

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360031

研究課題名（和文） 紫外光下電圧印加による MgO:LiNbO₃ 分極反転構造作製とその光デバイス応用研究課題名（英文） Fabrication of domain inverted structure in MgO:LiNbO₃ by voltage application under ultraviolet light illumination and application to optic devices

研究代表者

藤村 昌寿 (FUJIMURA MASATOSHI)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80263218

研究成果の概要（和文）：

紫外光照射下常温電圧印加によるMgO:LiNbO₃周期分極反転構造作製について以下の成果を得た。

- 1) 実効反転抗電界低減には波長331nm未満の紫外光が有効であることを見出した。
- 2) 紫外光照射下での第1段階電圧印加と、その後の紫外光を照射しない第2段階の電圧印加により、周期分極反転構造を形成する方法を見出した。
- 3) 導波路擬似位相整合第2高調波発生デバイスを試作し、理論予測に近い特性を得た。本方法の有用性が実証できた。

研究成果の概要（英文）：

A new simple method for formation of MgO:LiNbO₃ domain inverted gratings was proposed and examined. Periodic domain structure was formed on -z face by first voltage application under ultraviolet (UV) light with periodic intensity distribution. Following second voltage application without UV resulted in periodic structure continuing through crystal thickness. A waveguide quasi-phase-matched (QPM) nonlinear-optic device was fabricated by the method and characterized. The device performance agreed fairly well with theoretical prediction, and high applicability of the method to QPM device fabrication was demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用光学・量子光工学

キーワード：非線形光学、分極反転、擬似位相整合、光導波路、波長変換、光エレクトロニクス、ニオブ酸リチウム

1. 研究開始当初の背景

強誘電周期分極反転構造と光導波路を集積化した、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3 :LN) 導波路擬似位相整合非線形光学波長変換デバイスの研究が活発に行われている。海外では、米国スタンフォード大学、独国パデルボン大学、英国サザンプトン大学など、国内では、我々グループに加えて、早稲田大学、物質・材料研究機構、分子科学研究所、NTTなどで研究が実施されている。デバイス性能が実用レベルに近づくにつれて、短波長・高強度の励起光により引き起こされるLNの光誘起屈折率変化が動作の不安定性を引き起こすことが明らかになってきた。

LNの光誘起屈折率変化は、MgOを添加することで抑制できる。我々は、MgO添加LNを用いた導波路擬似位相整合非線形光学デバイスの研究を開始した。前述の研究機関でも同様の検討が行われ、いくつかの作製例が報告されたが、いずれも特殊な工夫を必要とする上、その詳細は報告されていなかった。我々は、超高圧水銀灯の紫外光を照射すればMgO添加LNの分極反転に必要な電圧を低減できるという現象を独自に見出した。この現象に基づいた分極反転構造作製法を考案し、周期 $15\mu\text{m}$ 程度の周期分極反転構造の作製に成功した。この方法では、Crパターンを有するフォトマスクを結晶に重ねて配置し、それを介して超高圧水銀灯からの紫外光を結晶に照射する。結晶には液体電極を介して全面に電圧を印加する。紫外光照射部では実効反転抗電界が低減するので分極が反転する。一方、非照射部では反転が起らない。よって、Crパターンに応じた分極反転構造が得られる。この方法は、大変簡便で生産性の高い方法であるが、分極反転構造の均一性にはまだ問題があり、デバイス化には至っていなかった。この分極反転方法については、英国

サザンプトン大学や独国ボン大学などのいくつかの研究機関で類似の研究が始まっていたが、分極反転グレーティングは得られておらず、我々の研究が大きく先行していた。

2. 研究の目的

本研究では、紫外線照射下での高電圧印加によりMgO添加LN結晶に強誘電分極反転グレーティングを作製する方法を詳細に調べ、作製技術の確立を図ること、また、分極反転グレーティング構造を作製したMgO添加LN結晶に光導波路を集積化して、導波路擬似位相整合非線形光学波長変換デバイスを作製、その性能を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

研究目的達成のため、具体的には次のような課題に取り組んだ。

(1) 紫外光照射下電圧印加分極反転特性解明

上記分極反転法は申請者が独自に見出した方法であるが、その反転特性の詳細はまだ明らかになっていない。温度依存性、紫外光強度依存性、紫外光波長依存性、印加電圧依存性などを調べる。また、結晶に入射したプローブ用レーザー光の光強度分布を観察して、紫外光照射下電圧印加時の結晶内電界分布の測定を行う。これらの知見を基にして屈折率変化分極反転メカニズムを検討し、明らかにする。

(2) 周期分極反転構造作製技術確立

単パルス電圧印加、連続パルス電圧印加、光導電膜装荷結晶への電圧印加、2段階電圧印加など、種々の手法を用いた電圧印加による周期分極反転構造作製を試み、光デバイス応用可能な微細周期・大面積周期分極反転構造の作製条件を確立する。

適切なフォトマスクを用いれば、紫外光

波長程度の光強度分布を結晶内部に形成できる。従って、これまで実現例のない周期 $<0.5\mu\text{m}$ 程度の微細周期分極反転構造が形成できる可能性がある。紫外光の回折の効果と(1)の結果を総合して検討し、その作製を目指す。

(3) MgO添加LN導波路擬似位相整合非線形光学波長変換デバイスの試作と評価

紫外光照射下電圧印加により作製した分極反転グレーティングを用い、MgO添加LN擬似位相整合非線形光学波長変換デバイスを試作し、その波長変換特性を測定する。光誘起屈折率変化特性、波長変換効率、出力パワー安定性などを測定し、紫外光照射下電圧印加分極反転構造作製法の有用性を評価する。

4. 研究成果

UV照射下室温電圧印加セットアップを図1に示す。MgO:LiNbO₃(0.5mm^t)-Z面に格子状Crフォトリソマスク(周期19 μm)を重ね、超高压水銀灯の波長 $\sim 313\text{nm}$ のUV(強度1.9mW/cm²)を照射しつつ、面積5 \times 8mm²の電極で1.4kVの電圧を結晶に室温で一様に印加した。結晶を流れた電荷が55 μC になるまで印加した。UV照射部で分極が反転して-Z面表層では周期分極反転構造が得られたが、反転域深さは僅か $\sim 5\mu\text{m}$ であった。より高い電圧の印加で結晶貫通反転域が得られたが面内均一性は不十分であった。ただし、この時の貫通反転域が非照射部でも得られたことから、貫通反転にUVは必要ないことが分かった。

そこで、UV照射下電圧印加により-Z面表層に分極反転域を形成、続いて非照射電圧印加により貫通反転域を形成する、2段階室温電圧印加を試みた。上述の条件でUV照射下電圧印加を施し、続いて非照射で2.5kVの電圧を一様に印加した。結晶を流れる電流は最初増加し、やがて減少してゼロになった。エッチングで分極反転構造を調べた(図2)。-Z面近傍はベ

タ状一様反転であったが、結晶内部ほぼ全域で+Z面まで貫通する周期分極反転構造を得ることができた。-Z面近傍の断面構造を観察すると、第1段階で得られた-Z面表層分極反転域は第2段階では拡大せず、第1段階で反転しなかった領域で結晶を貫通する分極反転域が得られている事が分かった。第1段階で形成された-Z面表層付近の反転域が第2段階での貫通分極反転を抑制していると考えている。

擬似位相整合波長変換デバイスを作製した。まず、2段階電圧印加で周期分極反転構造を作製した。MgO:LiNbO₃(0.5mm^t)+Z面に金薄膜電極(30 \times 8mm²)を堆積、格子状(周期19.0 μm)Crフォトリソマスクに結晶-Z面を重ねた。結晶とマスクの間に満たした液体電極の厚さの再現性・均一性向上のため、ポリイミドスペーサ(35 μm ^t)を用いた。+Z面には導電性ゴムを介してAlブロックを押付けた。第1段階電圧印加として、超高压水銀灯の波長313nm紫外光(強度1.6mW/cm²)を照射しつつ、液体電極を介して-1.5kVの電圧を結晶に一様に印加した。結晶貫通電荷が300 μC の時に印加を停止した。第2段階では、紫外光を照射せず、-2.4kVの電圧を電流が流れなくなるまで(約200秒)印加した。ベタ状一様反転となる-Z面近傍を除き、結晶内部ほぼ全域で+Z面まで貫通する周期分極反転構造(相互作用長 $L=30\text{mm}$)が得られた。Al薄膜マスク(開口幅5.0 μm)を用いた安息香酸中選択プロトン交換(200 $^{\circ}\text{C}$,3h)と酸素雰囲気中アニール(370 $^{\circ}\text{C}$,3h)により+Z面にチャネル光導波路を作製した。

擬似位相整合第2高調波発生実験を行った。波長可変InGaAsP半導体レーザの光をEDFAで増幅し、レンズを用いた端面結合によりTM導波モード励起光を励振した。励起光波長1552.4nmの時に擬似位相整合に基づく強いTMモード第2高調波が得られた。出力SH

光パワー $P_{SH}(L)$ と透過励起光パワー $P_p(L)$ は導波路出力端で測定した。SHGパワー変換効率 $P_{SH}(L)/P_p(L)$ の励起光パワー依存性を図3に示す。効率は励起光パワーに比例して増加し、その比例定数 $P_{SH}(L)/\{P_p(L)\}^2$ として 84 %/Wを得た。励起光パワーが=506 mW の時に、最大SH光パワー、200 mW が得られた。この時のSHGパワー変換効率として $P_{SH}(L)/P_p(L)=43$ %が得られた。導波路伝搬損失を考慮して見積った入射励起光パワー $P_p(0)$ を用いると、規格化SHG変換効率 $P_{SH}(L)/\{P_p(0)\}^2$ は73 %/Wとなった。 $P_{SH}(L)$ の励起光波長依存性の測定結果を図4に示す。導波路におけるファブリペロ共振に基づく励起光パワー揺らぎにより微細なリップル構造が重畳されているものの、理論で予測される Sinc^2 的依存性が得られた。励起光波長 FWHM受容幅は、理論予測0.41nmに近い0.44 nmが得られた。作製したデバイスの均一性の良さを示唆している。

QPM条件下での非線形モード結合方程式を弱励起近似 (NPDA) の下で解くと、規格化SHG効率は次式で与えられる。

$$\frac{P_{SH}(L)}{P_p(0)^2} = \kappa^2 L^2 \exp(-2\alpha_p L) \left[\frac{\exp\{(\alpha_p - \alpha_{SH}/2)L\} - 1}{(\alpha_p - \alpha_{SH}/2)L} \right]^2$$

非線形結合係数 κ はSHG係数、SH光モード、および励起光モードの2乗分布の重なり積分で与えられる。モード分布をガウス分布で近似し、SHG係数 d_{33} として 20 pm/Vを用い、SH光と励起光のモード分布ピーク位置のずれを 2.5 μm であると仮定すると、 κ は 0.4 $\text{W}^{-1/2}\text{cm}^{-1}$ と見積られた。この値と、相互作用長 $L=30$ mm、励起光伝搬損失 $\alpha_p=0.2$ dB/cm、SH光伝搬損失 $\alpha_{SH}=0.4$ dB/cm を上式に代入し、規格化効率の理論値として 70 %/W を得

た。実験値73 %/W は理論値に良く一致した。

これにより、紫外照射電圧印加分極反転法の有用性を示すことができた。この分極反転法は、既に報告されている方法と比較すると、フォトリソグラフィなどのウェット処理を必要とする微細パターン形成プロセス、電圧印加時に結晶加熱や真空チャンバなどを必要としない大変簡便で生産性の高い方法である。今後、製品の作製に用いられるようになる可能性が高いと考えられる。

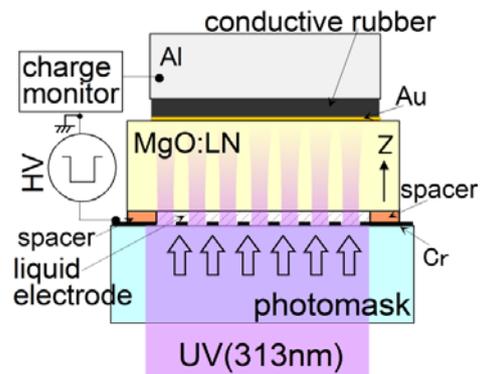


図1 電圧印加セットアップ

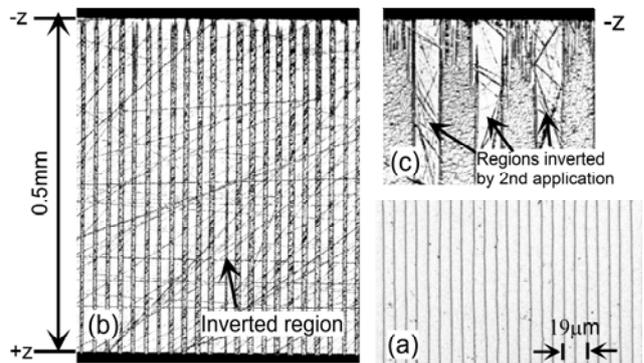


図2 分極反転構造(a)+z 表面(b)結晶断面(c)-z 面付近断面

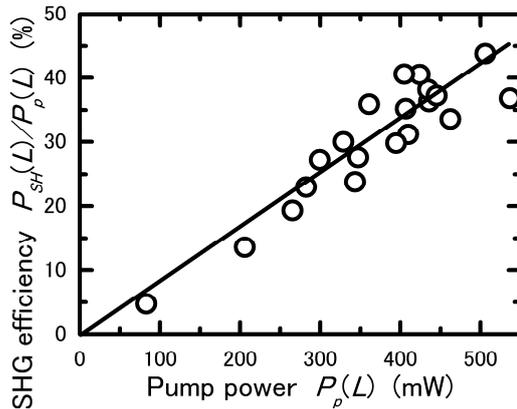


図 3 SHG パワー変換効率の透過励起光パワー依存性の測定結果

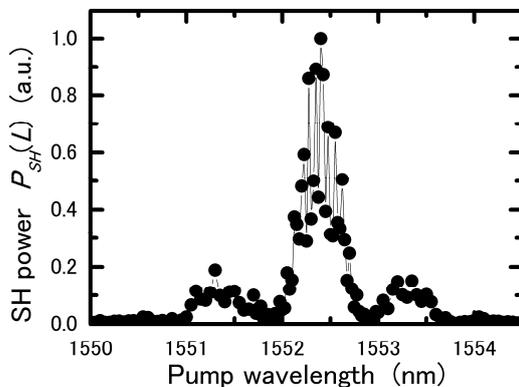


図 4 SH 光パワーの励起光波長依存性

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 1 件)

- (1) M. Fujimura, E. Kitado, T. Inoue, and T. Suhara, "MgO:LiNbO₃ Waveguide quasi-phase-matched second-harmonic generation devices fabricated by 2-step voltage application under UV Light," IEEE Photon. Technol. Lett., accepted (2011). [査読有]

[学会発表] (計 3 件)

- (1) 藤村昌寿、北戸英理、井上敏之、栖原敏明 "紫外照射 2 段階室温電圧印加作製 MgO:LiNbO₃ 周期分極反転構造を用いた導波路疑似位相整合第 2 高調波発生デバイス," 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 25a-BF-3 (2011 年 3 月 25 日、厚木).
- (2) 藤村昌寿、井上敏之、栖原敏明: "紫外

光下電圧印加による MgO:LiNbO₃ 周期分極反転構造作製," 応用物理学会励起ナノプロセス研究会, (2010 年 11 月 6 日、大阪).

- (3) 藤村昌寿、井上敏之、栖原敏明 "紫外照射 2 段階室温電圧印加による MgO:LiNbO₃ 周期分極反転構造作製," 平成 22 年秋季応用物理学術講演会, 16p-G-3 (2010 年 9 月 16 日、長崎).

[その他]

ホームページ等

<http://ioe.eei.eng.osaka-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤村 昌寿 (FUJIMURA MASATOSHI)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：80263218

(2) 研究分担者

栖原 敏明 (SUHARA TOSHIAKI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：90116054