

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656233

研究課題名(和文) High-Q共振器と光差周波発生を用いたミリ波・テラヘルツ波発生デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of millimeter-wave/THz-wave generation devices utilizing a high-Q resonator and nonlinear-optical difference frequency generation

研究代表者

村田 博司 (Murata, Hiroshi)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：20239528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：「方形導波管構造共振器における非線形光差周波発生」を利用した新しいタイプのミリ波・テラヘルツ波発生デバイスの動作解析、設計、試作実験を行い、設計周波数60GHz帯において、実験的に信号生成を確認した。生成された信号の周波数特性も設計値と良く一致し、基本動作実証実験に成功した。また、光差周波発生を利用した光信号相互相関デバイス・光信号自己相関デバイスを提案し、その基本動作を明らかにした。さらに、立体回路との融合およびテラヘルツ波発生へ向けた検討も行き、さらなる発展の可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：New millimeter-wave/terahertz-wave signal generation devices utilizing nonlinear optical difference frequency generation (DFG) in a rectangular waveguide resonator were studied in detail.

By using detailed analyses based-on the coupled-mode theory and the finite-domain time-domain (FDTD) method, basic device operations were identified and a proto-type device operating in the 60GHz-band was designed. In the experiment, 60GHz signal generation was successfully demonstrated in the fabricated device using LiTaO₃ crystal. The measured frequency response of the generated DFG signal was in good agreement with the theoretical one. In addition, the applications of the DFG technique to optical cross-/auto-correlation devices were also proposed and expected characteristics were shown theoretically. The fusion with standard rectangular waveguide circuits and higher frequency signal generation in the terahertz ranges were also discussed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波 テラヘルツ波 非線形光学 導波管 分極反転

1. 研究開始当初の背景

周波数が 100GHz から 10THz の電磁波は、新しい周波数資源・技術領域として近年大きな注目を集めている。非接触イメージングや分子指紋照合による危険物質の探知、さらには 10Gbps 級のブロードバンド無線通信キャリアとしての有用性が実証され、実用化へ向けた研究開発が精力的に進められている。

この周波数帯の信号源としては、光学的技術を用いるものと電子回路技術を用いるものがある。しかし、この周波数帯は「光と電波の境界領域」であるために、光学的・電子回路的いずれの方法でもパワーや安定性に問題がある。さらなる研究開発のために、小型・高効率でコヒーレンスの良いミリ波・テラヘルツ電磁波発生技術・信号処理技術の開発が重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、「導波管構造強誘電性非線形光学結晶」を用いて「ミリ波・テラヘルツ波帯 High-Q 共振器」と「非線形光差周波発生 (DFG) によるミリ波・テラヘルツ波信号注入」を同一の系で実現する。これにより、mW 級ミリ波・テラヘルツ波の発生・処理が可能な新しい小型高性能デバイスを追究することを目的とする。2 年間の研究で信号発生・信号処理デバイスの解析・設計・試作実験を行い、その有用性の実証に挑戦する。

3. 研究の方法

本研究課題で追究するデバイスの基本構成を図 1 に示す。通常の方角導波管の空気部分に強誘電性非線形光学結晶を充填する。この導波管は、発生させるミリ波・テラヘルツ波に対しては 1 つの伝搬モード (TE₁₀ モード) のみが伝搬可能で、他のモードはすべてカットオフとなるようにする。デバイスの両端は光波入力と信号出力のために開放としているが、強誘電性光学結晶 LiNbO₃/LiTaO₃ のミリ波・テラヘルツ波帯における屈折率 (>6) が空気 (=1) に比べてかなり高く、また両端の開口サイズが自由空間波長の 1/10 以下となるために、導波管内部で DFG により発生したミリ波・テラヘルツ波は、両端でほとんど (99%以上) 反射される。したがって容易に High-Q 共振器を得ることができる。また、結

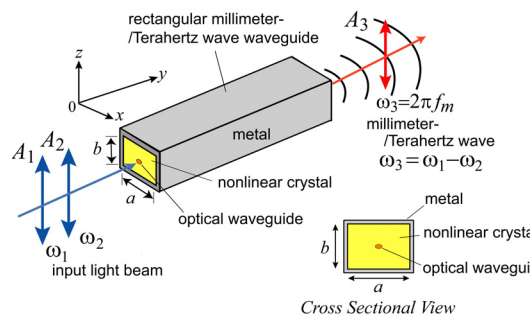


図 1 デバイスの基本構成

晶の表面あるいは中央部に光導波路を作製する。光の波長は、ミリ波・テラヘルツ波に比べて 2 桁以上小さいので、光導波路を作製しても共振器の特性はほとんど変わらない。光導波路に先球ファイバー等を介して、適当な周波数差を持つコヒーレント 2 光波を入射すると、生成された DFG 信号の High-Q 共振器による蓄積によりコヒーレンスの高いミリ波・テラヘルツ波が得られる。

4. 研究成果

(1) 基本動作解析・設計

まず、光学結晶として、z-cut LiTaO₃ を用いて、これを金属導波管中に挿入した時のミリ波・テラヘルツ波帯におけるモード分散特性を求めた。解析結果の一例を図 2 に示す。この解析結果から、60GHz において TE₁₀ モードのみが存在する条件として、図 1 における結晶幅 a=0.7mm と定めた。

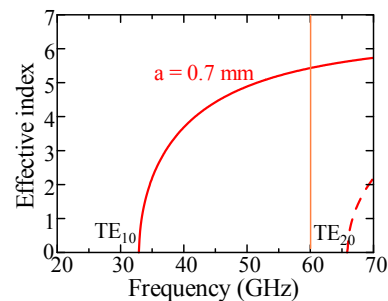


図 2 LiTaO₃ 結晶充填方形導波管の分散特性

次に、LiTaO₃ 結晶中分極反転構造を作製して擬似位相整合を得るための条件を求めた。図 2 の解析結果より、TE₁₀ モードの 60GHz における実効屈折率 (等価屈折率) は $n^{eff}=5.43$ となる。LiTaO₃ を用いた標準的な単一モード光導波路における波長 1.55μm 光の群屈折率は $n_g=2.17$ である。したがって、擬似位相整合のための分極反転周期 2L は、

$$2L = \frac{c}{f_m(n^{eff} - n_g)}$$

の関係より求められ、 $2L=1.53\text{mm}$ となった。このときの、DFG デバイスの周波数特性を図 3 に示す。周期分極反転による擬似位相整合によって決まる特性と、導波管共振器の共振特性とを合わせた特性となることわかる。

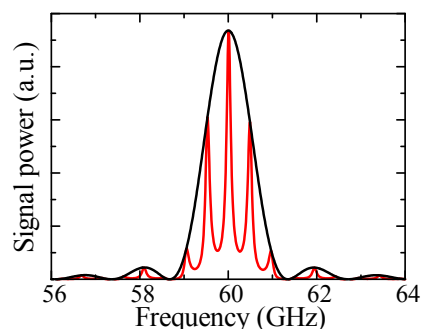


図 3 設計した DFG デバイスの周波数特性

さらに、FDTD 法を用いた詳細な数値解析を行い、DFG 信号の時間・空間発展を求め、デバイスの動作を追究した。解析結果の一例を図4に示す。DFG 信号は、チェレンコフ放射のように広がるが、金属壁で反射されて擬似位相整合が取れる条件のときに累積的に強められ、TE₁₀モードに結合することがわかった。

一連の解析結果を元にして、60GHz 帯で動作する DFG デバイスを設計した。

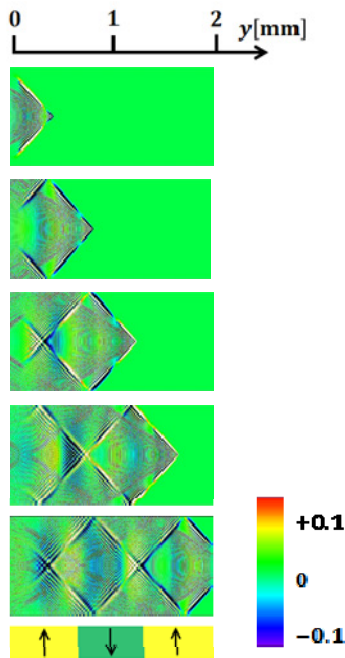


図4 FDTD 法による DFG 信号の時間・空間発展の解析結果

(2) 試作・動作実験

設計した 60GHz 帯信号生成 DFG デバイスを試作した。試作にはコングルーエント組成 z-cut LiTaO₃ 結晶を用いた。分極反転構造はパルス電圧印加法を用いて、光導波路はアニールプロトン交換法を用いてそれぞれ作製した。光導波路作製後、表面に SiO₂ バッファ層を作製してからダイシングソーで切断・研磨して、設計したサイズの光学結晶を得た。その後、両端面を保護用した後、真空蒸着により4つの側面に金属膜 (Al、厚さ 1 μ m) を作製して、デバイスを作製した。試作デバイスの写真を図5に示す。



図5 試作した 60GHz 帯信号生成デバイス

試作デバイスを用いて DFG 信号発生実験を行った。DFB レーザー (現有) からの CW 光を高速光強度変調器 (現有) に入力して、DC バイアス電圧を調節することにより光 2 トーン信号 (周波数差 \sim 60GHz) を生成した。生成した光 2 トーン信号を光増幅器で増幅し、デバイスに入射した。デバイス中で DFG により発生したミリ波信号は端面から空気中に放射される。これを、ホーンアンテナを介してスペクトラムアナライザにより観測したところ、設計通りの周波数 60GHz 帯において明瞭な信号生成を確認した。(図6) 生成された 60GHz 帯信号の周波数特性を図7に示す。ピーク周波数は若干 (約 0.5GHz) 高周波数側にシフトしたが、共振効果によると思われるサブピーク周波数の間隔は、理論値と良く一致した。以上より、提案したデバイスの動作実証実験に成功した。

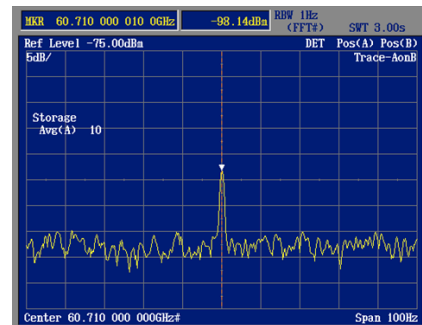


図6 観測したミリ波信号スペクトル

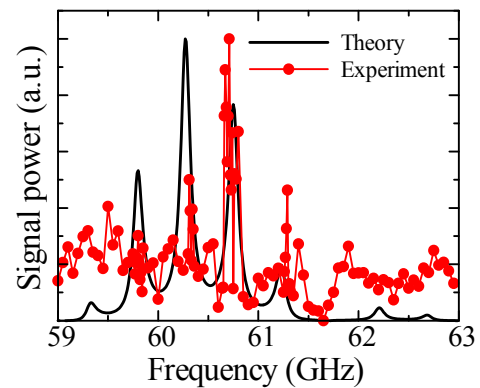


図7 ミリ波信号の周波数特性

(3) 新デバイスへの応用

単一モードミリ波導波管における DFG による信号生成・注入とその位相整合特性を利用することにより、新しい信号処理デバイスを提案した。図8にデバイスの構成を示す。図1と異なる点は、結晶中に光導波路を2本作製して、2つの異なる光信号を入力することができる点である。2本の導波路に、それぞれ設計周波数で変調された光波を入力すると、各光波を変調している信号の相互相関情報をミリ波信号として出力させることが

できる。2つの光信号はそれぞれコヒーレント光でなければならないが、相互のコヒーレンスは不要である。光信号のクロック抽出等への応用が期待できる。

また、高速変調された光信号の自己相関信号を得るための構成についても考察して、ビットレート・適用可能な信号フォーマット等に一定の制約はあるものの、新しいタイプの信号変換・処理デバイスを考案した。例えば、高速光 BPSK 信号をミリ波・テラヘルツ波帯の ASK 信号に変換することが可能である。

さらに、通常の導波管立体回路と融合させた複合導波管構造デバイスおよびテラヘルツ波信号発生デバイスの検討も行い、予想される特性を明らかにした。

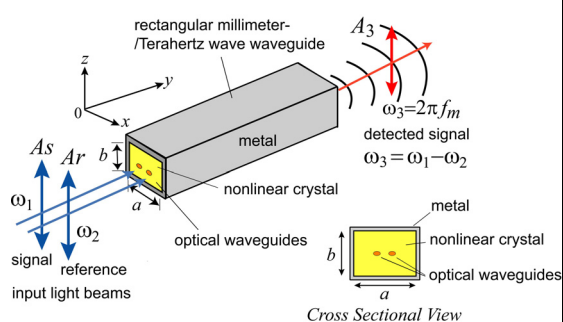


図8 光相互相関デバイス

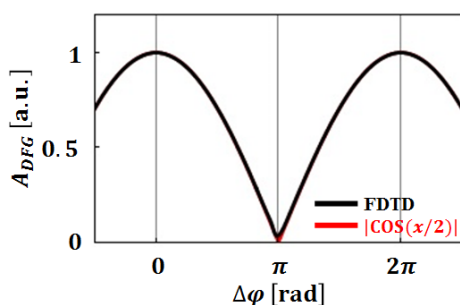


図9 光相互相関デバイスの出力と入力光信号間の位相差との関係
(黒：FDTD 解析結果、赤：理想相関特性)

本研究により、新しいタイプのミリ波・テラヘルツ波信号生成デバイスの可能性を実証するとともに、高速信号処理デバイスを提案した。これらの研究成果は、独自の発想に基づく新たなマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波フォトニクスデバイスとして高い評価を受け、国際学会・国内学会での招待講演および優秀論文賞として評価された。

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8件)

- ① 村田博司, “分極反転デバイスを用いた光-マイクロ波制御”, オプトロニクス, Vol.31, No.371, pp.115-120, 2012. (査読無)
- ② Quang Hong Ngo, Hiroshi Murata and Yasuyuki Okamura, "Nonlinear Crystal Rectangular Waveguide for Microwave/Millimeter-Wave Signal Generation," Technical digest of the 7th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2012), WB-2, Kyoto, Japan. (査読有)
- ③ Yusuke Takashima, Hiroshi Murata, Yasuyuki Okamura, “Analysis of DFG-Based Millimeter-Wave Signal Generation in Rectangular Waveguides Embedded with a Nonlinear Optical Crystal and Its Applications to Optical Signal Correlator and Converter,” Technical digest of the 8th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2013), PA-1, Gwangju, Korea. (査読有)
- ④ Yusuke Takashima, Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura, “Analysis of DFG-based Millimeter-Wave Signal Generation and Proposal of Optical Cross Correlator,” Proceedings of the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim and the 18th Opto-Electronics and Communications Conference/Photonics Switching 2013 (CLEO-PR/OECC&PS2013), ThO3-5, Kyoto, Japan. (査読有)
- ⑤ Hiroshi Murata, “Millimeter-Wave Signal Generation by Nonlinear Optical Effect in Rectangular Waveguides,” (Invited Paper) Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2013 Stockholm, 1P5, No.2, Stockholm, Sweden. (査読有)
- ⑥ Hiroshi Murata, Yuto Maejima, Yasuyuki Okamura, Atsushi Kanno, and Tetsuya Kawanishi, “Millimeter-Wave Signal Generation Using Optical Difference Frequency Generation in Rectangular Waveguide Embedded with LiTaO₃,” Proceedings of the 43rd European Microwave Conference (EuMC 2013), EuMC47-1, Nuremberg, Germany. (査読有)
- ⑦ Yusuke Takashima, Hiroshi Murata, Yasuyuki Okamura, Atsushi Kanno, and Tetsuya Kawanishi, “Optical DFG-based 60GHz signal generation by using a LiTaO₃ rectangular waveguide,” IEICE Electronics Express, Vol.11, 2014. To be published. (査読有)
- ⑧ Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura, “High-Speed Signal Processing Utilizing Polarization-Reversed Electro-Optic Devices,” (Invited Paper) IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.27, 2014. To be published. (査読有)

[学会発表] (計9件)

- ① 村田博司, “非線形光差周波発生を用いたマイクロ波・ミリ波信号生成”(招待講演), 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会 (MWP), 信学技報 Vol.112, No.280, MWP2012-47, pp.7-10, 京都工芸繊維大学 (2012年11月8日).
- ② 前島悠登, 村田博司, 岡村康行, “方形導波管における光差周波発生による60GHz帯ミリ波信号生成”, 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会 (MWP), 信学技報, Vol.112, No.398, MWP2012-87, pp.271-276, 大阪大学 (2013年1月25日).
- ③ 高島佑介, 村田博司, 岡村康行, “光差周波発生を用いた光PSK-ミリ波ASK変換デバイスの提案”, C-14-9, 秋季電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山大学(2012年9月12日).
- ④ 前島悠登, 村田博司, 岡村康行, “方形導波管構造における光差周波発生を用いたミリ波信号生成”, C-14-10, 秋季電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山大学 (2012年9月12日).
- ⑤ 高島佑介, 村田博司, 岡村康行, “FDTD法を用いたミリ波帯差周波信号生成の解析”, 2013年電子情報通信学会総合大会, C-14-18, 岐阜大学(2013年3月21日).
- ⑥ 前島悠登, 高島佑介, 村田博司, 岡村康行, “光学結晶充填方形導波管における非線形差周波発生を用いたミリ波生成”, 2013年(平成25年)第60回応用物理学会春季学術講演会, 29a-B3-5, 神奈川工科大学 (2013年3月29日).
- ⑦ 高島佑介, 村田博司, 岡村康行, “非線形光学結晶充填方形導波管を用いたミリ波信号生成デバイスの解析と光信号処理への応用”, 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会(MWP), 信学技報, Vol.113, No.141, MWP2013-40, pp.215-220, 稚内市 (2013年7月19日).
- ⑧ 高島佑介, 村田博司, 岡村康行, “非線形光学結晶を用いたミリ波方形導波管における光差周波発生とその光信号処理への応用”, 第3回集積光デバイスと応用技術研究会, IPDA13-P07, pp.63-64, 日光市 (2014年1月30日).
- ⑨ 村田博司, 高武直弘, 高島佑介, Yusf Nur Wijayanto, 岡村康行, “分極反転構造を用いたマイクロ波-光波変換デバイス”, (招待講演) 2014年(平成26年)第61回応用物理学会春季学術講演会, 18p-F8-8, 青山学院大学 (2014年3月18日).

[その他]

受賞:

APMP2013 Best Student Poster Award : Yusuke Takashima, Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura, “Analysis of DFG-Based Millimeter-Wave Signal Generation in

Rectangular Waveguides Embedded with a Nonlinear Optical Crystal and Its Applications to Optical Signal Correlator and Converter,” The 8th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2013), PA-1, 2013, Gwangju, Korea.

ホームページ:

<http://www.ec.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 博司 (MURATA HIROSHI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号: 20239528

(3) 連携研究者

川西 哲也 (KAWANISHI TETSUYA)

情報通信研究機構・研究室長

研究者番号: 40359063

菅野 敦史 (KANNO ATSUSHI)

情報通信研究機構・主任研究員

研究者番号: 20400707