

LiTaO₃・LiNbO₃ 薄板と水晶基板の接合による SAW デバイス特性の向上

Improvement of Surface Acoustic Waves Property on LiNbO₃ or LiTaO₃ Thin Plate Bonded to Quartz Substrate



栗本 浩平*
Kouhei Kurimoto



博士(工学) 大崎 智**
Dr. Satoru Osaki



岸田 和人***
Kazuhito Kishida



米内 敏文***
Toshifumi Yonai



博士(工学) 水野 潤****
Dr. Jun Mizuno



博士(工学) 垣尾 省司*****
Dr. Shoji Kakio

要 旨

スマートフォンに代表される携帯電話には SAW (Surface Acoustic Wave: 弾性表面波) デバイスが不可欠だが、次世代携帯電話と言われている 5G 携帯電話には現状よりも高性能な特性を持った SAW デバイスが求められている。

そこで本報では、SAW デバイスの高性能化を目指して、1 波長以下の板厚をもつ LiTaO₃ 薄板または LiNbO₃ 薄板と AT カット水晶基板を接合した構造のリーキー弾性表面波 (L-SAW)、および縦型リーキー SAW (LL-SAW) の伝搬特性を検討した。理論解析により、接合構造では粒子変位が表面付近に集中するため、単体よりも電気機械結合係数 K^2 が増加する板厚が存在することが明らかになった。実際に AT カット水晶基板と接合させた試料を用いて K^2 を測定した結果、36° YX-LT 上の L-SAW において LT 単体の 5.9% から 11.8% に、X31° Y-LT 上の LL-SAW において LT 単体の 3.2% から 8.5% にそれぞれ増加した。また、接合試料では単体試料よりも共振特性、周波数温度係数も向上することがわかり、目標とする特性を持った SAW デバイスの開発に道筋をつけることが出来た。

— Synopsis —

SAW devices are generally used to a cellular phone represented by smart phone, but new SAW devices with the special quality higher-performance than the current state are demanded for 5G cellular phone said to be a next-generation cellphone.

In this research, aiming for high performance of SAW device, we investigated propagation characteristic of leaky surface acoustic wave (L-SAW) and longitudinal-type leaky SAW (LL-SAW) on the structure where LiTaO₃ thin plate or LiNbO₃ thin plate having a plate thickness of 1 wavelength or less and AT cut quartz substrate are bonded. Theoretical analysis revealed that there is a plate thickness that increases the electromechanical coupling coefficient K^2 compared with the single plate because the particle displacement concentrates near the surface in the bonded structure. As a result of actually measuring the K^2 using the sample bonded to the AT cut quartz substrate, it increased from 5.9% (of LT single plate) to 11.8% (in the L-SAW on 36° YX-LT), and from 3.2% (of LT single plate) to 8.5% (in the LL-SAW on X 31° Y-LT) respectively. In addition, it was found that the resonance characteristics and the temperature coefficient of frequency also improved in the bonded specimen as compared with the single specimen, and it was possible to pave the way to the development of the SAW device having the target characteristics.

*: 結晶事業推進室 室蘭分室
Crystal Business Promotion Office
Muroran Branch Office

** : 室蘭研究所
Muroran Research
Laboratory

*** : 結晶事業推進室
Crystal Business
Promotion Office

**** : 早稲田大学
University of
Waseda

***** : 山梨大学
University of
Yamanashi

1. 緒 言

現在、スマートフォンに代表される携帯電話には SAW (Surface Acoustic Wave: 弾性表面波) デバイス (図 1: 圧電体基板上に形成されたくし型電極 (IDT: Inter Digital Transducer) により、特定の周波数帯域の電気信号を取り出す素子) が複数個搭載されており、その基板には圧電体であるタンタル酸リチウム LiTaO₃ (LT)、もしくはニオブ酸リチウム LiNbO₃ (LN) が主に用いられている。現状の携帯電話には 800MHz 帯～2.5GHz 帯の周波数帯が用いられているが、次世代携帯電話と言われている 5G 携帯電話にはそれぞれ 3.4～3.6GHz 帯、<6GHz 帯の周波数帯が割り当てられると言われている。それらに対応するためには高周波化、広帯域化、高 Q (Quality factor: 共振周波数における信号の鋭さ) 化、温度特性の安定化などに対応した SAW デバイスが求められており、国内外で研究開発が行われている。

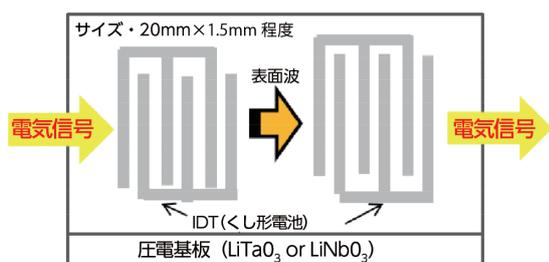


図1 SAWデバイスの概略図

SAW デバイス分野においては、従来の LN や LT 等の圧電基板のみを用いた半無限構造では、次世代携帯電話に必要な特性を満たすことが困難であるため、例えば高安定化対策として、SiO₂ 温度補償膜の装荷^[1-5]、サファイヤ (Al₂O₃) やガラス等の膨張係数の小さい支持基板との接合^[6-8]、広帯域化として非常に高い結合係数 (55%) をもつ LN 薄板中の SH (Shear Horizontal) 型板波の利用^[9]等が検討されてきた。最近では、音響インピーダンスの高い薄膜と低い薄膜から成る多層膜と、LT 薄板を組み合わせた構造を用いた極めて高い Q 値と良好な温度安定性を両立させた “Incredible High Performance SAW resonator” が発表され^[10] 注目を集めている。

著者らは過去に、LN や LT 基板上に高音速な AlN 薄膜を装荷すると、リーキー SAW (Leaky SAW: L-SAW) や、高音速な縦型リーキー SAW (Longitudinal-type LSAW: LL-SAW) の伝搬減衰が低減することを理論的、実験的に明らかにしたが、結合係数についても減少してしまう問題点がある^[11-13]。

一方近年、異種材料同士を接合させて新たな機能性を発現させる技術が材料工学の広い分野で発展を続けて

おり、最近では主に Si ウエハを基板とする接合技術が MEMS を用いたセンサデバイス等に適用されている。SAW デバイス分野では、主に LT と Al₂O₃ の接合構造が上述のような高安定化対策に利用されている。この場合、圧電基板の板厚は 5 波長以上である。

著者らは、平成 27 年度より 1 波長以下の板厚をもつ LT 薄板、または LN 薄板を高音速かつ単体での温度特性が良好である水晶支持基板 (Quartz) と接合した基板 (図 2) による SAW デバイス特性の向上に取り組んでいる。本報では上記の複合基板について理論的、実験的に検討した結果について述べる。

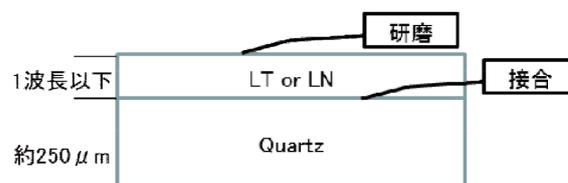


図2 複合基板の概略図

2. 開発目標

2.1 L-SAW を利用した SAW デバイスの開発目標

L-SAW はレイリー SAW (Rayleigh-SAW: R-SAW) と比較して電気機械結合係数 (K^2) が大きい、横波型であるために反射係数が高いなどの特徴を有している波モードであるが、弾性波エネルギーを基板内部に放射しながら伝搬するため、本質的に伝搬減衰を有している。このため市販されている LT、LN 基板は伝搬減衰が小さくなるカットで基板が用いられている (例えば 36° YX-LT や 41° YX-LN など)。現状 SAW デバイス用基板としては主に 36° Y カット付近の X 伝搬-LT が用いられており、36° YX-LT の SAW 特性は伝搬速度 $v=4178$ m/s、 $K^2=4.8\sim 7.0\%$ 、周波数温度係数 Temperature Coefficient of Frequency: TCF) = -33 ppm/°C である。著者らは 36° YX-LT 基板を単体での温度特性が良好である AT-Quartz と貼り合わせた後、36° YX-LT 基板側を 1 波長以下に薄板化することで、36° YX-LT 基板の伝搬速度はそのままで K^2 を 10% 以上、TCF を 0 ppm/°C に向上させた SAW デバイス用基板の開発を目標とした。

2.2 LL-SAW を利用した SAW デバイスの開発目標

次世代 SAW デバイスに求められる高周波化、広帯域化等の特性を満たすためにはより位相速度が高速、 K^2 が大きい (以下、高結合) 基板が求められており、現状の L-SAW を利用した 36° YX-LT 基板の伝搬速度、 K^2 では限界がある。そのため従来とは異なる波モードである LL-SAW に着目した。LL-SAW はレイリー波に比べると 1.5 倍～2.0 倍の SAW 伝搬速度を得ることができるが、基

板に 2 種類のバルク波を放出しながら伝搬するため、1 dB/波長以上の非常に大きな伝搬損失が発生するという欠点があった。そのため LL-SAW が発現する X31° Y-LT 基板を用いて上記と同様に AT-Quartz と貼り合わせ薄板化することで、高速ながらバルク波による伝搬損失を抑えることを試みた。目標値は伝搬速度 $v=6000$ m/s 以上、 $K^2=10$ % 以上、TCF=-0 ppm/°C とした。表 1 に開発目標をまとめたものを示す。

表 1 開発目標値まとめ

特性	現状の値 (36° YX-LT)	L-SAW 目標値 (36° YX-LT/AT-Quartz)	LL-SAW 目標値 (X31° Y-LT/AT-Quartz)
伝搬速度	4178 m/s	4178 m/s	6000m/s以上
K^2	4.8~7.0 %	10%以上	10%以上
TCF	-33 ppm/°C	0 ppm/°C	0 ppm/°C

3. 理論解析

3.1 解析解による伝搬特性の算出

AT-Quartz と接合した LT 薄板、もしくは LN 薄板上の L-SAW、LL-SAW の伝搬特性について計算を行った。比較として c 面 Al₂O₃ (c -Al₂O₃) と接合した場合についても計算を行った。伝搬減衰をもつ L-SAW、LL-SAW の解析は Yamanouchi らの方法^[14]に基づき実施し、層構造に対する解析は Farnell と Adler の方法^[15]を用いた。なお LT、LN および Quartz の材料定数は Kushibiki らの定数^[16,17]を用い、Al₂O₃ の材料定数は Slobodnik らの定数^[18]を用いた。自由表面 (Free) の位相速度 v_f と、薄板の表面を電氣的に短絡した場合 (Metallized) の位相速度 v_m を求め、式 (1) より K^2 を求めた。

$$K^2=2 \times (v_f - v_m) / v_f \quad (1)$$

Quartz は異方性が大きいいため、接合時の伝搬特性は Quartz の伝搬方向に大きく依存すると考えられる。そこでまずは図 3 に AT-Quartz 上の X 軸からの伝搬角に対する (a) L-SAW、(b) LL-SAW の位相速度の計算値を示す。

L-SAW では 0° X 伝搬、および 90° X 伝搬、LL-SAW では 45° X 伝搬において最も高い位相速度を有することがわかる。これらの伝搬方位において、LT や LN の単体と最大の位相速度差を有するため、粒子変位の集中効果が期待できる。一方、 c -Al₂O₃ 上の伝搬角に対する L-SAW と LL-SAW の位相速度についても計算したが、それぞれ約 6,500、11,200 m/s であり、どの伝搬角でもほぼ一定であった。

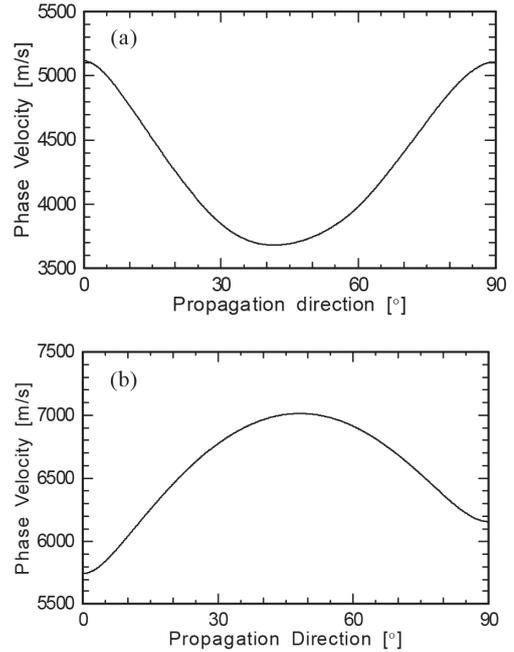


図 3 AT-Quartz 上 X 軸からの伝搬角に対する (a) L-SAW、(b) LL-SAW の位相速度

図 4 に 36° YX-LT 薄板を AT 90° X-Quartz、または c -Al₂O₃ と接合した場合の L-SAW の (a) 位相速度と (b) K^2 の計算値をそれぞれ示す。横軸は、波長 λ で規格化した LT 薄板の板厚 h/λ である。なお図中の c -Al₂O₃ との接合のグラフが途切れている範囲は解が得られない領域である。

いずれの場合においても、板厚の増加に従って、Quartz 単体の位相速度から LT 単体の位相速度に漸近することがわかる。 K^2 計算値に注目すると、いずれの場合においても単体の値よりも大きな K^2 が得られる板厚が存在することがわかった。特に 36° YX-LT 薄板の板厚 0.16 λ において単体の 2.3 倍 (11.9%) の K^2 を示すことが分かり、AT90° X-Quartz を支持基板とした場合において顕著な高結合化が期待できることが分かった。

参考として図 5 に 41° YX-LN 薄板と AT 90° X-Quartz、または c -Al₂O₃ と接合した場合についても L-SAW の (a) 位相速度と (b) K^2 の計算値をそれぞれ示す。LT の場合と同様の傾向を示し、板厚 0.19 λ において単体の 1.5 倍 (23.9%) もの K^2 が得られることが分かった。

図 6 には 36° YX-LT 薄板を AT 90° X-Quartz もしくは AT 0° X-Quartz と接合した場合の TCF について計算した結果を示す。先ほどと同様に横軸は、波長 λ で規格化した LT 薄板の板厚 h/λ である。いずれの場合においても板厚が薄くなるにつれて、LT 単体の温度特性よりも向上する傾向にあることが分かった。特に AT 90° X-Quartz と接合した場合、36° YX-LT 薄板の板厚 0.2 λ において目標である 0 ppm/°C が得られることが分かった。これは LT が薄くなるに従い、温度特性に優れた AT-Quartz の特性が顕著に表れたものと考えられる。

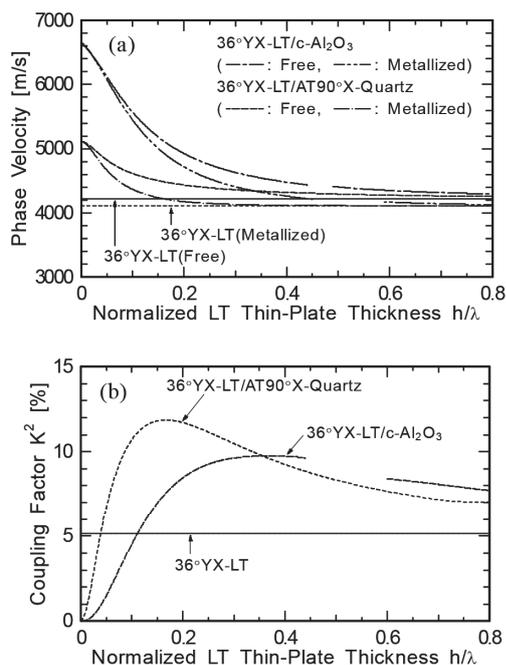


図4 LT 薄板接合構造上の L-SAW の (a) 位相速度と (b) K^2

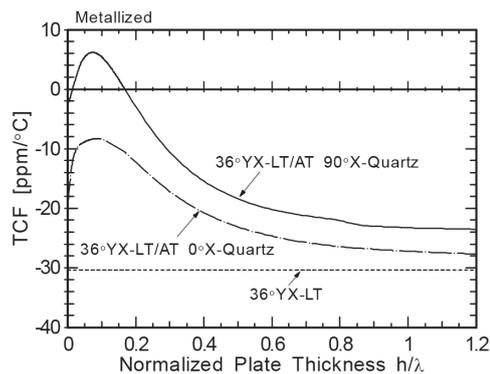


図6 LT 薄板接合構造上の L-SAW の TCF

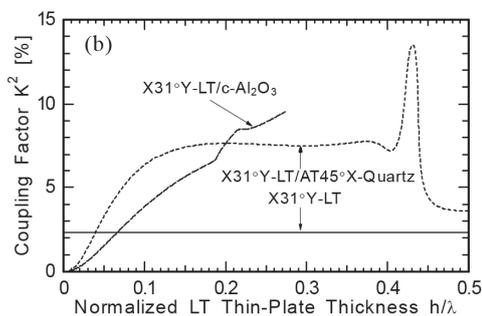
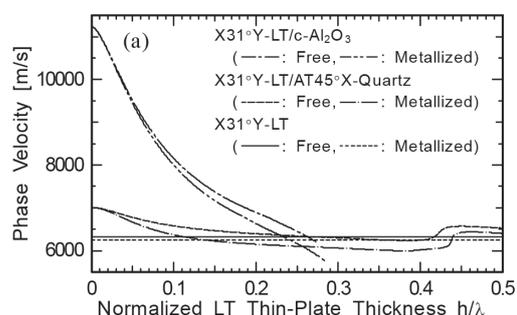


図7 LT 薄板接合構造上の LL-SAW の (a) 位相速度と (b) K^2

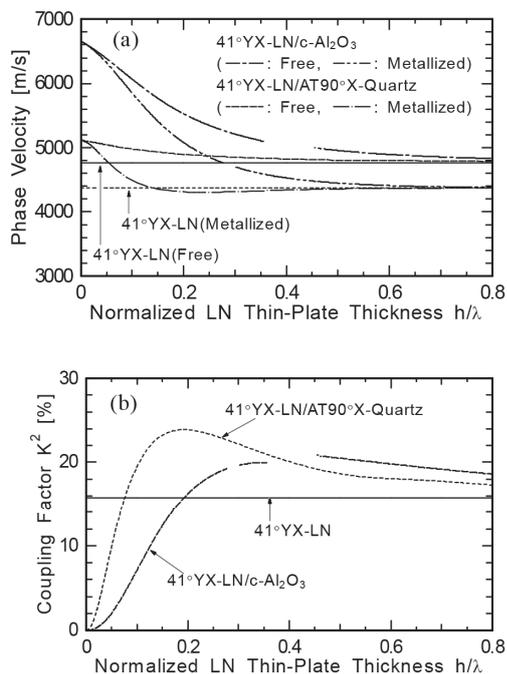


図5 LN 薄板接合構造上の LSAW の (a) 位相速度と (b) K^2

次に L-SAW と同様に、LL-SAW の (a) 位相速度と (b) K^2 について、X31° Y-LT 薄板と AT45° X-Quartz、または $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ と接合した場合の計算値を図 7 に示す。

LL-SAW においては、接合時の位相速度が LT 単体の位相速度よりも遅くなる特異な現象を示す板厚が存在することがわかった。また、板厚の増加に従って LL-SAW の K^2 は増加し、LT 単体の値よりも大きな値を示した。特に LT 薄板と Quartz との接合では、 $h/\lambda = 0.15 \sim 0.40$ において LT 単体の約 3 倍 (約 8%) の K^2 を示した。

図 8 には X31° Y-LT 薄板と AT45° X-Quartz を接合した場合の TCF について計算した結果を示す。X31° Y-LT 薄板の板厚が $0.1 \sim 0.4 \lambda$ の場合に $-10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ となり目標である $0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ には届かないが、単体よりも TCF が向上することが分かった。

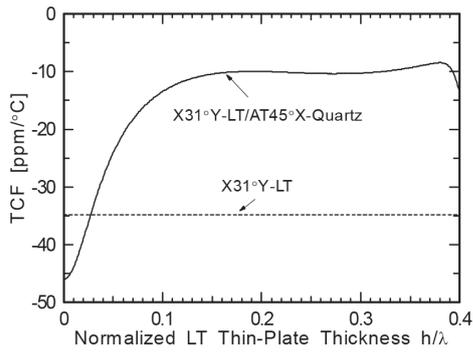
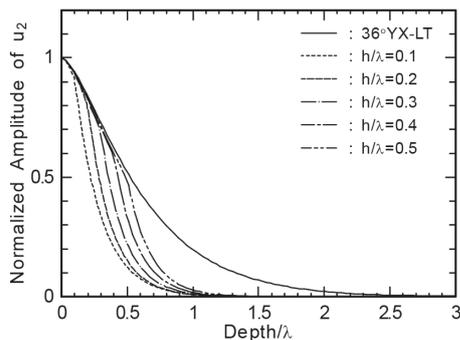


図8 LT 薄板接合構造上の LL-SAW の TCF

以上のように、L-SAWとLL-SAWに対して各特性について計算してきたが、LT単体と支持基板の位相速度差は、Quartzの方が $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ よりも小さいにもかかわらず、Quartzと接合すると、 $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ と接合した場合と同等か、それ以上の K^2 を示すという興味深い理論解析結果が得られた。

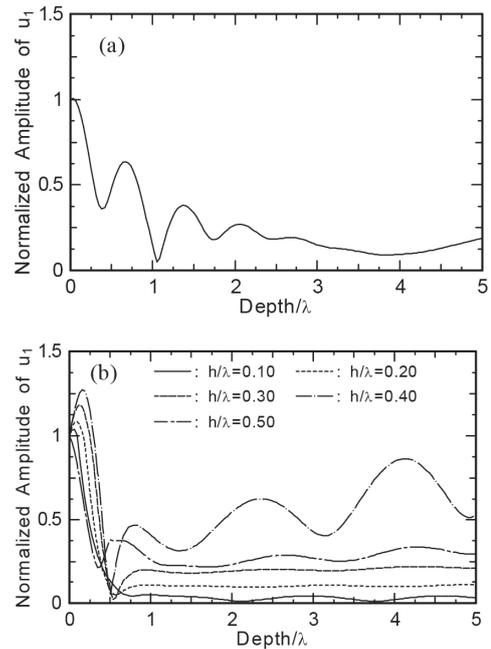
上述のような高結合化の要因を検討するために、L-SAWとLL-SAWのそれぞれに対し、深さ方向に対する粒子変位分布について計算を行った。まずは $36^\circ\text{YX-LT/AT90}^\circ\text{X-Quartz}$ 上のL-SAWについて、短絡表面におけるSH成分(u_2)の変位分布を図9に示す。なお変位は表面の値で規格化してある。計算から接合構造の変位分布は、LT単体のものと比較すると表面付近に集中すること及び規格化板厚が薄いほど集中効果が高いことがわかった。

図9 $36^\circ\text{YX-LT/AT90}^\circ\text{X-Quartz}$ 上 LSAWの u_2 (SH成分)の粒子変位分布

同様に、 $\text{X31}^\circ\text{Y-LT/AT45}^\circ\text{X-Quartz}$ 上のLL-SAWについて、(a)LT単体、(b)接合構造の短絡表面における縦波成分(u_1)の変位分布を図10に示す。LT単体では表面から深さ方向5波長以上にわたって変位が分布しているが、接合構造では表面から1波長以内に変位が集中している。このようにL-SAWやLL-SAWの粒子変位が圧電薄板の表面付近に集中することにより、 K^2 が増加したのではないかと考えられる。

また図10において、特に $h/\lambda=0.10$ では表面から1

波長以上深い領域における変位は小さい。これはLL-SAWの伝搬減衰が小さいことに相当しており、薄板化により伝搬減衰を抑えることが出来ている。一方、 $h/\lambda=0.20$ 以上では板厚の増加に従って深い領域の変位が増加し、LL-SAWの伝搬減衰も増加する。従って、LL-SAWの K^2 が特に増加する $h/\lambda=0.15\sim 0.40$ の範囲を用いようとした場合、伝搬減衰を低減させる方策が別途必要と考えられる。

図10 $\text{X31}^\circ\text{Y-LT/AT45}^\circ\text{X-Quartz}$ 上 LLSAWの u_1 (縦波成分)の粒子変位分布 (a)LT単体、(b)接合構造

3.2 有限要素法による解析

有限要素法 (Finite Element Method : FEM) を用いて、 $\text{X31}^\circ\text{Y-LT}$ 接合構造上に形成した IDT 型共振器 ($\lambda=8.0\ \mu\text{m}$, 交叉幅 $W=25\ \lambda$, 電極 Al 膜厚 $0.1\ \mu\text{m}$) の LL-SAW の共振特性について解析を行った。解析モデルとして、支持基板の板厚を $10\ \lambda$ とし、1周期分の IDT の両側に周期境界条件 (無限周期構造)、底面に完全整合層をそれぞれ仮定した。

解析例として図11に、支持基板を (a) $\text{AT45}^\circ\text{X-Quartz}$ 、(b) $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ とした場合の LL-SAW の共振特性であるアドミタンスの振幅 $|Y|$ を示す。アドミタンス $|Y|$ の軌跡から共振 Q を求めることが出来る。またグラフより得られた共振周波数 f_r における複素数アドミタンス Y_r 、反共振周波数 f_a における複素数アドミタンス Y_a (図12に各値の位置を示す) を用いて式 (2) より共振の強さを表すパラメータであるアドミタンス比、式 (3) より広帯域の指標である比帯域幅を求めた。

$$\text{Admittance Ratio} = 20 \log (Y_r/Y_a) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

$$\text{Fractional Band Width} = |f_a - f_r| / f_a \quad [\%] \quad (3)$$

Quartz と接合した場合、 $h/\lambda = 0.10$ のとき最も大きなアドミタンス比 66 dB が得られ、LT 単体の 24 dB よりも格段に向上することが分かった。比帯域幅や共振 Q も LT 単体の 2.1%、43 から 3.0%、1057 にそれぞれ増加した。また $h/\lambda = 0.15$ 以上では、板厚の増加に伴い比帯域幅は増加したが、アドミタンス比と共振 Q は減少する結果となった。これらの板厚依存性については、前節で述べた K^2 や粒子変位分布の板厚依存性を反映したものと考えられる。一方、 $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ との接合では、 $h/\lambda = 0.20$ のとき最も大きなアドミタンス比 :45 dB、共振 Q:397 が得られたが、Quartz と接合した方がより良好な共振特性が得られることがわかった。

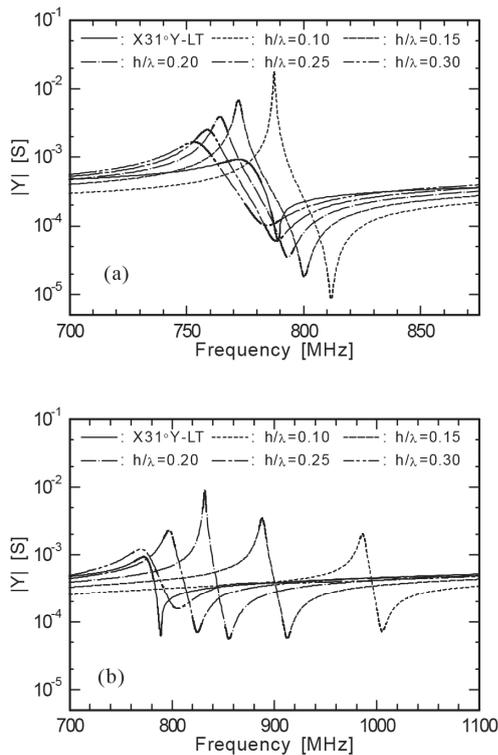


図 11 FEM 解析による X31° Y-LT 上の LL-SAW 共振特性 (無限周期構造)
(a) AT45° X-Quartz、(b) $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

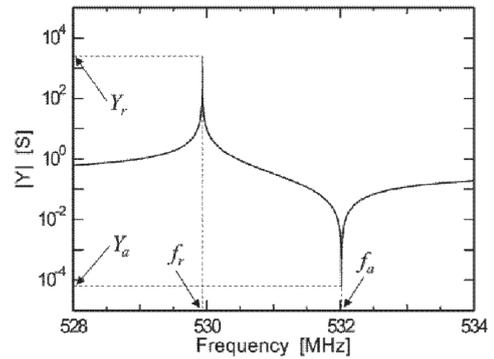


図 12 共振特性の各値 (f_r , Y_r , f_a , Y_a)

4. 実験結果

4.1 接合基板の製作

AT-Quartz と 36° YX-LT (L-SAW 用)、X31° Y-LT (LL-SAW 用) を用いて実際に接合試料を作製した。まずこれらの $\phi 4$ インチ径のウエハ (0.2 ~ 0.8 mm 厚み) を洗浄した後に、接合面をそれぞれ活性化させ表面同士を接合させた。接合後の外観写真を図 13 に示す。その後、数時間程度の熱処理を行うことで接合強度の向上を図った。 $\phi 4$ インチの接合ウエハから 20×15 mm 程度の試料に切断後、LT 側を $h = 3.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ の板厚を目指して研磨した。研磨前後のサンプル外観写真を図 14 に示す。研磨面上に IDT 型共振器 (シングル電極、 $\lambda = 8$ or $20 \mu\text{m}$ 、対数 $N = 10 \sim 30$) を Al 蒸着膜 (膜厚 $0.15 \mu\text{m}$) で形成した。AT-Quartz の伝搬方向は、まずは前節で述べたように L-SAW に対して高結合化の効果が大きな 0° X 方向とした。LL-SAW に対しては本来 45° X 方向が望ましいが、接合時の都合上今回は 60° X 方向とした。

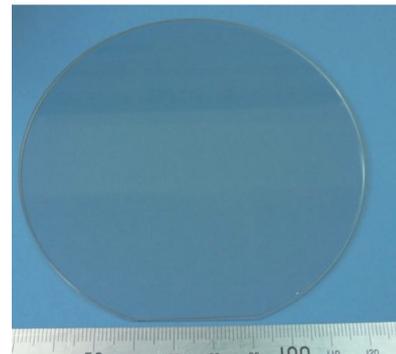


図 13 $\phi 4$ インチ基板同士接合後の外観写真

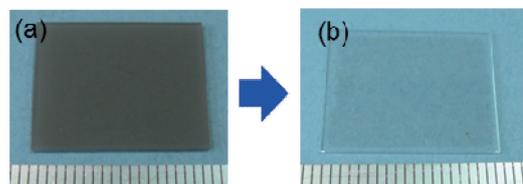


図 14 接合サンプルの外観写真
(a) 研磨前 (b) 研磨後

IDT のアドミタンス特性より求めた L-SAW ($\lambda=8\ \mu\text{m}$, $N=10$), LL-SAW ($\lambda=20\ \mu\text{m}$, $N=10.5$, 反射器 5 本) に対する K^2 測定値を規格化板厚 h/λ に対する理論値と共に図 15、16 にそれぞれ示す。

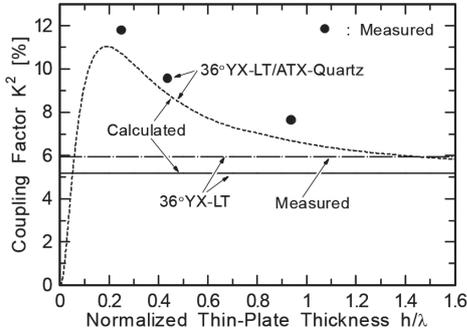


図 15 36° Y-LT/AT0° X-Quartz 試料と LT 単体試料の L-SAW の K^2 測定値と理論値

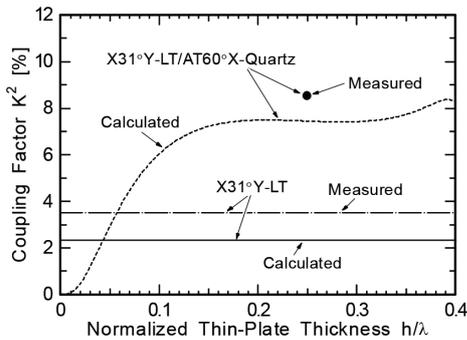


図 16 X31° Y-LT/AT60° X-Quartz 試料と LT 単体試料の LL-SAW の K^2 測定値と理論値

IDT の内部反射により理論値よりも大きな値が測定されたが、36° YX-LT 上の L-SAW において LT 単体の 5.9% から 2 倍の 11.8% ($h/\lambda=0.25$) に、X31° Y-LT 上の LL-SAW においては LT 単体の 3.2% から 2.4 倍の 8.5% ($h/\lambda=0.25$) にそれぞれ増加した。以上から実測値についても概ね計算結果を反映した結果を示すことも確認できた。

図 17、18 にはそれぞれ、L-SAW ($h/\lambda=0.44$, $\lambda=8\ \mu\text{m}$, $N=30$) と LL-SAW ($h/\lambda=0.23$, $\lambda=32\ \mu\text{m}$, $N=30$) の共振特性の測定値を示す。L-SAW では LT 単体試料と比較すると、アドミタンス比が 22 dB から 39 dB に、比帯域幅が 4.5% から 5.3% にそれぞれ増加した。LL-SAW においても、アドミタンス比が 6.26 dB から 22.2 dB に、比帯域幅が 4.02% から 4.87% への増加が観測された。また LL-SAW において伝搬速度を計算すると 6125 m/s となり目標値を達成できた。

図 19 には 36° YX-LT と AT 0° X-Quartz を接合した試料の TCF を測定した結果を示す。LT 単体 (TCF=-35.3 ppm/°C) に比べて h/λ が 6.25 ~ 0.375 と薄くなるにつれて TCF も -26.0 ppm/°C、-17.2 ppm/°C と向上していくことが

確認できた。今後も引き続き温度特性の評価について検討していく予定である。

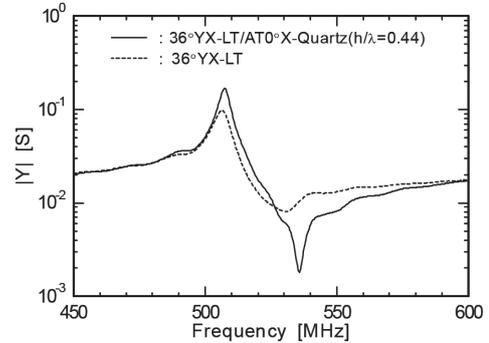


図 17 36° YX-LT/AT0° X-Quartz 試料 ($h/\lambda=0.44$) と LT 単体試料の L-SAW 共振特性測定値 ($N=30$)

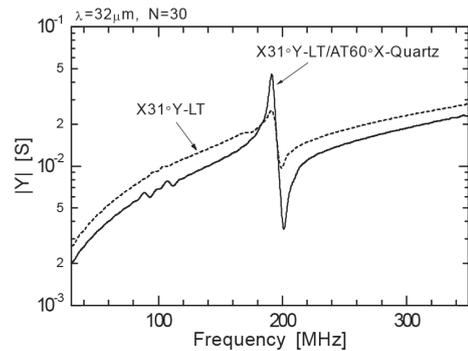


図 18 X31° Y-LT/AT60° X-Quartz 試料 ($h/\lambda=0.23$) と LT 単体試料の LL-SAW 共振特性測定値 ($N=30$)

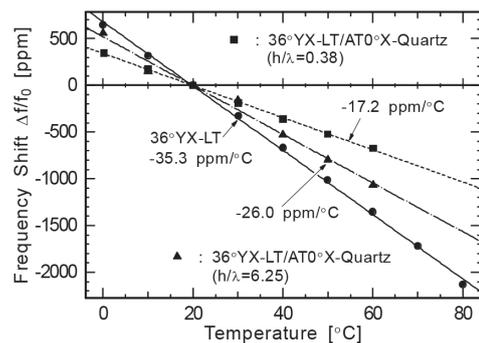


図 19 36° YX-LT/AT0° X-Quartz 試料の異なる h/λ に対しての TCF 実測値

5. 結 言

1 波長以下の板厚をもつ LT 薄板を AT カット Quartz と接合した構造上の L-SAW、LL-SAW の伝搬特性について理論的、実験的に検討した本研究により以下の結果を得た。

- 1) 理論解析により、接合構造では粒子変位が表面付近に集中するため、単体よりも K^2 が増加する板厚が存在することを明らかにした。また、TCF についても 0 ppm/°C となる板厚が存在することを明らかにした。
- 2) 共振特性の FEM 解析により、接合構造では、単体の特性よりもアドミタンス比や比帯域幅が増加することがわかった。
- 3) 実際に AT カット水晶と接合させた試料を用いて K2 を測定した結果、36° YX-LT 上の L-SAW において LT 単体の 5.9% から 11.8% に、X31° Y-LT 上の LL-SAW において LT 単体の 3.2% から 8.5% にそれぞれ増加した。
- 4) 共振特性や TCF についても測定した結果、接合試料では単体試料よりも共振特性(アドミタンス比、比帯域幅)や TCF が向上することがわかり、測定値についても概ね計算結果を反映した結果を示すことも確認できた。
- 5) L-SAW、LL-SAW を利用した SAW デバイスについて、伝搬速度や K^2 については開発目標を達成し、TCF についても目標に近い値まで達成できた。

参 考 文 献

- [1] K. Yamanouchi and T. Ishii, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, 3480 (2002).
- [2] M. Kadota, T. Nakao, N. Taniguchi, E. Tanaka, M. Miura, K. Nishiyama, T. Hada and T. Komura, Jpn. J. Appl. Phys., **44**, 4527 (2005).
- [3] H. Nakamura, H. Nakanishi, T. Tsurunari, K. Matsunami, Y. Iwasaki, K. Hashimoto, and M. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 4052 (2008).
- [4] T. Murata, M. Kadota, T. Nakao, K. Matsuda, and K. Hashimoto, Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 07GG05 (2009).
- [5] S. Matsuda, M. Hara, M. Miura, T. Matsuda, M. Ueda, Y. Satoh, and K. Hashimoto, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., **58**, 1684 (2011).
- [6] K. Onishi, A. Nanba, H. Sato, T. Ogura, S. Seki, Y. Taguchi, M. Tomita, O. Kawasaki, and K. Eda, Proc. IEEE. Ultrason. Symp., 1997, p. 227.
- [7] K. Yamanouchi, K. Kotani, H. Odagawa, and Y. Cho, Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1999, p. 239.

- [8] M. Miura, T. Matsuda, M. Ueda, Y. Satoh, O. Ikata, Y. Ebata, and H. Takagi, Proc. IEEE Ultrasonics. Symp., 2005, p. 573.
- [9] M. Kadota and S. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 07KD04 (2016).
- [10] T. Takai, H. Iwamoto, Y. Takamine, H. Yamazaki, T. Fuyutsume, H. Kyoya, T. Nakao, H. Kando, M. Hiramoto, T. Toi, M. Koshino, and N. Nakajima, IEEE Ultrasonics. Symp., 6A-2 (2016).
- [11] F. Matsukura, M. Uematsu, K. Hosaka, and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys., **52**, 07HD02 (2013).
- [12] F. Matsukura and S. Kakio, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 07KD04 (2014).
- [13] S. Kakio and K. Hosaka, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 07KD11 (2016).
- [14] K. Yamanouchi and K. Shibayama, J. Appl. Phys., **43**, 856 (1972).
- [15] G. W. Farnell and E. L. Adler, in Physical Acoustics, ed. W. P. Mason and R. N. Thurston (Academic Press, Inc., New York, 1972) p. 35.
- [16] J. Kushibiki, I. Takanaga, M. Arakawa, and T. Sannomiya, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **46**, 1315 (1999).
- [17] J. Kushibiki, I. Takanaga, and S. Nishiyama, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **49**, 125 (2002).
- [18] A. J. Slobodnik, Jr., E. D. Conway, and R. T. Delmonico, Microwave Acoustic Handbook, Vol. 1 A. Surface Wave Velocities, AFCRL-TR- 73-0597 (1973).