

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560365

研究課題名(和文) 逆プロトン交換を用いた縦波型リーキー弾性表面波の低損失化と高周波フィルタへの応用

研究課題名(英文) Loss reduction of longitudinal-type leaky surface acoustic wave by reverse proton exchange and its application to high-frequency filter

研究代表者

垣尾 省司 (KAKIO, Shoji)

山梨大学・医学工学総合研究部・教授

研究者番号：70242617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：次世代移動体通信の実現に向けて、LiNbO₃結晶などの圧電性を利用した弾性表面波フィルタの高周波化が強く要請されている。縦波型リーキー弾性表面波は、高速で伝搬するために高周波化に有利であるが、損失が非常に大きい。本研究では、LiNbO₃基板上に逆プロトン交換層を形成する、または高音速薄膜を装荷すると、縦波型リーキー弾性表面波のバルク波放射に起因する損失が格段に減少することを理論的、実験的に明らかにし、これまで困難であった低損失化を実現した。

研究成果の概要(英文)：Surface acoustic wave (SAW) devices with higher frequency have been strongly demanded to realize the next generation mobile communication system. The longitudinal-type leaky surface acoustic wave (LLSAW) is one of the SAW modes that is advantageous for application to high-frequency SAW devices. However, the LLSAW has huge inherent losses. In this study, it has been found theoretically and experimentally for the LLSAW propagating on LiNbO₃ substrate that, the losses due to bulk wave radiation can be considerably reduced by forming a reverse proton exchange layer or by loading with a dielectric thin film with a higher velocity than the substrate.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：弾性表面波 LiNbO₃ 逆プロトン交換 AlN薄膜 低損失フィルタ バルク波放射

1. 研究開始当初の背景

LiNbO₃(LN)や LiTaO₃(LT)などの誘電体単結晶の圧電性を利用した、フィルタやデュプレクサなどの弾性表面波(SAW)デバイスは、小型・軽量性と優れた電気的特性から、全世界の移動体通信を支える重要な役割を果たしている。特に、2GHz以下の周波数帯を用いる現在の第3世代携帯電話から、3.4~3.6GHz帯を利用する次世代(第4世代)携帯電話への進化、実現に向けて、端末用SAWデバイスの高周波化が急務である。現状多用されている圧電結晶基板と伝搬モード(例えば、42°YカットX伝搬LT上のリーキー弾性表面波(Leaky SAW: LSAW))を利用して高周波化を図ろうとすると、SAW励振用電極の周期を約半分に微細化する必要があるが、微細化には限界がある。従って、LSAWよりも伝搬速度が速いSAW伝搬モードの利用が不可欠である。その唯一のモードが、LSAWよりも1.5~2倍の伝搬速度をもつ縦波型リーキー弾性表面波(Longitudinal-type Leaky SAW: LLSAW)である。しかし、二種類のバルク波(表面に垂直・水平な横波)を基板内へ放射しながら伝搬するため、1dB/波長以上の非常に大きな伝搬損失を有するという問題点がある。LSAWでは、伝搬時に放射するバルク波は一種類(表面に垂直な横波)であるために、伝搬損失が小さい結晶方位(カット)が存在し実用されているが、LLSAWには、本質的にこのようなカットが無いことが明らかにされており、デバイス応用は極めて困難であった。

本研究者は、2010年度に科研費基盤研究(C)の成果として、LN基板表面付近にプロトン交換(Proton Exchange: PE)層を形成した後に、表層のみに逆プロトン交換(Reverse PE: RPE)層を形成することによって、弾性波速度の遅いPE層を基板内部に埋め込むと、LLSAWのバルク波放射に起因する損失が減少し、その伝搬特性や共振特性が格段に向上する条件が存在することを理論的、実験的に明らかにした。しかし、提案構造を作製した3インチXカットLNウェハ上のほとんどの領域で圧電性が不十分であり、歩留まりが極端に悪いという問題点があった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、RPE層を形成したLN上のLLSAWに対して、圧電性回復領域の比率を向上させるための作製条件を検討することを目的として研究を遂行した。

(2) RPE層を形成した基板構造の特徴は、表層の弾性波速度が、表層より深い領域の速度に比べて速いことである。従って、基板よりも弾性波速度が速い誘電体薄膜を装荷することによっても、LLSAW伝搬減衰の低減が可能であると期待される。そこで、高音速な誘電体薄膜材料であるAlNに注目し、LN上にAlN薄膜を装荷した場合のLLSAW伝搬特性を検討することも目的に加えて研究を遂

行した。

3. 研究の方法

(1) RPE法による低損失化

LLSAWの特性が格段に向上する反面、歩留まりが悪い試料の作製条件を基準として、3インチXカット36°Y伝搬LN(X36°Y-LN)ウェハ上に、RPE時、およびPE時の作製条件を変化させた試料を作製し、LLSAW共振特性を評価することにより、圧電性が回復した領域の比率が作製条件によってどのように変化するかを検討した。

ウェハ試料上に波長3.6μmのシングル電極指すだれ状電極(IDT)と反射器より成る共振子パターンをアルミニウム薄膜(膜厚0.02λ)で作製した。また、波長λ=3.6μm、開口長50λ、対数N=30のスプリット電極指の送受IDTを作製した。伝搬路長Lが、5λ、10λ、25λ、50λの四種を用意し、伝搬路の電気条件として自由表面(Free)、短絡表面(Metallized)、Shorted Gratingを用意した。試料上の1,800個(18種×100個)の共振子のうち、共振特性が誘導性を示した(アドミタンスの最小位相が負に及んだ)共振子の個数を、圧電性が回復した領域の比率とみなして評価した。基準試料において、誘導性を示した共振子は6個であった。また、送受IDT間の伝搬路長に対する最小挿入損失の勾配よりLLSAWの伝搬損失を求めた。

(2) 高音速薄膜装荷による低損失化

試料の作製

ロングスロースパッタ(Long-Throw Sputter: LTS)カソードを有するRFマグネトロンスパッタリング装置を用いてAlN薄膜を成膜した。LTSカソードは、試料を直接プラズマに曝さないため、滑らかな表面の薄膜を成膜することができる。

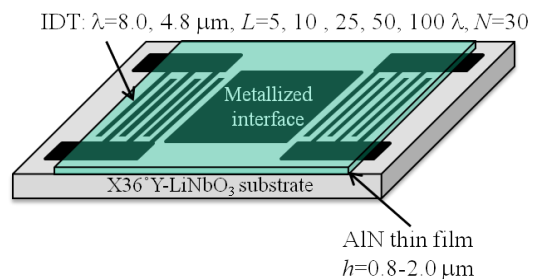


図1 試料の構造(AlN/IDT/X36°Y-LN)

SAW特性評価用試料の概観を図1に示す。X36°Y-LN上に波長λ=8.0, 4.8μm、伝搬路長L=5, 10, 25, 50, 100λ、対数N=30のシングル電極指のIDT対を、Al蒸着薄膜(膜厚1000Å)にて形成した。伝搬路は短絡表面である。次に、表1に示す成膜条件によりAlN薄膜をIDT対上に成膜し、膜厚h=0(未装荷)~2.0μmを有する試料を作製した。

X線回折パターンより、成膜されたAlN薄膜はc軸配向性を有することがわかった。し

かし、SiO₂ ガラス上に成膜した AlN 薄膜において測定された電気機械結合係数 K^2 は非常に小さい値であったため、成膜した AlN 薄膜は、非圧電薄膜であるとみなした。

表 1 AlN 薄膜のスパッタリング条件

ターゲット	Al (4N, 50 mmφ)
高周波電力 (W)	150
ガス流量 Ar:N ₂ (ccm)	30:15
ガス圧 (Pa)	0.75
基板温度 (°C)	150
成膜速度 (μm/h)	0.12

理論解析

LLSAW の理論解析に必要な AlN 薄膜の弾性定数 c_{11} , c_{44} を、X36°Y-LN 上を伝搬するレイリー型 SAW (Rayleigh-type SAW: R-SAW) の位相速度より算定した。薄膜と基板の境界面が短絡されている場合 (Metallized interface) について、R-SAW の位相速度を、理論解析により求めた。実験値と計算値の二乗誤差が最小となるように c_{11} , c_{44} を同時に決定した。

得られた弾性定数を用いて、AlN 薄膜を装荷した X36°Y-LN 上の LLSAW の位相速度と伝搬減衰を境界面短絡の場合について計算した。弾性定数の変化による影響を調べるため、決定した c_{11} , c_{44} に対して、係数パラメータ A を 0.4~1.5 の範囲で一様に变化させた弾性定数 A_{cj} を用いて計算した。

LLSAW 伝搬特性

図 1 の試料を用いて LLSAW 伝搬特性を実験的に評価した。位相速度は、中心周波数に波長 λ を乗じて求め、伝搬損失は伝搬路長さに対する最小挿入損失から求めた。また、LLSAW の最小挿入損失 (IL)、変換損失 (CL)、伝搬損失 (PL) より、IDT 内部から基板内部に放射されるバルク波放射損失 (BL) を、送受 IDT 対の中心間の伝搬路長 ($80 \lambda = L + 30 \lambda$) に対して $BL = IL - PL - CL$ の式より見積もった。CL は IDT のアドミタンス特性より求めた。

4. 研究成果

(1) RPE 層形成による低損失化

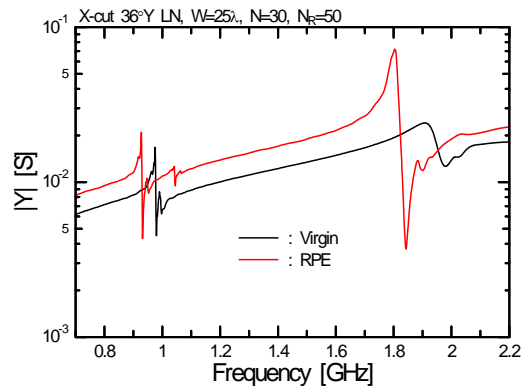
作製条件依存性

まず、RPE 時の処理温度を基準試料の 300 °C から 310 °C、または 320 °C に、処理溶液中の LiNO₃ 含有率 (Li⁺濃度に比例) を、33% から 66%、または 100% に変更し、これらを組み合わせた作製条件でいくつかの試料を作製し、共振特性を評価した。これらの試料上の誘導性共振子は、多いもので 4 個であったため、RPE 時の作製条件を変更しても、圧電性回復領域の比率向上に効果を示さないことがわかった。

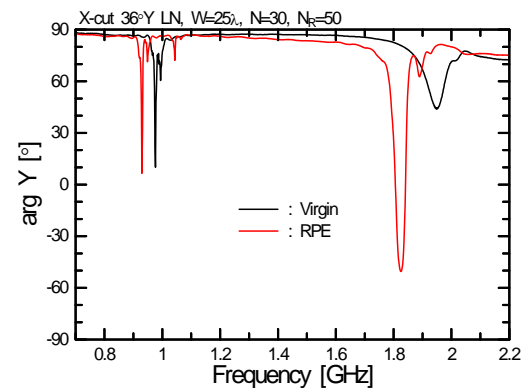
次に、RPE 時の作製条件を基準試料と同一

とし、初期 PE 層形成時における PE 源の Li⁺濃度を、基準試料の 1.0 mol% から、2.0 mol% に増加させて試料を作製した。PE 温度は基準試料と同一とし (250 °C)、初期 PE 層の深さが基準試料と同じ 1.7 μm となるように処理時間を設定した (23 h)。この試料上において観測された誘導性共振子は、基準試料の約 4 倍の 26 個であったことから、PE 源の Li⁺濃度を増加させると、圧電性回復領域の比率向上に有効性を示すことがわかった。図 2 に、この試料上で圧電性が回復した領域における共振子 (開口幅 $W=25 \lambda$, 対数 $N=30$ 対, 反射器本数 $N_R=50$) について、共振特性 (アドミタンスの (a) 振幅と (b) 位相) を示す。共振 / 反共振のアドミタンス比は未処理試料 (Virgin) の 5.6 dB から 25.8 dB に増大し、最小位相は 43.8° から -50.6° の誘導性に達した。共振 Q 値は 26 から 69 の約 3 倍、反共振 Q 値は 34 から 150 の約 5 倍に増加した。アドミタンス最大、最小の周波数を、 f_r , f_a とした際の比帯域幅 $(f_a - f_r) / f_a$ は 3.5% から 2.0% に減少した。

この試料上で圧電性が回復した領域において、自由表面の伝搬損失は 0.20 dB/λ であり、未処理試料 (0.50 dB/λ) の 2/5 に減少した。また、Shorted Grating の伝搬損失は 0.17 dB/λ であり、未処理試料 (0.43 dB/λ) の 1/3 に減少した。



(a) 振幅



(b) 位相

図 2 共振子のアドミタンス特性

RPE 後に圧電性が回復しない要因として、X カットでは自発分極の向きが基板表面に平

行であるため、RPE時に自発分極の正負がランダムに配置されてしまう可能性が挙げられる。PE源のLi⁺濃度を増加させると、初期PE層に残留する自発分極も増加し、これがRPE時に自発分極の正負を揃わせるための核となり、ランダムな配置が緩和されると考えられる。

以上の検討結果より、PE時のLi⁺濃度をさらに増加させることにより、圧電性回復領域の比率をさらに向上させることが可能であると考えられる。しかし、Li濃度の増加に伴い、PEの処理時間が大きく増加してしまうため、PE後のアニール処理の利用や、PE温度を高くするなどの検討が必要である。

(2) 高音速薄膜装荷による低損失化理論解析

AlN薄膜の弾性定数は、 c_{11} , $c_{44}=2.10, 0.80 \times 10^{11}$ N/m²と決定され、その縦波速度 $\sqrt{c_{11}/\rho}$ は約8,000 m/sであり、LN基板の縦波速度よりも速いことがわかった。

図3に、規格化膜厚 h/λ に対する位相速度の計算値を示す。A=0.9以上の場合、位相速度は膜厚に対して一旦増加した後減少し、LN基板のバルク縦波速度に近づいたA=0.6以下の場合、位相速度は膜厚に対して減少した。これは、AlN薄膜のバルク縦波速度がLN基板よりも遅くなるためである。図4に、LLSAW伝搬減衰の計算値を示す。A=1.0の時、伝搬減衰は膜厚に対して一旦上昇した後減少し、 $h/\lambda=0.16$ 以上の膜厚においてゼロ減衰を有するLLSAWが現れた。

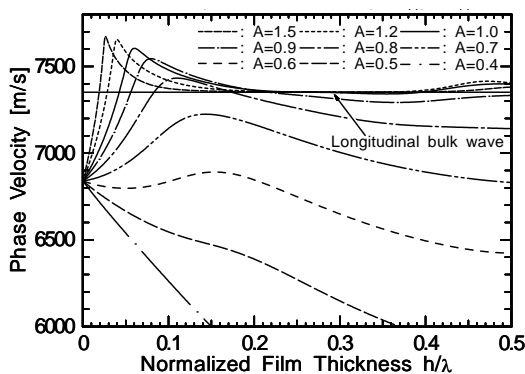


図3 AlN膜厚に対するLLSAW位相速度

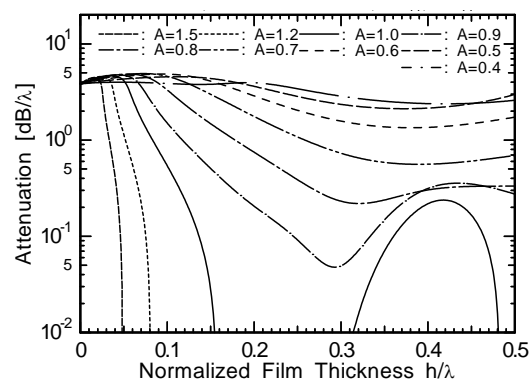


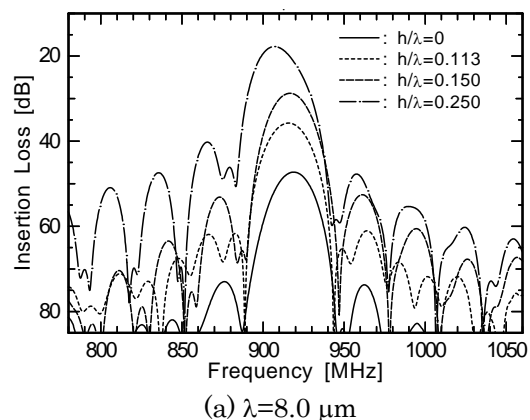
図4 AlN膜厚に対するLLSAW伝搬減衰

また、単結晶薄膜と同等の弾性定数を有する場合(A=1.5)、 $h/\lambda=0.05$ 以上の膜厚においてゼロ減衰が得られることがわかった。しかし、A=0.9以下では、伝搬減衰は膜厚に対して減少するが、ゼロ減衰は得られない。

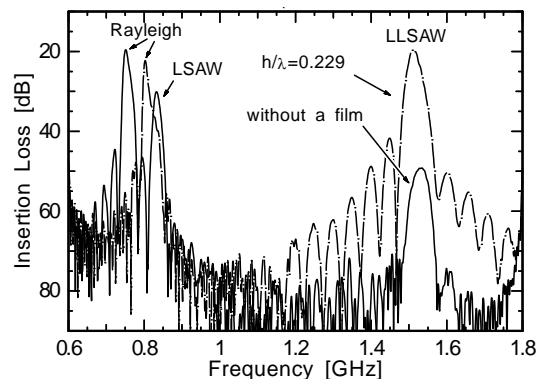
これらの解析結果より、AlN薄膜の様な、基板より高速な誘電体薄膜を装荷することによって、LLSAWの伝搬減衰を低減できることがわかった。

LLSAWの伝搬特性

図5に、 $L=50\lambda$ におけるIDT対のLLSAW周波数特性(a) $\lambda=8.0\ \mu\text{m}$, (b) $\lambda=4.8\ \mu\text{m}$ を示す。 $\lambda=8.0\ \mu\text{m}$ ではLLSAWの最小挿入損失は、膜厚に対して単調に減少し、膜厚 0.250λ では未装荷試料に比べて29.5 dB減少し、顕著な挿入損失の低減効果が得られた。膜厚 0.250λ の位相速度は7,300 m/sであり、未装荷試料の7,330 m/sよりも遅い。未装荷試料ではLLSAWの伝搬減衰が大きいため、測定された表面波は縦波型のバルク波(SSBW)であると考えられる。一方、膜厚 0.250λ ではLLSAWの損失が低減し、主にLLSAWからなる表面波が観測される。したがって、未装荷試料よりも位相速度が減少したと考えられる。 $\lambda=4.8\ \mu\text{m}$ では、LLSAWの最小挿入損失は、膜厚 0.229λ において未装荷試料に比べて29.2 dB減少した。また、図5(b)にはR-*SAW*の周波数特性も示してある。AlN薄膜 0.229λ 装荷後のLLSAWの最小挿入損失は、未装荷試料のR-*SAW*と同程度まで減少していることがわかる。

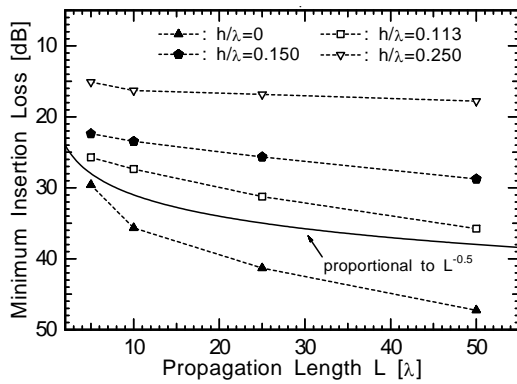


(a) $\lambda=8.0\ \mu\text{m}$

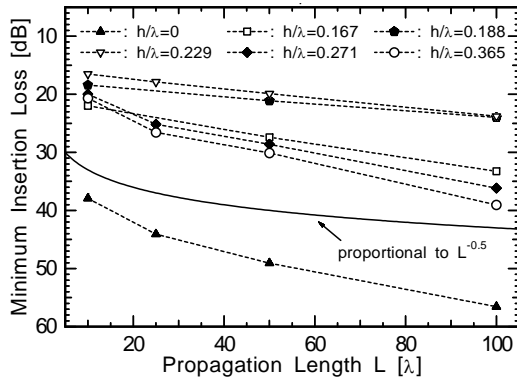


(b) $\lambda=4.8\ \mu\text{m}$

図5 AlN薄膜装荷試料の周波数特性



(a) $\lambda=8.0 \mu\text{m}$



(b) $\lambda=4.8 \mu\text{m}$

図 6 伝搬路長に対する最小挿入損失

図 6(a), (b)に, $\lambda=8.0 \mu\text{m}$, および $\lambda=4.8 \mu\text{m}$ の場合の, 伝搬路長に対する最小挿入損失を示す. $\lambda=8.0 \mu\text{m}$ では, すべての試料において, 最小挿入損失は伝搬路長に対して非線形に変化している. これは, 送信 IDT と受信 IDT が互いに近接していると, 送信 IDT から直接励振された SSBW の影響を強く受けるためであり, $L=5 \lambda$ の最小挿入損失は, LLSAW のみのものよりも小さく測定される. よって, $L=10 \sim 50 \lambda$ の勾配を 1 波長あたりの伝搬損失とみなした. 伝搬損失は, 未装荷試料では $0.28 \text{ dB}/\lambda$, $h/\lambda=0.250$ 試料では $0.03 \text{ dB}/\lambda$ と求められ, AlN 薄膜装荷によって伝搬損失が約 1/10 に低減したことがわかった. 一般に SSBW は伝搬路長 L に対して $L^{-0.5}$ に比例して減衰する. 図 6 には, $L^{-0.5}$ に比例する理想的な SSBW の損失を示してある. 膜厚 0.113λ 以下では, 最小挿入損失の勾配は $L^{-0.5}$ に近いことから, LLSAW は縦型 SSBW と類似した伝搬特性を有すると考えられる. しかし, 0.150λ 以上の膜厚では伝搬路長に対して最小挿入損失が線形的な変化を示す. これは, AlN 薄膜を装荷することによって LLSAW の伝搬損失が低減し, 主に LLSAW からなる表面波が観測されたことを示している.

$\lambda=4.8 \mu\text{m}$ では, $L=10 \sim 100 \lambda$ の勾配を伝搬損失とみなした. 伝搬損失は, AlN 薄膜を 0.188λ 装荷することによって未装荷試料の $0.20 \text{ dB}/\lambda$ から $0.06 \text{ dB}/\lambda$ に減少した. しかし, 0.271λ 以上の膜厚では, 最小挿入損失と伝搬

損失共に膜厚 0.229λ よりも増加した. また, 最小挿入損失は伝搬路長に対して非線形な変化を示し, 再び縦型 SSBW の特性に近づいた. これは, より厚い膜厚では, LLSAW の位相速度が LN 基板の縦型バルク波から離れ, 主に縦型 SSBW からなる表面波が観測されたと考えられる.

$\lambda=8.0 \mu\text{m}$ では $h/\lambda=0.250$ において 8.3 dB の BL が得られ, 未装荷試料の 15.4 dB から 7.1 dB 減少した. また, $\lambda=4.8 \mu\text{m}$ では, $h/\lambda=0.229$ において 4.0 dB の BL が得られ, 未装荷試料の 25.0 dB から 21.0 dB 減少したが, AlN 薄膜の装荷によって伝搬損失だけでなく, バルク波放射損失も格段に低減できることがわかった. しかし, アドミタンス特性の共振円が AlN 薄膜装荷によって縮小していることから, K^2 は薄膜装荷によって減少していると考えられ, フィルタ応用に必要な K^2 を得るためには, 配向性をもたせた圧電性を有する AlN 薄膜の利用が必要である.

上記のように, 本研究では, RPE 層の形成, または高音速薄膜装荷によって, これまで困難であった LLSAW の格段の低損失化を実現した. 今後は, 明らかにされた問題点の解決に取り組む.

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 5 件)

F. Matsukura and S. Kakio, "Loss reduction of longitudinal-type leaky surface acoustic wave by loading with high-velocity thin film," Jpn. J. Appl. Phys., vol.53, no.7S, pp.07KD04-1-6, 2014. doi:10.7567/JJAP.53.07KD04 査読有

F. Matsukura, M. Uematsu, K. Hosaka, and S. Kakio, "Longitudinal-type leaky surface acoustic wave on LiNbO₃ with high-velocity thin film," Jpn. J. Appl. Phys., vol.52, no.7, pp.07HD02-1-4, 2013. doi:10.7567/JJAP.52.07HD02 査読有

F. Matsukura, M. Uematsu, K. Hosaka, and S. Kakio, "Longitudinal-type leaky SAW on LiNbO₃ with high-velocity thin film," Proc. of 2013 Joint UFFC, EFTF, and PFM Symp., pp.1692-1695, 2013. 査読有

S. Kakio and M. Abe, "Loss reduction of longitudinal-type leaky surface acoustic wave by reverse proton exchange," Jpn. J. Appl. Phys., vol.51, no.7, pp.07GC17-1-5, 2012. doi:10.1143/JJAP.51.07GC17 査読有

S. Kakio and M. Abe, "Loss reduction of longitudinal-type leaky SAW by reverse proton exchange," Proc. of 2012 IEEE International Ultrasonics Symp., pp.1802-1805, 2012. 査読有

〔学会発表〕(計19件)

松倉 史弥 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 圧電材料・デバイスシンポジウム2014予稿集, F-3, pp.79-84, 2014/01/30. [仙台, 東北大学]

松倉 史弥 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 日本学術振興会 弾性波技術第150委員会第133回研究会資料, pp.19-24, 2013/10/03. [仙台, 仙台ガーデンパレス]
F. Matsukura and S. Kakio: “Loss reduction of longitudinal-type leaky SAW by loading with high-velocity thin film,” Proc. of The 34th Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS, 1P-3-8, pp.145-146, 2013/11/20. [Doshisha Univ., Kyoto]

松倉 史弥 植松 真人 保坂 桂子 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 日本音響学会2013年秋季研究発表会講演論文集, 1-4-19, pp.1171-1174, 2013/09/25. [豊橋, 豊橋技術科学大学]

松倉 史弥 植松 真人 保坂 桂子 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 第74回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 17p-A2-1, p.01-120, 2013/09/17. [京田辺, 同志社大学]

松倉 史弥 植松 真人 保坂 桂子 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷LiNbO₃基板上的縦型漏洩弾性表面波,” 第42回EMシンポジウム, pp.43-46, 2013/05/17. [東京, 東京理科大学]

松倉 史弥 植松 真人 保坂 桂子 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷 LiNbO₃ 基板上的縦型漏洩弾性表面波,” 第60回応用物理学会春季学術講演会, 29a-B5-5, p.01-139, 2013/3/29. [神奈川工科大学]

S. Kakio and M. Abe, “Loss reduction of longitudinal-type leaky SAW by reverse proton exchange,” 2012 International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, pp.131-135, 2012/12/7. [Chiba University, Chiba]

F. Matsukura, M. Uematsu, K. Hosaka, and S. Kakio, “Longitudinal-type leaky SAW on LiNbO₃ with high-velocity thin film,” The 33th Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS, 2P3-5, pp.203-204, 2012/11/13-15. [Chiba University, Chiba]

M. Abe and S. Kakio, “Loss reduction of longitudinal-type leaky SAW by reverse proton exchange – Dependence of recovery of piezoelectricity on fabrication conditions –,” The 33th Symposium on ULTRASONIC

ELECTRONICS, 2P3-6, pp.205-206, 2012/11/14. [Chiba University, Chiba]

松倉 史弥 植松 真人 保坂 桂子 垣尾 省司: “高音速薄膜装荷LiNbO₃基板上的縦型漏洩弾性表面波,” 日本音響学会2012年秋季研究発表会, 2-5-8, pp.1365-1366, 2012/09/20. [長野, 信州大学]

阿部 真也, 垣尾 省司: “逆プロトン交換による縦型漏洩弾性表面波の低損失化 – 圧電性回復の作製条件依存性 –,” 日本音響学会2012年秋季研究発表会, 2-5-6, pp.1361-1362, 2012/09/20. [長野, 信州大学]

垣尾 省司, 阿部 真也: “逆プロトン交換による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会第125回研究会, pp.7-12, 2012/05/14. [東京, 弘済会館]

垣尾 省司, 阿部 真也: “逆プロトン交換による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 圧電材料・デバイスシンポジウム2012, B-3, pp.23-28, 2012/1/30. [仙台, 東北大学]

垣尾 省司, 植松 真人, 保坂 桂子: “アルミナ薄膜装荷LiNbO₃基板上的縦型漏洩弾性表面波,” 2012年電子情報通信学会総合大会, A-11-4, p.204, 2012/3/20. [岡山大学]

M. Abe and S. Kakio, “Loss reduction of longitudinal-type leaky SAW by reverse proton exchange,” The 32th Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS, 2Pb3-8, pp.227-228, 2011/11/9. [Kyoto University, Kyoto]

阿部 真也, 垣尾 省司: “逆プロトン交換による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 電子情報通信学会超音波研究会, US2011-64, p.35-39, 2011/10/31. [甲府, 山梨大学]

阿部 真也, 垣尾 省司: “逆プロトン交換による縦型漏洩弾性表面波の低損失化,” 日本音響学会2011年秋季研究発表会, 3-2-12, 2011/09/22. [松江, 島根大学]

垣尾 省司, 阿部 真也, 清水 秀徳: “逆プロトン交換 LiNbO₃ 基板上的縦型漏洩弾性表面波の伝搬特性” 第40回EMシンポジウム, pp.85-90, 2011/05/20. [東京, 東京理科大学]

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~kakio/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

垣尾 省司 (KAKIO Shoji)

山梨大学・医学工学総合研究部・教授

研究者番号: 70242617