

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760044

研究課題名(和文)再生光整流による究極的高効率テラヘルツ波発生の開発

研究課題名(英文)High efficiency THz pulse generation with a regenerative optical-rectification

研究代表者

永井 正也(Nagai, Masaya)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：30343239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではレーザー加工用のレーザーを励起光源を用いて高強度のテラヘルツパルスはどこまで効率よく発生させられるかを調べた。ニオブ酸リチウム結晶中の高次の非線形光学過程と検出光のパルス圧縮を行うことで10kV/cmを超える最大電場強度でのパルス発生を実現した。これらは非接触非破壊検査や物質改質のための光源として応用展開が可能である。

研究成果の概要(英文)：We experimentally demonstrate the generation and detection of broadband THz pulses with a bandwidth extending beyond 4 THz by using a 1.04- μm Yb-doped fiber laser with a pulse duration of 0.48 ps. Owing to higher-order nonlinear processes in LiNbO₃ crystals, THz pulses can be emitted efficiently with a bandwidth extending beyond the boundaries of the spectral width of the excitation pulse. By compressing divided sampling pulses to as short as 80 fs, we detected the THz pulse in the full spectral range, which could not be resolved with the original pulse. The precise control of the nonlinear effects and the compression of the sampling pulses compensated for the disadvantage of using a 1- μm fiber laser. This work will contribute to the progress of nonlinear THz spectroscopy and imaging.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学

キーワード：テラヘルツ 高効率 超短光パルス 光整流 高強度 非線形光学

1. 研究開始当初の背景

THz 周波数領域は誘電性や伝導などの物性を特徴づける電子イオンの運動や巨大分子の立体配位を反映した運動が数多くみられる。したがって THz 帯の応答から物質やその状態を評価同定できることが食品や創薬管理、安全安心に向けたイメージング応用の基礎となっている。これらの観点から THz 周波数での電磁波発生に関する研究開発が最近盛んに行われている。そして実際に量子カスケードレーザ、電子デバイス、超短光パルス技術による光伝導アンテナや光整流過程を介した THz パルス発生がおおよそ確立されており、応用で用いられている。

しかし実際の産業界で用いられるためには、用途に見合った製品価格が実現できるかに加えて使いやすさやエネルギー効率、安定性が強く要請されている。一般に THz 技術は光と電波の中間的な領域でありその発生技術の困難さから現時点では THz 波へのエネルギー変換効率は極めて低い。例えば応用上有力視されている量子カスケードレーザであっても低温での動作となっている。また商用の THz 分光装置で用いられている光伝導アンテナによる THz パルス発生ではこれは光励起キャリアのピコ秒の時間の電子加速を用いており、そのエネルギー変換効率はおよそ 10^{-6} 程度と小さい。このようにチタンサファイアレーザがレーザ加工などの産業応用に低いエネルギー変換効率によって適用されなかった歴史を踏まえると、いかに高効率で THz パルスを発生させるかが鍵となる。

最近誘電体の光整流過程を用いることで 10^{-3} 程度のエネルギー変換効率での THz パルス発生が実現している。光整流過程は物質内の非共鳴な非線形分極の運動を用いるために、その発生効率は極めて低い。しかし非線形媒質内の伝播を利用して励起光を再生利用できることから、理想的には 100%に近いエネルギー変換効率での光整流が期待できる。光整流過程の発生効率は媒質ごとに特徴づけられる 2 次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$ と吸収や位相整合条件で決まる相互作用長、入射光強度で決定される。また光整流過程の場合は多光子吸収によって生じた自由キャリア吸収を回避するため、入射光強度に上限がある。この中でもフォノン吸収の裾が THz 領域に大きく寄与するため、結晶長を長くすることができない。このことから励起光をいかに非線形結晶中を長く伝播させ、発生した THz 波を吸収される前にいかに結晶外部に取り出すかが高効率化にとって重要である。

2. 研究の目的

そこで本研究では新しいイメージング、センシングとして有望な THz 波において光整流過程による発生エネルギー変換効率の限界を見出すことを目的とする。THz 領域の非線形結晶には THz 領域の吸収があり、位相整合条件を満たす条件では十分な長さの

相互作用長を取ることができない。そこで、励起光を非線形結晶中でいかに長く伝播させ、THz パルスをいかに短い伝播長で結晶外に取り出すことで、低パワー高繰り返し率の汎用超短パルス光源での高効率 THz パルス発生を目指す。

3. 研究の方法

本研究は $1 \mu\text{m}$ 帯の高繰り返しサブピコ秒光パルスレーザを用いて、THz パルス発生エネルギー変換効率の限界に迫る。当初の計画ではモード同期 Yb:YAG レーザの光を外部共振器と高抵抗 GaP 結晶を用い、光整流過程によって発生させる。外部共振器は電場強度を増強させる目的があるのだが、励起光を再び非線形結晶内に入射し、再生利用させるとみなすこともできる。このような再生光整流過程の考え方を用いてどこまで発生効率の限界に迫れるかを見極める。

しかし研究開始後、レーザのトラブルより予定通りに高繰り返しサブピコ秒光パルスレーザを用いることができなかった。そこで使えることができる 100kHz レーザを用いることで、発生効率の高効率化を図った。100kHz のレーザシステムにおいて最も効率の高いエミッタは LiNbO₃ 結晶であることを見出した。図 1 は市販の Yb ドープファイバーレーザからの光パルス (0.48 ps) を用いた高強度 THz パルスの実験配置である。光源からのビームを 2 つに分け、1 つを励起光としてもう 1 つをサンプリング光とした。励起光は回折格子とレンズを用いてパルス面を制御した後に、プリズム形状の室温下の Mg:LiNbO₃ 結晶に照射した。発生した THz 光は高次の非線形性によって帯域が広がっているため、もう一つのビームを非線形ファイバーと負分散ファイバーを用いて 0.08 ps にパルス圧縮してサンプリング光とした。

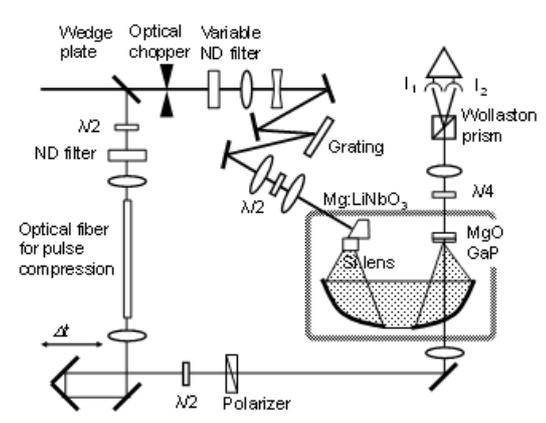


図 1 : Yb:ファイバーレーザを用いた高効率 THz 発生の実験系

4. 研究成果

図 2 および図 3 は異なる励起光強度で発生させた THz パルスの時間波形とパワースペクトル(左)を示している。弱励起下では励起

光の強度波形の1階微分の形状に比例したTHz 電場波形をしている。しかし励起光強度とともに発生した THz パルスの電場振幅は非線形に増大し、最大電場強度は10kV/cmを超える。またパワースペクトルより励起光強度とともにTHz 光が広帯域化するのが見て取れる。THz 光の帯域は励起光のパルス幅で決定づけられる。したがってTHz 光の広帯域化は高次の非線形光学過程によって励起光のパルス幅が狭くなったことに起因する。なお、サンプリング光のパルス幅が励起光と同じ0.48 ps のままで THz 電場を検出した場合、2.0THz の感度は 10^{-3} だけ小さくなってしまふ。このことから、今回の実験で帯域が4.0THz 以上に伸びたことを確認したのは、サンプリングパルスのパルス圧縮によつて高周波数側の感度を大幅に改善した賜物である。

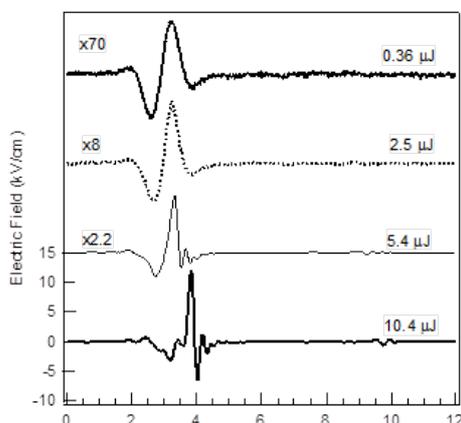


図2：異なる励起光強度で発生したTHz パルスの電場波形

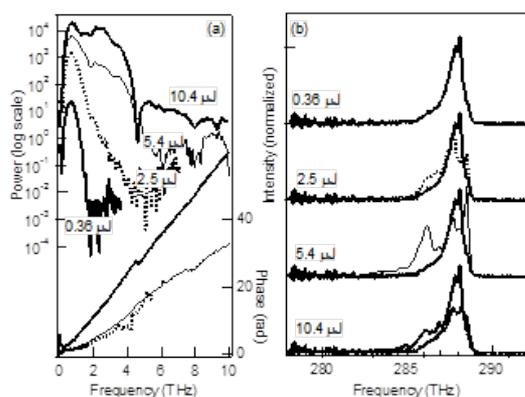


図3：異なる励起光強度で発生したTHz パルスのパワースペクトルと透過した励起光のスペクトル

このような強い非線形の振る舞いは非線形伝搬方程式を用いて数値計算を行った結果でも再現される。計算では励起光はパルス幅0.48ps の $1\mu\text{m}$ のレーザーパルスがLiNbO₃ 結晶中を伝搬したと考える。この際に励起光によってTHz が発生し、発生したTHz 光が励起光の位相を変調する $\chi^{(2)}$ 過程を考慮した。ま

た、LiNbO₃ は大きな $\chi^{(3)}$ の値を持つため、励起光に自己位相変調の寄与を取り込んだ。図4および図5は数値計算から得られたTHz パルスの時間波形とスペクトル形状を示している。

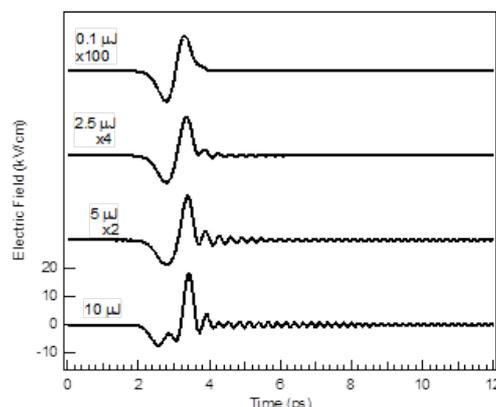


図4：数値計算から得られたTHz パルスの電場波形

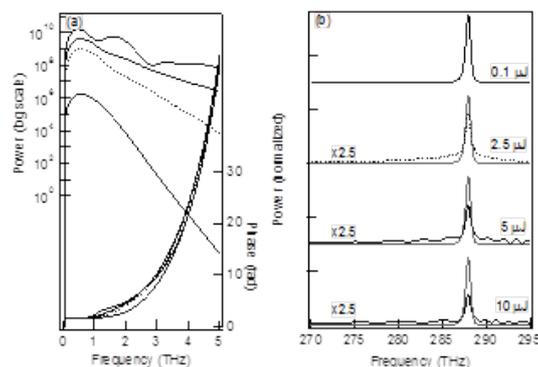


図5：異なる励起光強度で発生したTHz パルスのパワースペクトルと透過した励起光のスペクトル

このようにTHz パルスの高効率化には高次の非線形光学応答を考慮することが重要である。今後は $1\mu\text{m}$ 帯の高出力Yb系レーザーがモノサイクルTHz パルス発生励起光源となると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Masaya Nagai, Eiichi Matsubara, Masaaki Ashida, Jun Takayanagi, and Hideyuki Ohtake, "Generation and Detection of THz Pulses with a Bandwidth Extending Beyond 4 THz Using a Sub-picosecond Yb-doped Fiber Laser System", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, in press (2014).

〔学会発表〕(計 2 件)

[1] 永井正也, 森川慎吾, 松原英一, 芦田昌明, 高柳順, 大竹秀幸, "サブピコ秒光パ

ルス光源を用いた広帯域 THz 光発生と検出", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 17p-E17-14 (青山学院大学 2014 年 3 月 14 日)

[2] M. Nagai, E..Matsubara, M. Ashida, J. Takayanagi, and H. Ohtake, "THz time-domain spectroscopy beyond 4 THz using a sub-picosecond Yb-doped fiber laser system", The 39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014) accepted [図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井正也 (NAGAI Masaya)

研究者番号: 30343239