

氏名	かきお しょうじ 垣尾 省司
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成12年 2月 9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成4年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学位論文題目	プロトン交換結晶基板上の光波・弾性表面波特性に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 中村 信良 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 櫛引 淳一

論文内容要旨

第1章 緒論

光エレクトロニクス, 超音波エレクトロニクスの急速な進展に伴い, 光デバイスや弾性表面波(SAW)デバイスの高機能化・高性能化が強く望まれている. このようなデバイスの材料の一つにプロトン交換結晶基板がある. これは, ニオブ酸リチウム(LiNbO_3), あるいはタンタル酸リチウム(LiTaO_3)結晶基板の表面のリチウムをプロトンで置換し, 高屈折率層を形成した基板であり, 非線形光学デバイスや光回折素子などに用いられている. プロトン交換法は低温プロセスであるため, キュリー温度の低い LiTaO_3 の光導波路形成法として有効である. LiTaO_3 は光損傷に強く, 分散が小さいといわれており, プロトン交換後の光学特性を明らかにすることは重要であるが研究例は少ない. 一方, LiNbO_3 基板上を伝搬するSAW(レイリー波)の位相速度がプロトン交換により比較的大きく変化することが知られており, SAW導波路などに利用されている. しかし, 結晶の面方位依存性や, レイリー波とは異なる伝搬モードである漏洩弾性表面波(LSAW)の特性は明らかにされておらず, 大きな位相速度変化をもつというプロトン交換結晶基板の特徴が十分に活用されていないのが現状である.

そこで本研究では, プロトン交換結晶基板を用いた光デバイス, 弾性表面波デバイスの高機能化・高性能化を実現することを目的として, その光導波路特性, および弾性表面波特性のうち, これまでに十分な知見が得られていない, LiTaO_3 を基板とする光導波路の特性, SAWの励振効率が最大である 128° Yカット LiNbO_3 基板上のSAW特性と光音響相互作用, およびLSAWのバルク波放射の特性に着目し, これらの特性について検討した.

第2章 プロトン交換結晶基板の基礎物性と光導波路の特性

本論文で扱ういくつかの回転Yカット LiNbO_3 , LiTaO_3 基板に対し, 屈折率変化と拡散定数を測定し, 各章に必要な基礎データを得た. これらの基板のうち, 研究例の少ない LiTaO_3 光導波路をとりあげ, 電気光学効果を用いた機能デバイス化への設計指針を得るために, 光導波路の基礎的な特性を評価した. 基板にはプロトン交換後に荒れやクラックなどが発生しないZカット板を用いた.

まず, 単一モード三次元光導波路の設計に必要な, アニールによる屈折率分布の変化を測定し, 報告されている特異な表面屈折率の増減を確認した. また, 格子定数変化, およびLiとプロトンの濃度分布を詳細に測定し, アニール時間に対して格子定数変化は単調に減少すること, Liの表面濃度は

単調に増加することを明らかにした。これらの結果より、表面屈折率の増減の要因は、Liの外拡散による増加分と、格子歪による減少分との重ね合せであるというモデルを提案した。次に、アニールによるプロトン交換領域の広がりや表面屈折率の増減を考慮したLiTaO₃単一モード三次元光導波路の作製条件を明らかにした。この三次元光導波路を用いて挿入損失、伝搬損失、および電気光学定数(r_{33}^S)のアニール依存性を測定した結果、アニールにより挿入損失を約1/3に、伝搬損失を約1/5に低減できること、 r_{33}^S は交換直後には6pm/Vであるが、アニールを30分以上行うことによって22pm/V(バルク値の約7割)まで回復することが分かった(図1)。さらに、分岐干渉形光スイッチを試作した結果、消光比が小さい(5.4dB)、半波長電圧が大きい(16.8V:設計値の3.7倍)という問題点があるものの、基板表面に荒れの生じないZカット板では初めてスイッチ動作を確認した。

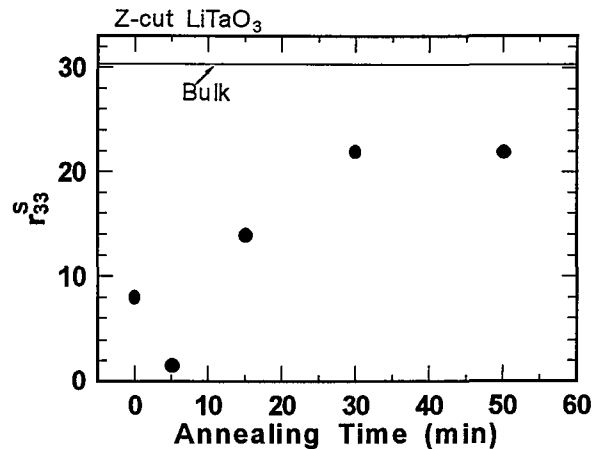


図1 アニール時間に対する電気光学定数

第3章 プロトン交換128° YカットLiNbO₃基板上の弾性表面波特性

レイリー波に対して最大の K^2 を持つ128° YカットLiNbO₃基板に注目し、プロトン交換後のSAW特性を評価した。SAW位相速度と K^2 は、報告されているYカット板の場合と同様にプロトン交換深さに対して単調に減少することを明らかにした。例えば、SAW波長で規格化した交換深さが0.11のとき、位相速度変化は-6.9%であり基板表面を短絡する場合(-2.25%)の約3倍と大きな値が得られること(図2)、このときの K^2 は2.9%でありSAWの励振には十分な値であることが分かった。これらの測定値からプロトン交換層の弾性定数(e_{11})、圧電定数(e_{22})を算定した結果、それぞれバルク値の54%、17%の値をもっており、弾性定数の低減率はYカット板よりも大きいこと、圧電定数はYカット板よりも大きな値であることを明らかにした。また、SAWの伝搬損失はプロトン交換により増大するが、短時間のアニールによって未処理の基板に近い値まで減少することを見出した。さらに、プロトン交換128° Y-X LiNbO₃基板上の短絡表面のSAW位相速度が、ある値以上の交換深さでは、自由表面の位相速度よりも速くなるという興味ある現象を明らかにした。

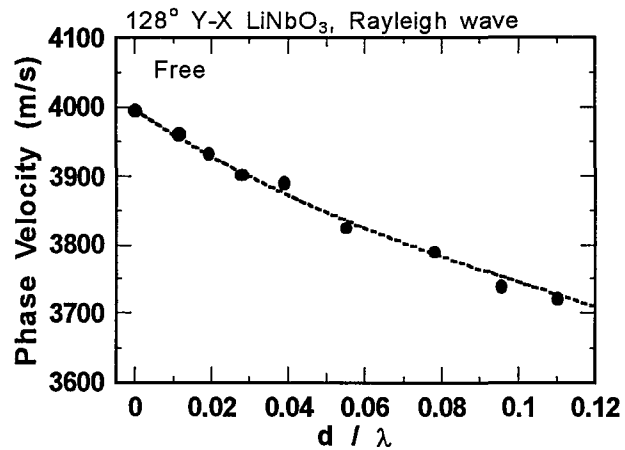


図2 プロトン交換深さに対するSAW位相速度

この現象は、プロトン交換により基板表面に生ずる歪線が実効的に弾性定数を低減させ、Alの蒸着によって低減した弾性定数が回復することに起因すると考えられることを示した。

第4章 プロトン交換128° YカットLiNbO₃基板上の光音響相互作用

プロトン交換128° YカットLiNbO₃基板を用いたブラッグ回折素子の低駆動電圧化を目標として、その光音響相互作用について検討した。まず、モード結合理論によりブラッグ回折素子の解析を行い、第

2章, および第3章で測定されたプロトン交換層屈折率変化, 弾性定数の値が, ブラッグ回折素子の駆動SAWパワーに与える影響を定量的に明らかにした. 次に, プロトン交換による弾性定数, 圧電定数の低減を考慮して光弾性定数を算定した結果, 基板の8割近い値を持っていること, 90分以上のアニールにより基板の値と等しくなるまで回復することが分かった. さらに, アニール時間が15分程度になるように単一モード光導波路を作製すればブラッグ回折素子の駆動電圧が最小となることを示した.

第5章 プロトン交換による漏洩弾性表面波のバルク波放射の抑圧

LSAWはレイリー波に比べて K^2 が大きく, 位相速度が速いという特徴をもっているが, その伝搬時, および励振時にバルク波が放射されるため, 本質的にバルク波放射による損失を有している. 本章では, これら二種類のバルク波放射をプロトン交換によっていずれも抑圧できることを明らかにした.

まず, 回転YカットX伝搬LiNbO₃上のバルク波放射特性を解析し, 伝搬減衰, 粒子変位分布に及ぼすプロトン交換の効果について詳細に検討した. その結果, プロトン交換層の形成によって基板のもつ異方性を実効的に変化させ, ゼロ減衰を示す回転角を制御できることを明らかにした. また, 伝搬路の電氣的条件が自由表面であっても, LSAWの粒子変位分布がプロトン交換により短絡表面の場合と同様に基板表面へ集中することを理論的に明らかにした.

次に, 41° YカットLiNbO₃における短絡表面の伝搬損失を, 非常に浅いプロトン交換層($d/\lambda = 0.003$)の形成によって, 約1/3に低減できることを実験的に明らかにした(図3). この新しい現象は, プロトン交換による導電性の増加が短絡表面の電氣的条件に影響を与えることに起因する可能性を示した. また, 粒子変位分布の計算結果が示唆している通り, 41° YカットLiNbO₃, および36° YカットLiTaO₃において, LSAW励振時のバルク波放射を, プロトン交換によってほぼ抑圧できることを実験的に明らかにした.

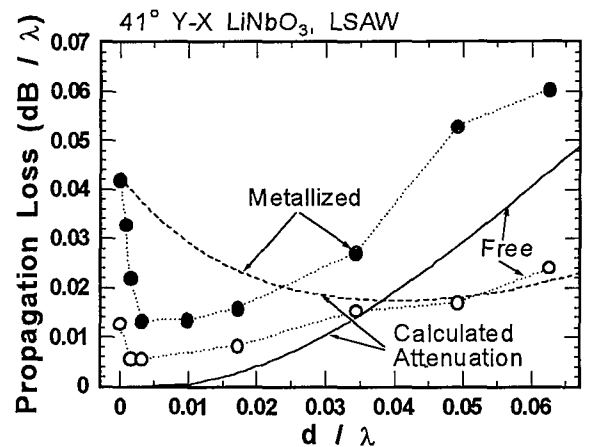


図3 プロトン交換深さに対するLSAW伝搬損失

第6章 結論

本研究では, プロトン交換結晶基板を用いた光デバイス, 弾性表面波デバイスの高機能化・高性能化を実現することを目的として, その光導波路特性, および弾性表面波特性のうち, LiTaO₃を基板とする光導波路の特性, Yカット以外のLiNbO₃基板上のSAW特性, LSAWのバルク波放射の特性などの, これまでに十分な知見が得られていない点について検討した. まず, プロトン交換LiTaO₃光導波路の屈折率変化, 電気光学定数などの基礎特性を明らかにし, 光位相変調器の挿入損失と変調効率が共に良好となる作製条件を見出し, これまで注目されなかった電気光学効果を利用したデバイス用基板としての可能性を示した. 次に, LiNbO₃基板の面方位のうち, レイリー波の励振効率が最大である128°回転Y板に注目し, プロトン交換後のSAW特性, および関連する物理定数を明らかにした. また, 位相速度変化が大きく, かつ伝搬損失の小さい作製条件を見出し, 光音響デバイスの低駆動電圧化に有効であることを示した. さらに, LSAWの伝搬時, および励振時に放射されるバルク波がプロトン交換により抑圧され, その励振・伝搬特性が格段に向上することを見出し, LSAWデバイスの低損失化に有効な新しい材料としての位置を確立した.

審査結果の要旨

LiNbO₃結晶やLiTaO₃結晶のリチウムイオンをプロトンで置換するプロトン交換法は、光波や弾性表面波の導波路形成法として重要である。しかし、プロトン交換光導波路の基礎物性やプロトン交換結晶基板上を伝搬する弾性表面波の特性には未解明の点が多い。著者は、プロトン交換基板を用いた光デバイスおよび弾性表面波デバイスの高性能化を図るため、プロトン交換条件と基礎物性との相関を明らかにし、光導波特性と弾性表面波特性を詳細に調べた。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、プロトン交換LiTaO₃の基礎物性について研究を行い、X線回折による格子歪の測定から、プロトン交換層の格子の乱れが大きいこと、またこれが短時間のアニーリングによって改善されること、プロトン交換により低下した電気光学定数は、アニーリングによりバルク値の7割まで回復することを明らかにしている。これは電気光学効果を利用した光導波路デバイスの設計上重要な知見である。また、アニーリング後の特異な表面屈折率変化は、リチウム外拡散による増加分と、格子歪により光弾性効果を介して生じる減少分の重畳で表されるというモデルを提案している。

第3章では、128°Y-X LiNbO₃基板のプロトン交換による弾性表面波特性の変化を調べ、弾性定数と圧電定数はそれぞれバルク値の54%および17%に低減すること、プロトン交換により増加した伝搬損失は短時間のアニーリングによりほぼプロトン交換前の値まで減少することなどを見出している。また、プロトン交換源として安息香酸を用いた場合にのみ基板表面にマイクロクラックが発生すること、これが自由表面と短絡表面の位相速度の逆転を誘発することなど、非常に興味深い現象を見出している。

第4章では、プロトン交換128°Y-X LiNbO₃基板上の光音響相互作用を検討している。光ブラッグ回折素子の駆動パワーの測定結果より算定したプロトン交換層の光弾性定数はバルク値の8割近い値を持っていること、90分以上のアニーリングにより基板と等しい値まで回復することを見出している。また、駆動電圧の低減のためにはアニーリング時間の最適値が存在し、これによりプロトン交換直後の1/3に駆動電圧を低減できることを明らかにしている。

第5章では、漏洩弾性表面波特性へのプロトン交換の効果を詳細に調べている。波長の1/10以下の非常に薄いプロトン交換層を形成することにより、表面波のエネルギーが基板表面に十分集中するようになり、励振時のバルク波放射が抑圧され、かつ伝搬時の漏れ損失が約1/3に低減することを見出している。これらは、デバイスの低損失化に極めて有用な成果であり、高く評価される。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、プロトン交換結晶基板の基礎物性を詳細に調べ、光導波特性や弾性表面波特性とプロトン交換およびアニーリング条件との関係を明らかにし、光機能デバイスや弾性表面波デバイスの高性能化を図ったもので、電気通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。