

高周波数帯次世代移動通信に向けた c 軸平行 ScAlN 薄膜 / 単結晶 LiNbO₃ 板構造をもつ縦型漏洩 SAW フィルタの開発

山梨大学 鈴木雅視

Longitudinal Leaky SAW Filter Consisting of c-axis Parallel ScAlN film /
LiNbO₃ Single Crystal Substrate for High Frequency Next Generation Mobile Communications

Masashi Suzuki
University of Yamanashi

縦型リーキーSAW (Longitudinal Leaky SAW: LLSAW) は他の SAW 伝搬モードより高い結合係数, 高位相速度を有するため, 高周波フィルタ応用に適した SAW 伝搬モードである。しかし, 圧電基板単体構造を用いた SAW デバイスでは, LLSAW は伝搬減衰が大きくなり, 低 Q 値となる。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”の両立する「結晶方位, 分極方向を制御した希土類 AlN 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」の開発を試みた。巨大 ScAlN 薄膜を様々な圧電単結晶基板上に積層した構造での SAW 伝搬特性の理論解析から, ScAlN 膜を LiNbO₃ 基板に装荷した場合, 結合係数と伝搬減衰はトレードオフの関係にあることを確認した。一方, c 軸平行 ScAlN 膜を水晶に装荷した構造では高位相速度, ある程度大きな結合係数, 低伝搬減衰が両立することを明らかにした。

Longitudinal leaky SAW (LLSAW) devices are more suitable for applications to high frequency filters than other mode SAW devices, because of their high electromechanical coupling factor (K^2) and high phase velocity. However, the LLSAWs on monolayer piezoelectric substrates possess high attenuation, which cause a low Q factor. We expected that the high K^2 , high phase velocity, and low attenuation in LLSAW would be obtained by loading the giant piezoelectric ScAlN film on the piezoelectric single crystal substrate. In this study, the LLSAW propagation characteristics on ScAlN films/piezoelectric single crystal substrates (Quartz and LN) were investigated to determine the optimized layered structure for LLSAW devices. From the results of theoretical SAW propagation analysis, LLSAWs on c-axis oriented or parallel ScAlN films / LiNbO₃ substrate did not have high K^2 and low attenuation simultaneously. On the other hand, LLSAWs propagating on c-axis parallel ScAlN film / AT-cut or X-cut quartz possess have high phase velocity, relatively high K^2 , and low attenuation.

1. はじめに

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 2.2GHz 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) が要求される。

縦型漏洩弾性表面波 (LLSAW) の特徴は速い SAW 位相速度である^[1]。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、垣尾らによって提案されたのが、圧電単結晶基板に基板よりも音速が速いアモルファス AlN 薄膜を装荷した LLSAW デバイスである^[2]。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った。

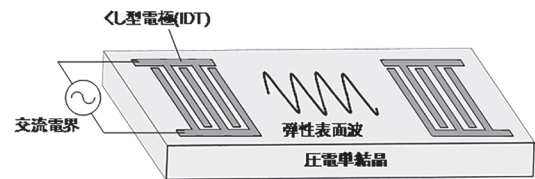
これらの課題に対し、装荷する薄膜に「高い圧電性、高音速を有する結晶性薄膜を用いる」、かつ薄膜内での SAW 伝搬に寄与する圧電性の大きさ、正負符号は結晶方位や分極方向で変化するため、「SAW 伝搬モードや伝搬方向に合わせて薄膜内の結晶方位や分極方向を制御する」ことで、初めて高い SAW 位相速度、高い結合係数、低い伝搬減衰を両立する LLSAW デバイスが達成できると考えた。そこで本研究では、「高い SAW 位相速度・高い電気機械結合係数・低い伝搬減衰」の両立を目的とした「結晶方位、分極方向を制御した希土類 AlN 薄膜 / 圧電単結晶基板構造を用いた縦型漏洩弾性表面波 (LLSAW) デバイス」の実現 (図 1(b)) に向け、以下の研究を行った。

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

2. ScAlN 薄膜の結晶方位制御

研究開始前の成果として、スパッタ AlN 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 AlN 膜^[3]」の結晶構造は AlN 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 2 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 α 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バー側面に装備した。表 1 に示す条件で ScAlN 成膜、極点 XRD 測定による結晶配向性評価、

(a) 従来：圧電単結晶基板単体構造
⇒低位相速度 (高周波動作不可)



(b) 本研究：結晶構造制御した圧電薄膜積層構造
⇒高位相速度, 高結合係数, 低伝搬減衰が両立

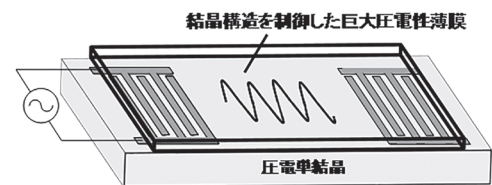


図 1

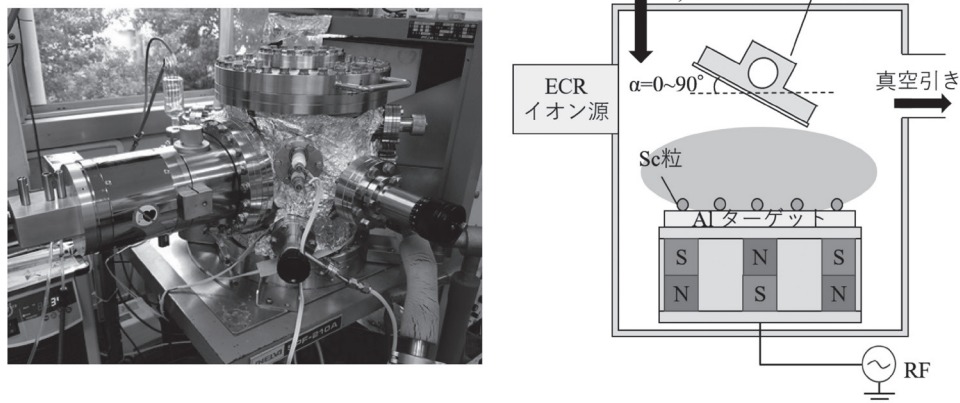


図2 本課題で構築したイオンビームアシスト RF マグネトロンスパッタ装置

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 μ m

EPMA 測定による Sc 濃度測定を行い、ScAlN 薄膜においても AlN 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 ScAlN 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。

まずは、スパッタ粒子入射角度 α 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 3 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、

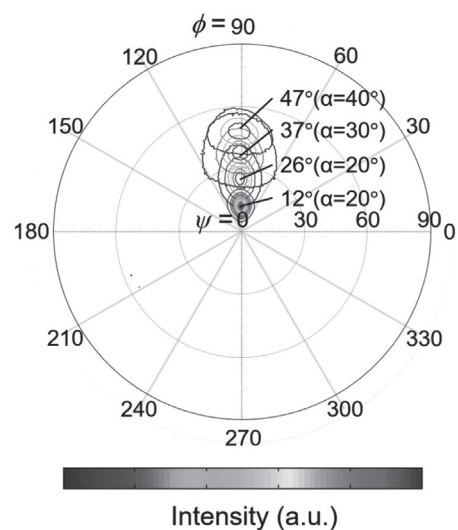


図3 (0002) 極点図

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要因であると考えられる。

図4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。

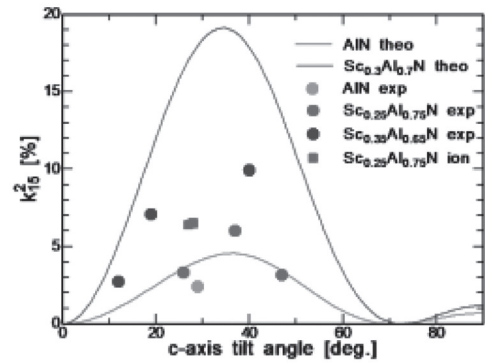


図4 作製したScAlN膜の電気機械結合係数 k_{15}^2 のc軸傾斜角度依存性

3. SAW伝搬理論解析による最適なScAlN薄膜/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, LLSAWデバイスに最適なScAlN薄膜/圧電単結晶基板(LiNbO₃および水晶)構造を決定した。

3.1 ScAlN薄膜/LiNbO₃圧電単結晶基板上でのLLSAW伝搬特性^[4]

図5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 $h/\gamma < 0.04$ では増加し, $h/\gamma \approx 0.04$ で最大値(約7700m/s)となる。 $h/\gamma < 0.04$ では減少に転じ, 約7350m/sに収束する。伝搬減衰は, $h/\gamma > 0.1$ 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 $h/\gamma < 0.1$ で減少し, $h/\gamma \approx 0.04$ で最小値(約6600m/s)となる。 $h/\gamma > 0.1$ では増加する。また伝搬減衰は h/γ 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36°Y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。

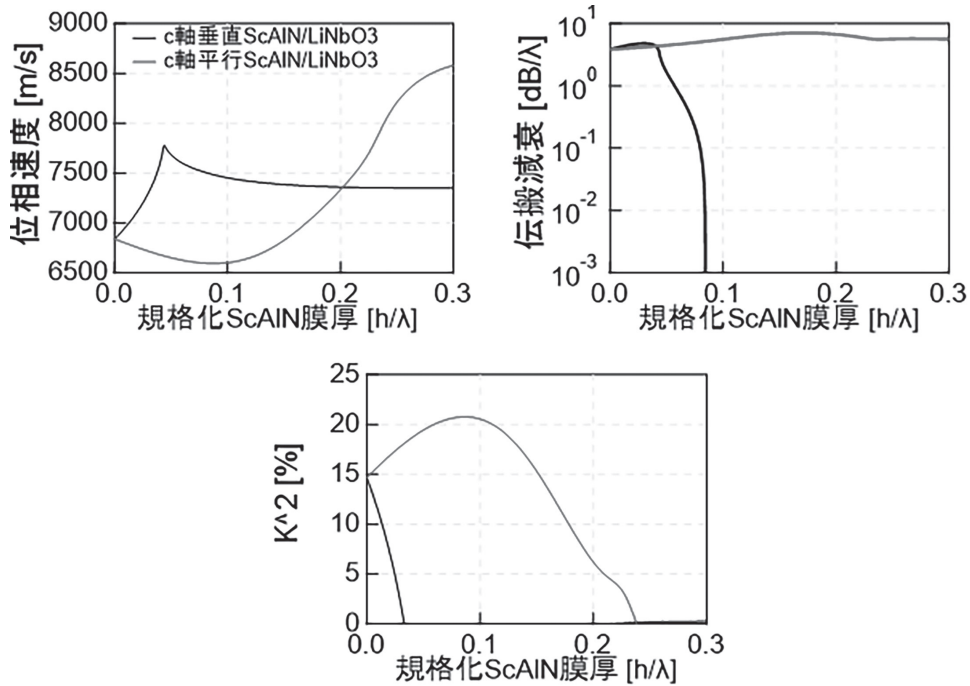


図5 ScAlN 膜 /LiNbO₃ 基板上での LLSAW 位相速度, 伝搬減衰, 結合係数の ScAlN 膜厚依存性の数値計算結果

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 θ 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 6 (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/λ < 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 θ 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 θ 角度と規格化膜厚を発見することができなかった。

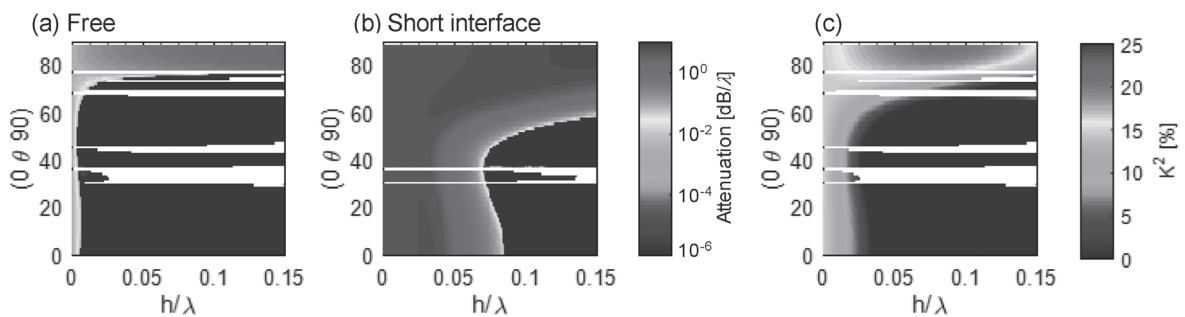


図6 ScAlN 膜 /LiNbO₃ 基板上での LLSAW 伝搬減衰, 結合係数の ScAlN 膜 c 軸傾斜角度依存性の数値計算結果

3.2 ScAlN 薄膜/水晶圧電単結晶基板上での LLSAW 伝搬特性^[5]

回転 Y カット 45° X 伝搬水晶基板のカット角が LLSAW の結合係数および伝搬減衰に及ぼす影響を (0° 90° 90°)ScAlN 層 / (0° θ 45°) 水晶基板構造での理論解析から評価した。図 7 (a) に示すように, θ = 125° において伝搬減衰が極小値を示した。また図 7 (b) に示す

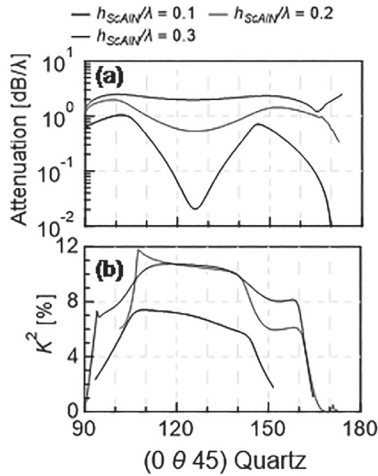


図7 (0° 90° 90°)ScAlN/(0° 45°)水晶構造上 LLSAW の (a) 伝搬減衰 (短絡表面), (b) 結合係数と水晶基板第2オイラー角依存性

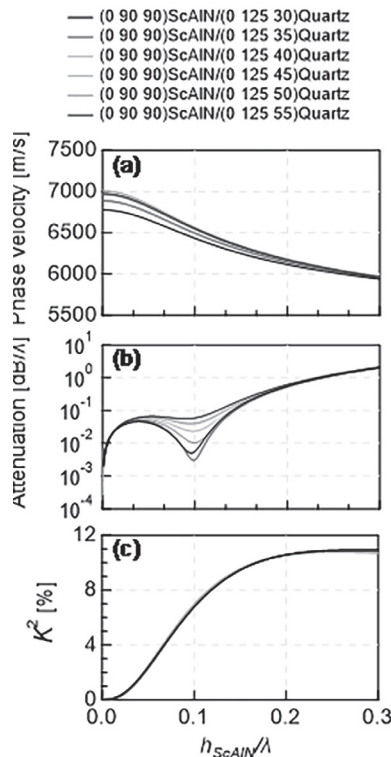


図8 (0° 90° 90°)ScAlN/(0° 125° Ψ)水晶構造上 LLSAW の (a) 位相速度, (b) 伝搬減衰 (短絡表面), (c) 結合係数

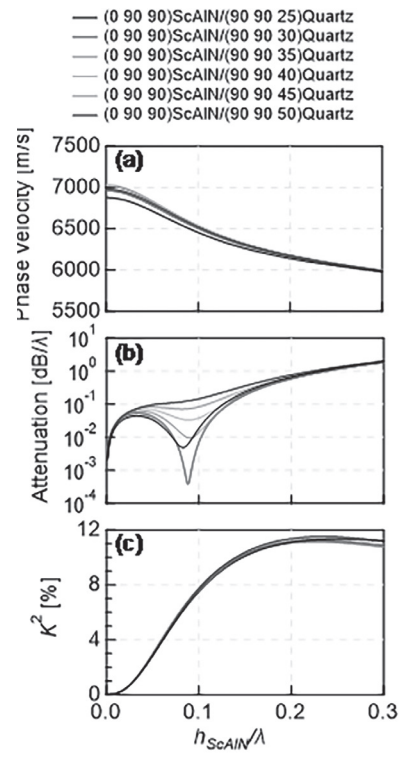


図9 (0° 90° 90°)ScAlN/(90° 90° Ψ)水晶構造上 LLSAW の (a) 位相速度, (b) 伝搬減衰 (短絡表面), (c) 結合係数

ように $\theta = 125^\circ$ での K^2 は 7% 以上を示している。よって ScAlN 層 / 回転 Y カット 45° X 伝搬水晶基板上を伝搬する LLSAW にて低伝搬減衰, 高結合係数を得るためには, AT カットが最適であることがわかった。次に, 各 h_{ScAlN}/λ における (0° 90° 90°)ScAlN/AT カット 30-55° X 伝搬水晶基板上を伝搬する LLSAW の位相速度, 伝搬減衰, 結合係数の理論解析を行った。図 8 (a) に示す位相速度はすべての構造で h_{ScAlN}/λ 増加に伴い, AT カット水晶基板の LLSAW 位相速度 (=6,700-7,000 m/s) から減少した。図 8 (b) に示す伝搬減衰は $h_{\text{ScAlN}}/\lambda = 0.1$ 付近で極小値を示した。この伝搬減衰極小値の大きさは水晶の SAW 伝搬方向に依存し, 35° X 伝搬時に最小値 (=0.003 dB/λ) となった。次に図 10 に各 h_{ScAlN}/λ における (0° 90° 90°)ScAlN/X カット 30-55° Y 水晶構造上 LLSAW の位相速度, 伝搬減衰, 結合係数の理論解析を示す。位相速度 (図 9 (a)) および結合係数 (図 9 (c)) は AT カット水晶基板の場合と同様の傾向となった。LLSAW 伝搬減衰はすべての構造で $h_{\text{ScAlN}}/\lambda = 0.09$ 付近で極小値を示した (図 9 (b))。AT カット水晶を基板とした時と同様に, 伝搬減衰極小値の大きさは水晶の SAW 伝搬方向に依存し, 30° Y 伝搬時に最小値 (=0.0003 dB/λ) となった。

図 10 に FEM 解析により計算した IDT/(0° 90°

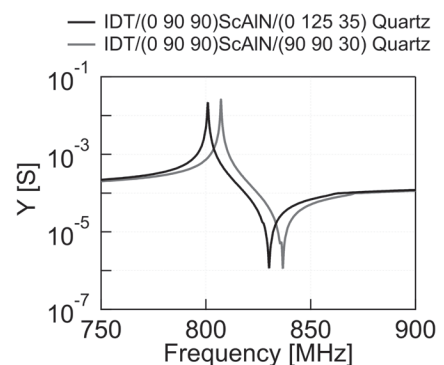


図 10 FEM 解析による IDT/ScAlN/水晶構造 LLSAW 共振子のアドミタンス周波数特性

90°)ScAlN 層 /AT35°X および X30°Y 水晶基板でのアドミタンス特性を示す。h_{ScAlN}/λは短絡表面での伝搬減衰が極小値となる h_{ScAlN}/λ = 0.1 (AT35°X 水晶), 0.09 (X30°Y 水晶) とそれぞれ設定した。両構造とも 800 MHz 付近に共振特性が観測された。AT35°X 水晶基板の場合は帯域幅 = 3.5%, アドミタンス比 = 86 dB, 共振 Q = 1,990, 反共振 Q = 2,040, X30°Y 水晶基板では帯域幅 = 3.5%, アドミタンス比 = 87 dB, 共振 Q = 2,480, 反共振 = 2,780 であった。よって LLSAW 伝搬においては, より高 Q 値となった (0° 90°)ScAlN 層 /X30°Y 水晶が最適構造であると考えられる。

図 11 に FEM 解析による共振周波数での x,y,z 方向の粒子変位分布 u_x,u_y,u_z を示す。低 Q 値 (= 約 8) となる X カット 36°Y 伝搬 LN (図 8 (a)) では, すべての粒子変位が基板内深い部分でも大きい。一方で, ScAlN/ 水晶構造 (図 8 (b,c)) では, 粒子変位が1波長以下の深さに集中しており, LLSAW は ScAlN 層に集中, かつ横波バルク波放射が抑制されるために, 低伝搬減衰および高 Q 値が得られたと考えられる。

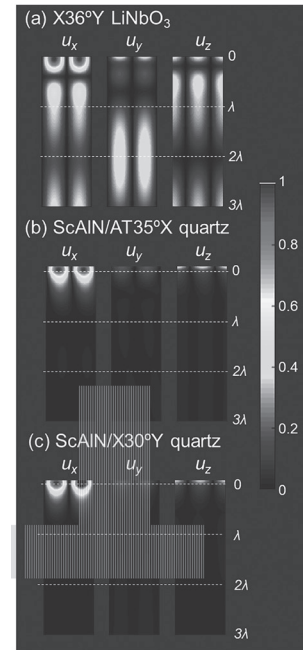


図 11 FEM 解析による共振周波数における (a)X36°Y LiNbO₃ 単体, (b)ScAlN/AT35°X 水晶, (c)ScAlN/X30°Y 水晶での粒子変位

4. 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^[4]

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 2 章で高配向膜の得られた条件 (表 1) で IDT / LiNbO₃ 基板の上に装荷した。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 3-1 章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。図 12 に作製した IDT / X カット 36° Y 伝搬 LiNbO₃ 基板および c 軸配向 ScAlN / IDT / X カット 36° Y 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/λ と大きいが, 装荷ありでは 0.08-0.10 dB/λ となり, 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 2.7 nm であり, LLSAW の波長 (4.8 μm) 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。

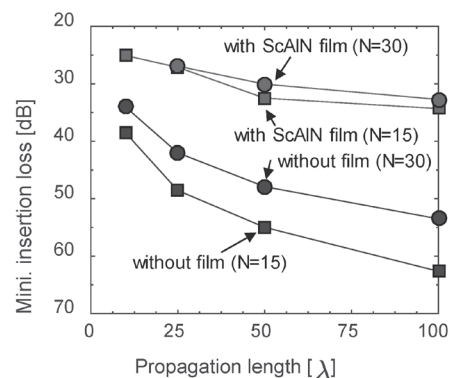


図 12 ScAlN / IDT / LiNbO₃ LLSAW デバイスでの最小挿入損失の伝搬距離 L 依存性

5. 結論

ScAlN 成膜中のスパッタ粒子入射角度, イオン照射を制御することで c 軸方向の制御を試みた。c 軸が最大 50 度傾斜した ScAlN 膜の形成に成功した。また, それらの膜の結合係数は AlN 単結晶の値よりも大きくなった。

ScAlN 膜を LiNbO₃ および水晶上に装荷した場合の LLSAW 伝搬特性の解析を行った。c 軸平行 ScAlN 膜を LiNbO₃ に装荷した場合, 結合係数が増幅する事がわかった。但し, 低伝搬減衰との両立は実現できなかった。一方, c 軸平行 ScAlN 膜を水晶に装荷した構造では高位相速度, ある程度大きな結合係数, 低伝搬減衰が両立することを明らかにした。

6. 参考文献

- [1] T. Sato and H. Abe, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 45, 136 (1998).
- [2] F. Matsukura and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 07KD04 (2014).
- [3] T. Yanagitani and M. Suzuki, Appl. Phys. Lett. 105, 122907 (2014).
- [4] M. Suzuki, M. Gomi, and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 07LD06 (2018).
- [5] M. Suzuki, N. Sawada, and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys. 58, SGGC08 (2019).