Preparation and Characterization of T:Er:LiNbO₃ Films Grown by Sol-gel Method

Tsuyoshi Yoshiga Student Member, Naofumi Kajitani Non-member, Miyako Fukami Non-member, Makoto Takahashi Non-member, Koichi Wakita Member (Chubu University)
Ietaka Sahashi Non-member (Yamaju Ceramics Corporation)
Ryohei Otowa Non-member (Santec Co. Ltd.)

Keywords: stoichiometric, LiNbO₃, sol-gel method, doping, rare earth, photoluminescence

High-quality, stoichiometric thick and crack-free LN (SLN) films have been demonstrated by using a sol-gel method improved by the addition of a large amount of protective colloid such as polyvinyl alcohol (PVA) to the precursor solution, and good optical characteristics as well as highly efficient electro-optic effect have been reported⁽¹⁻²⁾. Based on this method, Ti doping as well as rare earth ion is easy to form waveguide structure without high temperature diffusion process.

In this paper, highly efficient PL has been made clear for Er doped thick films with Ti-doped waveguide structures. The orientation relationships between films and substrates were determined by x-ray diffraction, Raman spectroscopy, SEM, and the results showed that (006) oriented LN epitaxial layers could be grown on a z-cut CLN wafer substrate.

Transmission losses for Ti:Er:LN waveguide structures have been investigated and estimated to be very low (0.35~0.4 dB/cm) as shown in Fig. 1., where abrupt increase in transmission loss is observed at the initial stage of very small Er³⁺ ion concentration and then increases gradually. The magnitude of transmission loss is much smaller than those of proton-exchanged z-cut CLN wafer (~0.71 dB/cm) and proton-exchanged z-cut SLN (0.51 dB/cm). This indicates that Ti:Er:LN layers can be used for low loss waveguide.

Figure 2 shows the PL spectra for 1 μ m thick various Ti and Er doping concentration, where a He-Cd laser lasing at 325 nm is used for exciting light source and the sample temperature is 15K. Bright green luminescence (549 and 560 nm) has been observed. These lines are only observed at the condition of both doping of Ti and Er ion. The emission has strong correlation with co-doping of Ti and Er ion. Without Ti or Er ion doping, no sharp emission lines are observed as shown in Fig. 2 (b) and (c). In order to make clear the emission condition, we investigate the photoluminescence intensity as a function of Er ion concentration under the Ti ion concentration of 1.5 mol%.

Fig. 1. Transmission losses of Ti:Er:LiNbO₃ films

Figure 3 shows the photoluminescence intensity emitted at 549 nm for Ti:Er:LN as a function of Er ion concentration. There is an optimum condition of strong emission condition, that is 0.05 mol% Er³⁺ and 1.5 mol% Ti⁴⁺. After the critical condition, the PL intensity decreases abruptly and then increases gradually with

(a) z-cut CLN wafer (b) Er³⁺1.0 mol% LN (c) Ti⁴⁺1.5 mol% LN (d) Ti⁴⁺1.5 mol% Er³⁺1.0 mol% LN

Fig. 2. PL spectra

Fig. 3. PL intensity of Ti:Er:LiNbO₃ films

increase in Er ion concentration. The intensity of 560 nm changes associated with that of 549 nm.

In summary, we have investigated transmission loss and photoluminescence in Ti:Er:SLN layers deposited by the sol-gel method and made clear that these SLN crystals with Ti-doped waveguide structures demonstrated low transmission loss and highly efficient photoluminescence effect. This sol-gel method has a potential for practical application for optical devices.

References

- (1) M. Takahashi, K. Wakita, et al., Thin Solid Films, 458, 108 (2004)
- (2) K. Wakita, M. Takahashi, et al., IEEE Trans. ELS, Vol. 124, No. 12, 2401(2004).

ゾルゲル法による Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の作製と物性評価

学生員 芳賀 剛* 非会員 梶谷 尚史*
 非会員 深見 宮子* 非会員 高橋 誠*
 正 員 脇田 紘一* 非会員 佐橋 家隆**
 非会員 音羽 亮平***

Preparation and Characterization of Ti:Er:LiNbO₃ Films Grown by Sol-gel Method

Tsuyoshi Yoshiga*, Student Member, Naofumi Kajitani*, Non-member, Miyako Fukami*, Non-member, Makoto Takahashi*,
 Non-member, Koichi Wakita*, Member, Ietaka Sahashi**, Non-member, Ryouhei Otowa**, Non-member

Ti⁴⁺ and Er³⁺ LiNbO₃ films on the z-cut congruent LiNbO₃(CLN) wafer substrates were grown by using a sol-gel method. The orientation relationships between films and substrates were determined by x-ray diffraction, Raman spectroscopy, scanning electron microscope(SEM), and the results showed that (006) oriented LiNbO₃ epitaxial layers with parallel epitaxial relationships could be grown on a z-cut CLN wafer substrate. Er³⁺ exhibited an emission at 1.53 μ m and efficient luminosity in the visible light could be observed from Ti:Er:LiNbO₃ films. The strongest luminosity was observed for the films with Ti⁴⁺ concentration 1.5 mol% and Er³⁺ concentration 0.05 mol% Ti:Er:LiNbO₃ films.

キーワード：ニオブ酸リチウム, 化学量論比組成, ゾルゲル法, ドーピング, 希土類, フォトルミネッセンス

Keywords: Lithium niobate, Stoichiometric, Sol-gel method, Doping, Rare earth, Photoluminescence

1. はじめに

現在, LiNbO₃ はレーザ光の変調⁽¹⁾, 偏波制御⁽²⁾, 波長変換⁽³⁾, 超音波応用素子⁽⁴⁾など広く応用されている。しかし, 通常使用されている LiNbO₃(LNと省略)は化学量論比を満たしておらず Li:Nb=0.94:1 の Congruent LN(CLN)組成になっている。化学量論比を満たした Stoichiometric LN(SLN)は CLN に比べ電気光学定数や非線形光学効果などの向上が報告され⁽⁵⁾, 幅広い応用が期待されている。そこで我々は今までにゾルゲル法により作製した膜が化学量論比を満たしており 1 μ m 程度の厚い膜を形成しても, クラックフリーで光学的にも良質な膜であることを報告してきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また, LN に Er³⁺をドーピングすることにより発光させ, 導波路レーザ・光増幅素子への応用が期待されており, 現在 LN ウェハーへ

の Er³⁺熱拡散が検討されている。しかし, 熱拡散では高温(約 1,000°C)・長時間(10 時間)の熱処理が必要で, その過程に LN 基板中からの Li₂O 外拡散によって, Li 欠損が問題となるが⁽⁸⁾, ゾルゲル法を用いることで LN 基板からの Li₂O 外拡散を解決でき, 膜中に Er³⁺を膜厚方向にも均一にドーピングすることを報告してきた⁽⁹⁾。しかし, Er³⁺をドーピングすることにより屈折率が z-cut CLN wafer 基板よりも低い値を示してしまうために, 導波路として利用できなくなってしまう。そこで屈折率を上げるために, ゾルゲル法を用いて, Ti⁴⁺をドーピングした Ti:LiNbO₃ 薄膜を作製し, 導波路として利用できることを報告してきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。今回我々は, ゾルゲル法を用いて, 種々の濃度の Ti⁴⁺, Er³⁺を共ドーピングした Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜を作製し, 物性及び光導波路特性, 室温での Er³⁺による発光(1.53 μ m)と Ti⁴⁺, Er³⁺を共ドーピングすることによる可視光域での発光(549, 560 nm)の関係について検討を行った。

2. 実験

〈2・1〉 試料作製 Ti:Er:LiNbO₃ 前駆体は LiOC₂H₅, Nb(OC₂H₅)₅, Ti(-I-OC₂H₅)₄, Er(CIO₄)₃ を無水エタノール中で 20 時間還流後, 加水分解させ生成した Ti-Er-Li-Nb の複合水酸化物を濾過し, 無水エタノールで洗浄し, 濾別して得られた水酸化物を 35°C で乾燥し前駆体とした。ゾル溶液はポリビニルアルコール(PVA)濃度 0.10 mol/l(モノマー単位で)を

* 中部大学

〒487-8501 愛知県春日井松本町 1200

Chubu University

1200, Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi 487-8501

** 株式会社山寿セラミックス

〒487-0012 愛知県尾張旭市三郷町角田 1123

Yamaju Ceramics Co., Ltd.

1123, Tsunoda, Misato, Owariasahi, Aichi Pref., 488-0012

*** santec株式会社

〒485-0802 愛知県小牧市大草上坂 5823

santec Co., Ltd.

5823, Kmisaka, Ookusa, Komaki, Aichi Pref., 485-0802

含んだ前駆体濃度 0.20 mol/l の溶液で、0.5 mol/l 酢酸によって pH=6.4 となるよう調整した。成膜はディップコーティング法により z-cut CLN wafer (山寿セラムックス製)上に塗布し、80°C 30 分乾燥後、700°C 1 時間、酸素雰囲気下で焼成した。各種特性評価用試料の膜厚は 1 μ m とした。

〈2・2〉 試料評価方法 物性評価として、前駆体の組成は inductively coupled plasma(ICP)発光分析(Seiko Ins 株, SPS-7000A), 溶液粘性は動粘度計(APPAAR, AMV-120), コロイド粒子の大きさは粒径分布測定装置(大塚電子株, DLS-7000), 焼成後の膜厚は接触表面粗さ計(小阪研究所, SE-2300), 膜の結晶性は X 線回折(Rigaku 株, Mini Flex)・ラマン分光法(日本分光, NRS-300), 膜の表面モロロジーは SEM 観察(日立製作所, S-3500N), 屈折率は自動エリプソメータ(溝尻光学工業所株, DVA-36L)を用い, 光導波路特性はプリズムカップラ法 (He-Ne レーザ 632nm) を用い, Er^{3+} による発光特性は半導体レーザ(0.98 μ m)を励起光とし室温で 1.53 μ m の光を検出した。また Ti^{4+} , Er^{3+} 共ドーブにすることによる可視光域での発光はフォトルミネッセンス(PL)(He-Cd レーザ(325nm), 15K)で測定した。

3. 結 果

図 1, 図 2 は各種 Ti^{4+} , Er^{3+} 仕込み濃度と膜中 Ti^{4+} , Er^{3+} 濃度の ICP 発光分析結果である。この結果から Ti^{4+} , Er^{3+} 共に膜中イオン濃度は仕込みイオン濃度に対し, 比例して増加することから, 膜中イオン濃度は仕込みイオン濃度で容易に制御できることがわかる。

図 3 は Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の X 線回折の Er^{3+} 濃度依存性である。測定試料は(a) z-cut CLN wafer, Ti^{4+} 濃度 1.5 mol%一定とし, 種々 Er^{3+} 濃度 (b) 0.01 mol% (c) 0.05 mol% (d) 0.6 mol% (e) 1.0 mol% とした。また膜厚は 1 μ m とした。この結果から, 基板の(a) z-cut CLN wafer からは $2\theta = 38.88^\circ$ に鋭いピークが確認でき, これは LiNbO₃ の(0 0 6)面に対応したものであり, (b)~(e) からも同様のピークしか見られないことから, 基板からの影響を強く受けて成長した配向性の高い膜

図 1 膜中 Ti^{4+} 濃度の仕込み Ti^{4+} 濃度依存性
Fig. 1. Ti^{4+} concentration in films vs. Ti^{4+} concentration in the starting solution Er^{3+} concentration of 0.6 mol%.

であると考えられる。また, Er^{3+} 濃度を増加させても, 同様のピークしか見られないことから, Er^{3+} による濃度依存性はないものと考えられる。

図 4 は Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜のラマンスペクトルの Er^{3+} 濃度依存性である。測定試料は(a) z-cut CLN wafer, Ti^{4+} 濃度 1.5 mol%一定とし, 種々の Er^{3+} 濃度 (b) 0.01 mol% (c) 0.05 mol% (d) 0.6 mol% (e) 1.0 mol% とした。また膜厚は 1 μ m とした。この結果から, (a) z-cut CLN wafer からは特有の波形, Nb-O 対称伸縮振動(860, 580, 150 cm^{-1} 付近), O-Nb-O 縮重変角振動(430, 330, 240 cm^{-1} 付近), Li-O 対称伸縮振動(370, 270 cm^{-1} 付近), O-Li-O 縮重変角振動(270 cm^{-1} 付近)のピークが観測され, (b)~(e) の Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜では 650, 520 cm^{-1} 付近(●)に, (a) z-cut CLN wafer には観測されないピークが見られた。このピークは Ti^{4+} のみを添加した Ti:LiNbO₃ 薄膜からは見ら

図 2 膜中 Er^{3+} 濃度の仕込み Er^{3+} 濃度依存性
Fig. 2. Er^{3+} concentration in films vs. Er^{3+} concentration in the starting solution Ti^{4+} concentration of 0.5 mol%.

図 3 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の XRD パターン
Fig. 3. XRD patterns of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti^{4+} concentration of 1.5 mol%. Film thickness : 1.0 μ m. (a) z-cut CLN wafer (b) Er^{3+} 0.01 mol% (c) Er^{3+} 0.05 mol% (d) Er^{3+} 0.6 mol% (e) Er^{3+} 1.0 mol%.

図4 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜のラマンスペクトル

Fig. 4. Raman spectra of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti⁴⁺ concentration of 1.5 mol%. Film thickness : 1.0 μm. (a) z-cut CLN wafer (b) Er³⁺0.01 mol% (c) Er³⁺0.05 mol% (d) Er³⁺0.6 mol% (e) Er³⁺1.0 mol%.

図5 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜のSEM像

Fig. 5. SEM images of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti⁴⁺ concentration of 1.5 mol%. Film thickness : 1.0 μm. (a) SLN (b) Er³⁺0.1 mol% (c) Er³⁺0.6 mol% (d) Er³⁺1.0 mol%.

れず⁽¹⁰⁾, Er³⁺のみを添加した Er:LiNbO₃ からは見られた⁽⁹⁾。また、このピークは Ti⁴⁺, Er³⁺を共ドーピングした場合であっても、Er³⁺一定で Ti⁴⁺濃度を変化させたものは z-cut CLN wafer と同様のピークしか見られなかったため⁽¹²⁾, LiNbO₃ 結晶中にイオン半径の大きな Er³⁺ (r_{Er} : 1.73 Å, r_{Ti} : 1.45 Å) が添加されたことで、結晶格子内に歪みが生じ、580 cm⁻¹ の Nb-O 対称伸縮振動(▲)が分裂したものである。

図5は Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜のSEMの Er³⁺濃度依存性である。測定試料の(a)はゾルゲル法により作製した SLN であり、(b)～(d)は Ti⁴⁺濃度 1.5 mol%一定とし、種々の Er³⁺濃度 (b)

図6 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の屈折率

Fig. 6. Refractive index of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti⁴⁺ concentration of 1.5 mol%. Ti:Er:LiNbO₃ (● : n₀, ○ : n_e), z-cut CLN wafer (n₀ : ▲ 2.287, n_e : △ 2.202), SLN (n₀ : ■ 2.286, n_e : □ 2.192).

0.10 mol% (c) 0.62 mol% (d) 0.98 mol%とした。また膜厚は 1 μmとした。(a)～(d)のすべての膜表面には、まったくと言っていいほどひび割れや荒れがなかった。これは、ゾル溶液調整時に PVA を添加したことにより、これが保護コロイドとして作用し、焼成時に生じる応力を PVA が緩和させるためにひび割れや荒れのないきれいな膜が作製可能であったと考えられる。また Er³⁺濃度を増やしていても、膜表面には変化は見られなかったため、Er³⁺濃度を増やすことで膜表面へ影響はないものと考えられる。

図6は Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の屈折率の Er³⁺濃度依存性である。測定試料は Ti:1.5 mol%一定とした。また Ti:Er:LiNbO₃ についての異常光線屈折率(n_e)を○とし、常光線屈折率(n₀)を●とした。この結果から n_e, n₀ともに Ti⁴⁺濃度 1.5 mol%のときでは、Er³⁺濃度 0.1 mol%付近までは急激に減少し、それ以上ではほぼ一定になる傾向が見られた。Er³⁺濃度の増加に伴い屈折率は減少しているが、n_e, n₀ともに z-cut CLN wafer (n₀ : ▲ 2.287, n_e : △ 2.202) やゾルゲル法により作製した SLN (n₀ : ■ 2.286, n_e : □ 2.192)よりも高い値を示している。

図7に Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の伝搬損失の Er³⁺濃度依存性を示す。測定試料は Ti⁴⁺濃度 1.5 mol%一定とし、膜厚は 1 μmとした。また入射光には He-Ne レーザ(632.8nm, TM モード)を使用し、プリズムカップラ法で光散乱検出法を用いて測定を行った。また Ti:Er:LiNbO₃ を●、H⁺交換 z-cut CLN wafer を▲、H⁺交換 SLN を■とした。この結果から、Er³⁺濃度 0.1 mol%付近までは伝搬損失は急激に増加し、それ以上では Er³⁺濃度の増加に伴い徐々に増加する傾向が見られたが、H⁺交換 z-cut CLN wafer(0.71 dB/cm)や H⁺交換 SLN(0.51 dB/cm)よりも低い値を示している。これは、図6.に示したように、屈折率が Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の方が他のものより高いために、導波路中での光の閉じ込め効率が上がり、基板の伝搬損失よりも光導波路部の伝搬損失が小さくなるためであると考

えられる。また Er^{3+} 濃度 1.0 mol% 付近でも 0.45 dB/cm と低いので十分に光導波路として利用できると考えられる。

図 8 は Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の Er^{3+} による発光の Er^{3+} 濃度依存性である。測定試料は Ti^{4+} 濃度 1.5 mol% 一定とし、膜厚は 1 μm とした。また励起光には半導体レーザー(0.98 μm , レーザ出力: 150 mW)を用い、室温で測定を行った。1.53 μm に発光のピークが見られた。これは Er^{3+} の $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 準位の 3 準位系発光と一致している⁽¹³⁾ことから、 Er^{3+} による発光であると考えられる。また Er^{3+} 濃度 0.3 mol% 付近までは急激に増加しそれ以上では、ほぼ一定となる傾向が見られた。

図 7 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の伝搬損失

Fig. 7. Transmission losses of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti^{4+} concentration of 1.5 mol%. Film thickness : 1.0 μm .
● : Ti:Er:LiNbO₃, ▲ : H⁺ exchange z-cut CLN wafer, ■ : H⁺ exchange SLN.

図 8 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の Er^{3+} による発光(1.53 μm)

Fig. 8. Er^{3+} emission (1.53 μm) of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti^{4+} concentration of 1.5 mol%. Film thickness : 1.0 μm .

図 9 は LiNbO₃ に金属イオンを添加した PL スペクトルである。励起光には He-Cd レーザ(325 nm)を用い、15 K で測定を行った。測定試料の膜厚は 1 μm とした。また(a) z-cut CLN wafer (b) Er^{3+} 1.0 mol% LiNbO₃ (c) Ti^{4+} 1.5 mol% LiNbO₃ (d) Ti^{4+} 1.5 mol% Er^{3+} 1.0 mol% とした。この結果から(a)~(c)には見られない発光(549 nm, 560 nm)が(d)からは観察されたことから、 Ti^{4+} , Er^{3+} を共ドーピングすることによる発光であると考えられる。

図 10 は Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の Ti^{4+} , Er^{3+} 共ドーピングによる可視光域での発光の Er^{3+} 濃度依存性である。測定試料は Ti^{4+} 濃度 1.5 mol% 一定とし、膜厚は 1 μm とした。励起光には He-Cd レーザを用い 15 K で測定を行った。なお発光ピークは 2 つあるが、同じ変化をするのでこの図では波長 549 nm の強度について示す。この結果から、 Er^{3+} 濃度が 0.05 mol% 付近の

図 9 PL スペクトル

Fig. 9. PL spectra He-Cd laser (352 nm, at 15K), (a) z-cut CLN wafer (b) Er^{3+} 1.0 mol% LN (c) Ti^{4+} 1.5 mol% LN (d) Ti^{4+} 1.5 mol% Er^{3+} 1.0 mol% LN.

図 10 Ti:Er:LiNbO₃ 薄膜の PL 強度

Fig. 10. PL intensity of Ti:Er:LiNbO₃ films with Ti^{4+} concentration of 1.5 mol%. Film thickness : 1.0 μm . He-Cd laser (352 nm, at 15 K).

きに異常に強いピークが観察され、それ以外の場合は Er^{3+} 濃度の増加に伴い単調に大きくなっている。また、 Er^{3+} 濃度 0.05 mol% 一定で Ti^{4+} 濃度を变化させたときにおいても、同様に Ti^{4+} 1.5 mol%, Er^{3+} 0.05 mol% の時にのみ強いピークが見られたことから、この点は特異的な点であると考えられる。

4. ま と め

ゾルゲル法を用いて Ti^{4+} と Er^{3+} を共ドーブした SLN 薄膜を作製し、 Ti^{4+} および Er^{3+} の添加条件と膜組成、結晶性、光導波路特性、および可視光域での発光特性を調べ以下のことを明らかにした。

(1) PVA を添加した前駆体溶液を用いることによってクラックフリーの Ti:Er:LiNbO_3 薄膜を作製することができた。

(2) 膜中の Ti^{4+} および Er^{3+} 濃度は、前駆体合成時の仕込み濃度と一致することが分かった。

(3) 作製した膜の結晶性は XRD 測定から基板の z-cut CLN wafer の結晶面に強く配向した膜であることが確認できた。

(4) ラマンスペクトル測定から、 Er^{3+} をドーブすることにより結晶格子内に歪みが生じ、 580 cm^{-1} の Nb-O 対称伸縮振動が分裂することが確認できた。

(5) Ti^{4+} 濃度 1.5 mol% の膜では、 Er^{3+} 濃度を 1.3 mol% まで増加させても、屈折率(n_o , n_e)は基板よりも高い値を示した。

(6) Ti:Er:LiNbO_3 薄膜の伝搬損失は、z-cut LN wafer および SLN 薄膜にプロトン交換法で作製した導波路の伝搬損失の値よりも低い値を示した。

(7) 作製した膜に $0.98\text{ }\mu\text{m}$ 光を照射すると Er^{3+} の 3 準位系発光($^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$)に基く、 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 帯域での発光が観測され、この膜が光増幅素子に利用できることが分かった。

(8) 作製した膜は $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 帯域での発光のほかに、可視光域での発光が確認できた。この可視光域での発光は基板、SLN 薄膜、 Er:LiNbO_3 薄膜、 Ti:LiNbO_3 薄膜からは観測できなかったため、 LiNbO_3 に Ti^{4+} と Er^{3+} を共ドーブすることによる発光であるといえる。また PL 測定の結果よりこの発光は 549 nm , 560 nm であると確認できた、また発光強度は $\text{Ti:1.5 mol\% Er:0.05 mol\%}$ 付近のときに非常に強い発光ピークが確認できた。

本研究は文部科学省の学術フロンティア推進事業の援助を受けて行われたものである。ここに謝意を表します。

(平成 17 年 3 月 15 日受付, 平成 17 年 8 月 8 日再受付)

文 献

- (1) J. A. Fells, I. H. White, R. V. Penty, M. A. Gibbon, G. H. B. Thompson, A. P. Wright, R. A. Saunders, C. J. Armistead, and E. M. Kimber: "Crip and System Performance of Integrated Laser Modulators.", *IEEE Photonic Technol Lett*, Vol.17, No.11, p.1279-1281 (1995)
- (2) 貴堂靖昭・古屋一仁・末松安晴: 「電気光学効果を用いた光偏波面制御」, 信学論誌 C, Vol.68, No.2, pp.79-86 (1985)
- (3) M. Fujimura, T. Murayama, and T. Suhara: "Quasi-Phase-Matched

Difference Frequency Generation Devices with Annealed / Proton-Exchanged LiNbO_3 Waveguides Buried by Reverse Proton Exchange", *Jpn. J. Appl. Phys. Part*, Vol.2, No.43, 12A ()

- (4) M. A. Breazeale, I. V. Ostrovskii, and M. S. Mcpherson: "Thermal hysteresis of nonlinear ultrasonic attenuation in lithium niobate", *J. Appl. Phys.*, Vol.96, No.5, pp.2990-2994 (2004)
- (5) Y. Kondo, T. Fukuda, Y. Yamashita, K. Yokoyama, K. Arita, M. Watanabe, Y. Furukawa, and H. Nakajima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.39, pp.1477 (2000)
- (6) M. Takahashi, K. Yamauchi, T. Yagi, A. Nishiwaki, and K. Wakita: "Preparation and characterization of high-quality stoichiometric LiNbO_3 thick films prepared by sol-gel method", *Thin solid films*, Vol.458, pp.108-113 (2004)
- (7) M. Takahashi, R. Otowa, H. Mori, S. Sato, A. Nishiwaki, K. Wakita, N. Ohnishi, T. Yagi, and T. Utida: "Epitaxial growth and characterization of stoichiometric LiNbO_3 films prepared by sol-gel method", *J. Appl. Phys.*, Vol.96, pp.6569-6573 (2004)
- (8) 宮沢信太郎・野口壽一: 「Ti 拡散 LiNbO_3 光導波路作製における問題点」, 応用物理, Vol.48, No.9, pp.867-874 (1979)
- (9) 音羽亮平・山内けい子・高橋 誠・大西直之・西脇 彰・脇田絃一・八木 透・大橋秀樹・佐橋家隆: 「ゾルゲル法による Er doped LiNbO_3 薄膜の作製とその物性評価(II)」, 春期応用物理学会関係連合講演予稿集, 27p-W-18 (2003)
- (10) 八木 透・山内けい子・佐藤充紀・高橋 誠・西脇 彰・脇田絃一・大橋秀樹・佐橋家隆: 「ゾルゲル法による Ti:LiNbO_3 厚膜の作製とその物性評価」, 春期応用物理学会関係連合講演予稿集, 27p-W-17 (2003)
- (11) 脇田絃一・井上真吾・音羽亮平・西脇 彰・高橋 誠・佐橋家隆: 「ゾルゲル法で作製した Ti 添加 LiNbO_3 厚膜における電気光学効果」, 電学論 C, Vol.124, No.12, pp.2401-2406 (2004-12)
- (12) 音羽亮平・芳賀 剛・高橋 誠・大西直之・西脇 彰・脇田絃一・佐橋家隆・上原 昇: 「ゾルゲル法による Ti:Er:LiNbO_3 薄膜の作製と膜物性評価(II)」, 春期応用物理学会関係連合講演予稿集, 27p-W-18 (2003)
- (13) S. F. Li, Q. Y. Zhang, and Y. P. Lee: "Absorption and photoluminescence properties of Er-doped and Er/Yb codoped soda-silicate laser glasses", *J. Appl. Phys.*, Vol.96, No.9, pp.4746-4750 (2004)

芳 賀 剛

(学生員) 1981 年 9 月 24 日生。2000 年 4 月中部大学工学部応用化学科入学, 2004 年 4 月中部大学大学院工学研究科博士課程前期入学, 現在にいたる。主として Ti,Er 共ドーブ LiNbO_3 の作製と評価の研究に従事。

梶 谷 尚 文

(非会員) 1982 年 11 月 10 日生。2001 年 3 月中部大学工学部応用化学科入学, 2005 年 3 月同学科卒業。同年 4 月中部大学大学院工学研究科博士課程前期入学, 現在に至る。主として希土類ドーブ LiNbO_3 の作製と評価の研究に従事。

深 見 宮 子

(非会員) 1982 年 4 月 30 日生。2001 年 3 月中部大学工学部応用化学科入学。主として希土類ドーブ LiNbO_3 の作製と評価の研究に従事。2005 年 3 月同学科卒業。同年 4 月(株)興和工業所入社, 現在に至る。

高橋 誠

(非会員) 1953 年 10 月 12 日生。1986 年 3 月北海道大学大学院理学研究科化学専攻博士課程修了。1986 年 4 月川崎製鉄㈱ハイテク研究所勤務。半導体材料・素子の開発研究に従事。2000 年 4 月中部大学工学部応用化学科教授。理博。応用物理学会、電気化学会、アメリカ電気化学会 (ECS) 会員。

佐橋 家隆

(非会員) 1950 年 8 月 20 日生。1976 年 3 月名古屋大学工学部応用化学科卒。同年 4 月(株)山壽セラミックス入社。1984 年製造部長, 1995 年取締役工場長、2002 年常務取締役。オプトエレクトロニクス, 弾性表面波材料, ニオブ酸リチウム・タンタル酸リチウム単結晶の育成、加工, 評価, 高品質化, 研磨加工, 技術研究に従事。

脇田 紘一

(正員) 1944 年 4 月 18 日生。1973 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。同年 4 月日本電信電話 (公) 武蔵野電気電信研究所勤務。光伝送用半導体素子の研究実用化に従事。1997 年 10 月中部大学工学部電子工学科教授。工博。電子情報学会、応用物理学会会員。

音羽 亮平

(非会員) 1979 年 5 月 29 日生。1998 年 4 月中部大学工学部応用化学科入学、2002 年 4 月中部大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 santecc(株)入社。