

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360037

研究課題名(和文)環境に優しい波長変換紫外レーザーの研究

研究課題名(英文)Study for environmentally-friendly wavelength-converted ultraviolet laser

研究代表者

栗村 直 (KURIMURA, Sunao)

独立行政法人物質・材料研究機構・光・電子材料ユニット・主幹研究員

研究者番号：10287964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：微細ツインを安定に形成するためには、応力印加で発生したツイン壁に蓄積される弾性エネルギーを低減することが重要である。応力印加でツインを発生させた状態から応力値を低下させて、バックスイッチングした時点での応力(BS)を実時間観察で測定した。段差加工面の温度低下とともにBSは約50%低減させ得ることがわかった。温度依存曲線を室温に外挿するとBSは0以下となり、周期 $42\mu\text{m}$ で安定であることが実証された。さらにツインサイズ(周期)に対して抗応力のグラフを測定し、サイズ減少に伴い抗応力が上昇することがわかった。また応力印加状態を継続できるモジュールを作製し、周期 $9.6\mu\text{m}$ にて安定化を確認した。

研究成果の概要(英文)：We here investigate the fabrication technology of fine-period twins in quartz for quasi-phase-matched wavelength conversion to VUV light. To form fine stable twins, it is essential to reduce the stored elastic energy in stress application because the energy triggers backswitching (BS) of the formed twins. For estimating the energy stored in twin walls, we developed a method to measure BS stress. If we use the sufficiently low decreasing rate, the BS stress is turned out to be lowered by 50% as the temperature decreases. The extrapolated curve indicates the BS stress should be lower than zero, meaning twins could survive even at zero stress. The guideline is established for stabilization. We also measured the coercive stress for twins and obtained the step width dependence of the stress. As the step width becomes narrower, more stress is required for switching. Furthermore, we designed and fabricated stress-maintaining module and achieved stable fine twin structures with $9.6\mu\text{m}$ period.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：水晶 分極反転 非線形光学 常誘電体 ツイン

1. 研究開始当初の背景

半導体微細加工、光情報記録、眼科医療、環境計測などの分野では毒性希ガスを用いたエキシマレーザー(波長 193nm)が使用されている。高いエネルギーをもつ短波長レーザー光は、現在は密度の低いガスを媒質としており、一定の利得を得るために長い相互作用長が必要になっている。密度の高い固体波長変換材料を用いれば、小型で安全な可搬性の高い真空紫外レーザーを実現できる。そこで豊富な天然資源で環境に安全な固体水晶 SiO₂ 波長変換デバイスによる小型波長変換レーザーを提案している。エキシマレーザーを代替するモバイル真空紫外レーザーは在宅眼科治療やフィールド環境計測に展開できるため医療・環境分野において新規市場を開拓することができる。

2. 研究の目的

水晶 SiO₂ を用いる擬似位相整合波長変換のためには、水晶内部に微細な周期的極性反転構造を造り込むことが必要になる。この極性反転は、高温下で外部より応力を印加することにより実現できるため、所望の領域に段差加工を施して選択的に応力を印加することで周期ツインを発生させる。本プロジェクトでは、微細な周期ツインを安定的に形成する技術を探索する。

3. 研究の方法

微細ツインを安定的に形成するためには、応力印加で発生したツイン壁に蓄積される弾性エネルギーを低減することが重要であり、これが高いとバックスイッチング(BS)が発生する。ツイン形成過程の実時間観察法を用いて、応力および温度条件に対するツインの形成プロセスを評価し、バックスイッチング(BS)の蓄積エネルギーを評価する。壁の蓄積エネルギーを評価するために、応力を印加してツインを発生させた状態から応力の絶対値を低下させて、BSした時点での応力(σ_{BS})を実時間観察で測定する。これによりツイン安定化のためのパラメータ探索を行い、バックスイッチ応力(σ_{BS})を低減できるパラメータ領域を探索する。蓄積される全弾性エネルギーがBSのトリガーと推察されることから、ツイン壁の面積をきめるデバイス形状などもパラメータとして検討する。

σ_{BS} = 0 の領域探索に困難がみられる場合には、応力を保持してツインのBSを抑制する応力保持治具を用いてツインの安定化を検討する。

4. 研究成果

応力印加を 350 度付近で行った後、冷却時の温度勾配を十分小さくして徐冷を行うと、段差加工面の温度低下とともに σ_{BS} は約 50%低減させ得ることがわかった。この温度

依存曲線を室温に外挿すると σ_{BS} は 0 以下と求められ、周期 42 μm では安定的に存在することが実証された(図 1)。ここにおいて σ_{BS} の定量評価から安定的なツイン形成に到る手法が確立されたと言える。今後短周期において σ_{BS} を 0 とする条件を継続的に探索する。

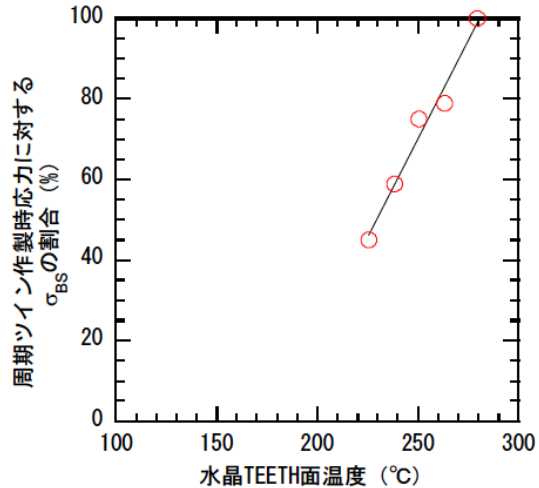


図 1 BS の冷却開始温度依存性

さらにツインサイズ(段差部幅)に対して抗応力のグラフを測定し、サイズ減少に伴い抗応力が上昇することがわかった(図 2)。微細ツイン形成時の抗応力の境界条件依存性が求められた。これにより周期構造設計時の設計幅から抗応力を予測することができ、作製条件の探索が容易になった。

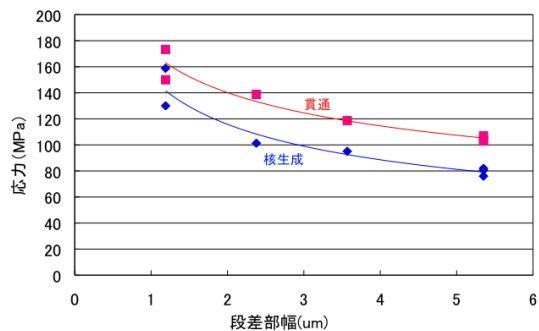


図 2 抗応力の段差幅依存性

また有限要素法によるシミュレーションを用いて結晶内の応力分布を計算し異なる段差形状と抗応力の関係を測定した。抗応力に大きな変化はみられず、大きな依存性を示さないことがわかった。一般に依存性の大きいパラメータを見いだすことと同様に、依存性の小さいパラメータを見いだすことは重要である。パラメータを消去することは次元の削減と等価であり、実験数を大きく減らし真理に近づく確実な道である。このようにして段差構造の形状を制御パラメータから除くことができた。

これらと平行して応力印加状態を継続できる高平行モジュールを試作し、ツインの安定化を確認した。写真は周期 9.6 μm の段差構

造に応力印加した際のツイン構造を示している。直交ニコルを用いて屈折率楕円体の回転をコントラストに変換してツインを可視化している。微細なツイン構造が応力保持モジュールにより安定化されていることがわかる。

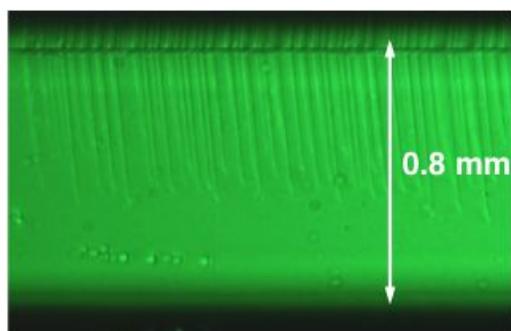


図3 周期 9.6 μm のツイン構造

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 16 件)

H. H. Lim, S. Kurimura, and N. E. Yu, "Parasitic-light-suppressed quasi-phase-matched optical parametric oscillation device", OPTICS EXPRESS, 査読有, vol.22, No.5, 369-375, 2014, DOI:10.1364/OE.22.005209.

栗村直, 「高出力波長変換デバイス・材料の開発」, 機能材料, 査読無, vol.31, No.3, 5-10, 2011.

栗村直, 「波長変換材料の進展」, THE REVIEW OF LASER ENGINEERING(レーザー研究), 査読有, vol.39, No.5, 319-325, 2011. DOI: 10.1364/OME.1.001367.

S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada, and T. Ueno, "Quartz revisits nonlinear optics: twinned crystal for quasi-phase matching", Optical Materials EXPRESS, 査読有, vol.1, No.7, 2011, 1367-1375, DOI:10.1364/OME.1.001367.

H. H. Lim, S. Kurimura, T. Katagai, I. Shoji, "Thermal performance in high power SHG characterized by phase-matched calorimetry", OPTICS EXPRESS, 査読有, vol.19, No.23, 2011, 22588-22593.

DOI:10.1364/OE.19.022588.

[学会発表](計 15 件)

栗村直, 「波長変換材料・デバイスの進展」, レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場, 北九州市, 日本 (2014.1.20).

S. Kurimura, H. H. Lim, and N. E. Yu, "Green-Suppressed

Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillation, Advanced Solid-State Lasers 2013, Paris Marriott Rive Gauche Hotel and Convention Center, Paris, France (2013.10.29).

H. H. Lim, S. Kurimura, W. Nagashima, K. Noguchi, and I. Shoji, "Photo-thermal Effects in High-Power QPM Wavelength Conversion," JSAP-OSA Joint Symposia 2013, 同志社大学京田辺キャンパス, 京田辺市, 日本 (2013.9.18).

H. H. Lim, S. Kurimura, W. Nagashima, K. Noguchi, and I. Shoji, "Dephasing and lensing in high power wavelength conversion", Nonlinear Optics (NLO), The Fairmont Orchid, Hawaii, USA (2013.7.25).

S. Kurimura, "Designable nonlinear optical devices for quantum optics", New Science and Technologies Using Entangled Photons (NSTEP2013), 大阪大学, 吹田市, 日本 (2013/07/09).

H. H. Lim, S. Kurimura, W. Nagashima, K. Noguchi, and I. Shoji, "Thermal management for high-power wavelength conversion", CLEO-PR& OECC/PS 2013, 国立京都国際会館, 京都市, 日本 (2013.7.3).

H. H. Lim, S. Kurimura, "Photo-Thermal Performance of QPM Wavelength Converter", CLEO2013, San Jose Convention Center, San Jose, USA (2013/06/12).

原田昌樹, 村松研一, 上田基, 栗村直, 「水晶極性反転におけるバックスイッチ応力の温度依存性」第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 神奈川県, 日本, 28p-B3-4, (2013.3.28).

S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada, and T. Ueno, "Mechanically twinned quartz for UV QPM", NLO50 | 50 Years of Nonlinear Optics International Symposium, ICFO - Institut de Ciencies Fotoniques, Barcelona, Spain (2012.10.10).

原田昌樹, 村松研一, 上田基, 栗村直, 足立宗之, 山田毅, 「真空紫外波長変換を実現する極性反転水晶」, 第 59 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学・早稲田キャンパス, 東京都, 日本, (2012.3.15).

S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Okano, A. Tanaka, S. Subashchandran, S. Kurimura, and N. Nishizawa, "Realization of ultra-broadband entangled photons and application to quantum sensing", SPIE Photonics West 2012, The Moscone

Center, San Francisco, USA (2012.01.24).

H. H. Lim, T. Katagai, T. Shimizu, S. Kurimura, N. Ohmae, N. Mio, and I. Shoji, "Optimal Pump Linewidth for Conversion Efficiency in cw single-pass QPM SHG", IQEC/CLEO Pacific Rim, Sydney Convention and Exhibition Centre, Sydney, Australia (2011.8.29).

H. H. Lim, T. Katagai, S. Kurimura, N. Ohmae, N. Mio, T. Shimizu, and I. Shoji, "Thermal Management in High Power CW SHG Characterized by PMC", Nonlinear Optics (NLO), Marriott Kauai Beach Resort, Kauai, Hawaii, USA (2011.7.19).

S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada, and T. Ueno, "Quartz Revisits Nonlinear Optics: Vacuum-UV Emission in Phase Matching", Nonlinear Optics (NLO), Marriott Kauai Beach Resort, Kauai, Hawaii, USA (2011.7.19).

S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada, and T. Ueno, "Quasi-phase-matched second-harmonic generation at vacuum ultraviolet 193 nm", CLEO 2011, Baltimore Convention Center, Baltimore, USA (2011.5.3).

〔図書〕(計 3件)

栗村直、オプトロニクス社、分極反転デバイス ~過去、現在、そして未来~/ Polarization-reversed optical devices -Past, Present, and Future -, 2012、106-109

原田昌樹、村松研一、上田基、栗村直、オプトロニクス社、真空紫外波長変換を実現する極性反転水晶 / Polarity-reversed Crystal Quartz for Vacuum Ultraviolet Emission、2012、131-134

栗村直、波長変換技術、先端固体レーザー、波長変換技術、2012、500

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称: Wavelength conversion element, wavelengthconversion method phasematching method, and light source device

発明者: 栗村直

権利者: 栗村直

種類: 特許

番号: 13/571696

出願年月日: 2012年8月10日

国内外の別: 外国

取得状況(計 1件)

名称: 波長変換素子、波長変換方法、位相整合方法、及び光源装置

発明者: 栗村直/松村研一

権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構/株式会社ニコン

種類: 特許

番号: 特許登録第 5354501 号

取得年月日: 2013年9月6日

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

NIMS Researchers Database

http://samurai.nims.go.jp/KURIMURA_Sunao-o-e.html

分極反転光デバイスチーム

<http://www.nims.go.jp/fcg/kurimura/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

独立行政法人物質・材料研究機構・光・電子材料ユニット・主幹研究員

栗村直 (KURIMURA, Sunao)

研究者番号: 10287964

(2)研究分担者

独立行政法人物質・材料研究機構・光・電子材料ユニット・ポスドク研究員

林桓弘 (Lim Hwan Hong)

研究者番号: 70601011

(3)連携研究者

株式会社ニコン コアテクノロジー - センター事業開発部探索グループ

原田昌樹 (Masaki Harada)

株式会社ニデック 研究開発本部光学開発部レーザー開発課技師

足立宗之 (Muneyuki Adachi)