

フォトニック結晶共振器によるテラヘルツ波発生の研究 (052102003)

Investigation of Terahertz-wave generation using photonic crystal oscillator

研究代表者

水津光司 名古屋大学

Koji SUIZU Nagoya University

研究期間 平成 17 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

小型かつ連続発振が可能なテラヘルツ波発生器の構築を目的とする。ゲイン媒質として擬位相整合結晶 PPLN を用いる。PPLN 結晶のデザインと特殊加工により、面発光型のテラヘルツ波発生デバイスを実現する事ができる。一般に非線形光学結晶はテラヘルツ帯において非常に強い吸収を有しており、効率の良いテラヘルツ波発生が困難であるが、面発光型素子にする事で吸収の問題を抑制し、高効率なテラヘルツ波発生が可能となる。さらに、フォトニック結晶構造によりテラヘルツ波帯での共振器構造を構築し、PPLN 結晶をフォトニック結晶構造内に設置して共振器中でテラヘルツ波を発生させる事で、PPLN 結晶単体でのテラヘルツ波発生を大きく上回る効率を達成する。高効率なテラヘルツ波発生により励起光源への要求を下げ、半導体レーザーベースでの小型励起光源によるテラヘルツ発生装置の構築を行う。

Abstract

The aim of this research is constructing a compact THz-wave source with CW-operation. A surface emitted THz-wave device is realized by a proper design and special processing for PPLN. Photonic crystal structure has a useful function for a high-Q optical (including THz-wave) oscillator. High conversion efficiency of THz-wave generation via nonlinear frequency conversion would be obtained by inserting a PPLN crystal (gain media) into photonic crystal oscillator. Getting high conversion efficiency leads to reduction of requirements for pumping source, that's follows THz-wave generation using compact pumping source based on diode laser components.

1. まえがき

光波と電波の中間領域に位置するテラヘルツ波帯は、長い間有効な発生方法も検出方法も無く、電磁波のグレーゾーンとして残されてきた。近年、この周波数帯に関する研究が特に光波技術に基づいて世界的に活性化しており、コヒーレントな光源が開発されて来っており、超高速通信や衛星間通信などの通信応用が重要視され初めている。この目的のためには連続発振するテラヘルツ波光源が必要である。本研究開発では、テラヘルツ波を直接共振させることで高効率にテラヘルツ波を発生させ、連続発振を可能とする小型のテラヘルツ波光源の開発を行う事を目的とする。また、そのための励起光源開発や各種デバイス作製技術の開発を行う。

2. 研究内容及び成果

2.1 MgO 添加定比組成 LiNbO_3 (SLN) の分極反転技術の確立

本研究ではテラヘルツ波発生源として分極反転 LiNbO_3 (PPLN) を使用した。母材として MgO 添加 SLN (MgSLN) を使用した。MgSLN は、ごく最近に開発された新規非線形光学結晶であり、分極反転に関する報告もほとんど無い。そこで、レジスト厚の最適化、フォトマスク形状の改良、電圧印加方式の最適化などを行い、デュティ比 50% となる分極斑点結晶作製技術を確立した。

2.2 フレキシブル 2 波長発振光源の開発

半導体レーザーをベースにした小型励起光源の開発を行った。光源としては小型化だけに留まらず高機能性も追求した。すなわち、波長可変性、パルス幅、繰り返し周波数を容易に変更可能なフレキシビリティを実現した。連続発振の半導体レーザー (1.5 μm 帯) を 2 台用い、少なくとも 1 台に外部共振器型半導体レーザーを用いた。連続発振半導体レーザーからの連続波 2 波長を LN 強度変調器に

で切り出し、パルス化を行った。連続波光源に外部共振器型 LD を用いる事で波長可変性が得られ、LN 強度変調器を駆動する電気信号の制御によりパルス幅および繰り返し周波数のフレキシブルな制御を可能とした。パルス増幅においては、微弱なパルス光 (種光) を Er 添加ファイバー増幅器 (EDFA) により増幅した。増幅段階において、種光の増強や広帯域フィルタを導入する事により、図 1 に示すようにパルス光と ASE との比として約 40dB を達成しており、良好な 2 波長パルスの生成に成功した。最終的な光源の出力は 2 波長合計で 4 kW を達成した。

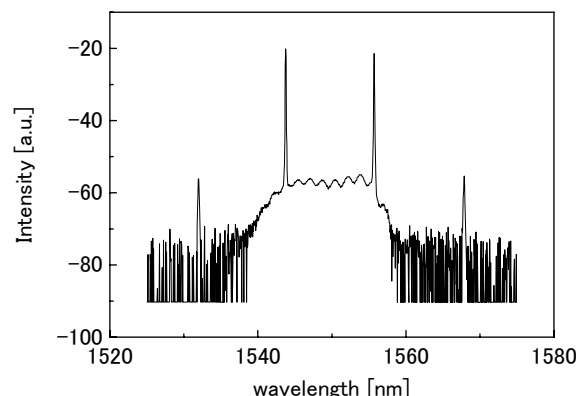


図 1 フレキシブル 2 波長光源出力スペクトル

本光源の有する特性は、Ti サファイヤレーザー、ファイバーレーザー、パラメトリック発振器等、従来光源では得られないものであり、差周波発生用光源としての新規性・有用性は特筆すべきものである。テラヘルツ発生のみならず、近赤外光や中赤外光の差周波発生においても非常に有効である事から、今後の差周波発生応用技術を飛躍的に高める技術である。また、同様の装置で CW 動作から直接変調動作まで自由に使用可能である事から、将来的な

THz 波通信デバイスのプロトタイプとして有望であると言える。

2.3 PPLN のリッジ導波路加工

PPLN をリッジ導波路形状にすることで、テラヘルツ波発生方向への位相整合を考慮する必要がなくなり、かつ、両方向へのテラヘルツ波発生が可能となる。また、テラヘルツ波励起光である半導体レーザー光を導波路内に閉じ込める事で電界強度を上げ、高効率なテラヘルツ波発生が可能となる。リッジ幅として、テラヘルツ波の半波長以下に設定する事で位相整合を考慮する必要がなくなる事から、1.5 THz(波長 200 μm) を発生させる事を前提に PPLN 結晶の屈折率(約 5.2)を考慮すると、20 μm 程度もしくはそれ以下にすれば良い LN 結晶はエッチングによる加工を適用する事が難しく、また、エッチングでは高アスペクト比を実現する事が困難である。そこで本研究では機械加工によるリッジ形状切り出しを採用し、ブレードの選定、スピンドル回転数および送り速度を調整し、チップングが少なく滑らかな面が得られる加工条件を見出した。

2.4 リッジ型 PPLN 導波路によるテラヘルツ波発生

CLN にて作製した導波路型 PPLN によるテラヘルツ波発生試験を行った。図 2 に実験系を示す。結晶の両側に出射されるテラヘルツ波の一方を、テラヘルツ波用ロッドレンズによりコリメートし、シリコンボロメータにより検出した。また、プリミティブな共振器構造として、他方のテラヘルツ波をアルミミラーにて折り返し、PPLN 結晶に再入射させた上で同時に検出した。

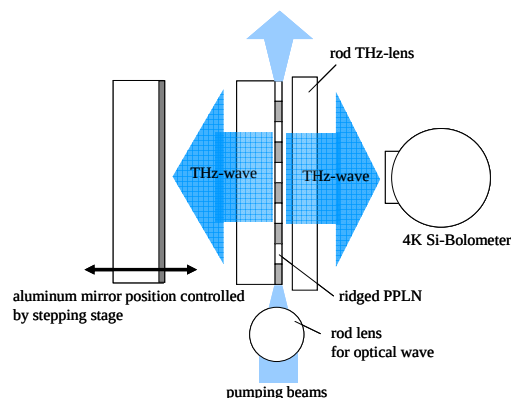


図 2 テラヘルツ波発生実験模式図

図 3 に示すように、ミラーの位置により明確なテラヘルツ波の強弱が確認された。この時、テラヘルツ波の強度は、ミラーを設置しない場合に比べ最大 4.5 倍にまで増強された。ミラーが無い状態、および、テラヘルツ波の強度が最大となる位置にミラーを設置した状態でのテラヘルツ波入出力特性を比較し、共振効果の有効性を検討した。ミラーが無い状態での入出力特性は、差周波発生で良く知られた励起光強度の 2 乗に比例する特性となった。一方、ミラーを設置した場合、テラヘルツ波の強度は励起光強度の 3.3 乗に比例しており、これはテラヘルツ波増幅の明確な証拠である。本構造は、アルミニウム(反射率 95%程度)と LN 端面(反射率 45%程度)での共振器構造とも考えられ、LN の端面は波長以下の薄さではあるが 2 面存在する。図 3 に示した結果ではアルミミラーのスキャンに対しテラヘルツ波強度の強くなるピーク構造が非対称な形をとっている。特に、ピークの左側で高強度を引きずるような形をしているが、これは、シリコンボロメータ側の端面

およびアルミニウムミラーで反射されたテラヘルツ波の干渉であると考えられ、定在波の裾野が LN 内部にわずかに侵入している状態である。定在波の中心を LN 内部に持つてくることでさらに増強が起きることが予想され、プリミティブなテラヘルツ波共振が観測されたとと言える。

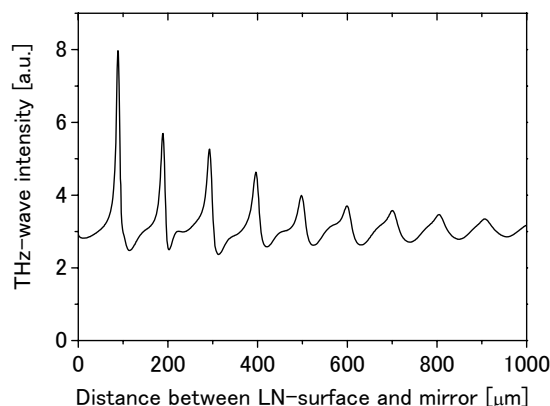


図 3 ミラー位置によるテラヘルツ波出力変動

3. むすび

過去にほとんど報告例のなかった MgSLN の分極反転技術を確認したことは、テラヘルツ波発生だけでなく情報通信分野によっても大きな成果である。また、本研究開発で得られたフレキシブル 2 波長光源は、従来非線形光学で用いられてきた固体レーザーに比べ小型であり、波長可変性、パルス幅、繰り返し周波数を容易に変更可能というフレキシビリティを実現できた。さらに、差周波発生のみならず、CW 半導体レーザー光源を増設する事で、多波長化も非常に容易であることから、さまざまな用途に対応できる自由度の高い光源である。これを元を実現したテラヘルツ波光源は、将来的にはレーザー駆動電源部も含めた上でデスクトップパソコン程度の大きさにする事も十分可能である。全ての光導波部をファイバー結合する事が可能であり、光軸調整の必要の無い光源となる。異分野への転用を行う場合、メンテナンス作業が非常に容易になり、ロバスト性も飛躍的に向上する。最後に、本研究で見出されたテラヘルツ波の増幅現象は、誘電体を用いたテラヘルツ波の増幅作用を始めて観測した例であり、物理的に非常に興味深いのみならず、工学的にもテラヘルツ波の増幅器としての応用が考えられる。

【誌上発表リスト】

- [1] Y. Sasaki, Y. Suzuki, K. Suizu, H. Ito, S. Yamaguchi, M. Imaeda, "Surface emitted terahertz-wave difference frequency generation in periodically poled lithium niobate ridge type waveguide", Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters Vol. 45, No. 12-16, pp L367-L369 (2006)
- [2] K. Suizu, Y. Suzuki, Y. Sasaki, H. Ito, Y. Avetisyan, "Surface emitted THz-wave generation using ridged PPLN and enhancement effect by mixing two THz-waves", Optics Letters Vol. 31, No. 7, pp 957-959 (2006)
- [3] Cheikh Ndiaye, Takashi Sugiyama, Shigehiro Nagano, Koji Suizu, Hiromasa Ito, "Development of dual-wavelength light source for THz-wave generation", The Joint international Conference of The 4th IGNOIE-COE06 & SOIM-COE06 (Sendai) (2007 年 1 月 24 日)