

柳谷隆彦研究室

エピ音響ブラッグ反射器上のエピ圧電薄膜から成る SMR

1. 研究背景

スマートフォンなどの移動体通信機器に搭載される BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタには、密集した無線バンド間の干渉を防ぐため、高い急峻性 (Q 値) が望まれる。BAW フィルタの圧電層に単結晶薄膜を用いれば、多結晶に比べて誘電損失や機械的損失が小さくなり、 Q 値が向上することが期待できる。ここで、ScAlN 等の単結晶圧電薄膜の作製方法としては、数百 nm オーダーの厚さで 8 インチ以上の大面積で結晶化が可能なエピタキシャル成長技術が有用である。

BAW フィルタの 1 種である SMR (Solidly Mounted Resonator) [1] は、高/低音響インピーダンス層を交互に積層した音響ブラッグ反射器上に圧電薄膜共振子を形成する。音響ブラッグ反射器の高音響インピーダンス層としては W, Mo, Pt, Ta, Ta₂O₅ 等が、低音響インピーダンス層としてはアモルファス SiO₂ が主に利用される。SMR では、このアモルファス SiO₂ のせいで、基板からエピタキシャル成長するのは困難である。

本研究では、高/低音響インピーダンス層に Pt/ZnO および Pt/Ti をそれぞれ用いることで、サファイア単結晶基板上に音響ブラッグ反射器をエピ成長させた。さらに、その上に圧電層として ZnO, MgZnO, ScAlN 薄膜を形成し、すべての層がエピタキシャル薄膜から成る SMR の実現を試みた。

2. エピタキシャル SMR の作製

初めに、RF マグネトロンスパッタにより、(0001) サファイア単結晶基板上に 6 ペアの (0001) ZnO/(111) Pt および 5 ペアの (0001) Ti/(111) Pt をそれぞれエピ成長させて、エピ音響ブラッグ反射器を作製した。次に、下部電極として (111) Pt を音響ブラッグ反射器上に形成したのち、(0001) ScAlN 圧電薄膜をエピ成長させた。作製したエピタキシャル SMR の断面 SEM 画像を図 1 に示す。いずれも厚さが均一な 6 ペアの ZnO/Pt および 5 ペアの Ti/Pt 上に ScAlN 圧電薄膜がそれぞれ形成されていることが確認できる。一方で、図 1 (a) において ZnO/Pt 音響ブラッグ反射器の界面が粗くなっていることがわかる。そのため、低音響インピーダンス層の ZnO 薄膜の成長温度等のスパッタ条件を見直す、または、成長後に CMP 等により表面処理をする必要があると考えている。

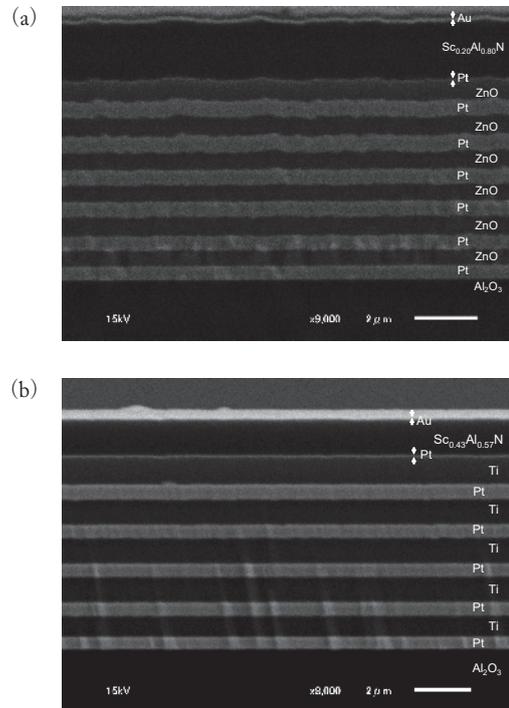


図1 エピタキシャル SMR の断面 SEM 画像
(a) 6 ペア ZnO/Pt 上 Sc_{0.20}Al_{0.80}N 圧電薄膜 SMR
(b) 5 ペア Ti/Pt 上 Sc_{0.43}Al_{0.57}N 圧電薄膜 SMR

3. 結晶性の評価

X線回折装置 (X'Pert PRO, PANalytical) を用いてエピタキシャル薄膜の結晶性を評価した。図 2 に各エピタキシャル SMR の 2θ - ω スキャンの結果を示す。(0001) Al₂O₃ 基板上に、(0001) ZnO/(111) Pt または (0001) Ti/(111) Pt ブラッグ反射器および (0001) ScAlN 圧電層がそれぞれ成長していることが確認できる。次に、ZnO/Pt および Ti/Pt 音響ブラッグ反射器の結晶性を評価した。図 3 (a) に Pt (002) 面極点図を、図 3 (b) に ZnO (10 $\bar{1}$ 1) 面極点図をそれぞれ示す。いずれも六回対称が確認できることから、ZnO/Pt 音響ブラッグ反射層がサファイアの結晶構造を反映してエピタキシャル成長していることがわかる。図 4 に示すように、Ti/Pt 音響ブラッグ反射器についても、同様な六回対称が観測されエピ成長を確認した。さらに、圧電層の結晶性も評価した。各 ScAlN 圧電層の (10 $\bar{1}$ 1) 面極点図を図 5 に示す。いずれも $\chi = 60^\circ$ 付近に六回対称が確認できることから ScAlN 圧電層までエピ成長していることがわかった。

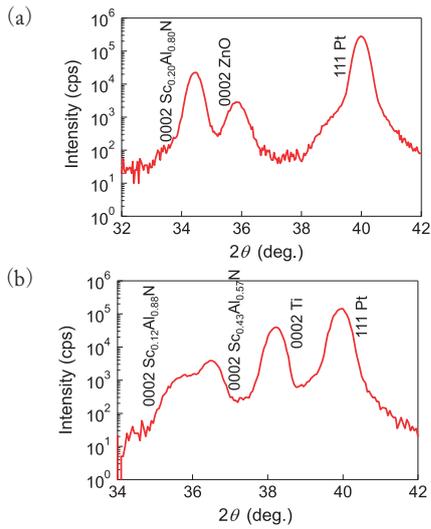


図2 エピタキシャルSMRの 2θ - ω スキャン
(a) 6ペア ZnO/Pt 上 $\text{Sc}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{N}$
(b) 5ペア Ti/Pt 上 $\text{Sc}_{0.43}\text{Al}_{0.57}\text{N}$

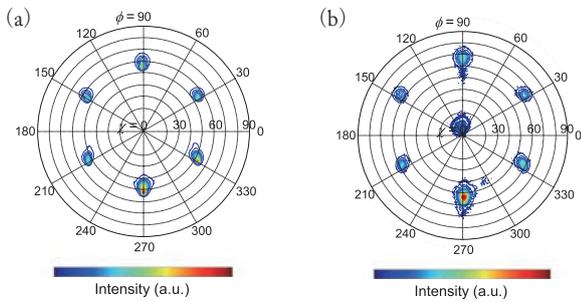


図3 エピ ZnO/Pt 音響ブラッグ反射器のXRD極点図
(a) Pt (002) 面, (b) ZnO (1011) 面

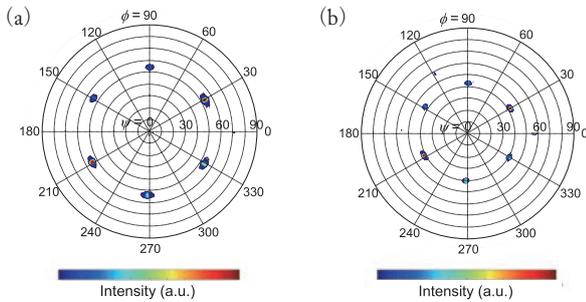


図4 エピ Ti/Pt 音響ブラッグ反射器のXRD極点図
(a) Pt (002) 面, (b) Ti (1012) 面

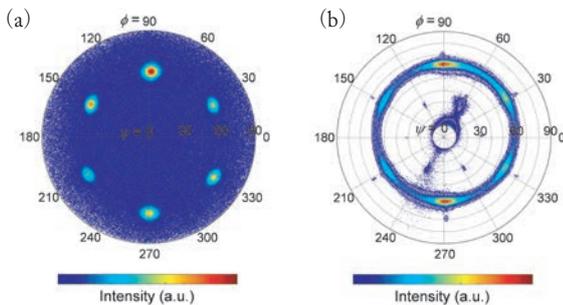


図5 エピ ScAlN 圧電層の(1011)面XRD極点図
(a) 6ペア ZnO/Pt 上 $\text{Sc}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{N}$
(b) 5ペア Ti/Pt 上 $\text{Sc}_{0.43}\text{Al}_{0.57}\text{N}$

4. 圧電性の評価

作製したエピタキシャルSMRの共振特性をネットワークアナライザにより測定し、共振反共振法[2]を用いて実効的電気機械結合係数 k_{eff}^2 を算出した。各エピタキシャルSMRの実測インピーダンス曲線を図6に示す。各SMRにおける共振周波数 f_s 、反共振周波数 f_p および実効的電気機械結合係数 k_{eff}^2 を表1に示す。6ペアのZnO/Pt上 $\text{Sc}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{N}$ 圧電薄膜SMRでは2.1 GHz付近で、それぞれ共振・反共振ピークが確認できる。しかし、ZnO/Pt音響ブラッグ反射器の粗い界面の影響を受けてScAlNの結晶性が劣化し、20%のScドーパ濃度の割には k_{eff}^2 が低くなってしまっている。粗い界面において音波が散乱し、微弱なピークとなっている。一方で、5ペアのTi/Pt上 $\text{Sc}_{0.43}\text{Al}_{0.57}\text{N}$ 圧電薄膜SMRでは1.8 GHz付近で急峻な共振・反共振ピークが観測された。また、 k_{eff}^2 は13.6%と算出され、43%のSc高濃度ドーパによる高い圧電性が確認できた。

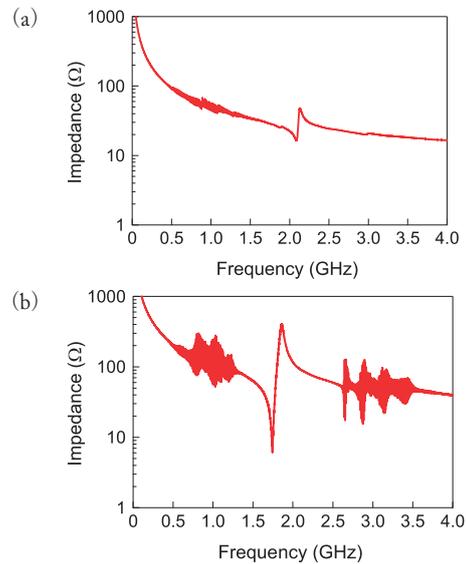


図6 エピタキシャルSMRの実測インピーダンス
(a) 6ペア ZnO/Pt 上 $\text{Sc}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{N}$ 圧電薄膜SMR
(b) 5ペア Ti/Pt 上 $\text{Sc}_{0.43}\text{Al}_{0.57}\text{N}$ 圧電薄膜SMR

表1 エピタキシャルSMRの共振特性

圧電層	$\text{Sc}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{N}$	$\text{Sc}_{0.43}\text{Al}_{0.57}\text{N}$
反射器	ZnO/Pt 6ペア	Ti/Pt 5ペア
f_s	2.095 GHz	1.743 GHz
f_p	2.122 GHz	1.852 GHz
k_{eff}^2	3.1%	13.6%

文献

- [1] K. M. Lakin, K. T. McCarron and R. E. Rose, "Solidly mounted resonators and filters," Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1995.
- [2] "IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE Std 176-1987)," IEEE Ultrason., Ferroelect., and Freq. Contr., vol. 43, no. 5, pp. 719-772, 1996.

著書・論文

<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>S. Tokai, T. Yanagitani "Full-epitaxial ScAlN and MgZnO solidly mounted resonators based on epitaxial acoustic Bragg reflector" Appl. Phys. Lett. vol.124 082901, (2024).</p>
<p>S. Tokai, T. Yanagitani "Epitaxial ZnO piezoelectric layer on SiO₂/Mo solidly mounted resonator fabricated using epitaxial Au sacrificial layer" Appl. Phys. Express, vol. 17, 025501, (2024).</p>
<p>K. Shiraiwa, T. Yanagitani "Bragg reflector type shear mode BAW transformer based on c-axis zig-zag ScAlN multilayer for rectifying antenna" IEEE Sens. Lett. 7 (11) 2504404, (2023).</p>
<p>Y. Koike, Y. Sato, T. Yanagitani "GHz fingerprint acoustic imaging by mechanically scanning a soft conductive probe on epitaxial PbTiO₃ films" IEEE Sens. Lett. 7 (10) 2504004, (2023).</p>
<p>T. Tominaga, S. Takayanagi, and T. Yanagitani "Theoretical investigation of Rayleigh surface acoustic wave propagation characteristics in c-axis-zigzag ScAlN film/silicon substrate structure" J. Appl. Phys., vol. 133, no. 20, pp. 204502, (2023).</p>

講演・発表

<p>S. Kuninobu and T. Yanagitani High quasi-shear mode electromechanical coupling of c-axis tilted PbTiO₃ epitaxial thin film grown on off-angle SrTiO₃ single crystal substrate IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/7</p>
<p>S. Tokai and T. Yanagitani 30-layer polarization inversion resonator for acoustic separation of the piezoelectric layer and the substrate IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/7</p>
<p>Y. Shimano and T. Yanagitani New method for extracting keff² from HBAR by producing pseudo FBAR characteristics without substrate removal IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/7</p>
<p>Y. Shimano and T. Yanagitani Investigation of the origins of electrode area dependence in kt² evaluation using FEM analysis in comparison with experimental data IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/7</p>
<p>S. Matsumura and T. Yanagitani Hysteresis curves of ferroelectric ScAlN films for fabricating periodically polarization inverted structure IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/7</p>
<p>H. Uchida and T. Yanagitani c-axis tilted LiNbO₃ epitaxial thin film grown on off-angle Al₂O₃ single crystal substrate IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/7</p>
<p>柴田真之, 柳谷隆彦 c軸ジグザグ分極反転 ScAlN 薄膜を用いたトランスバーサル型 BAW フィルタ 第44回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム USE 2023, 富山国際会議場, 2023/11/15</p>
<p>渡海 智, 柳谷隆彦 エピ圧電薄膜/エビ音響ブラッグ反射器構造の SMR 電子情報通信学会 超音波研究会, 静岡大学, 2023/11/27</p>
<p>白岩和剛, 柳谷隆彦 圧電層と基板の音響分離を目指した30層分極反転 HBAR 電子情報通信学会 超音波研究会, 静岡大学, 2023/11/27</p>

<p>柴田真之, 柳谷隆彦 高電力性向上を目的とした高次モード分極反転 ScAlN 薄膜 SMR 電子情報通信学会 超音波研究会, 静岡大学, 2023/11/27</p>
<p>國信聡太, 柳谷隆彦 c 軸傾斜エピ PbTiO₃ 薄膜の高い擬似すべりモード電気機械結合係数 電子情報通信学会 超音波研究会, 静岡大学, 2023/11/27</p>
<p>S. Kuninobu and T. Yanagitani kt₂ Hysteresis curves of PbTiO₃ epitaxial film resonators before and after removing substrate The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/8</p>
<p>S. Kuninobu and T. Yanagitani Shear mode electromechanical coupling coefficient of c-axis tilted PbTiO₃ epitaxial thin film/off-angle La-SrTiO₃ substrate The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/7</p>
<p>S. Tokai and T. Yanagitani Acoustic separation of piezoelectric layer and substrate using 30-layer c-axis zigzag ScAlN polarization inversion resonator The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/8</p>
<p>S. Tokai and T. Yanagitani Full epitaxial ZnO, MgZnO and ScAlN piezoelectric thin film BAW resonators based on epitaxial acoustic Bragg refractor The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/7</p>
<p>S. Shibata and T. Yanagitani Polarization-inverted c-axis zigzag ScAlN multilayers for transversal type BAW filter The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/7</p>
<p>S. Shibata and T. Yanagitani RF power durability of polarization-inverted c-axis zigzag ScAlN piezoelectric multilayers The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/6</p>
<p>F. Zitai and T. Yanagitani Characteristics of piezoelectric LiNbO₃ epitaxial thin films grown on off-angle Al₂O₃ substrate The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/7</p>
<p>F. Zitai and T. Yanagitani Characteristics of acoustic resonators using YbAlN and YbGa₂N epitaxial piezoelectric thin films The 15th PACIFIC RIM conference of ceramic societies (PACRIM15), 中国, 深圳, 2023/11/6</p>
<p>下山 航, 島野耀康, 國信聡太, 柳谷隆彦 エピタキシャル PbTiO₃ 薄膜を用いたブラッグ反射器型共振子 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/29</p>
<p>富岡美咲, 渡海 智, 柳谷隆彦 電極抵抗低減に向けて上下電極に金属音響ブラッグ反射器を採用した SMR 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/29</p>
<p>島野耀康, 柳谷隆彦 パルスエコー法による減衰定数測定を用いた ScAlN 薄膜の Q 値評価 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/29</p>
<p>勝又彩馨, 島野耀康, 柳谷隆彦 エピタキシャル YSZ 薄膜および YHfO₂ 薄膜の電界誘起圧電性 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/29</p>
<p>松村理司, 島野耀康, 大野直輝, 柳谷隆彦, 長 康雄 周期的傾斜分極反転構造を用いたベタ電極による SAW の励振 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/29</p>
<p>花井彩香, 柳谷隆彦 純 AlN 薄膜共振子の強誘電性とヒステリシス特性 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/30</p>
<p>浴田航平, 石井直輝, 島野耀康, 柳谷隆彦 AOGs レス Sc_{0.4}Al_{10.6}N 薄膜の大面积成膜を目指した矩形カソード平行平板スパッタリング 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/30</p>

<p>松村桃佳, 柴田真之, 柳谷隆彦 分極反転もしくは中間電極を用いたScAlN多層薄膜SMRによる二重モード型BAWフィルタ (DMB) 圧電材料・デバイスシンポジウム2024, 東北大学, 2024/1/30</p>
<p>下山 航, 島野耀康, 國信聡太, 柳谷隆彦 エピタキシャルPbTiO₃薄膜を用いたブラッグ反射器型共振子の分極反転特性 第71回応用物理学会 春季学術講演会, 東京都市大学, 2024/3/23</p>
<p>勝又彩馨, 島野耀康, 柳谷隆彦 エピタキシャルYSZ薄膜およびYHfO₂薄膜の誘起圧電性 第71回応用物理学会 春季学術講演会, 東京都市大学, 2024/3/25</p>
<p>松村理司, 島野耀康, 大野直輝, 柳谷隆彦, 長 康雄 周期的傾斜分極反転構造とベタ電極からなるSAWデバイス 第71回応用物理学会 春季学術講演会, 東京都市大学, 2024/3/24</p>
<p>花井彩香, 柳谷隆彦 純AlN薄膜SMRのkt²ヒステリシス特性 第71回応用物理学会 春季学術講演会, 東京都市大学, 2024/3/24</p>
<p>小池由奈, 柳谷隆彦 c軸傾斜ScAlN薄膜を用いた送受波型ジャイロセンサの作製 第71回応用物理学会 春季学術講演会, 東京都市大学, 2024/3/23</p>
<p>柳谷隆彦 BAWフィルタ应用を目指した強誘電性酸化物圧電薄膜の開発 第71回応用物理学会 春季学術講演会, 東京都市大学, 2024/3/22</p>
<p>柳谷隆彦 ワイヤレス電力伝送レクテナへの应用を目指した圧電薄膜トランスの開発 ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム (WiPoT) ジョイントシンポジウム, 早稲田大学, 2023/12/8</p>
<p>S. Tokai and T. Yanagitani Full-epitaxial ScAlN, ZnO and MgZnO SMR based on epitaxial metal acoustic Bragg reflector IEEE Ultrasonic Symposium 2023, 2023/9/5</p>
<p>S. Kuninobu and T. Yanagitani Quasi-shear mode excitation of c-axis tilted ScAlN and MgZnO epitaxial thin films on off-angle sapphire single crystal substrates IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/6</p>
<p>S. Matsumura and T. Yanagitani Shear mechanical properties of acoustic Bragg reflector measured by GHz pulse echo method IEEE Ultrasonic Symposium 2023, カナダ, モントリオール, 2023/9/5</p>
<p>渡海 智, 柳谷隆彦 RFフィルタ向けエピタキシャル圧電薄膜多層構造 革新的無線通信技術に関する横断型研究会, 沖縄市町村自治会館, 2023/10/10</p>
<p>國信聡太, 柳谷隆彦 横波型RFフィルタを目指したPbTiO₃圧電薄膜 革新的無線通信技術に関する横断型研究会, 沖縄市町村自治会館, 2023/10/10</p>
<p>柴田真之, 柳谷隆彦 RFフィルタ向け窒化物多層圧電薄膜のハイパワー特性 革新的無線通信技術に関する横断型研究会, 沖縄市町村自治会館, 2023/10/11</p>
<p>白岩和剛, 柳谷隆彦 基地局向けRFフィルタを目指した多層圧電薄膜共振子 革新的無線通信技術に関する横断型研究会, 沖縄市町村自治会館, 2023/10/11</p>
<p>渡海 智, 柳谷隆彦 エビ音響ブラッグ反射器上に成長させたエビScAlN, MgZnO圧電薄膜SMR 第44回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム USE 2023, 富山国際会議場, 2023/11/15</p>
<p>國信聡太, 柳谷隆彦 高い横波電気機械結合係数を持つc軸傾斜PbTiO₃薄膜/オフ角La-SrTiO₃基板共振子 第44回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム USE 2023, 富山国際会議場, 2023/11/15</p>

<p>渡海 智, 柳谷隆彦 エビ犠牲層エッチングを用いたエビ圧電層/音響ブラッグ反射器構造の作製 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>
<p>柴田真之, 柳谷隆彦 積層電極によるScAlN多層薄膜SMRを用いた二重モードBAWフィルタ (DMB) 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>
<p>國信聡太, 柳谷隆彦 PbTiO₃ エピタキシャル自立薄膜共振子の電気機械結合係数ヒステリシスカーブ 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>
<p>白岩和剛, 柳谷隆彦 厚みすべりモードc軸ジグザグScAlN積層を用いたSMR型圧電トランス 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>
<p>石井直輝, 島野耀康, 柳谷隆彦 c軸傾斜Sc_{0.4}Al_{0.6}N薄膜の大面积成膜を目指した矩形カソードによる平行平板スパッタリング 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>
<p>小林 栞, 柳谷隆彦 エピタキシャルZnO犠牲層を用いたc軸傾斜エピタキシャルScAlN自立薄膜共振子 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>
<p>茂木彩音, 柳谷隆彦 数百MHz帯超音波を用いた複素反射率測定による生体物質の相互作用の検出 電子情報通信学会 応用音響研究会, 九州大学, 2023/12/22</p>