

Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by  
optical rectification in LiNbO<sub>3</sub>

「LiNbO<sub>3</sub>結晶での光整流による1MV/cmを超えるシングルサイクルテラヘルツパルス」

H.Hirori, A.Do, F.Blanchard, and K.Tanaka

APPLIED PHYSICS LETTERS **98**, 091106 (2011)

Abstract :

In this paper, they generate single-cycle terahertz (THz) pulse using the tilted-pump-pulse-front scheme with LiNbO<sub>3</sub>. In generation setup, the condition that the image of the grating coincides with the tilted-optical-pulse-front is fulfilled to obtain optimal THz beam characteristics and pump-to-THz conversion efficiency. By using an uncooled micro bolometer-array THz camera, it is found that the THz beam leaving the output face of the LN crystal can be regarded as a collimated rather than point source. The designed focusing geometry enables tight focus of the collimated THz beam with a spot size close to the diffraction limit, and the maximum THz electric field of 1.2 MV/cm is obtained.

高強度テラヘルツパルス発生による最近の成果として、大規模なオブジェクトのイメージング、医療診断や治療、そしてセキュリティ問題に対するリモートセンシング技術のような多くの有望なアプリケーションを作成した。さらに、高強度テラヘルツパルスは量子状態のコヒーレントテラヘルツ操作、高次高調波発生、非線形光学現象、および固体中の非線形移動現象のような未開発非線形現象の研究が可能にする。

Heblingらが2002年に、LiNbO<sub>3</sub> (LN) 結晶による、位相整合を満たし効率的なテラヘルツパルス発生が行えるパルス面傾斜法を提案し、その技術は急速に発展した。この手法により、低繰り返し周波数の増幅チタンサファイア(Ti:S)レーザーを用いて数10Jのエネルギーを持つテラヘルツパルス発生の可能性を実証した。アプリケーションの汎用性と未開発である非線形現象の研究を可能にするためには、最適なテラヘルツビーム特性と最大化したテラヘルツの電界強度を得るためのセットアップが必要である。最近の詳細な調査により、回折格子とレンズから成るセットアップにおけるイメージングエラーが、LN 結晶の出力面後において、テラヘルツパルスの強度の歪みにつながることで予測された。この歪みによって、テラヘルツ計測の最適な設計において不正確さの原因となる強度と不明な発散が生じ、その結果、アプリケーションを制限してしまう。

本稿では、1.3モル%のMgOを添加したLN 結晶を用い、パルス面傾斜法によるシングルサイクルテラヘルツパルスの発生について述べる。テラヘルツパルス発生のセットアップにおいて、回折格子のイメージが傾斜波面と一致する条件は、最適なテラヘルツビーム特性と励起光→テラヘルツ変換効率を得るために満たされる。LN 結晶の出力面から出るテラヘルツパルスの伝搬特性は、非冷却マイクロボロメータアレイのテラヘルツカメラで測定

した。その結果、テラヘルツパルスは1テラヘルツで水平方向に $52 \pm 5$ ミリラジアンが発散があることがわかった。コリメートしたテラヘルツビーム用に設計した焦点の配置は、1テラヘルツあたり約 $300 \mu\text{m}$ のスポットサイズで電気光学結晶（EO結晶）に厳密な集光を可能にし、 $1.2 \text{ MV/cm}$ のピーク電界強度と $1 \times 10^{-3}$ のエネルギー変換効率が得られた。

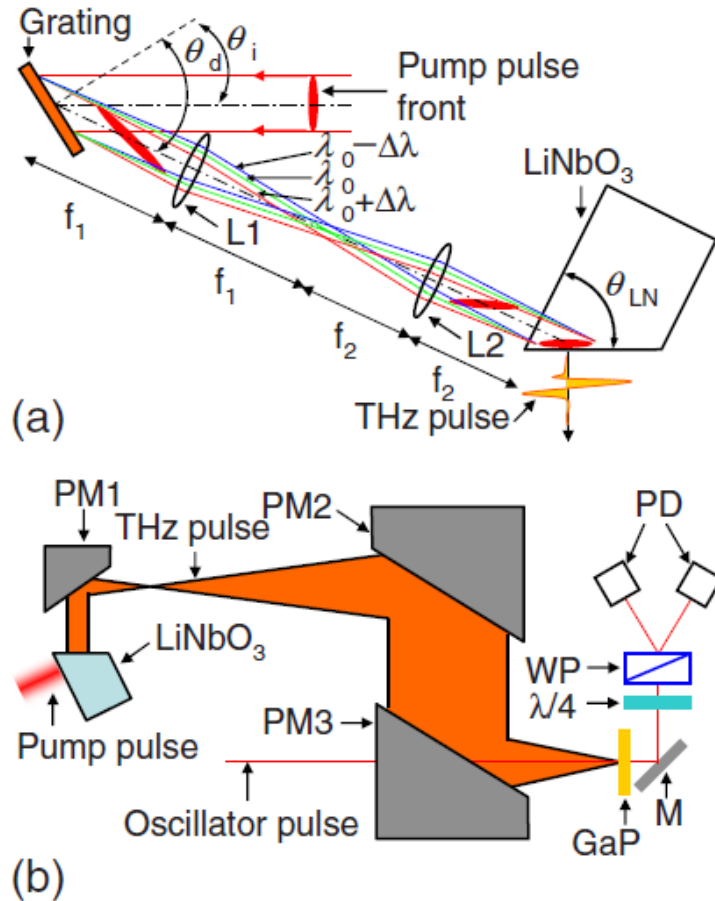


図1 (a) パルス面傾斜法を用いたテラヘルツパルス発生 の概略図(b) EOサンプリングの概略図

図1aと1bにそれぞれ、パルス面傾斜法とEOサンプリングを用いたテラヘルツパルス発生セットアップの概略図を示す。励起光源には、パルスエネルギー4 MJ、半値幅85 fs、中心波長780 nm、繰り返し周波数1 kHzの増幅Ti:Sレーザーを用いた。EOサンプリングには増幅したパルスに同期した80MHzの繰り返し周波数を持つオシレータからの光パルスを用いた。効率的にテラヘルツパルスを発生させるために、LN結晶内で励起光の群速度とテラヘルツパルスの位相速度を一致させる、すなわち $v_p^{gr} \cos \gamma = v_{THz}$ となる。図1に示すように、回折格子と2つのシリンドリカルレンズを用いて波面を傾斜させている。波面の傾斜角 $\gamma$ は次式で表される。

$$\tan\gamma = \frac{m\lambda_0 p}{n_p^{gr} \beta_1 \cos\theta_d}$$

$m$ 、 $\theta_d$ 、 $p$ はそれぞれ回折次数、回折角、回折格子の溝密度であり、また、 $\lambda_0$ 、 $n_p^{gr}$ はそれぞれ中心波長、中心波長に対するLN結晶内での群屈折率である。 $\beta_1$ は、レンズの水平方向の倍率である。テラヘルツパルスはLN結晶の出力面に対して垂直に出ていくため、図1aに示すLN結晶の角度は $\gamma$ と等しくしなければならない。

最適なテラヘルツビーム特性と励起光—テラヘルツ変換効率を得るためには、回折格子のイメージを持つ励起光のパルス幅は極小であるため、LN結晶内部における回折格子のイメージの傾斜角は励起光パルス前面と一致させなければならない。傾斜角 $\theta$ は次式で表せる。

$$\tan\theta = n\beta_2 \tan\theta_d$$

ここで、 $n$ はLN結晶の励起光に対する屈折率、 $\beta_2$ は回折格子のもつイメージ面の水平方向の倍率である。

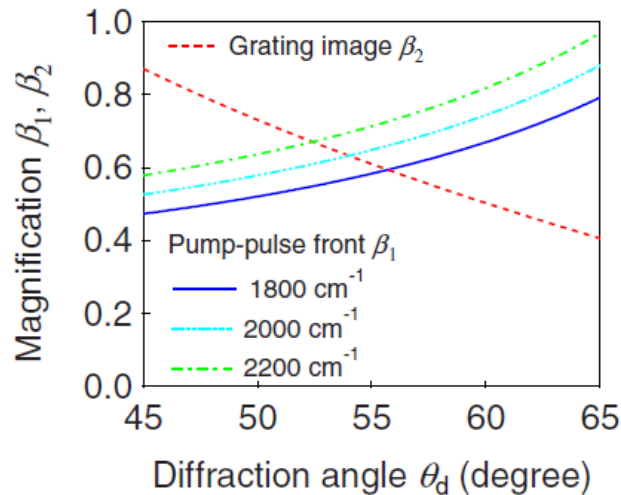


図2 水平方向の倍率 $\beta_1$ および回折格子の像に対するレンズの水平方向の倍率である。

図2は、回折角 $\theta_d$ に対する溝数が異なる場合の $\beta_1$ 、および $\beta_2$ の値を計算して得られた曲線であり、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ が同じ値であるとき、角度整合の条件が満たされている。今回は、1テラヘルツ付近の発生を高効率化するため、 $\theta$ と $\gamma$ を $62^\circ$ に設定している。図2に示すように、溝数 $1800\text{cm}^{-1}$ に対する $\beta_1$ （実線）と $\beta_2$ （破線）の曲線は、 $\theta_d=55.7^\circ$ のとき $0.59$ で同じ値となっている。実際のセットアップでは、図1aに示すように4f光学系によって、計算した値 $0.59$ とほぼ同じ値である $0.6$ に設定されている。

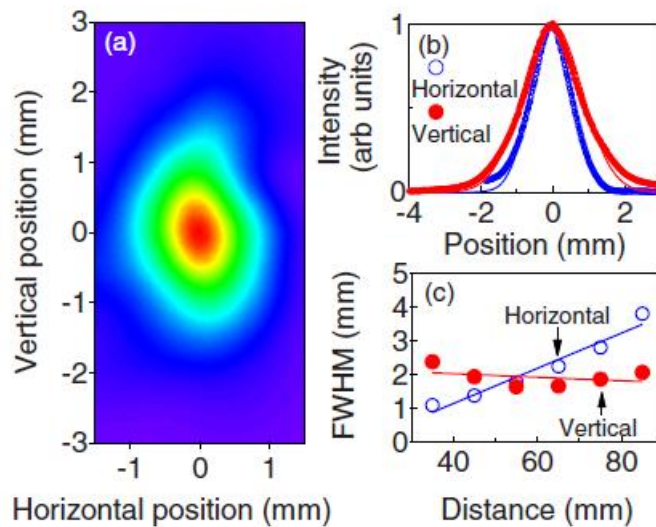


図3 (a) テラヘルツ強度のイメージ (b) LN 結晶の出力面から45mmでの断面図 (c) テラヘルツ伝搬距離に対するスポットサイズ

図3aと3bにそれぞれ、LN 結晶の出力面から45mmの位置でのテラヘルツ強度イメージと断面プロファイルを示す。1テラヘルツ用300GHz幅のバンドパスフィルタ（村田製作所、品番MMBPF40-1000）を通過したテラヘルツ強度イメージを240×320ピクセルの非冷却マイクロボロメータテラヘルツカメラ（NEC社、品番IRVT0830）で測定した。図3bにおいて、実線は対応するガウス曲線を示し、垂直方向と水平方向の半値幅での直径は、それぞれ1.9ミリメートルと1.3ミリメートルである。画像が縦に細長くなっているのは、半値幅における入射励起光のスポット径5.2mmが水平方向に0.6倍になっており、残留イメージングエラーとLN 結晶におけるテラヘルツ吸収があるためである。

図3cに、テラヘルツパルスの伝搬距離に対する、スポットサイズの変化を示す。テラヘルツビームは水平方向と垂直方向にそれぞれ、 $54 \pm 5 \text{ mrad}$ 、 $-5 \pm 5 \text{ mrad}$  発散がある。図3bと3cに示している半径方向に対称なガウスビームを持つコリメータビームは、テラヘルツ発生の4f光学系が回折格子のイメージの角度と励起光のパルス前面を一致させることができたことを示している。最大化したテラヘルツパルスの電界強度を取得するには、テラヘルツカメラの測定により確認したコリメータテラヘルツパルスの、エキスパンド、コリメート、集光を厳密にしないと行けない。図1bに示すように、点光源ではなくコリメータテラヘルツビーム源を仮定して、3つの軸外し放物面鏡PM1、PM2、PM3によってEO結晶に対し焦点を配置した。

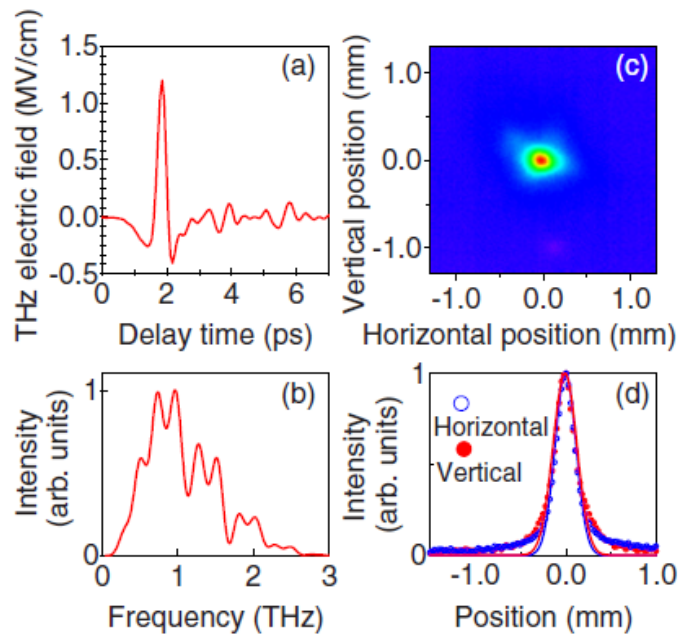


図4 (a) テラヘルツパルス の時間波形 (b) スペクトル波形 (c) 軸外し放物面鏡PM3の焦点位置でのテラヘルツイメージ (d) テラヘルツイメージの断面図

図4aと4bに、厚さ300 $\mu\text{m}$ のGaP 結晶によるEOサンプリングによって得た、テラヘルツパルスの時間波形とフーリエ変換によって得られたスペクトル波形をそれぞれ示す。テラヘルツパルスのピーク電界強度において、バランス検出器によって測定した信号 $I_A$ 、 $I_B$ の最大変調、すなわち $(I_A - I_B) / (I_A + I_B)$ の値はシリコン減衰器を用い0.44であり、この値は、シリコン減衰器なしでの1.2 MV / cmの電界に対応している。図4bに示すスペクトルには、1テラヘルツ周辺の最大強度と、乾燥空気パージをしていないため、水蒸気による吸収線がある。

図4cと4dに、軸はずし放物面鏡（図1bのPM3）の焦点距離の位置での、テラヘルツイメージと強度プロファイルを示す。図4dの強度プロファイルにおいて、垂直方向と水平方向の半値幅におけるテラヘルツパルスのスポット径は両方それぞれ約300 $\mu\text{m}$ である。回折限界に近い小さなスポットサイズは、図1bに示す焦点の配置が、十分にテラヘルツパルスが焦光していることを意味している。時間的・空間的にテラヘルツ強度を統合することにより、総パルスエネルギーはおおよそ2 $\mu\text{J}$ 、エネルギー変換効率はおおよそ $1 \times 10^{-3}$ に達すると推定される。また、焦電検出器によって得られたテラヘルツパルスエネルギーは3 $\mu\text{J}$ にまで達している。

結論として、LN 結晶とパルス面傾斜法を使用して、シングルサイクルテラヘルツパルスを生成した。パルス面の厳密な制御により、最適な励起光—テラヘルツ変換効率およびテラヘルツパルスのビーム特性を改善した。LN 結晶の出力面から出るテラヘルツビームの空間的形狀と発散は、テラヘルツカメラによって観測され、テラヘルツビームは点光源では

なくむしろコリメータビームとみなすことができることがわかった。コリメートしたテラヘルツビーム源の発生を仮定して設計した焦点の配置により、約300 $\mu\text{m}$ のスポットサイズにテラヘルツビームを厳密に集光でき、1.2MV/cmのピーク電界強度と、エネルギー変換効率 $1\times 10^{-3}$ が得られた。