

令和元年6月20日現在

機関番号：13501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06721

研究課題名（和文）巨大圧電性希土類AlN膜の配向制御と次世代高周波弾性表面波フィルタへの応用

研究課題名（英文）Crystalline control of rare earth doped AlN film and applications to next generation SAW filter with high frequency

研究代表者

鈴木 雅視（SUZUKI, Masashi）

山梨大学・大学院総合研究部・特任助教

研究者番号：60763852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では次世代移動体通信用周波数フィルタ応用に向け、希土類ScAlN膜の配向性制御とScAlN膜/LiNbO₃圧電基板からなる縦型漏洩弾性表面波（LLSAW）デバイスの開発を行った。成膜条件、イオン照射条件を制御することでScAlN膜の結晶方位は制御可能であり、かつAlN膜を超える横波電気機械結合係数 k_{152} が得られることを示した。ScAlN膜/LiNbO₃基板上LLSAW理論解析では、c軸配向ScAlN膜装荷によりLLSAW伝搬減衰の低減が可能となることを示し、実験においてもこの低減は観測した。c軸平行ScAlN膜装荷では結合係数が増幅し、LiNbO₃単体の約1.6倍となることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SAWデバイスは周波数フィルタとして実用化されている。今後さらなる通信の大容量化、高速化に向けて、より高周波帯域な移動通信規格（3GHz以上）が検討されている。本課題では結晶方位を制御したScAlN膜をLiNbO₃基板上に装荷した層状構造基板からなるSAWデバイスの開発を行い、高周波動作に要求される“高SAW位相速度、高結合係数、低伝搬減衰”を満たすと示唆する成果を得た。これにより、現状のSAWデバイス構造では困難な次世代移動体通信規格に対応可能な層状構造基板SAWデバイスの設計・開発指針を示すことができたと考えている。

研究成果の概要（英文）：We investigated the crystalline orientation control of rare-earth doped ScAlN film, and the propagation characteristics of LLSAW on ScAlN/LiNbO₃ layered substrates for applications to frequency filters in next generation mobile communications. The crystalline orientation of ScAlN films could be controlled by adjusting film deposition and ion beam irradiation conditions. The ScAlN films have higher shear mode electromechanical coupling than that of pure AlN. In theoretical analysis of LLSAW characteristics on ScAlN/LiNbO₃, we demonstrated the reduction of LLSAW attenuation by loading c-axis oriented ScAlN on LiNbO₃. Moreover, K_2 of LLSAW are enhanced in c-axis parallel ScAlN film/ LiNbO₃. The K_2 of c-axis parallel ScAlN film/ LiNbO₃ is approximately 1.6 times higher than that of LiNbO₃ substrate.

研究分野：圧電薄膜、弾性表面波デバイス

キーワード：AlN薄膜 配向制御 弾性表面波 SAWフィルタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

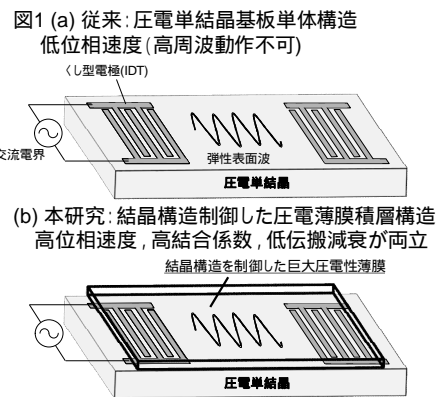
逆圧電効果を利用して弾性表面波を励振する SAW デバイス(図 1)は、携帯電話等の周波数フィルタとして利用され、移動体通信産業を支える極めて重要な役割を果たしている。現在の移動通信システムの周波数域は 2.2 GHz 以下であるが、スマートフォン等の急速な発達に伴い、通信大容量化や高速化に向け、3GHz 以上を周波数帯域とした次世代移動通信システムへの移行が検討されている。これを実現するためには、周波数フィルタ用 SAW デバイスには以下の両立が求められる。

- ・高い SAW 位相速度 高周波動作
- ・高い電気機械結合係数 広帯域幅
- ・低い SAW 伝搬減衰 高 Q 値

これらの要求に対し、「縦型漏洩弾性表面波伝搬モード」かつ「結晶方位・分極方向を制御した希土類 AIN 系圧電薄膜/圧電単結晶基板構造 (図 1 (b))」を利用した SAW デバイスが有力な候補の一つだと考えている。

縦型漏洩弾性表面波(LLSAW)の特徴は速い SAW 位相速度である。他の伝搬モードより 2 倍程度速度が大きく、高周波動作に適した伝搬モードである。しかし、弾性波を基板内部へ放射しながら伝搬するため、非常に大きな伝搬損失をもつという欠点があり、従来構造(図 1(a))では不適切な伝搬モードであった。そこで、研究協力者である垣尾らによって提案されたのが、圧電単結晶基板上に基板よりも音速が速いアモルファス AIN 薄膜を装荷した LLSAW デバイスである。弾性波は速度の速い層に集中するという性質があり、高音速膜装荷により LLSAW での伝搬減衰低減を達成している。しかし、装荷した薄膜がアモルファス構造であるがゆえ、圧電性が有しないために SAW 伝搬に寄与せず、電気機械結合係数が小さいといった課題がある。これに対し、装荷する薄膜に「高い圧電性、高音速を有する結晶性薄膜を用いる」、かつ薄膜内での SAW 伝搬に寄与する圧電性の大きさ、正負符号は結晶方位や分極方向で変化するため、「SAW 伝搬モードや伝搬方向に合わせて薄膜内の結晶方位や分極方向を制御する」ことで、初めて高い SAW 位相速度、高い結合係数、低い伝搬減衰を両立する LLSAW デバイスが達成できると考えた。このような背景のもと、以下の圧電薄膜に関する研究成果を得ていた。

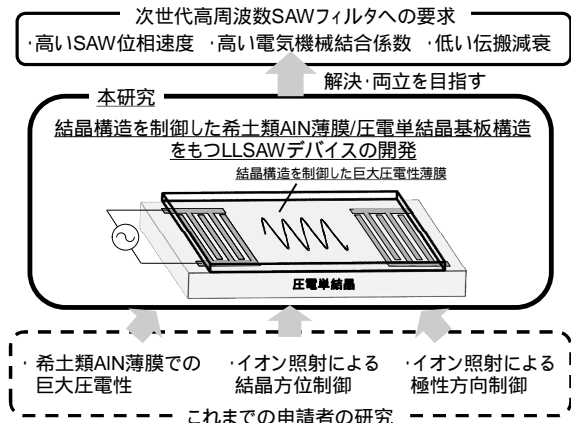
- 「・強誘電体に匹敵する大きな圧電性をもつ希土類 AIN 薄膜の発見」
- 「・イオン照射による AIN 薄膜の結晶方位制御と分極方向制御」



2. 研究の目的

そこで本研究では、「高い SAW 位相速度・高い電気機械結合係数・低い伝搬減衰」の両立を目的とした「結晶方位、分極方向を制御した希土類 AIN 薄膜/圧電単結晶基板構造を用いた縦型漏洩弾性表面波 (LLSAW) デバイス」の実現 (図 2) に向け、(1) ~ (3) の研究を行った。

- (1) 希土類 AIN 薄膜の結晶方位制御
- (2) SAW 伝搬理論解析による最適な希土類 AIN 薄膜/圧電単結晶基板構造の決定
- (3) 希土類 AIN 薄膜/圧電単結晶基板構造 LLSAW デバイス作製・評価



3. 研究の方法

(1) 希土類 AIN 薄膜の結晶方位制御

研究開始前の成果として、スパッタ AIN 成膜中の基板へのスパッタ粒子入射角度およびイオン照射を制御することで、基板に依存せずに結晶方位・分極方向が制御できることを見出していた。「巨大圧電性希土類 AIN 膜」の結晶構造は AIN とほぼ同じ(ウルツ鉱構造)であるため、同様の手法で結晶方位制御は可能だと考えた。まずは、図 3 に示す成膜装置の構築を行った。通常スパッタ成膜装置と構成はほとんど同じであるが、スパッタ粒子の入射角度、イオン照射角度を変化させるために基板角度を制御できるような機構をもつ。加えて、成膜中のイオン照射するために、ECR イオン源を真空チャンパー側面に装備した。表 1 に示す条件で ScAIN 成膜、極点 XRD 測定による結晶配向性評価、EPMA 測定による Sc 濃度測定を行い、ScAIN 薄膜においても AIN と同様に結晶配向制御が可能であるか調査を行った。また ScAIN 膜薄膜共振子を作製し、ネットワークアナライザによる変換損失測定からすべりモード電気機械結合係数を算出し、Sc 濃度および c 軸傾斜角度に対する依存性について評価した。

図 2 研究概略図

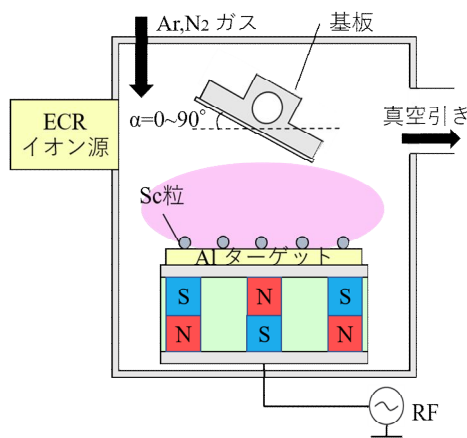
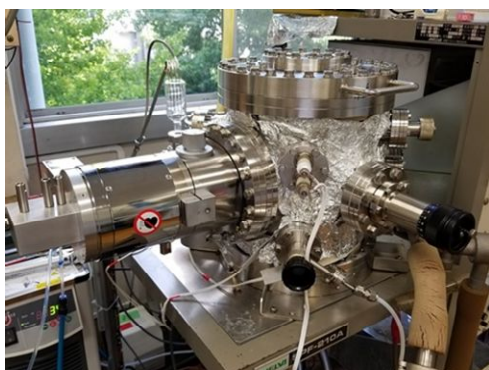


図3 本課題で構築したイオンビームアシスト RF マグネトロンスパッタ装置
表1 成膜条件

基板	Al / SiO ₂
成膜ガス圧 (N ₂ :Ar)	0.4 Pa (1:2)
RF電力	140-200 W
成膜時間	4-5 h
Sc粒量	1.76 - 2.3 g
基板傾斜角度α	0° - 90°
膜厚	2.2 ~ 5.1 μm

(2) SAW 伝搬理論解析による最適な ScAlN 薄膜/LiNbO₃ 圧電単結晶基板構造の決定

高い SAW 位相速度・高い電気機械結合係数・低い伝搬減衰を両立する SAW デバイスには、「LLSAW 伝搬モード」,「結晶方位・分極方向を制御した巨大圧電性薄膜の圧電単結晶基板上への装荷」が必要になると考えた。そこで、Farnell と Adler の SAW 伝搬解析法を LLSAW に拡張した方法を用い、装荷する ScAlN 薄膜の Sc 濃度、結晶方位、分極方向、膜厚といったパラメータを変化させた時の LLSAW 位相速度、結合係数、伝搬減衰を計算し、得られた計算結果から LLSAW デバイスに最適な ScAlN 薄膜/圧電単結晶基板(LiNbO₃)構造を決定した。

(3) 希土類 AlN 薄膜/圧電単結晶基板構造 LLSAW デバイス作製・評価

c 軸配向 ScAlN 薄膜/IDT/LiNbO₃ 圧電単結晶基板構造 LLSAW デバイスの作製を行った。ScAlN 膜は(1)で高配向膜の得られた条件(表1)で IDT/LiNbO₃ 基板上に装荷した。ネットワークアナライザを用いた周波数特性評価から薄膜を装荷しない従来 SAW デバイスの特性、および(2)で計算した理論解析結果と比較することで、作製した LLSAW デバイスの優位性、問題点を検討した。

4. 研究成果

(1) 希土類 AlN 薄膜の結晶方位制御

まずは、スパッタ粒子入射角度を 20~90° とし、結晶方位(c 軸傾斜角度)制御した ScAlN 膜を形成し、イオンビームなしで成膜可能な c 軸傾斜角度の調査を行った。図4に各試料での(0002)極点図を示す。基板台傾斜角度の増加に伴い薄膜内の c 軸傾斜角度も増加していることがわかる。また、基板台傾斜角度を 60° とすると、c 軸の傾斜角は 50° 弱となった。基板台傾斜角度を 90° とした時は、面内、面外とも結晶配向性が著しく低下した。これは、スパッタ粒子の入射角度が基板に平行になったことで堆積しにくい、かつ、自己陰影効果による膜のポーラス化が発生したためと考えられる。このことから、基板台の傾斜のみで作製できる c 軸傾斜膜は 50° 程度までということがわかった。次に、低加速電圧 300V で加速したイオンビームを成膜中に照射した ScAlN 膜の形成も行った。(0002)極点図から配向性評価を行ったところ、低加速度イオンビーム照射では c 軸傾斜角度はほとんど変化せず、イオン照射による ScAlN 膜での c 軸傾

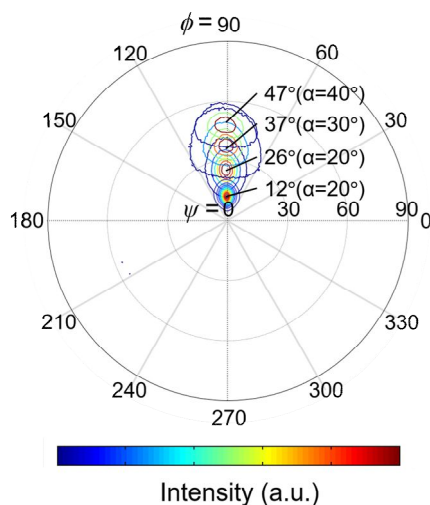


図4 (0002)極点図

斜角度制御は実現できなかった。これは、装置不良によりイオン加速電圧 300V までに制限され、AlN で c 軸角度制御に成功した高加速度ビーム(数 1000V)が照射できなかったことが主な要因であると考えられる。

図 5 に本研究で作製した ScAlN 膜の電気機械結合係数 k_{15}^2 の c 軸傾斜角度依存性を示す。実曲線は AlN, ScAlN の材料定数を用いて計算した単結晶の理論曲線である。高濃度 Sc ドープ (Sc:35% 付近) 試料では, AlN 単結晶を超える k_{15}^2 値が得られており, Sc ドープによる k_{15}^2 値の増幅を確認した。c 軸傾斜角度に注目すると, 理論計算通り c 軸傾斜角度 35-40° の間で k_{15}^2 値は最大となり, c 軸傾斜角度 40° かつ Sc 濃度 31% の薄膜で $k_{15}^2 = 9.9\%$ となった。一方でイオンビーム照射した ScAlN 薄膜では, 同じ c 軸傾斜角度をもつイオンビーム照射なし試料と比較すると, k_{15}^2 値が約 2 倍程度に増幅するサンプルもあり, イオンビーム照射による ScAlN 薄膜のさらなる圧電性改善の可能性を示した。この要因としては, イオン照射による窒化の促進, 結晶歪み, 膜の緻密化が挙げられるが, Sc 濃度や c 軸傾斜角度, イオンビーム照射の強度, イオンビームの導入角度など未だ検討されていない部分は多くあり, 今後の研究でさらなる調査を行う。

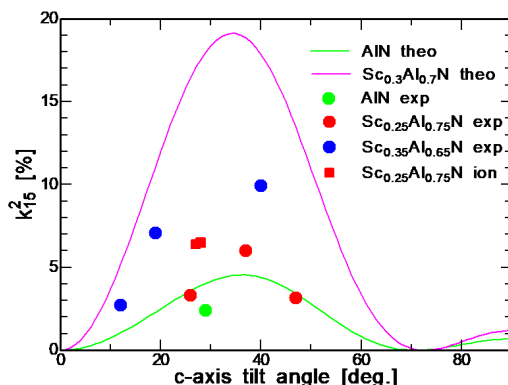


図 5 作製した ScAlN 膜の電気機械結合係数 k_{15}^2 の c 軸傾斜角度依存性

(2) SAW 伝搬理論解析による最適な ScAlN 薄膜/LiNbO₃ 圧電単結晶基板構造の決定

図 6 に c 軸配向もしくは c 軸平行 ScAlN 膜/X カット 36° Y 伝搬 LiNbO₃ 基板上を伝搬する LLSAW 位相速度, 伝搬減衰, 結合係数の理論解析結果を示す。c 軸配向 ScAlN 膜装荷時の位相速度は $h/\lambda < 0.04$ では増加し, $h/\lambda = 0.04$ で最大値(約 7700m/s)となる。 $h/\lambda < 0.04$ では減少に転じ, 約 7350m/s に収束する。伝搬減衰は, $h/\lambda > 0.1$ でゼロ減衰となる。一方, c 軸平行 ScAlN 膜装荷の場合は, 位相速度は $h/\lambda < 0.1$ で減少し, $h/\lambda = 0.04$ で最小値(約 6600m/s)となる。 $h/\lambda > 0.1$ では増加する。また伝搬減衰は h/λ 増加に伴い増加することが分かった。結合係数は c 軸平行 ScAlN 薄膜装荷時に 36Y 伝搬 Xcut LiNbO₃ 単体より大きな値が得られ, $h/\lambda = 0.1$ の時最大となり $K^2=21\%$ となった。この値は LN 単体の約 1.6 倍となった。以上より, LLSAW 伝搬減衰を抑制するためには c 軸配向 ScAlN 膜装荷, 結合係数増幅には, c 軸平行 ScAlN 膜装荷が有効であることが分かった。

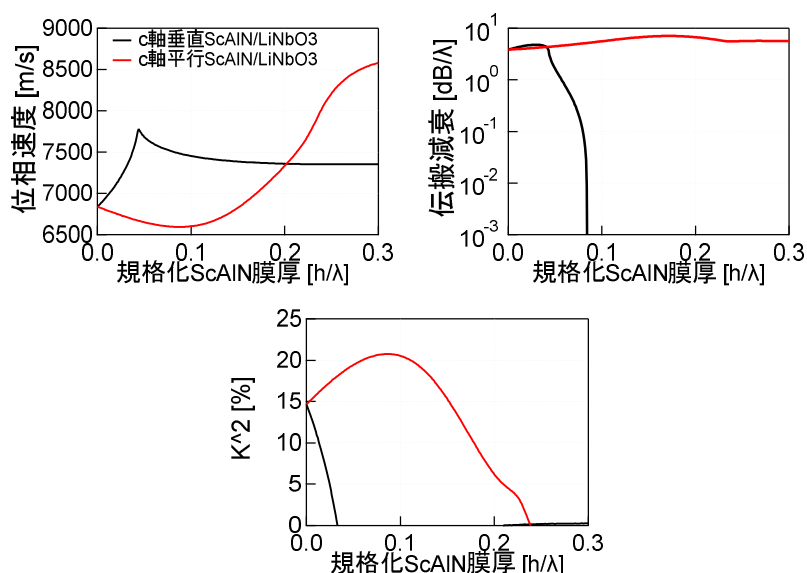


図 6 ScAlN 膜/LiNbO₃ 基板上での LLSAW 位相速度, 伝搬減衰, 結合係数の ScAlN 膜厚依存性の数値計算結果

次に、ScAlN 薄膜の c 軸傾斜角度が LLSAW の特性に及ぼす影響を評価するために、 $(0\theta 90)$ ScAlN 膜の θ 角度を変化させた時の LLSAW 伝搬特性を理論解析した。図 7(a), (b)に開放状態および境界短絡状態の伝搬減衰, (c)に結合係数を示す。 $0 < h/\lambda < 0.15$ では θ 角度が大きくなるにつれて、結合係数が大きくなることが確認できた。一方で、結合係数が LN 単体より大きくなる 角度 80 度以上では、ゼロ減衰が得られていないため、ScAlN/LiNbO₃ 基板構造では結合係数増幅とゼロ伝搬減衰の両立を実現する 角度と規格化膜厚を発見することができなかった。今後は、他材料基板(水晶, サファイア, LiTaO₃ 等)を用いた場合での解析を行い、最適構造のさらなる探索を行う予定である。

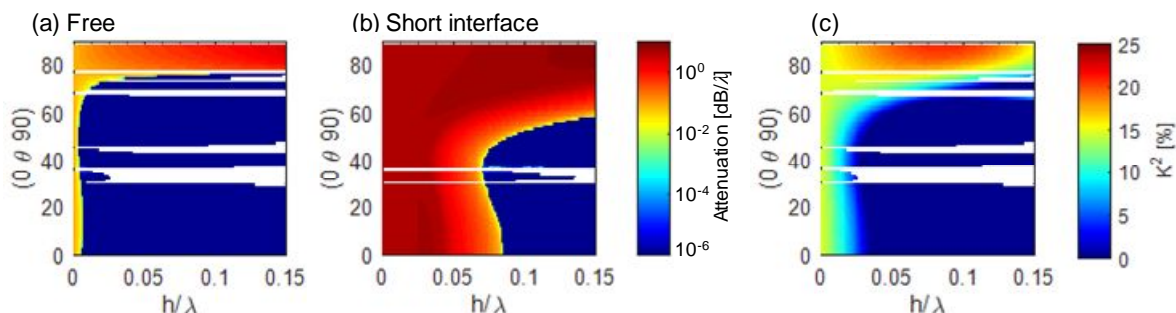


図 7 ScAlN 膜/LiNbO₃ 基板上での LLSAW 伝搬減衰, 結合係数の ScAlN 膜 c 軸傾斜角度依存性の数値計算結果

(3) c 軸配向 AlN 薄膜/圧電単結晶基板構造 LLSAW デバイス作製・評価

図 8 に作製した IDT/X カット 36Y 伝搬 LiNbO₃ 基板および c 軸配向 ScAlN/IDT/X カット 36Y 伝搬 LiNbO₃ 基板構造を持つ LLSAW デバイスでの挿入損失最小値の伝搬距離 L 依存性を示す。すべての L で ScAlN 膜を装荷により LLSAW の挿入損失が改善している。また伝搬損失を各曲線から算出すると、装荷なしでは 0.20-0.25 dB/ と大きい、装荷ありでは 0.08-0.10 dB/ となり、(2)理論解析で示された c 軸配向 ScAlN 膜装荷による伝搬損失の低減は観測できた。しかし、理論解析のようなゼロ伝搬減衰は観測されなかった。この要因を ScAlN 表面形状と考察し、AFM により表面粗さ測定を行った。ScAlN 膜表面粗さ R_q は 2.7nm であり、LLSAW の波長(4.8 μ m)より十分に小さかったため、ScAlN 表面形状はゼロ伝搬減衰が得られなかった要因とは考えづらい。現在は ScAlN と LiNbO₃ の界面に存在する結晶構造の不連続性、不活性層が原因だと考えているおり、今後は断面 SEM 評価などを行い、原因の解明を行う予定である。

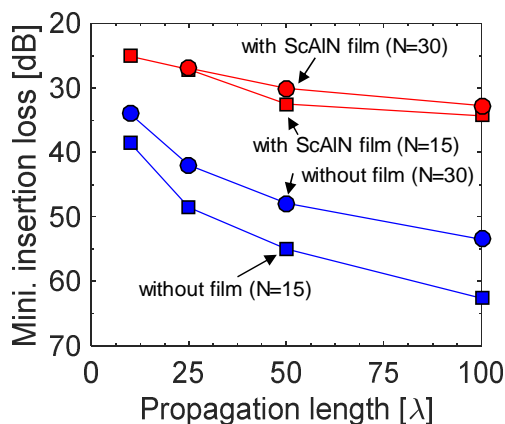


図 8 ScAlN/IDT/LiNbO₃ LLSAW デバイスでの最小挿入損失の伝搬距離 L 依存性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

- [1] **鈴木雅視**, 早川竜盛, 垣尾省司, “RF マグネトロンスパッタ法で形成した Cr 添加 AlN 膜の圧電特性,”電気学会研究会資料・電気回路研究会, 2018/12/07 (査読なし)
- [2] **Masashi Suzuki** and Shoji Kakio, “Theoretical analysis and design of longitudinal leaky SAW device consisting of ScAlN film / piezoelectric single crystal,” Proceedings 2018 IEEE Ultrasonics symposium, 2018/10/22 (査読あり)
- [3] **Masashi Suzuki**, Masashi Gomi, and Shoji Kakio, “Propagation characteristics of longitudinal-type leaky surface acoustic wave on layered structure consisting of Sc_xAl_{1-x}N film / LiNbO₃ substrate,” JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 57/7S1, 07LD06-1-07LD06-7 2018/04/27. (査読あり)

[学会発表](計 9 件)

- [1] **鈴木雅視**, 垣尾省司, “ScAlN 薄膜/水晶基板上縦型リーキーSAW の伝搬減衰に速い横波, 遅い横波成分が及ぼす影響の理論的検討,” 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019/03/09.
- [2] **鈴木雅視**, 早川竜盛, 垣尾省司, “RF マグネトロンスパッタ法で形成した Cr 添加 AlN 膜の圧電特性,” 電子回路研究会・テーマ「圧電材料・デバイスと応用」, 2018/12/07.

- [3] **Masashi Suzuki**, Naoya Sawada, and Shoji Kakio, “Theoretical analysis of longitudinal wave leaky SAW propagation characteristics on ScAlN film/Quartz or Sapphire substrate,” The 39th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2018/10/29.
- [4] **Masashi Suzuki** and Shoji Kakio, “Theoretical analysis and design of longitudinal leaky SAW device consisting of ScAlN film / piezoelectric single crystal,” 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2018/10/24.
- [5] **鈴木雅視**, 早川竜盛, 垣尾省司, “スパッタ成膜法による c 軸配向 CrAlN 薄膜の形成と電気機械結合係数 kt_2 評価,” 第 79 回応用物理学会秋季講演会, 2018/09/18.
- [6] **鈴木雅視**, 垣尾省司, “ScAlN 薄膜/水晶基板上を伝搬する縦型リーキーSAW に水晶カット角と SAW 伝搬方向が及ぼす影響,” 第 79 回応用物理学会秋季講演会, 2018/09/18.
- [7] 澤田直弥, **鈴木雅視**, 垣尾省司, “ScAlN 薄膜/水晶基板またはサファイア基板構造における縦型リーキーSAW 伝搬特性の理論解析,” 第 65 回応用物理学会 春季学術講演会, 2018/03/19.
- [8] **Masashi Suzuki** and Shoji Kakio, “Theoretical Analysis of Longitudinal-type Leaky Surface Acoustic Wave on LiNbO₃ with Oriented ScAlN Film,” The 38th symposium on Ultrasonic Electronics, 2017/10/25.
- [9] **鈴木雅視**, 垣尾省司, “ScAlN 薄膜/LiNbO₃ 板構造における縦型リーキ SAW 伝搬特性の理論解析,” 第 78 回応用物理学会秋季講演会, 2017/09/05.

〔図書〕なし

〔産業財産権〕なし

〔その他〕

山梨大学 研究者データベース

<http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/338/0033743/profile.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：垣尾 省司

ローマ字氏名：KAKIO Shoji

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。