次世代通信システムに向けた「圧電層/高音速層/基板」 からなる SAW フィ ルタの開発

研究代表者 鈴木 雅視 山梨大学 大学院総合研究部工学域 助教

1 研究背景

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(a))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、膨大な情報通信量を必要とするスマートフォン、タブレット等の急速な発達・ 普及に伴い、さらなる通信大容量化や高速化が求められ、3 GHz 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。現在実用化されている圧電単結晶基板単体からなる SAW デバイス(図 1(a))を次世代通信帯 3 GHz 以上で動作させる場合、SAW の位相速度が 4,000 m/s 程度の SAW モードを利用 しているため、櫛型電極幅を 0.3 µm 以下とする必要がある。しかし電極幅 0.5 µm 以下であると電気抵抗や 耐電力等が劣化するため、このデバイス構造では 3 GHz 以上への対応は不可能であった。そのため SAW フ ィルタは今後の高周波帯域移行に対応できず、AIN 薄膜共振子を用いたフィルタへ置き換わるとされている。



3GHZ 以上動作を実現する周波数フィルタ用 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
- ・高い温度安定性⇒環境変動に対応可能

高 SAW 位相速度,高結合係数をもつ SAW モードとして,漏洩弾性表面波(LSAW)および縦型漏洩弾性表 面波(LLSAW)モードがあり,次世代 SAW 周波数フィルタ応用のための伝搬モードとして有望視されてい る。但し,従来の SAW デバイスの構造(図 1(a))において,LLSAW は基板内部に横波バルク波を放射しな がら伝搬するため,SAW 伝搬減衰が大きくなり,高Q値が得られないという欠点をもつ。

このような背景の基,「アモルファス AIN 薄膜/圧電単結晶[1]」,「ScAIN 膜/圧電単結晶[2]」,「圧電薄板と 高音速基板の異種材料接合[3,4]」等の図 1(b)のような層状構造を用いた高周波化に対応可能な SAW デバイス が報告されている。各構造での特徴は表1に示す。層構造基板を用いることで従来の単層構造では達成しえ ない低伝搬減衰,高結合係数は得られているが各性能が両立できない,また熱膨張率が異なる異種基板同士 の接合,圧電基板を数 100 nm まで薄板化する研磨による基板の割れや界面の剥離など様々な問題が発生し ているのが現状である。

構造	圧電層	基板	状況	伝搬モード	位相速度	結合係数	LLSAWでの 伝搬減衰	温度安定性
圧電層/高音速層/高温度安定性基板	ScAIN, YbAIN,CrAIN	高音速層/ 高温度安定基板	本課題	LLSAW	7000 m/s~ ?	© ?	0?	0?
圧電単結晶基板のみ	なし	LiNbO3, LiTaO3	実用化	IJ—‡SAW	~4000 m/s	0	×	SiO2装荷 により©
高音速層/圧電単結晶基板	アモルファスAIN	LiNbO ₃ , LiTaO ₃	論文レベル	LLSAW	7000 m/s~	×	Ø	Δ
	c軸平行ScAIN	LiNbO ₃	論文レベル	LLSAW	7000 m/s~	Ø	\times	×
圧電薄板/高音速基板	LiNbO3, LiTaO3	水晶	論文レベル	LLSAW	6000 m/s~	0	0	0
	LiNbO3, LiTaO3	音響ミラー層基板	論文レベル	LLSAW	6000 m/s~	0	0	0

表1報告されている SAW デバイス構造と本研究の性能比較

2 本研究の目的・特色

本研究では次世代通信システム(3 GHz 以上)に対応可能な高周波フィルタに向け,「高 SAW 位相速度, 高結合係数,低 SAW 伝搬減衰,高い温度安定性」をすべてを満たし,かつ広く産業応用が進んでいるスパ ッタ法で形成可能な新たな層構造基板「他元素ドープ AIN 圧電層/高音速層/高温度安定性基板 (図 1(c))」の 創成とその基板を用いた SAW フィルタの開発を目的とする。そこで高位相速度をもつ LSAW, LLSAW モー ドに対して,①圧電層,②高音速層,③基板の材料,材料特性,結晶方位等を最適化することで上述した要 求の両立を目指す。圧電層,高音速層がスパッタ法で形成可能であれば大口径化も可能であり,かつ各層の 材料選択の幅も広がる。

- ①圧電層: 結合係数は主に圧電層の圧電性の大きさに左右される。そこで申請者がこれまでの研究で発見 した結合係数が最大 17%かつスパッタ法で形成可能な「巨大圧電性他元素ドープ AIN 膜 (ScAIN, YbAIN, CrAIN)」を圧電層として用いる。
- ②高音速層:弾性波には位相速度が遅い層にエネルギーが集中するという特徴があり、圧電層と基板間への高音速層挿入により圧電層に SAW のエネルギーを集中させることで、伝搬減衰の低減が可能となる。この層挿入により基板選択の自由度も確保できる。また申請者はこれまでに高音速層装荷による LLSAW 伝搬減衰の低減を実現している[1,2]。そこで本課題では他元素ドープ AIN 膜より音速が速いと予想されるアモルファス AIN, Al2O3, SiO2 膜を高音速層の候補とし、伝搬特性に影響を及ぼす膜厚の最適化も行う。
- ③基板: 圧電層より温度特性が優れた水晶を基板として用いる。水晶は周波数温度係数が圧電層とは正負号が異なるため、打ち消しあいにより高い温度安定性が確保できると予想される。また基板の結晶方位も結合係数、伝搬減衰に影響を及ぼすため、カット角の検討も行う。

3 SAW 伝搬理論解析および FEM 解析による最適な層構造基板の探索

まずはLSAW およびLLSAW 伝搬に最適な ScAIN 圧電層,水晶基板の膜厚,オイラー角を決定するために, 図 2(a)に示すような「空気/ScAIN 圧電層/水晶基板」構造を伝搬する RSAW, LSAW, LLSAW の薄膜表面が 電気的に自由,電気的に短絡した場合での位相速度,伝搬減衰を Farnell と Adler の SAW 伝搬解析法により 計算した。結合係数 K² は K²=200*(vr-vm)/vr (vr:自由表面時の位相速度,vm:電気的短絡時の位相速度)から求め た。水晶基板の材料定数には,櫛引らの定数を用いた。Sc_xAl_{1-x}N 内 Sc 濃度は最も圧電性増幅する x=0.4 とし た。Sc_{0.4}Al_{0.6}N 圧電層の弾性定数,圧電定数には,caro らの第一原理計算から算出された値を用い,密度は 3,601 kg/m³,誘電率は AlN 単結晶の値とした。伝搬減衰を持つ LSAW および LLSAW では,山之内らの方法 を Farnell と Adler の SAW 伝搬解析法に組み込むことで解析を行った。また IDT/ScAIN 圧電層/水晶基板構造 SAW 共振子の周波数特性を有限要素法(FEM)により解析した(解析ソフトウェア:Femtet,ムラタソフトウェ ア)。図 2(b)に解析モデルを示す。モデルの両側は周期境界条件,底面は完全整合層(PML),周期 IDT(Al:1000Å) の波長*λ*,交叉幅,基板厚はそれぞれ 8µm,25*λ*,10*λ*とした。ScAIN の膜厚,オイラー角,水晶基板のオイラ ー角は SAW 伝搬理論解析の結果から決定した最適条件をそれぞれ設定した。また,各材料の機械損および 誘電損は考慮していない。



図2 解析モデル

3-1 ScAIN 圧電層/水晶基板上を伝搬する LSAW 特性

図3にScAIN単板上を伝搬するLSAWでの結合係数を示す。(0°90°60°)の時, K²(=6.3%)は最大となった。一方で,(0°90°60°)ScAIN でのLSAW 伝搬減衰は 0.13 dB/λと大きいため,水晶基板との層構造により伝搬減衰 改善を目指す。

次に(0° 90° 60°)ScAIN 層/((0° θ0°)水晶基板構造での理論解析から,回 転 Y カット X 伝搬水晶基板のカット角が LSAW の結合係数および伝搬 減衰に及ぼす影響を評価した。図 4(a)に示すように,伝搬減衰はθ=129.5° において,極小値を示した。またこの水晶基板オイラー角での K2 は4.5% 以上を示している(図 4(b))。よって ScAIN 層/回転 Y カット X 伝搬水晶 基板上を伝搬する LSAW にて低伝搬減衰,高結合係数を得るためには, 水晶基板オイラー角は, (0° 129.5° 0°)が最適であると考えられる。



図3 ScAIN 単層上を伝搬する LSAW の結合係数と c 軸 傾斜角度□との関係



図4 (0° 90° 60°)ScAlN/(0° θ0°)水晶構造上 LSAW の(a)伝搬減衰,(b)結合係数の水晶基板オイラー角依存性

各 $h_{\text{ScAIN}}\lambda$ における(0° 90° 60-72°)ScAIN/(0° 129.5° 0°)水晶構造上 LSAW の位相速度, 伝搬減衰, 結合係数の 理論解析を行った。図4(a)に示す位相速度は, hScAIN/□増加伴い, (0° 129.5° 0°)水晶基板の LSAW 位相速度 (=5,100 m/s)から減少した。図4(b)に示す LSAW 伝搬減衰では, 極小値を示す $h_{\text{ScAIN}}\lambda$ が存在する。この極小 値は ScAIN 単層の LSAW 伝搬減衰よりも一桁以上小さいため, ScAIN/水晶基板構造においても圧電薄板/水 晶基板構造と同様に LSAW の低伝搬減衰化が得られることがわかった。図4(c)に示す結合係数は $h_{\text{ScAIN}}\lambda$ =0.2 付近で最大値を示し, この K^2 値は ScAIN 単層より高結合化している。一方, ScAIN 層/X カット水晶, Z カッ ト水晶では LSAW での高結合化, 低伝搬減衰は得られなかった。



図 5 (0° 90° 60-72°)ScAlN/(0° 129.5° 0°)水晶構造上 LSAW の(a)位相速度, (b)伝搬減衰 (短絡表面), (c)結合 係数

図 6 に FEM 解析により計算した IDT/(0° 90° 66° < ψ<72°)ScAIN/(0° 129.5° 0°)水晶基板でのアドミッタンス特性を示す。 h_{ScAIN}/λは短絡表面での伝搬減衰が極小値付近となる h_{ScAIN}/λ=0.33 (ψ=66°), 0.28 (ψ=69°), 0.23 (ψ=72°)とした。ψ=66° では帯域幅=2.9%, アドミタンス比=93 dB, 共振 Q=3,570, 反共振 Q=4,060, ψ=69° では帯域幅=2.9%, アドミタンス比=100 dB, 共振 Q=5,210, 反共振=5,620, ψ=72° では帯域幅=2.7%, アドミタンス比=93 dB, 共振 Q=3,910, 反共振=4,013 となった。よって LSAW 伝搬においては,高結合係数と高 Q 値を両立する(0° 90° 69°)ScAIN 層/(0° 129.5° 0°)水晶が最適構造であると考えられる。



図 6 FEM 解析による IDT/ScAIN/水晶構造 LSAW 共振子のアドミタンス周波数特性

3-2 ScAIN 圧電層/水晶基板上を伝搬する LLSAW 特性

図7にScAIN単板上を伝搬するLLSAWでの結合係数を示す。(0° 90° 90°) の時, K^2 (=12.5%)は最大となった。一方で, (0° 90° 90°)ScAIN でのLLSAW 伝搬減衰は9 dB/ λ と大きいため, LSAW と同様に水晶基板との層構造によ り伝搬減衰改善を試みる。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°)ScAIN 層 /((0° θ 45°)水晶基板構造での理論解析から評価した。図 8(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 8(b)に示すように θ =125° での K^2 は 7%以上を示している。よって ScAIN 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 図 得るためには, AT カットが最適であることがわかった。





図 8 (0° 90° 90°)ScAlN/(0° θ 45°)水晶構造上 LLSAW の(a)伝搬減衰,(b)結合係数と水晶基板第 2 オイラー 角依存性

次に、各 h_{ScAIN}/λ における(0° 90° 90°)ScAIN/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 9(a)に示す位相速度はすべての構造で h_{ScAIN}/λ 増加伴い、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 9(b)に示す伝搬減衰は $h_{ScAIN}/\lambda=0.1$ 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。図 9(c)に示す結合係数は $h_{ScAIN}/\lambda=0.28$ 付近で最も大きな $K^2=11\%$ となった。この値は (0° 90° 90°)ScAIN 単層よりやや小さい値となり、LLSAW では高結合化は見られなかった。次に図 13 に各 h_{ScAIN}/λ における(0° 90° 90°)ScAIN/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 10(a))および結合係数(図 10(c))は AT カット水晶基板の場合とほぼ同様の傾向と なった。LLSAW 伝搬減衰はすべての構造で $h_{ScAIN}/\lambda=0.09$ 付近で極小値を示した(図 10(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。以上の結果から、ScAIN/水晶基板構造では、LSAW と同様に LLSAW 伝搬モードに おいても低伝搬減衰が得られることがわかった。一方で ScAIN 単板を超えるような高結合化はみられなかっ た。



図 11 に FEM 解析により計算した IDT/(0° 90° 90°)ScAIN 層/AT35°X および X30°Y 水晶基板でのアドミッタ ンス特性を示す。*h*_{ScAIN}/λは短絡表面での伝搬減衰が極小値となる *h*_{ScAIN}/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° 90°)ScAIN 層/X30°Y 水晶が最適構造であると考えられる。



図 11 FEM 解析による IDT/ScAIN/水晶構造 LLSAW 共振子のアドミタンス周波数特性

図 12 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 ux,uy,ux を示す。低 Q 値(=約 8)となる X カット 36°Y 伝搬 LN(図 12(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 12(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 12 FEM 解析による共振周波数における(a)X36°YLiNbO3単体, (b)ScAlN/AT35°X 水晶, (c)ScAlN/X30Y 水晶 での粒子変位

3-3 ScAIN 圧電層/中間層/水晶基板構造上の LLSAW 伝搬特性解析

図 13 に FEM 解析により計算した IDT/(0° 90° 90°)ScAlN 層($h_{ScAlN}/\lambda==0.09$)/中間層/X30°Y 水晶基板でのアド ミッタンス特性を示す。中間層には材料定数が既知のアモルファス Al2O3(図 9(a)), AlN(図 9(b)), SiO2(図 9(c)) を選択し、アモルファス層の規格化膜厚 h_a/λ は 0.001-0.1 と変化させ、中間層挿入が LLSAW 特性に及ぼす影 響を調査した。a-Al2O3 膜および a-AlN 膜を挿入した場合、 h_a/λ が増加するに従い、LLSAW 共振が高周波側 にシフトした。また、 $h_a/\lambda=0.01$ の時、共振 Q 値が最大 (a-Al2O3 挿入:9500, a-AlN 挿入:6000) となった。但 し帯域幅は h_a/λ 増加により減少した。一方で、a-SiO2 を挿入した場合、 h_a/λ が増加するに従い、LLSAW 共振 が低周波側にシフトしたが、 $h_a/\lambda=0.01$ の時、共振 Q 値(=6300)、帯域幅(=3.65%)がともに増加した。以上の 結果より、IDT/(0° 90° 90°)ScAlN 層($h_{ScAlN}/\lambda=0.09$)/X30°Y 水晶基板にアモルファス SiO2 層を $h_a/\lambda=0.01$ 程度挿





図13 FEM 解析による IDT/ScAIN/中間層/水晶構造 LLSAW 共振子のアドミタンス周波数特性

4 層構造基板形成のための ScAIN 膜の結晶配向性制御技術

SAW 伝搬理論解析による最適構造探索の結果から,結合係数が大きくとるためには他元素ドープ AIN 膜内の c 軸方向制御が必要となることがわかった。そこで, c 軸方向制御が可能な「スパッタ粒子斜入射成膜法」,または「イオンビームアシスト成膜法[5]」による成膜をおこなうため,研究室に既存の成膜装置の改造を行った。図 14 に改造後の成膜装置概略図と外観写真を示す。



図14 成膜装置の概略図と外観写真

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 ScAIN 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。スパッタ粒子を基板に対して斜入射させること で、 c 軸が傾斜する。図 15 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 ScAIN 膜の形成も行った。成膜中の イオンビーム照射に対してウルツ鉱型 AIN の各結晶面はスパッタ率異方性をもつ。ビーム照射によりスパッ タ率の高い(0001)粒は成長が阻害、c 軸が基板に対して平行となる(11-20)や(10-10)結晶粒が優先的に成長し、 c 軸平行膜が形成される。しかし、(0002)極点図から作製した ScAIN 膜の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 軸傾斜角度制御は実現できず、LSAW、LLSAW デバイス応用に最適とされる c 軸平行膜(オイラー角(0° 90° ψ))の形成には至らなかった。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、AIN 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 16 に本研究で作製した ScAIN 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 AIN, ScAIN 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, AIN 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 ScAIN 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 ScAIN 薄膜のさらなる圧電性改善の可能性を示した。





図 16 作製した ScAIN 膜の電気機械結 合係数 k₁₅²の c 軸傾斜角度依存性

5 まとめ

ScAIN 圧電層/水晶基板構造上の LSAW, LLSAW の伝搬特性,共振特性について理論解析を行った。以下の構造において圧電薄板と水晶の異種接合構造と同様に,高結合化と LSAW, LLSAW の低伝搬減衰化が観測された。

LSAW: (0° 90° 69°)ScAlN/(0° 129.5° 0°)水晶 LLSAW: (0° 90° 90°)ScAlN/(0° 125° 35°)水晶 (0° 90° 90°)ScAlN/(90° 90° 30°)水晶

特に位相速度=約6500m/s, 伝搬減衰=0.003dB/2以下, 結合係数=約7%を示す ScAIN 圧電層(hscAIN/2=約0.1)/ 水晶基板構造を用いた LLSAW デバイスは, 高周波化, 高Q値, 広帯域幅の両立が期待できる。FEM 解析に よる IDT/ScAIN 圧電層/水晶基板でのLLSAW 共振特性でも上述した高性能化を示唆する結果が得られている。 さらに, 中間層としてアモルファス SiO2 膜挿入によりさらなる高結合係数化と高Q値化も確認した。一方 で, LSAW・LLSAW に最適な層構造基板の作成には成膜装置不良(高加速イオンビームが引き出せない)に より至らなかった。今後は成膜装置の再整備・改造, 層構造基板およびデバイス作製を行い, 実験的な評価 を行う予定である。

【参考文献】

- [1] F. Matsukura and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 07KD04 (2014)
- [2] M. Suzuki, M. Gomi, and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 07LD06 (2018).
- [3] J. Hayashi, K. Yamaya, M. Suzuki, S. Kakio, H. Suzaki, T. Yonai, K. Kishida, and J. Mizuno, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 07LD21 (2018).
- [4] T. Kimura, Y. Kishimoto, M. Omura, and K. Hashimoto, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 07LD15 (2018).
- [5] M. Suzuki and T. Yanagitani, in Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2011, p. 312.

〈発	表	資	料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月	
Analysis of longitudinal leaky surface acoustic wave propagation characteristics on piezoelectric ScAlN layer/ sapphire or quartz substrate	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 58, pp. SGGC08	2019年6月	
Analysis of leaky surface acoustic wave characteristic propagating on high piezoelectric ScAlN film / high velocity quartz substrate	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 59, pp. SKKC07	2020 年 4 月	
ScAlN 圧電層/水晶基板上を伝搬する SAW 特性理論解析	第 48 回 EM シンポジウム	2019年6月	
Theoretical Analysis of Leaky SAW Propagation Characteristics on ScAlN film/Quartz	The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics	2019年11月	
Analysis of leaky surface acoustic wave propagation characteristics on piezoelectric ScAIN layer / quartz substrate	2020 IEEE Ultrasonics Symposium	2020年9月予定	