Yanagitani, Takeshi Mori, 2, and Kiyotaka Wasa "Electromechanical coupling hysteresis curves of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> epitaxial films determined by GHz ultrasonic method using film/substrate structure" 13th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators & Energy Conversion Materials and Devices 2016, 2016年8月22日, 韓国

[20] Takeshi Mori, Takahiko Yanagitani, and Kiyotaka Wasa, "Polarity inverted Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>/PbTiO<sub>3</sub> epitaxial multilayer frequency switchable resonator in the GHz range" 13th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators & Energy Conversion Materials and Devices 2016, 2016年8月22日, 台北

[21] Masahiko Kawabe, Takahiko Yanagitani, Hayato Ichihashi, Shinji Takayanagi, Masashi Suzuki, Mami Matsukawa "Fast wave velocity measurement by Brillouin scattering using induced phonon from ScAlN piezoelectric thin film" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp. 2015年10月22日, 台北

[22] PA-3 Takeshi Mori, Takahiko Yanagitani, Masashi Suzuki, "High order mode polarity inverted Al-polar (0001) ScAlN/O-polar (000-1) ZnO film resonator" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[23] P4A1-5 Shoko Hiyama, Takahiko Yanagitani, Shinji Takayanagi, Mami Matsukawa, "Conductivity measurement of liquid by SH-SAW sensor consisting of IDT/(11-20) oriented ZnO film/silica glass substrate" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[24] 6D-2 Masahiko Kawabe, Takahiko Yanagitani, Hayato Ichihashi, Shinji Takayanagi, Masashi Suzuki, Mami Matsukawa "Fast wave velocity measurement by Brillouin scattering using induced phonon from ScAlN piezoelectric thin film" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[25] 7D-3 Mineki Oka, Shinji Takayanagi, Takahiko Yanagitani, Mami Matsukawa, "c-Axis parallel oriented ScAlN films grown by ion-beam assisted RF magnetron sputtering" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[26] 6G-3 Takeshi Mori, Takahiko Yanagitani, Masashi Suzuki, "High order mode polarity inverted Al-polar (0001) ScAlN/Opolar (000-1) ZnO film resonator" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[27] 6G-4 Takahiko Yanagitani, Hayato Ichihashi, Masashi Suzuki, Shinji Takayanagi, Mami Matsukawa "Elastic constant c<sub>ij</sub> E tensors of (0001) ScxAl1-xN films (x=0-0.63)" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[28] 6G-5 Masashi Suzuki, and Takahiko Yanagitani "Quasi-shear mode electromechanical coupling k<sup>15</sup> and shear wave velocity in c-axis tilted ScxAl1-xN films" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[29] P1C6-10 Sayaka Matsukawa, Hiroko Tsuneda, Isao Mano, Katsunori Mizuno, Takahiko Yanagitani, Shinji Takayanagi, Mami Matsukawa, "Ultrasound radiation from bone transducer in the MHz range" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp., 2015年10月22日, 台北

[30] P3C1-1 Takeshi Mori, Takahiko Yanagitani, Masashi Suzuki "c-axis parallel polarity inverted multilayer ZnO film resonators fabricated by grazing ion beam assisted RF magnetron sputtering" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp. 2015年10月22日, 台北

北

[31] P3C1-2 Shinji Takayanagi, Takahiko Yanagitani, Mami Matsukawa "Shear mode properties of c-axis parallel oriented ScxAl1-xN films grown by RF bias sputtering" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp. 2015年10月22日, 台北

[32] P3C1-3 Shota Tomita, Takahiko Yanagitani, Masashi Suzuki, Hayato Ichihashi, Shinji Takayanagi, Mami Matsukawa "Measurement of acoustic wave velocity and refractive index in thickness direction of c-axis oriented ScAlN films by Brillouin scattering" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp. 2015年10月22日, 台北

[33] P2C2-2 Yusuke Korai, Masashi Suzuki, Takahiko Yanagitani "ScAlN thin film transducers for ultrasonic microscopy in the VHF range" 2015 IEEE International Ultrasonics Symp. 2015年10月22日, 台北

#### 【国内会議】

[34] 森剛志, 高柳真司, 清水貴博, 柳谷隆彦 「単結晶 PZT/PT エピタキシャル薄膜を用いた周波数切り替え可能な共振器」 2017 年電子情報通信学会総合大会, 2017年3月23日, 名城大学

[35] 松川沙弥果, 牧野大輝, 小山大介, 高柳真司, 水野勝紀, 柳谷隆彦, 松川真美 「縦波・横波の超音波伝搬時における骨中誘発電位の検討」 圧電材料・デバイスシンポジウム 2017, 2017年2月6日, 東北大学

[36] 佐野耕平, 唐澤嶺, 柳谷隆彦 「電気機械結合係数 kt<sub>2</sub>=19%のScAlN 厚膜を用いた低周波帯 80 MHz トランスデューサ」 圧電材料・デバイスシンポジウム 2017, 2017年2月6日, 東北大学

[37] 盛一馬, 高柳真司, 松川真美, 柳谷隆彦 「RF マグネトロンスパッタ法を用いて作製した c 軸平行配向 ZnO 膜の圧電不活性層低減に関する検討」 圧電材料・デバイスシンポジウム 2017, 2017年2月6日, 東北大学

[38] 唐澤嶺, 山川倫生, 森剛志, 矢崎花, 佐野耕平, 柳谷隆彦 「c 軸傾斜配向 ScAlN 膜/ブラック反射層構造の GHz 帯厚みすべりモード共振器を用いた液体粘性評価」 圧電材料・デバイスシンポジウム 2017, 2017年2月6日, 東北大学

[39] 山川倫生, 佐野耕平, 唐澤嶺, 森剛志, 柳谷隆彦 「c 軸傾斜配向 ScAlN 膜/AT カット水晶基板構造の低 TCF 横波共振器を用いた 広帯域周波数粘度測定」 圧電材料・デバイスシンポジウム 2017, 2017年2月6日, 東北大学

[40] 清水貴博, 森剛志, 柳谷隆彦, 和佐清孝 「抗電界差による基本モード/高次モード周波数切り替え可能な PZT/PT エピ膜分極反転共振器」 圧電材料・デバイスシンポジウム 2017, 2017年2月6日, 東北大学

[41] 柴垣慶明, 川部昌彦, 柳谷隆彦, 高柳真司, 鈴木雅視, 松川真美 「励起フォノンを用いた Brillouin 散乱測定の高速度に関する検討」 第 58 回光波センシング技術研究会, 2016年12月8日, 東京理科大学

[42] S. Takayanagi, T. Yanagitani, "High electromechanical coupling of Sezawa mode SAW using a polarization-inverted ScAlN film/high velocity substrate structure" The 37th Symp. on Ultrasonic Electronics., 2016年11月17日, 韓国 釜慶大学

[43] S. Matsukawa, S. Mori, D. Koyama, S. Takayanagi, K. Mizuno, T. Yanagitani, M. Matsukawa, "Evaluation of piezoelectricity in bone by ultrasound irradiation" The 37th Symp. on Ultrasonic Electronics. 2016年11月17日, 韓国 釜慶大学

[44] S. Tomita, T. Yanagitani, S. Takayanagi, M. Matsukawa, "Piezoelectric stiffening in the thickness direction of c-plane ZnO single crystal measured by Brillouin scattering" The 37th Symp. on Ultrasonic Electronics. 2016年11月17日, 韓国 釜慶大学

[45] 柴垣慶明, 川部昌彦, 柳谷隆彦, 高柳真司, 鈴木雅視, 松川真美 「ScAlN 薄膜トランスデューサを用いた縦波・横波のブリュアン散乱光の同時増幅」 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 2016年9月14日, 富山大学

[46] 森剛志, 柳谷隆彦, 和佐清孝 「PZT と PT の抗電界差を利用した周波数スイッチナブル分極反転エピタキシャル薄膜共振器」 第 45 回 EM シンポジウム(2016). 2016年6月16日, 東京理科大学

[47] 森剛志, 鈴木雅視, 柳谷隆彦 「GHz 帯で純横波超音波を高効率励振する c 軸平行 ZnO 薄膜トランスデューサ」 電子情報通信学会 超音波研究会 (2016). 2016年4月18日, 早稲田大学

[48] 森剛志, 鈴木雅視, 柳谷隆彦 「ScAlN/ZnO 極性反転圧電薄膜を用いた 2 次モード励振超音波トランスデューサ」 電子情報通信学会 超音波研究会 (2016). 2016年4月18日, 早稲田大学

〔その他〕ホームページ

<http://www.eb.waseda.ac.jp/yanagitani/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柳谷隆彦 (Takahiko Yanagitani)

早稲田大学 理工学術院 先進理工学部

電気・情報生命工学科 准教授

研究者番号: 10450652