Ca₃TaGa₃Si₂O₁₄ 圧電単結晶上のラブ波型 SH 波

Shear-horizontal surface acoustic wave on Ca₃TaGa₃Si₂O₁₄ piezoelectric single crystal

鈴木涼人¹, 鈴木雅視¹, 垣尾省司¹, 木村悟利²(¹山梨大, ²Piezo Studio) Ryoto Suzuki¹, Masashi Suzuki¹, Shoji Kakio¹, and Noritoshi Kimura² (¹Univ. of Yamanashi, ²Piezo Studio Inc.) E-mail: g21te013@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

近年の移動通信システムの急速な発展に伴い、弾性表面波(Surface Acoustic Wave: SAW) デバイスの広帯域化、高安定化、低損失化、 高周波化等が求められている. SAW デバイス には、主に LiTaO₃(LT)、LiNbO₃(LN)、水晶等 の圧電単結晶が利用されてきた. LT, LN は大 きな電気機械結合係数 K^2 を有する反面、周波 数 温 度 係 数 (Temperature Coefficient of Frequency: TCF)が大きい. 一方、水晶は良好な 温度特性を有するが、 K^2 が小さい.

La₃Ga₅SiO₁₄(LGS)や La₃Ga_{5.5}Ta_{0.5}O₁₄ 等のラ ンガサイト型圧電単結晶は,水晶の 3~5 倍の *K*²(~0.5%) とゼロの周波数温度係数 (Temperature Coefficient of Frequency: TCF)を有 する基板として注目されたが,材料コストが 高いことや結晶成長時の組成の制御が困難等 の問題があった.吉川らは,新規ランガサイ ト型圧電単結晶 Ca₃TaGa₃Si₂O₁₄(CTGS)を開発 することでこれらの問題を解決している[1].

一方, SAW 伝搬モードの一つにラブ波型 Shear Horizontal(SH)波がある. ラブ波型 SH 波 は基板表面に平行で伝搬方向に垂直な横波成 分のみから成るため,スプリアスが発生しづ らく,理論上伝搬減衰を持たない表面波とし て知られている.著者の垣尾らは,回転 Y カ ット 90°X 伝搬 LGS[オイラー角:(0°, θ, 90°)]上 に,Au 等の高密度薄膜を用いてすだれ状電極 (Interdigital Transducer: IDT)を形成すると,1% の K²とゼロ TCF を同時に示すラブ波型 SH 波 が得られることを明らかにした[2-4].

本研究では、この Au 薄膜装荷による高結 合化と高安定化を CTGS に適用し、Au/CTGS 上のラブ波型 SH 波の伝搬特性と共振特性を 理論的,実験的に検討した.また,Al 薄膜装 荷による Al/CTGS 上のラブ波型 SH 波につい ても,伝搬特性と共振特性を理論的,実験的 に検討した.

2. 伝搬特性の理論解析

図1に理論解析モデルを示す.空気/金属薄 膜/CTGS(0°, θ, 90°)の層構造であり、ラブ波型 SH 波の伝搬方向を x1, 基板深さ方向を x3 と し, x₂ 方向の振幅と位相は一様として解析し た. 層構造における解析は Farnell と Adler の 方法[5]を用いた.また、自由表面の位相速度 を求める際には、金属薄膜の誘電率を仮想的 に真空の誘電率として計算した. CTGS の材 料定数は Ohashi らの報告値[6,7]を用いた. Au の材料定数は Neighbours らの報告値[8]を, Al の材料定数は Sutton らの報告値[9]を等方近似 したもの[10]をそれぞれ用いた. K²は $K^2=2(v_f-v_m)/v_f$ より求めた. v_f , v_m はそれぞれ自 由,短絡表面の位相速度である.また,TCFは TCV-α₁₁より求めた. α₁₁は CTGS の伝搬方向 の線膨張係数であり, TCV は位相速度の温度 係数である.



図1理論解析モデル (a)Au/CTGS, (b)Al/CTGS



図2 カット角に対するラブ波型 SH 波の位相速度



図 2, 3 に, Au/CTGS(0°, θ, 90°)上のラブ波 型 SH 波の位相速度(短絡表面)と K² をそれぞ れ示す.また,図4(a),(b)には,Au/CTGS(0°, θ, 90°)上とAl/CTGS(0°,θ, 90°)上のTCF(短絡 表面)をそれぞれ示す.図中のパラメータは, 波長λで規格化した金属薄膜の膜厚 h/λである. 図4には後述するTCF 測定結果もプロットし てある.

図 2 より,位相速度は Au 膜厚の増加に伴って,CTGS 単体の約 3,000 m/s から単調に低減することがわかる.図 2 中に示した, $h/\lambda=0.1$ の Al/CTGS(0°, θ ,90°)の位相速度は, $h/\lambda=0.01$ の Au/CTGS(0°, θ ,90°)の位相速度と同程度であることがわかる.また,図 3 より全てのカット角において Au 薄膜装荷によって K^2 が格段に増加することがわかる.これは,Au 薄膜装荷によって基板表面に弾性波エネルギーが集中するためである.この K^2 の増加は $h/\lambda=0.02$ で飽和し、 $\theta=125^\circ$ において $h/\lambda=0.02$ のとき 2.27%の最大値を示した.この値は Au/



図4 カット角に対するラブ波型 SH 波の TCF

LGS 構造上の *K*² と比較すると約 2 倍である. 図 4 より, CTGS には正,および負の TCF を示すカット角の範囲がそれぞれ存在するこ とがわかる. Au 膜と Al 膜の TCF は負である ため, *h*/λの増加に伴い全てのカット角で負の 方向にシフトする.

上記の結果より、CTGS(0°, 134°, 90°)上に $h/\lambda=0.02$ のAu薄膜を装荷すると、2%程度の K^2 とゼロTCFを同時に満たすラブ波型SH波 が励振されることを理論的に明らかにした.

3. 共振特性の測定

前項の解析結果を踏まえて、CTGS(0°,134°, 90°)基板を用意し、AuのRFスパッタ膜を用 いて波長 λ =32 µm、交叉幅 W=25 λ 、対数 N=70.5 のIDT と N_R=25 本の反射器から成る共振子パ ターンを基板上に作製した.Auの膜厚 h は Cr 密着層(10 nm 膜厚)を含み 0.67 µm であり、規 格化膜厚(h/λ)は 0.02 である.



さらに、同じ (0°,134°,90°)CTGS 上に Al 蒸 着膜を用いてλ=6.4 μm, *W*=50λ, *N*=100.5, *N*_R=100の共振子パターンを作製した. Al の膜 厚は 0.35 μm である(*h*/λ=0.055).

また,後述するシミュレーションにおいて 最大の実効的電気機械結合係数を示した CTGS(0°,155°,90°)基板も用意し,同様に h=0.30 µm の Au 膜を用いて $\lambda=32$ µm($h/\lambda=0.009$), $W=25\lambda$, N=100.5, $N_{R}=50$ の共 振子パターン,およびh=0.35µm の Al 膜を用 いて $\lambda=6.4$ µm ($h/\lambda=0.054$), $W=50\lambda$, N=100.5, $N_{R}=100$ の共振子パターンを作製した.さらに. h=0.87 µm の Al 膜を用いて $\lambda=12$ µm($h/\lambda=0.072$), $W=25\lambda$, N=100.5 or 150.5, $N_{R}=0$ or 100 から成る共振子パターンを作製した. 図 5 に SAW 共振子の概略を示す.

ネットワークアナライザを用いて,これら SAW 共振子の共振特性を測定した.図6(a)~(c) に,Au-IDT,Al-IDT のラブ波型 SH 波の共振 特性をそれぞれ示す.図6(a)の Au-IDT, λ =32 µmにおいて,CTGS(0°,134°,90°)では86 MHz 付近に,CTGS(0°,155°,90°)では92 MHz 付近 に明瞭なラブ波型 SH 波の共振応答が観測さ れた.両試料に観測された94 MHz 付近の応 答はバルク波の応答と考えられる.共振特性 の実効的電気機械結合係数 K^2_{eff} ,アドミタン ス比,共振 Qを表 I に示す.Au-IDT/CTGS(0°, 134°,90°)の測定結果から,38.9 dBのアドミ タンス比と3,440の共振 Qが得られた.以下 の式で求めた K^2_{eff} は0.66%であり,後述する ようにシミュレーション値の約7割であった.

$$K_{eff}^2 = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{f_a - f_r}{f_a} \tag{1}$$

ここで f_r は共振周波数, f_a は反共振周波数である. Au-IDT/CTGS(0°, 155°, 90°)では、0.81%の K^2_{eff} , 53.0 dBのアドミタンス比、3,080の共振Qが得られ、Au-IDT/CTGS(0°, 134°, 90°)より



因 0 / / 似 至 S I 似 0 共 抓 付 住 側 足 柏 未

も大きなアドミタンス比と K²effを示した.

図 6(b) の Al-IDT/CTGS(0°, 155°, 90°), λ=12 μm においては 249 MHz 付近にラブ波型 SH 波の応答が観測され, 0.69%の K²eff, 59.1 dB の アドミタンス比, 6,220 の共振 Q 値が得られ た. これらの特性も表Iに示す. しかし共振・ 反共振周波数間にスプリアスが観測され, そ の低減方法について検討が必要である.

Structure	λ [μm]	h/λ	K^2_{eff} [%]	Admittance Ratio [dB]	Resonance Q
Au/CTGS(0°, 134°, 90°) N=70.5, N _R =25	32	0.02	0.66	38.9	3,440
Au/CTGS(0°, 155°, 90°) N=100.5, N _R =50	32	0.009	0.81	53.0	3,080
Al/CTGS(0°, 155°, 90°) N=100.5, N _R =100	12	0.072	0.69	59.1	6,220
Al/CTGS(0°, 134°, 90°) N=100.5, N _R =100	6.4	0.055	0.34	30.6	2,230
Al/CTGS(0°, 155°, 90°) N=100.5, N _R =100	6.4	0.054	0.70	44.7	2,340

表 I ラブ波型 SH 波の共振特性(測定値)

図 6(c)の Al-IDT/CTGS, λ =6.4 µm においても, 468 MHz 付近にラブ波型 SH 波の応答が観測 された.表 I 中にこれらの共振特性を示す. Al-IDT/CTGS(0°, 134°, 90°)において, K^2_{eff} は 0.34%であり,アドミタンス比は 30.6 dB,共振 Q 値は 2,230 であった.また,Al-IDT/CTGS(0°, 155°, 90°)においては,0.70%の K^2_{eff} ,44.7 dBのアドミタンス比,2,340の共振 Q 値が得られた.これら測定結果より,観測 周波数が異なるため,Au-IDTの共振特性と直 接比較はできないが,Al-IDT を用いても Au-IDT よりも大きな応答が観測され,Au 等の高 密度薄膜を用いなくても,通常の Al-IDT を用 いてラブ波型 SH 波の集中効果が得られるこ とを明らかにした.

両試料について、30°Cの共振周波数を基準 周波数(f₀)として、20 or 30°Cから 70~80°Cま で温度を変化させたときの共振周波数を測定 した.図 7(a)にその変化率(Δf/f₀)を示す. CTGS(0°,134°,90°)においては、Au-IDTとAl-IDTの変化率はいずれも温度に対して線形に 単調増加したため、一次関数でフィッティン グした勾配を TCF 測定値とした.図4 中にそ れらの TCF 測定値をプロットした.Au-IDTと Al-IDTの CTGS(0°,134°,90°)における TCF 測 定値は、それぞれ 21.5、43.5 ppm/°C であり、 いずれも理論値と一致した値が得られた.

一方, CTGS(0°, 155°, 90°)においては, Au-IDT と Al-IDT の変化率はいずれも CTGS(0°, 134°, 90°)と比較して高い安定性を示した. こ れらの拡大図を図 7(b)に示すように, 放物特 性を含む温度依存性が観測された.



図7 共振周波数変化率の温度依存性測定結果

特に $h/\lambda=0.072$ のAl-IDT/CTGS(0°, 155°, 90°) においては 55°C を頂点温度とする放物特性 であり、20~80°C の範囲で 46 ppm の周波数変 化率を示し、高安定な特性が得られた. 一次 +二次関数でフィッティングした 30°C にお ける一次係数を TCF 測定値として図 4 中にプ ロットした. CTGS(0°, 155°, 90°)における Au-IDT ($h/\lambda=0.009$), Al-IDT($h/\lambda=0.054$, 0.072)の TCF 測定値は、それぞれ 3.1, 2.1, 1.9 ppm/°C であり、 θ =155°においては理論値より正にシ フトした値を示した.以上の結果より、Au-IDT と Al-IDT のいずれを用いても、膜厚と CTGS カット角の選択によりゼロ TCF が得ら れることを明らかにした.

4. 共振特性のシミュレーション

有限要素法(Finite Element Method: FEM)を 用いて、上述の Al-IDT/CTGS(0°, 134°, 90°)の 試料パラメータと同様のモデルを仮定し、共 振特性を解析した.シミュレーション結果を 共振特性の測定結果とフィッティングするこ とにより CTGS の機械損を決定した.その結 果、機械損 1/Q_m=0.00048 が得られた.以降の シミュレーションにおいてはこの機械損を考 慮し、式(1)により K²eff のシミュレート値を求 めた.誘電損は考慮していない.図 8 にシミ ュレーションモデルを示すように、無限周期 構造、メタライゼーション比 *a/p*=0.5 の IDT モ デルを仮定し、カット角0を 134°と 155°に設 定した.

図 9に IDT の規格化膜厚 h/λ に対する K^2_{eff} のシミュレート値を示す. 図中には前述の K²eff 測定値もプロットしてある.いずれの IDT においても CTGS(0°, 134°, 90°)よりも CTGS(0°, 155°, 90°)のほうが高い K²eff を示し た. さらに, Al-IDT を用いても, h/λ=0.1 以上 の膜厚では Au-IDT と同等の K^2_{eff} が得られる ことを理論的に明らかにした. K^2_{eff} のシミュ レーション値の最大は, Au-IDT において h/λ=0.015 のとき 1.24%, Al-IDT において $h/\lambda=0.10$ のとき 1.22%であった. しかし, K^{2}_{eff} 測定値はシミュレーション値の 50~70%程度 である.これは、IDT の対数や反射器本数の 不足によるものと考えられる.また,基板表 面へのラブ波型 SH 波のエネルギー集中に寄 与する電極指幅がオーバーエッチングによっ て狭くなったことも原因として考えられる.

ここで、 K^{2}_{eff} シミュレーション値のカット 角依存性を解析した.規格化膜厚を最大の K^{2}_{eff} が得られた値(Al: $h/\lambda=0.1$, Au: $h/\lambda=0.021$) に固定した.図 10 に K^{2}_{eff} シミュレーション値 を示す.Au, Al のいずれにおいても 155°付近 で K^{2}_{eff} が最大値を示した.しかし、図 3 に示 したように、解析解においては 125°付近で K^{2}



が最大値を示した.このような相違は, IDT 下 のグレーティングモードと一様膜下の伝搬モ ードの振る舞いが異なることに起因すると考 えられる.

以上の検討結果より、Au-IDT においては $h/\lambda=0.02$ 、 $\theta=150^{\circ}$ で 1.21%の K^{2}_{eff} とゼロ TCF を同時に満たすこと、同様に Al-IDT において は $h/\lambda=0.1$ 、 $\theta=145^{\circ}$ で 1.15%の K^{2}_{eff} とゼロ TCF を同時に満たすことを明らかにした.

次に, IDT 下のグレーティングモードとー 様膜下の伝搬モードの相違について検討する ため,解析解における粒子変位とシミュレー ションにおける粒子変位を比較した.両解析 手法による Au/CTGS(0°, 134°, 90°),および Al/CTGS(0°, 134°, 90°)の最大粒子変位で規格 化した粒子変位(SH 成分, u2)を図 11 に示す. この結果から, Au においては IDT 下でも一様 膜下でも弾性波エネルギーの表面への集中効 果が高いが, Al においては IDT 下でなければ 弾性波エネルギーの表面への集中効果が得ら れないことが示された.

5. まとめ

本研究では, Au-IDT, または Al-IDT を形成 した CTGS 上のラブ波型 SH 波の伝搬特性と 共振特性を理論的,実験的に検討した.その 結果, 高密度な Au-IDT のみならず, 通常の Al-IDT を用いても, 基板表面へのラブ波型 SH 波のエネルギー集中効果が得られることを明 らかにした. Al-IDT(h/λ=0.072)によって励振 するラブ波型SH波は55°Cを頂点温度とする 放物特性を示し, 20~80℃の範囲で 46 ppm の 周波数変化率を示し,高安定な特性を示した. CTGS のカット角と電極膜厚の選択によって 約 1%の K^2_{eff} とゼロ TCF が同時に得られるこ と明らかにした. 具体的には, CTGS(0°, 145°, 90°)上に規格化膜厚 h/λ=0.1 の Al-IDT を形成 すると、1.15%の K²eff とゼロ TCF を同時に示 し, CTGS(0°, 150°, 90°)上に h/\lambda=0.02 の Au-IDT を形成すると、1.21%の K^2_{eff} とゼロ TCF を同時に示すことを明らかにした.

今後は, Al-IDT/CTGS(0°, 145°, 90°)に対する 実験的評価を進め, 室温でゼロ TCF が得られ る条件を確立させる. 謝辞 本研究は JST 研究成果最適展開支援プ ログラム(A-STEP)トライアウトの支援を受け ている.

参考文献

- 吉川,横田,鎌田,工藤,江口,"結晶材 料およびその製造方法,"特願 2014-173209, 特許第 6489574 号.
- [2] 垣尾,"弾性表面波素子," 特願 2003-072659, 特許第 4399587 号.
- [3] S. Kakio, M. Nozawa, and Y. Nakagawa, "High coupling and highly stable shearhorizontal-type surface acoustic wave on langasite with Au or Ta₂O₅ thin film," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43, no. 5B, pp. 2992-2995, (2004).
- [4] S. Kakio, M. Nozawa, and Y. Nakagawa, "Propagation characteristics of shearhorizontal-type surface acoustic wave on langasite with Au or Ta₂O₅ thin film," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 44, no.6S, pp. 4544-4547, (2005).
- [5] G. W. Farnell and E. L. Adler, "Elastic wave propagation in thin layers," in Physical Acoustics, ed. W. P. Mason and R. N. Thurston, pp. 35-59, 1972.
- [6] Y. Ohashi, M. Arakawa, T. Kudo, Y. Yokota, Y. Shoji, S. Kurosawa, K. Kamada, J. Kushibiki, and A. Yoshikawa, "Dependence of acoustic property on Al substitution for Ca₃Ta(Ga_{1-x}Al_x)₃Si₂O₁₄ single crystals," Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 07KB06 (2016).
- Y. Ohashi, M. Arakawa, Y. Yokota, Y. Shoji, A. Yamaji, S. Kurosawa, K. Kamada, and A. Yoshikawa, "Temperature dependence of acoustic property of Ca₃Ta(Ga,Al)₃Si₂O₁₄ single crystals," Jpn. J. Appl. Phys. 56, 07JB03 (2017)
- [8] J. R. Neighbours and G. A. Alers, "Elastic constants of silver and gold," Phys. Rev. 111 (1958) 707.
- [9] P. M. Sutton, "The variation of the elastic constants of crystalline aluminum with temperature between 63K and 773K," Phys. Rev., vol. **91**, no 4, (1953).
- [10] 室田, 平野, C.S. ラム, D.E. ホルト, 清 水, "アルミニウム薄膜を考慮した LST カ ット基板による弾性表面波デバイスの温 度特性,"電子情報通信学会論文誌 A, vol. J74-A, no. 9, pp. 1359-1365, (1991).