

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560293

研究課題名(和文) 逆プロトン交換を用いたバルク波フリー弾性表面波基板と低損失広帯域フィルタへの応用

研究課題名(英文) Surface acoustic wave substrate structure without bulk wave radiation free using reverse proton exchange and its application to low-loss and wide-band filter

研究代表者

垣尾 省司(KAKIO SHOJI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：70242617

研究成果の概要(和文): 情報通信の大容量化・多機能化に伴い, LiNbO₃ 結晶などの圧電性を利用した弾性表面波フィルタの低損失化・広帯域化が強く要請されている. 逆プロトン交換層の形成によりプロトン交換層を埋め込んだ LiNbO₃ 基板構造を, 横波型リーキー弾性表面波や縦波型リーキー弾性表面波に適用すると, 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.

研究成果の概要(英文): For the development of high-performance surface acoustic wave (SAW) devices, the materials, substrate structures, and SAW modes required to realize high coupling, high stability, low loss, and high frequency have been widely demanded. In this study, it has been found theoretically and experimentally that, by adapting the substrate structure with a reverse-proton-exchanged layer and a buried proton-exchanged layer to a shear-horizontal-type leaky SAW and a longitudinal-type leaky SAW on LiNbO₃, the propagation and resonance properties can be considerably improved.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野: 通信工学, 超音波工学, 光エレクトロニクス

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, 低損失フィルタ, バルク波放射

1. 研究開始当初の背景

LiNbO₃ や LiTaO₃ などの誘電体結晶の圧電性を利用した弾性表面波(SAW)フィルタなどの圧電デバイスは, 全世界の移動体通信インフラを支える極めて重要な役割を果たしているが, 通信の大容量化・多機能化に従い, フィルタの低損失化・広帯域化を実現するための材料探索や基板構造開発が強く要請されている. リーキー表面波(LSAW)は,

レイリー波モードよりも位相速度が速く高周波化が容易, 横波型であるから, フィルタの重要な要素である SAW 共振子におけるグレーティング反射係数が大きいなど有利な特徴を有し, LSAW フィルタに実用されている. しかし, 従来基板構造では, 励振時と伝搬時にバルク波を基板内へ放射するため, 本質的にバルク波放射損と伝搬減衰を有しており, 低損失化に限界がある. 本申請者らは

1997年に科研費奨励研究(A)の成果として、基板上にプロトン交換(Proton-Exchange: PE)層を形成するとLSAWのバルク波放射が抑圧され、バルク波放射損と伝搬減衰がほぼゼロに低減することを世界で初めて見出した。これはsoft化された(弾性定数が減少した)位相速度の遅い層にバルク波がトラップされることに起因することを明らかにしている。しかし、プロトン交換後にLiNbO₃(LN)の圧電性が低減してしまうため、LSAWの励振効率とグレーティング反射係数が減少する問題がある。

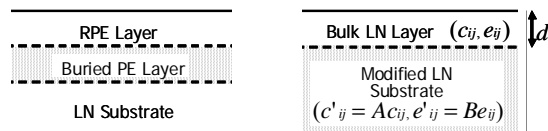
2. 研究の目的

本研究ではこの問題点を解決するため、基板表面に逆プロトン交換(Reverse-PE: RPE)層を形成し、PE層を基板内部に埋め込んでバルク波のトラップ層として利用し、バルク波放射損と伝搬減衰をゼロにまで低減させること、電極と接するRPE層は結晶基板と同じ物性を有することを利用して、励振効率が大きく、グレーティング反射係数の大きなLSAW共振子を作製し、低損失・広帯域弾性表面波フィルタを実現させることを目的とする。

3. 研究の方法

(1)理論解析

RPEによってPE層を埋め込むと、図1(a)に示すように、空気を含めた4層構造を呈する。解析では、図1(b)に示すように、RPE層を「バルクLN層」、埋込PE層とLN基板を合わせて「材料定数が変化したLN基板」と仮定した3層構造を用いた。弾性定数 c'_{ij} 、圧電定数 e'_{ij} はテンソルによらず一様に低減するものとし $c'_{ij}=Ac_{ij}$ 、 $e'_{ij}=Be_{ij}$ と表した。PE後のLNの弾性定数はバルク値の60%程度、圧電定数は20%程度に低減すると知られている。また、密度、誘電率も変化する。



(a) RPE 基板構造 (b) 解析モデル
図1 RPE 基板構造と解析モデル

PE層を形成後、アニーリングを行うとPE層の材料定数はバルク値に近づくことがわかっている。従って、埋込PE層と基板部分を合わせた実効的な弾性定数の低減率は60%~100%未満と予想される。そこで、 $0.6 < A < 1.0$ の範囲として、圧電定数、密度、誘電率はAの変化分を比例配分した値を用い

た(表1)。

表1 解析に用いたパラメータのセット

A ($c'_{ij}=Ac_{ij}$)	B ($e'_{ij}=Be_{ij}$)	ρ [kg/m ³]	ϵ_{11}/ϵ_0	ϵ_{33}/ϵ_0
1.000	1.00	4700	44.0	29.0
0.950	0.90	4675	45.4	32.3
0.900	0.80	4650	46.8	35.5
0.875	0.75	4638	47.4	37.1
0.850	0.70	4625	48.1	38.8
0.825	0.65	4613	48.8	40.4
0.600 ^[4]	0.20 ^[5]	4500 ^[6]	55.0 ^[7]	55.0 ^[7]

FarnellとAdlerの3層構造におけるSAW伝搬の解析方法を、LSAW、またはLLSAWに拡張した解析により、自由表面、短絡表面における位相速度と、それぞれの伝搬減衰を求めた。

(2)実験

基板としては、LSAW、およびLLSAWに対して結合係数(K²)が大きな10°Y-X LN、およびX-36°Y LNを用いた。これらの3-inch LNウエハ上に初期PE層、RPE層を形成した試料を作製した。まず、ウエハを250°Cの安息香酸中(Li 1.0 mol%)に所定の時間浸漬することにより、PE層を形成した。次に、このPE試料を、300°CのLiNO₃、NaNO₃、KNO₃の等モル溶液液中に所定の時間浸漬することにより、RPE層を形成し、PE層を基板内部に埋め込んだ。表2に作製条件、初期PE層とRPE層の層厚を示す。層厚はレーザー光導波による屈折率分布の測定により決定した。解析結果に従って、RPE層の層厚を0.3λ~0.5λに設定した。

表2 試料の作製条件

Substrate	PE 250°C		RPE 300°C	
	Time (h)	Initial depth (μm)	Time (h)	Depth (μm)
10°Y-X LN	22.5	3.2	77.5	1.8
X-36°Y LN	5	1.7	9	1.1

RPE後のウエハ試料上に、波長λ=3.6 μm、開口長50λ、対数三種(N=5, 10, 30)のスプリット電極指のIDT対を、Al膜(膜厚0.02 λ)で作製した。伝搬路長Lが、5λ, 10λ, 25λ, 50λの四種を用意し、伝搬路の電気的條件として自由表面(Free)、短絡表面(Metallized)、Shorted Gratingを用意した。同時に、λ=3.6 μmのシングル電極指と反射器より成る共振

子電極も作製した．これら電極パターンの概略を図 2(a), (b)に示す．

ネットワークアナライザを用いて, IDT 対の周波数特性を測定し, 得られた最小挿入損失の伝搬長さに対する勾配から伝搬損失を評価した．また, IDT のアドミタンス周波数特性から K^2 を測定した．さらに, 共振子パターンを用いて共振特性を測定し, 共振の大きさを表すアドミタンス比や, 比帯域幅等を評価した．

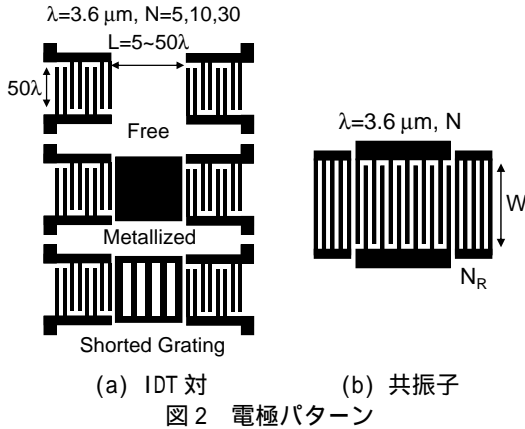


図 2 電極パターン

4. 研究成果

(1) 理論解析

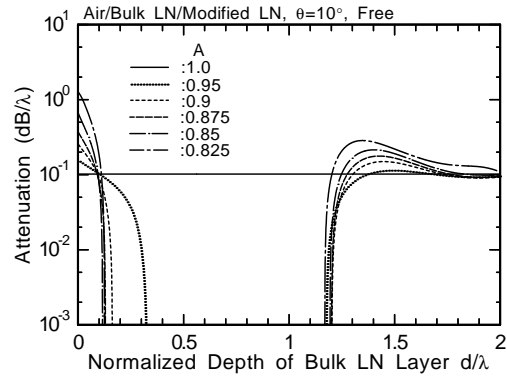
LSAW

10°Y-X LN 上, 波長 λ で規格化したバルク層の深さ d/λ に対して, LSAW の伝搬減衰を計算した結果を図 3 にそれぞれ示す. $A=1.0$ の結果は, LN 自身の伝搬減衰に相当する. 自由表面では, $d/\lambda=0.15$ 以下では「材料定数が変化した基板」のバルク波を感受した LSAW の解が得られ, 図 3(a)に示すように, 伝搬減衰はゼロに向かって急激に減少する. その後, 位相速度が速い横波速度を超えると「バルク LN 層」のバルク波速度を感受した LSAW の解が現れるまで解がなくなり, 解が現れると伝搬減衰ゼロから急激に増加する. また, $A=0.95$ では解の分離は現れず, 全ての深さで LSAW が存在する.

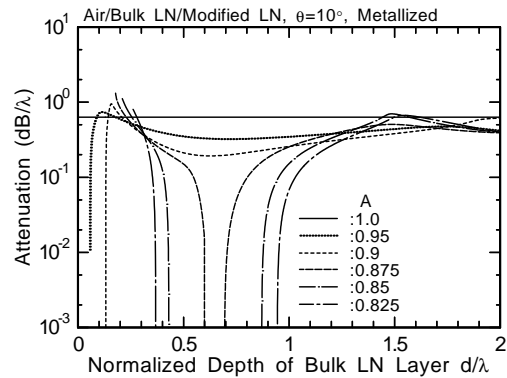
一方, 短絡表面の位相速度は, 自由表面と同様に高速化するが, $d/\lambda=0.2$ 以下においては, 遅い横波よりも位相速度が遅いためラプ波化し, 図 3(b)に示す伝搬減衰は無損失化している. 位相速度が遅い横波を超えると LSAW の解が現れ, 速い横波を超えるまで存在する. その伝搬減衰は, 未処理($A=1.0$)よりも大きい, d/λ の増加に伴い減少していきゼロ減衰が現れた. その後, 「バルク LN 層」のバルク波速度を感受した LSAW の解が現れ, 伝搬減衰はゼロから急激に増加する. $A=0.9$ 以下では解の分離は現れず全ての深さ

で LSAW が存在する.

なお, $B=0.65$ 以下では遅い横波と速い横波の速度差が小さくなるため, LSAW の解が得られる層厚がほとんど存在しない.



(a) 自由表面



(b) 短絡表面

図 3 LSAW 伝搬減衰の計算値 (10°Y-X LN)

LLSAW

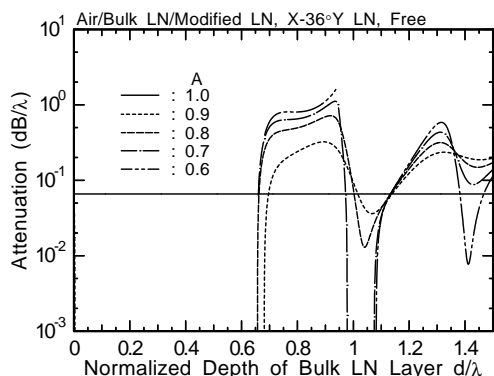
同様に, X-36°Y LN 上, バルク層の規格化厚さ d/λ に対して, LLSAW 伝搬減衰を計算した結果を図 4 に示す. (a)が自由表面, (b)が短絡表面の解析結果である. 係数パラメータ

自由表面では, $d/\lambda=0.1$ 以下で LLSAW の解が得られ, 図 4(a)に示す伝搬減衰は, 層厚が現れるとすぐにゼロに向かって減少する. $d/\lambda=0.1 \sim 0.6$ の LLSAW の解が得られない領域は, 「材料定数が変化した基板」のバルク縦波と縮退している可能性がある. $d/\lambda > 0.6$ では, 「バルク LN 層」のバルク縦波速度を感受するため LLSAW の解が復活し, 伝搬減衰はゼロから急激に増加する.

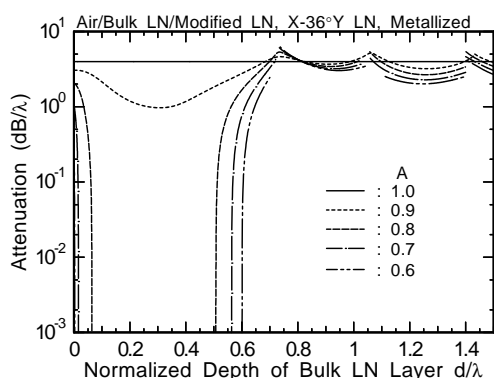
一方, 短絡表面の位相速度は, $A=0.9$ の場合のみ, 「バルク LN 層」の厚みによらず LLSAW の解が存在した. その伝搬減衰は, 図 4(b)に示すように, $d/\lambda=0 \sim 0.6$ の範囲で減少しており, 特に, $d/\lambda=0.3$ 付近で減少の割合が大きいことがわかる. $A < 0.9$ の場合では, $d/\lambda=0.1 \sim 0.6$ で LLSAW の解が得られないが,

その境界で伝搬減衰はゼロに減少している。

このように、弾性定数が低減した基板とバルク LN 層を組み合わせると、LSAW や LLSAW の伝搬減衰が減少する可能性を理論的に明らかにした。



(a) 自由表面



(b) 短絡表面

図4 LLSAW 伝搬減衰の計算値 (X-36° Y LN)

(2) 実験

LSAW

測定した IDT 対の周波数特性の例として、短絡表面、 $L=25\lambda$ の結果を図5に示す。高周波側から LLSAW, LSAW, レイリー波の応答が確認でき、提案構造 (PE+RPE) では LLSAW の挿入損失が未処理のものよりも低減していることがわかる。LSAW より高周波側の 1.3GHz 付近にあるスプリアス応答は RPE 層がステップ状になっているために、バルク波が導波したため発生したと考えられる。PE 層形成後にアニーリング処理を施すと (APE+RPE), このスプリアス応答消失することがわかった。

短絡表面の伝搬損失は未処理試料の 0.44 dB/λ から PE+RPE 試料の 0.01 dB/λ, APE+RPE 試料の 0.23 dB/λ と減少した。Shorted Grating においても伝搬損失の減少がみられた。一方、自由表面では伝搬損失が未処理試料より増加した。

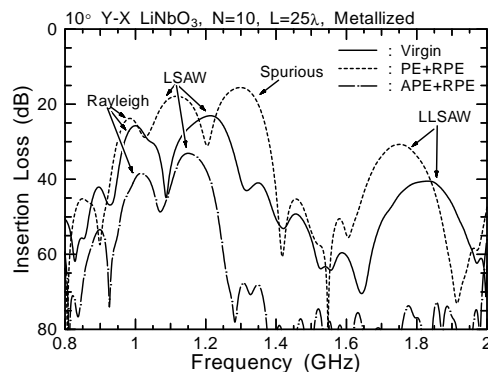


図5 10° Y-X LN 試料の周波数特性

K^2 は APE+RPE 試料では 0.7% となり未処理試料の 18.8% から大幅に減少した。これは表層の RPE 層の K^2 が増加する効果より埋め込んだ PE 層の電気機械結合係数 K^2 が減少する効果が大きく現れたことに起因すると考えられる。PE+RPE 試料では K^2 が 10.7% であり、未処理の 6 割の値を有していた。

図6に共振子アドミタンス特性の例として、開口長 $W=25\lambda$, IDT 対数 $N=100$, 反射器本数 $N_R=0$ の結果を示す。未処理試料より位相速度が遅くなったため、RPE 試料は低周波側にシフトしていることがわかる。PE+RPE 試料, APE+RPE 試料のアドミタンス比は未処理のものに比べて減少している。これは K^2 が減少したためである。アドミタンス特性からも PE+RPE 試料において 1.3GHz にスプリアス応答があることが確認でき、APE+RPE 試料で消失していることがわかる。

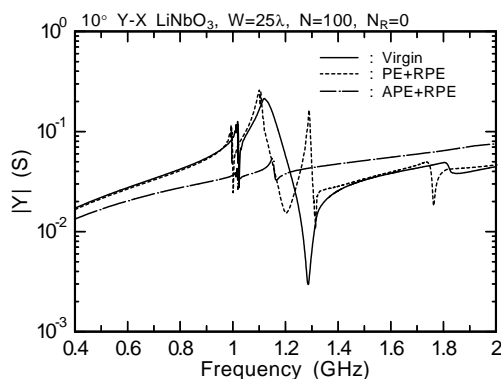


図6 10° Y-X LN 試料の共振特性

LLSAW

X-36° Y LN においては、RPE 試料上的一部分に圧電性の回復した領域が存在した。以下、これを「good 領域」とし、同じ試料上で圧電性が低減した「bad 領域」の特性と比較する。

表3に K^2 測定値を示す。「bad 領域」のレ

イリー波の K^2 は、未処理試料の 1/40 の値であった。一方、「good 領域」の K^2 は 8 割程度まで回復しており、PE 層の形成により低減した圧電性が、RPE 層の形成によってほぼ回復したと考えられる。また、未処理試料の LLSAW の K^2 は 1.0~1.2% であり、理論値 (12.9%) と比較すると一桁小さい値が観測された。後述するように伝搬損失が減少した「good 領域」では、4.7~6.2% の値が得られていることから、非常に大きな伝搬損失によって本来の値よりも小さい結合係数が観測されたと考えられる。

表 3 結合係数 k^2 の測定値 (X-36°Y LN)

X-36°Y LN	Rayleigh (%) (Theory: 0.33%)		LLSAW (%) (Theory: 12.9%)	
	N=10	N=30	N=10	N=30
Virgin	1.4	1.3	1.2	1.0
RPE(good)	1.1	1.1	6.2	4.7
RPE(bad)	-	0.03	-	0.2

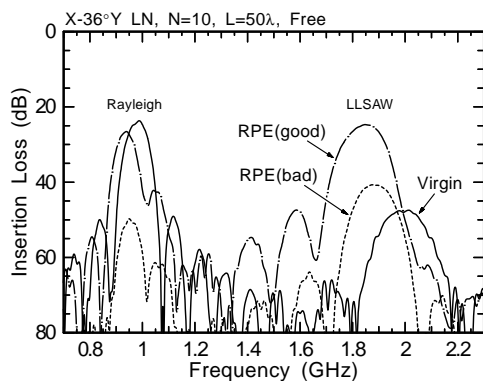


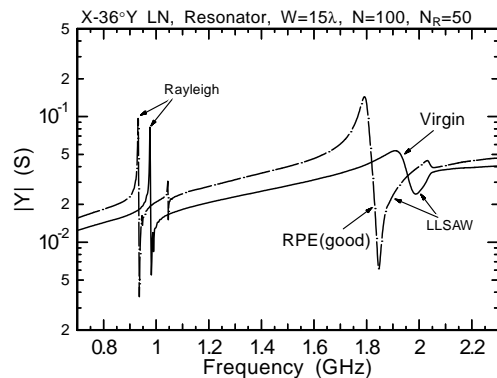
図 7 X-36°Y LN 試料の周波数特性

「good 領域」の IDT 対 ($L=50\lambda$, $N=10$, 自由表面) の周波数特性について、未処理、「bad 領域」との比較を図 7 に示す。「good 領域」の LLSAW の挿入損失は、未処理の値 (47.5 dB) から約 23 dB 低減し、未処理レイリー波の挿入損失 (23.7 dB) に近い、24.7 dB まで減少した。また、「bad 領域」では圧電性が大きく低減しているにもかかわらず、LLSAW の挿入損失は未処理のものより減少した。中心周波数から未処理、「good 領域」の LLSAW 位相速度は、それぞれ 7,190, 6,650 m/s と求められ、RPE により位相速度は約 7.5% 減少した。

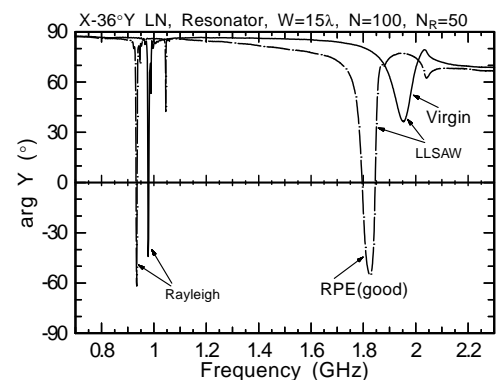
「good 領域」の自由表面の伝搬損失は、未

処理試料 0.48 dB/ λ から約 1/3 の 0.18 dB/ λ に減少した。「bad 領域」であっても、自由、短絡、Shorted Grating の伝搬損失が未処理試料の 1/5~1/4 に減少することがわかった。

図 8 に、X-36°Y LN 上の共振子 ($W=15\lambda$, $N=100$ 対, $N_R=50$) について、アドミタンス周波数特性の (a) 振幅と (b) 位相を示す。「good 領域」では、LLSAW の共振特性が格段に向上することがわかった。レイリー波の特性に着目すると、「good 領域」では、未処理試料と同等以上の特性が得られていることから、RPE により圧電性が回復していることがわかる。「good 領域」では、共振/反共振のアドミタンス比は 6.9 dB から 27.7 dB に増大し、最小位相は 34.6° から誘導性の -55.3° に達した。共振 Q 値は約 2 倍、反共振 Q 値は約 4 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 3.9% から 3.0% に減少した。



(a) 振幅



(b) 位相

図 8 X-36°Y LN 試料の共振特性

同一試料上に現れた「good 領域」と「bad 領域」の相違は、RPE 処理時のわずかな処理温度差や Li^+ 濃度の差により発生したと考えられるが、その要因を特定し、試料上全面に圧電性が回復した領域を形成可能な作製条件を確立することが必要である。

以上のように，RPE層の形成によりPE層を埋め込んだLN基板構造をLSAWやLLSAWに適用すると，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向上する条件が存在することを明らかにした．これらの成果は，SAWフィルタの高周波化や低損失化に直接有効である．今後は，試料上全面に圧電性が回復した領域を形成可能な作製条件を検討し，低損失化の最適条件を探索する．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

垣尾 省司，清水 秀徳，中川 恭彦，“逆プロトン交換 10° Y-X LiNbO_3 基板上的漏洩弾性表面波の伝搬特性，”電気学会論文誌2011年6月号「圧電材料・デバイス」特集号(2011)掲載決定，査読有

S. Kakio，H. Shimizu，and Y. Nakagawa，“Leaky-surface-acoustic-wave properties on reverse-proton-exchanged LiNbO_3 ,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.48, no.7, pp.07GG10-1-5. (2009) 査読有

S. Kakio，H. Shimizu，and Y. Nakagawa，“Leaky-SAW properties on reverse-proton-exchanged LiNbO_3 ,” Proc. of 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, P3K-103-04, pp.2229-2232, (2008) 査読有

[学会発表](計8件)

垣尾 省司，阿部 真也，清水 秀徳，“逆プロトン交換 LiNbO_3 基板上的縦型漏洩弾性表面波の伝搬特性，”2011年電子情報通信学会総合大会，AS-2-11, pp.S-37-S-38, 2011/3/17. [東京，東京都市大学] =>東日本大震災により学会中止(発表は成立)
S. Kakio，H. Shimizu，and Y. Nakagawa，“Leaky-surface-acoustic-wave properties on reverse-proton-exchanged LiNbO_3 ,” Fourth International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2010/03/05. [Chiba University, Chiba]

H. Shimizu，S. Kakio，and Y. Nakagawa，“Theoretical analysis of leaky SAW properties on reverse-proton-exchanged substrate,” The 30th Symposium on Ultrasonic Electronics, 3P3-11, 2009/11/20. [Doshisya University, Kyoto]

清水 秀徳，垣尾 省司，中川 恭彦，“逆プロトン交換基板上的漏洩弾性表面波の伝搬特性解析 - 圧電定数依存性 - ，”日本音響学会 2009 年秋期研究発表会，3-8-4, 2009/09/17. [郡山，日本大学]

清水 秀徳，垣尾 省司，中川 恭彦，“逆プロトン交換基板上的縦波型漏洩弾性表面波の伝搬特性解析，”日本音響学会 2009 年春期研究発表会講演論文集，1-2-6, pp. 1171-1172, 2009/03/17. [東京，東京工業大学]

H. Shimizu，S. Kakio，and Y. Nakagawa，“Leaky-SAW properties on reverse-proton-exchanged LiNbO_3 ,” Proc. of The 29th Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS, 1P5-8, pp. 143-144, 2008/11/11. [Sendai City Silver Center, Sendai]

垣尾 省司，清水 秀徳，中川 恭彦，“逆プロトン交換 LiNbO_3 基板上的リーキー表面波伝搬特性，”日本音響学会 2008 年秋期研究発表会，2-Q-20, 2008/09/11. [福岡，九州大学]

垣尾 省司，清水 秀徳，中川 恭彦，“逆プロトン交換 LiNbO_3 基板上的漏洩弾性表面波伝搬特性，”電子情報通信学会超音波研究会，US2008-11, 信学技報. Vol.108, No.73, pp.5-10, 2008/05/30. [東京，機械振興会館]

[その他]

ホームページ

<http://pine.esse.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・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：70242617

(2)連携研究者 (H20、H21)

中川 恭彦 (NAKAGAWA YASUHIKO)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究者番号：50006277