

THz imaging technique using balanced detection.

1. イントロダクション

THz 分光計測は、THz 電磁波（波長 0.1-10THz）の持つ良好な透過特性や、THz 領域において各種物質が特徴的な吸収スペクトル（指紋スペクトル）を示すことを利用し、糖類等の成分分析を行うことが出来る。従って多様な分野において有効な検査ツールとして期待されている。しかし、これまで行われてきた手法は計測に時間がかかり、実用的なものではなかった。従って高速な THz 計測手法の開発が求められている。

高速計測を実現する為に、サンプル計測にラスタースキャンを必要としない 2 次元電気光学サンプリングや、ポンププローブ法において、プローブパルスの波面を傾けることで時間遅延操作を省略する手法等が提案されている。しかしながら取得データの計算が長大となったり、測定時間窓の不足といった課題が残されていた。今回紹介する研究では、それらの問題解決をはかり、有用で高速な THz 分光計測手法が提案されており、実時間 THz 分光イメージングの手法改善に寄与することが期待される。

2. Multichannel balanced electro-optic detection for Terahertz imaging [1]

THz イメージングは過去に何度か実証されている。最も容易な方法は、THz ビームを点集光させ、焦点を通る配置でサンプルを移動させるものである。この方法はロックイン増幅器(LIA)による増幅によって優れた信号対雑音比(SNR)を提供する。しかしながら、3次元(2次元空間と時間次元)に必要とされる走査過程により、この方法の計測時間は実用的ではない。この時間遅延操作の改善案として、非同期光サンプリングが提案されているが、強い背景光の影響を受けてしまうことや、高いパルスエネルギーと低い繰返し周波数を持つ高価なレーザーを必要とするなどといった課題がある。他の手法として CCD カメラを用いた 2D - EO サンプリングやシングルショット 1D-EO サンプリングがあるが、これも高価な光源を必要とし、バランス検出やロックイン検出が行われていなかった。

本論文では超短 THz パルスを用いた THz イメージングの実用段階への適用の為、高い SN 比を達成するバランス検出とロックイン検出による THz イメージング手法を提案する。

2-1 実験装置と原理

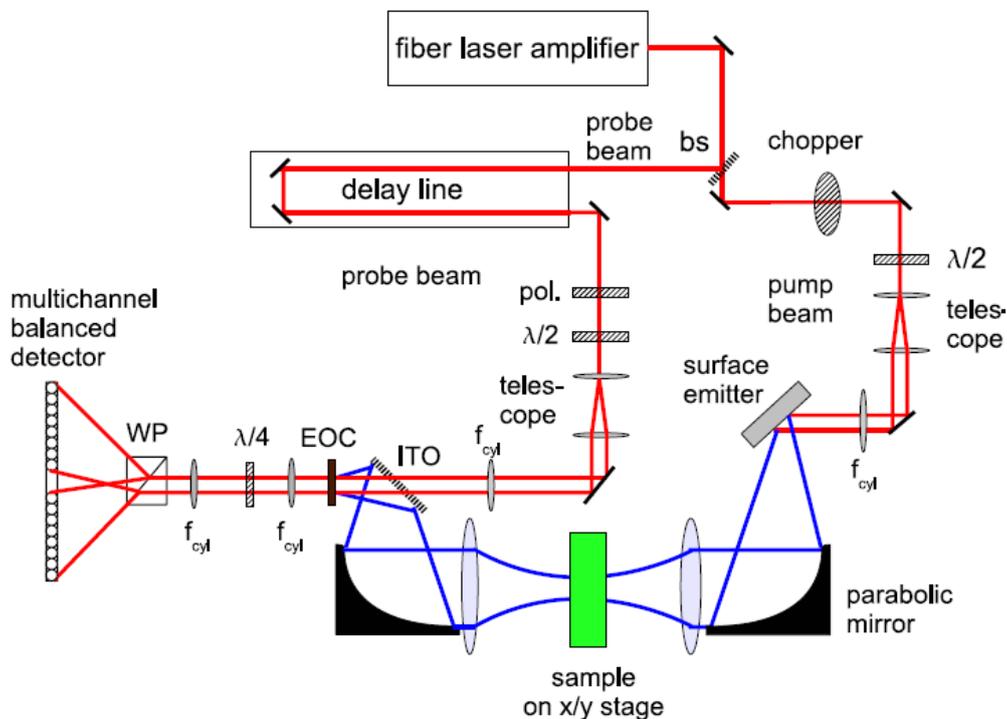


Fig. 1 Schematic setup of the THz multichannel imaging system.

実験に用いた THz イメージング装置を Fig. 1 に示す。このファイバーレーザーは 1060nm で 10W であり、パルス幅はおよそ 100fs、繰返し周波数は 75MHz である。検出は 1 ライン 8 ピクセルを同時に取得でき、SN 比向上の為、マルチチャンネルを持つロックインアンブに結合したマルチチャンネルのバランス検出器にて行う。Fs レーザーパルスはビームスプリッターで THz 発生用のポンプ光と検出用のプローブ光に分けられる。強度はそれぞれ 96% と 4% に分けられている。ポンプ光はエミッターにて発生する THz 波の強度が最も強くなるように半波長板で偏光方向を回転させられる。ビームは拡大され、THz エミッター (p-InAs) の表面に円筒レンズによってライン集光される。このエミッターの効率が光伝アンテナより小さくても、励起レーザーのビームプロファイルにより放射された THz のビームプロファイルを形成する長所がある。したがって、放射された THz パルスはライン状のビームプロファイルを持つ金属製の 2 つの軸外し放物面鏡は焦点距離 105mm であり、2 つの非球面レンズは可視光に対し透明で 91mm の焦点距離を持つ。

プローブビームは偏光子により直線偏光となり、偏光方向は最大の信号を達成するために半波長板によって回される。プローブビームも拡大され、THz 検出の為に検出用結晶へ円筒レンズによって線集光される。2 番目の円筒レンズでビームを平行にし、4 分の 1 波長板でプローブビームは楕円偏光になる。3 番目の円筒レンズは再びビームを集光する。そ

の一方でウォラストプリズムは、バランス検出用に両方の偏光成分に分割している。

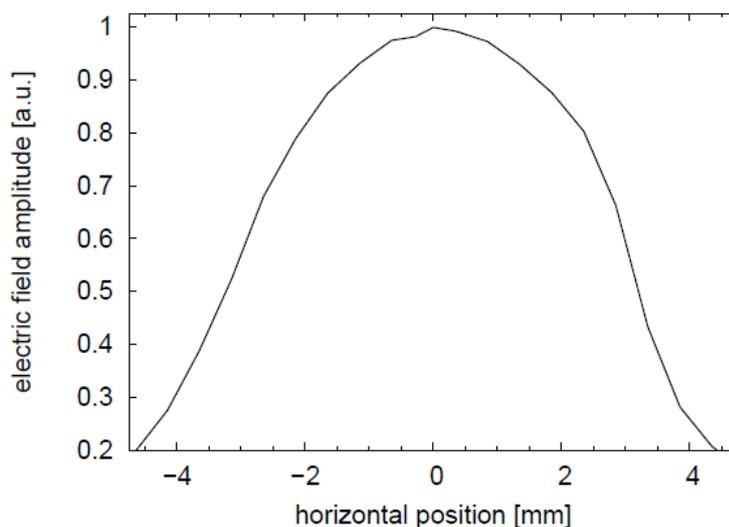


Fig. 2 Horizontal electric field amplitude distribution inside the electro-optic crystal. The FWHM is about 6.4 mm.

バランス検出器は、直径 $500\mu\text{m}$ で $750\mu\text{m}$ のピクセル・ピッチを備えた8つのInGaAsフォトダイオード・ペアから成る。差分の信号は $5\times 10^5\text{ V/A}$ だけ増幅される。したがって、強い背景光の中の小さな信号を測定することが可能である。プローブビームが数回拡張し、プローブビームの一部だけがフォトダイオードによって測定されるので、ビームの内部の変動は無視できない。また、増幅はバンドフィルタによって制限した後に行われている。このバランスフォトダイオード・ペアは全て 50dB よりよいCMNRを示す。測定された信号は、LIAによって増幅される。使用されるLIAは8つのチャンネルに 80dB よりよい動的蓄え、 2ms までの平均時定数、および 12dB/oct の傾斜を備えた出力フィルターを供給する。システムの方角分解能は、最後の2枚の円筒レンズ間の配置によって調整することができる。オブジェクトのイメージングの為、焦点面上でサンプルを移動させるために、サンプルは電動x/yステージに置かれる。各位置では、8つのピクセルを表わす8つのパルスが同時に記録される。

電気光学結晶の内部の電場分布は、先述の通り、表面エミッターから放射された THz 放射線のイメージである。放射された THz ビームプロファイルは、エミッター上のレーザー焦点をコントロールすることにより調整することができる。それが光伝導スイッチほど効率的でなくても、この柔軟性はラインエミッターとして非常に有用である。実験では、エミッター上のレーザー・スポット・サイズは調節され、すべてのバランスフォトダイオード・ペアが電場分布の FWHM 内にある。電場は、THz とプローブビームの相対位置を水平移動させることにより調べた。最大の THz パルス振幅は Fig. 2 に示した。その分布はレーザーのガウスのビームプロファイルによりガウシアン波形となっている。なお FWHM

は 6.4mm である。プローブビームは、8 倍以上拡大し、ピクセルがすべて同様の SNR を持つ為に、10%未満の強度差をとるガウス分布の中央部近辺のみを検出に用いた。THz 焦点と $M=1.1$ の検出結晶の間の再生規模を考慮に入れて、セッティングは確認された。したがって、ライン焦点の走査エリアは、 $8 \times 500 \mu m = 4mm$ に基づく。単一のピクセル用の FWHM は水平方向 1.4mm、垂直方向 0.8mm まで決定された。異なるプローブビーム配置によって、望まれる走査エリアおよび改善を行うことが出来るかもしれない。8つの同時の正確な点は、Fig. 3 中で示される。各電場波形は見やすくするために 2ps ずらされている。パルスの包絡線は、片側で小さな不調和を持ったガウスプロファイルに似ている。

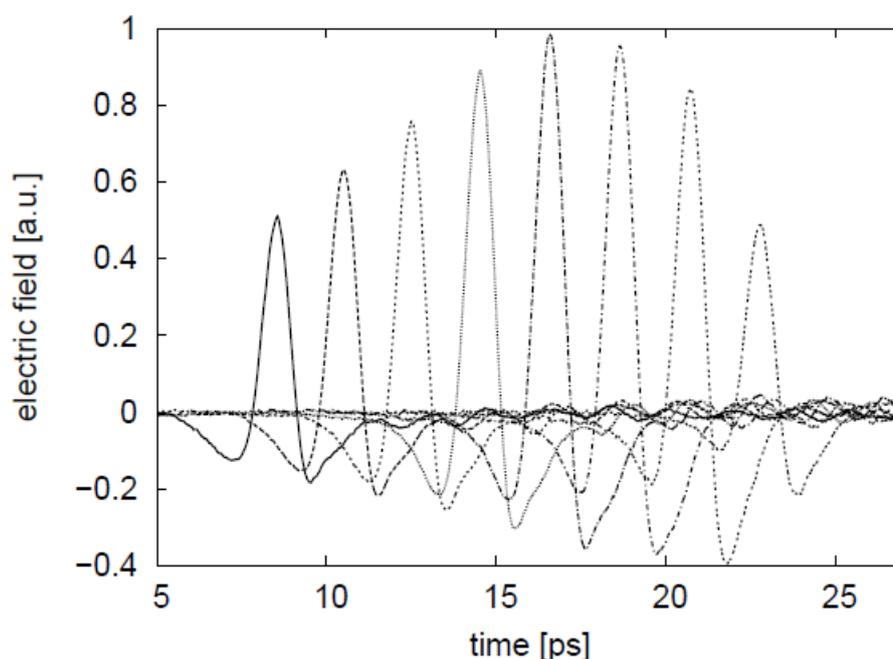


Fig. 3 Simultaneous measurement of 8 spots inside the THz electric field distribution (the electrical field traces are shifted in time for better overview). Due to the photodiode spacing and the reproduction scale, each pulse represents a horizontal lateral shift of $500 \mu m$ inside the THz focus.

2-2 実験結果

2D イメージは、金属ホルダー内のサンプルを THz 線状焦点を通るように移動させることにより得られた。8 点が各ラインで同時に測定された。スキャンタイムは同様の SNR を備えた単一ピクセルの装置と比較して約 5 倍短い。

主パルスの振幅および時間遅れが分析された。THz 空間ビームプロファイルを考慮に入れる為に、サンプルのない参照信号は各ラインの初めに得られ、パルス/点はすべてこれらの参照信号値に標準化された。これは異なるピクセルの異なる振幅と、レーザー出力ドリフトによる長期ドリフトを相殺する。

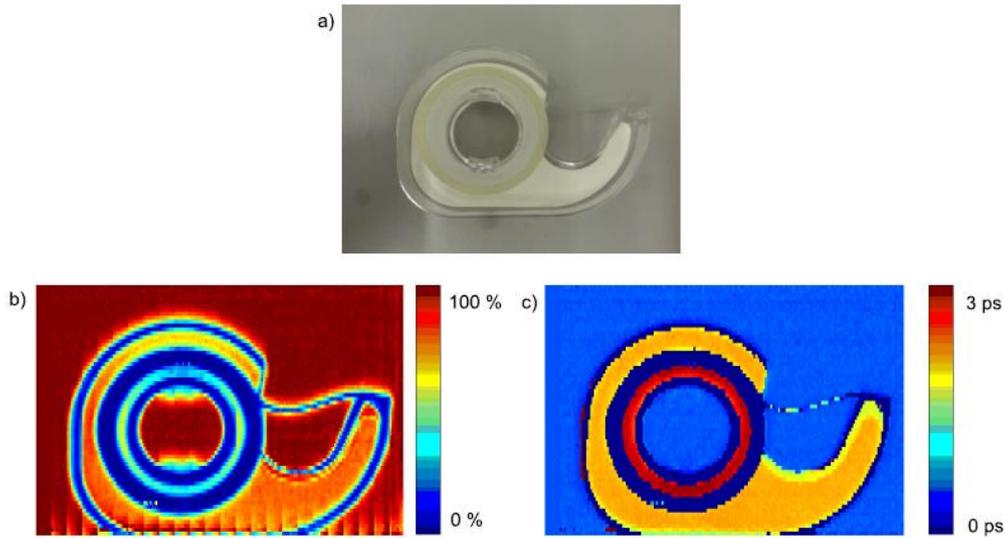


Fig. 4 Adhesive tape unwinder: a) photo; b) false color representation of THz main pulse amplitude; c) THz main pulse time delay.

測定された最初のオブジェクト、接着テープ **unwinder** は Fig. 4(a)に示される。サンプルは 24×76 回移動し、8つの電場波形が各位置で同時に記録された。合計では、水平方向で $500\mu\text{m}$ および垂直方向で $1000\mu\text{m}$ のピクセル・ピッチで 192×76 ピクセルを測定した。スキャンタイムは1つのピクセルの代わりに8つのピクセルを同時に記録することにより約 12h から 2.5h に減らされた。Fig. 4(b)は、THzの主パルス振幅の偽色彩表現を示す。**unwinder**の構造は明白に感じられる。波長より小さな厚みを持つテープさえ確認できる。イメージの下部に、8つのピクセル間の縞状組織が見られる。これは、サンプルを移動させるために使用された金属ホルダーの散乱による。Fig. 4(c)では、THzの主なパルス時間遅れが示されている。チャンネル間の小さな漏れが主なピーク時遅れに影響を及ぼさないので、縞はこの場合見られない。

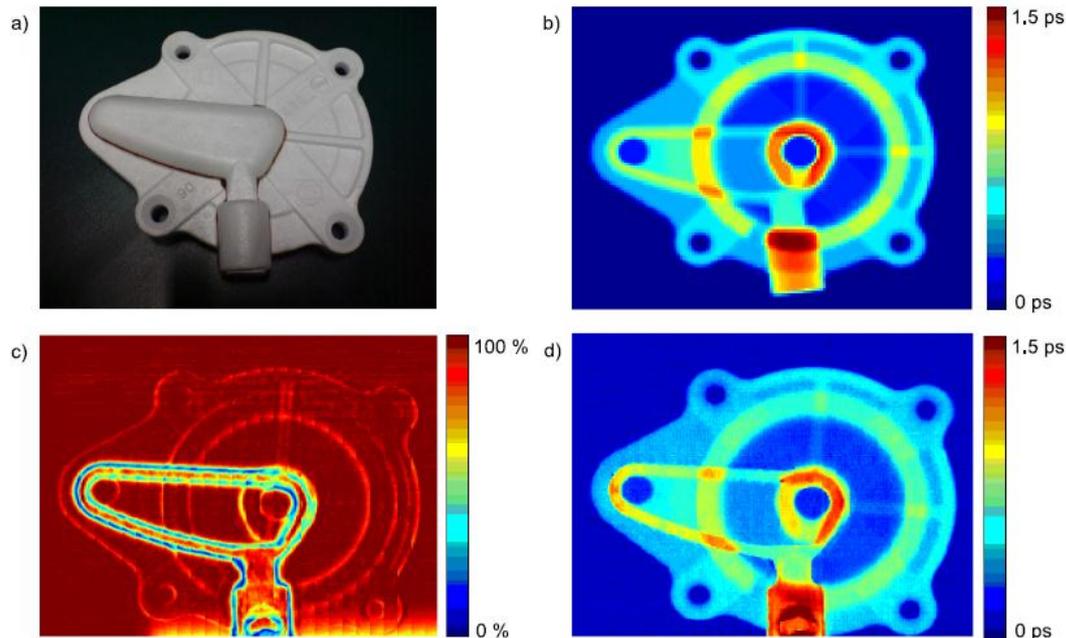


Fig. 5 Polystyrol template for iron cast: a) photo; b) optical delay calculated according to CAD data c) false color representation of THz main pulse amplitude; d) THz main pulse time delay.

Fig. 5(a)は別の例を示す。サンプルである鉄成型のための polystyrol テンプレートは 2 つのパーツから成り、それらは接着されている。Polystyrol における THz 波の屈折率は $n=1.01$ であり吸収は無視できる。サンプルは、 33×240 回移動された。また、再び 8 つの電場波形が各位置で同時に記録された。合計で、水平・垂直方向の両方で $500 \mu\text{m}$ のピクセル・ピッチを備えた 264×240 ピクセルが得られた。THz の主なパルス振幅の偽色彩表現は Fig. 5(c)に示す。予想通り、polystyrol 端および接着剤だけが確認出来る。異なる時間遅れにより、パルスは拡大し、それに伴い振幅は減少する。THz パルス時間遅れは Fig. 5(d)に示される。polystyrol に詳述するイメージは約 $200 \mu\text{m}$ の厚さまでサンプリングする。厚さ分解能は、THz パルス長、遅延線の正確さおよび試料自体によって制限される。時間遅れイメージ中の inhomogenities は約 200fs を区別しているが、それは 2 回反射するパルス長である。

システムの整合性を実証する為、サンプルの CAD データと比較された。サンプルの光路長差は、 $100 \mu\text{m}$ の分解能を備えた CAD データからのレイ・トレーシング・プログラムによって計算された。データはいくつかの放射線に関して平均された。結果は Fig. 5(b)に示される。Fig. 5(d)との比較によって、CAD データからの特徴はすべて明白に確認できる。いくつかの違いはサンプル上およびそのサンプル内部の接着剤による。それも Fig. 5(c)で見ることができる。

2-3 まとめ

8 ピクセルのバランス検出セットアップを、THz イメージングに提示した。LIA と各ピクセルを組み合わせることによって、SN 比は単一ピクセル検出のセットアップに匹敵する。しかし、スキャンタイム同 SN 比の単一ピクセル検出と比較して 5 倍短縮された。この手法は 256 を超えるピクセルを備えた完全なラインへ適用可能で、THz イメージングを実験装置から現実世界の応用へ昇格させる助力となる。

3. A pulsed THz Imaging System with a line focus and a balanced 1-D detection scheme with two industrial CCD line-scan cameras [2]

現実世界への応用について、テラヘルツ(THz)イメージングおよび THz 時間領域分光学(TDS)システムは、まだほとんどリアルタイムの大きなサンプルエリアをカバーするのに必要な速度を欠く。速度は主に、サンプルを走査する過程と、機械的な時間遅延走査の必要によって制限される。測定速度を改善するために、荷結合素子(CCD)カメラを用いた 2 次元電気光学サンプリング(EOS)に基づく多重ピクセルセンサーおよびエミッターの適用が現在研究されている。さらに、CMOS カメラを使用するシステムも実証された。1 台の CMOS カメラおよび偏光子を使用する方法は、北原らによって示されました。しかしそれらは、気温のような環境条件によってシステム雑音が強く影響されたと述べられている。

本論文では、サンプルを点ではなく、THz ラインを集中させることによる、1 ステップでの完全なライン検出について報告する。これはバランス検出の使用によって、SN 比および測定速度を改善する。安井らによって示された仕事とは対照的に、本システムは産業環境において使用可能にするために、増幅されたレーザー・システムを使用しない。

3-1 実験装置と原理

本研究では THz-TDS のセットアップを使用する(Fig. 6 を参照)。エミッター(50 μm ボウタイアンテナ)は、780nm の中心波長、100fs 未満のパルス幅および 80MHz の繰返し周波数を備えた Ti:S から射出された 80mW の平均出力の光学パルスを照射される。励起された光電流の調整は電氣的にコントロールされる。

THz ラインフォーカスは、Fig. 7 に示すアルミニウム鏡で達成される。これは、一般的な鏡が行うように、3 次元の放物面屈曲ではなく 2 次元の放物線屈曲を特色とする反射面を持っていることによる。この 2 次元放物面鏡の精度は約 10 μm であり、波長に対し十分細かいものである。

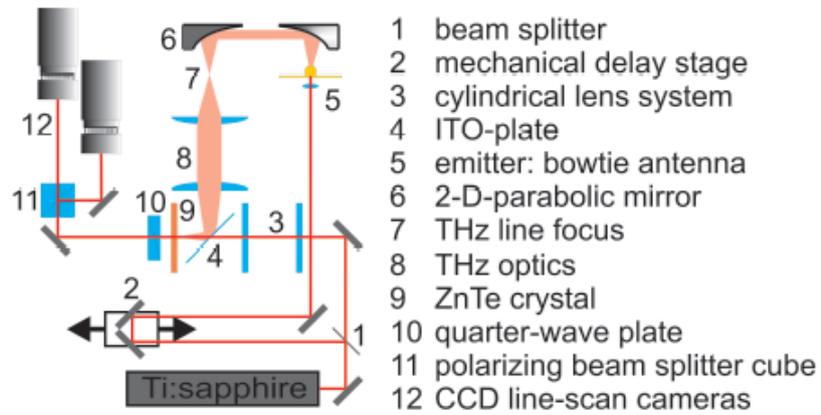


Fig. 6 Setup.

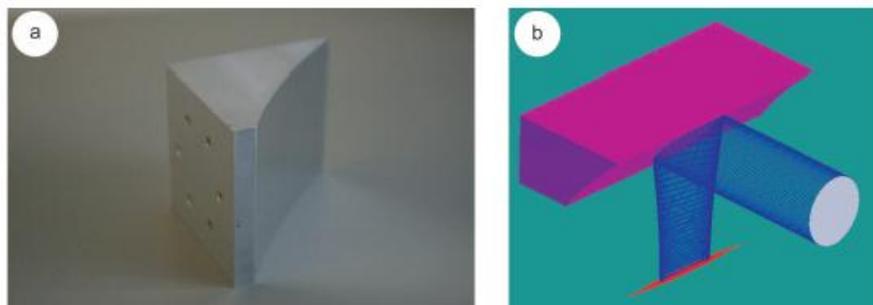


Fig. 7 (a) 2-D Parabolic Mirror, (b) ZEMAX $R_$ -Simulation.

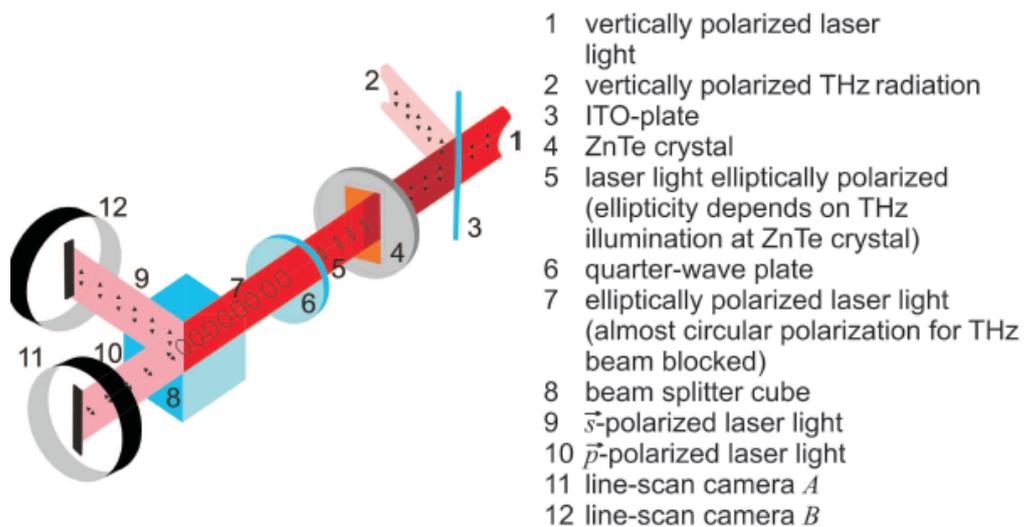


Fig. 8 Detection Scheme.

THz 検出器は EOS セットアップから成り、テルル化亜鉛(ZnTe)結晶は直線的に拡大したレーザービームによって照射される。また、THz ラインフォーカスは、インジウムスズ酸化物(ITO)プレートの使用によって光学ビームをオーバーラップさせて、ZnTe 結晶上で結像される。その後、ZnTe 結晶のイメージは、4分の1波長板を通して偏光ビーム・スプリッタによって、ラインスキャンカメラ A、B の CCD ライン上に結像される。

結晶を通り抜けるプローブビームは、THz 波がないときに4分の1波長板で円偏光となるように調整しておく。電場の振幅および過程は、偏光ビーム・スプリッタによって偏光を検知され分割される。2つの異なる偏光方向は、それぞれ2048ピクセルを持つ各 CCD センサー・ラインに入射し、CCD ラインスキャンカメラ(Fig. 8 参照)で同時に記録される。

2つのライン信号にピクセル差のアルゴリズムを適用することによって、THz 電場のバランス検出を行う。さらに SNR を改善するために、信号もその間にチョッピングされる。

単一の矩形波信号発生器は、実験の時計を形成する。カメラはそれぞれその方形波発生器が引き金となり、カメラ・コンピューターの対応するフレーム・グラバー・カードへ行列(1)として送ることができるまで、500のラインから成る、「構造」と呼ばれるデータ・レコードにその記録されたラインを記録する。

$$F_{n,m}^x \quad x \in \{A,B\}; n = 1, \dots, 500; m = 1, \dots, 2048 \quad (1)$$

500のライン上限はコンピューターの処理速度に依存し、エラーなしのデータ転送を保証するよう選ばれた。エミッター・アンテナのバイアス電圧が2の固定因数を備えた周波数分割器によって同じ矩形波信号発生器が引き金となって起きるので、フレーム・カバーのすべての偶数ラインがTHz波存在で、奇数ラインがTHz波不在のような状態を構成している。各カメラは、以下のように定義された要素により構成される新たなフレーム F' を算出する。

$$F'_{n,m} = \begin{cases} f'_{k,m} = (F_{i,m}^x + F_{i+1,m}^x)/2 \\ f'_{l,m} = (F_{i,m}^x - F_{i+1,m}^x)/2 \end{cases} \quad (2)$$

$$x \in \{A,B\}; k = 1, \dots, 250; l = 251, \dots, 500; m = 1, \dots, 2048; i = 1, 3, 5, \dots, 499$$

フレーム F' の最初の250行は2行のライン平均を形成し、単に整列目的に使用される。2の値を備えた除数は確認に必要であり、値は、プログラムの中で使用される与件変数のタイプから与えられたデジタル範囲内で残る。最後の250行のラインはいわゆる「電氣的チョッピング技術」でロックイン法を構成する。バランス検出法(カメラBのフレームからカメラAのフレームを引く)の利用により、検出されたTHz信号をさらに増強する。

$$F''_{n,m} = (F'_{n,m}{}^B - F'_{n,m}{}^A)/2 \quad n = 1, \dots, 500; m = 1, \dots, 2048. \quad (3)$$

各フレーム F'' の251~500ラインは、グラフとしてスクリーンに表示され、".tif"-イメージファイルとしてディスクに保存することができる「結果ライン」へ平均される。再び、2の

値を備えた除数は、与件変数のデジタル範囲内の値を維持する。

THz-TDS の測定は、THz 波形がより短い光学のレーザーパルスによってサンプリングされる方法で遅れを移動させることにより実現される。TDS 測定はこのように一連の".tif"-イメージに帰着し、どれが結果ラインを含んでいるか各スライドをファイルする (Fig.9 を参照)。スライドをすべて組み立てることによって、各センサー・ピクセルの波形を検索するだけでなく、サンプル「飛ぶ」ことを可能にする、「断層撮影法」フィルムを作ることができる。垂直に整列した THz ラインセンサーとビーム方向に垂直なオブジェクトを移動させることによって、これはサンプルをイメージングすることもできる。コンピュータスクリーン上で可能なディスプレイ割合は THz システムのクロック周波数および平均レベルに依存し、最大のカメラ繰り返し周波数によって制限されている。

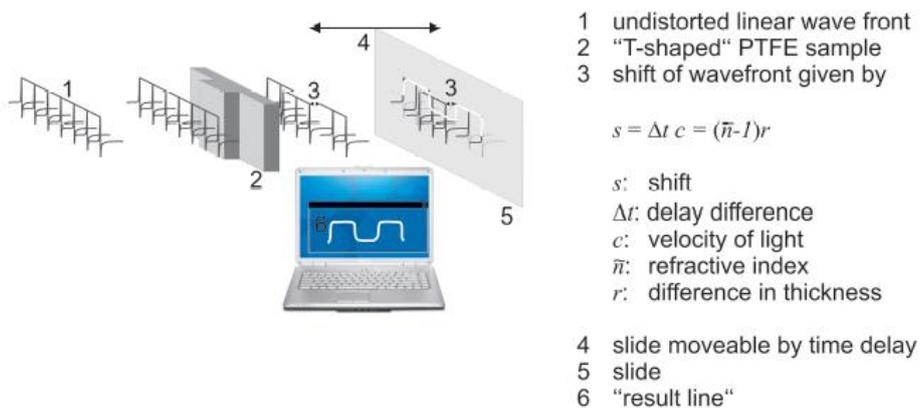


Fig. 9 TDS measurement. For display simplification, the picture is rotated by 90° .

3-2 実験結果

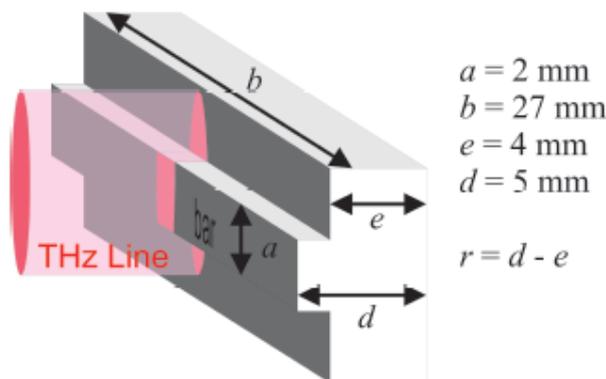


Fig. 10 "T-shaped" PTFE Sample.

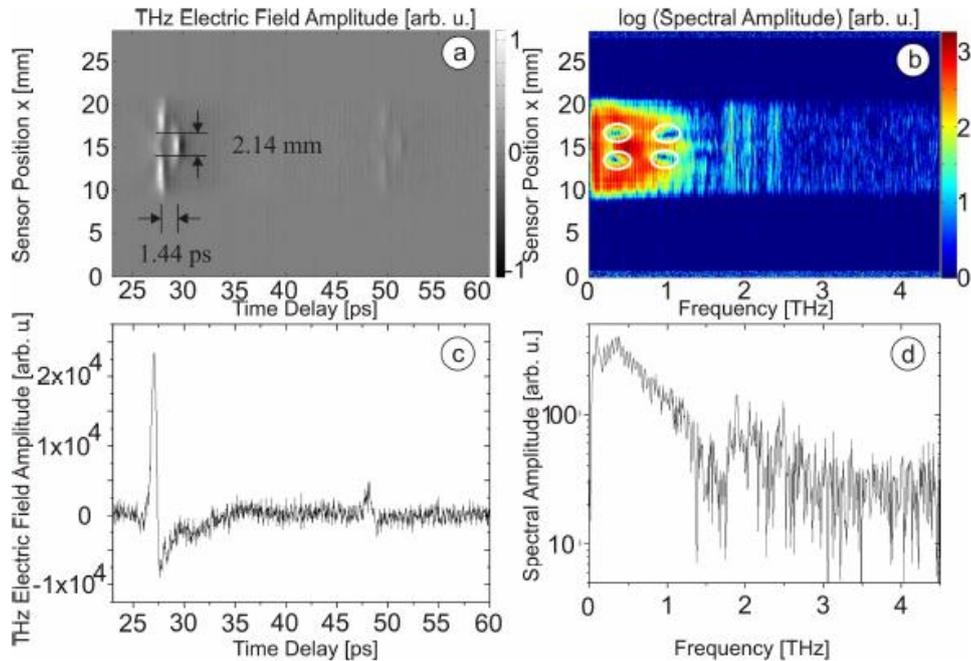


Fig. 11 (a) Spatially resolved THz Electric Field Amplitude in Time Domain (Media 1). (b) Spatially resolved THz Spectral Amplitude. (c) Example for a measured THz waveform at position $x = 18.9\text{mm}$. (d) Fourier transformation of the waveform plotted in (c). One can see that the bandwidth goes up to 2.5THz. However, due to the imperfect purging, water absorption lines around 1.4THz and 1.6THz and between 2.2THz and 2.3THz are seen.

「T字形の」ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)サンプルはシステムを特徴づけ、整列を確認するために使用された(Fig. 10を参照)。棒は、高さ(a)2mm幅(b)27mm厚さ1mmで、棒の後ろの支援するブロックは厚さ(e)4mmである。ラインセンサーの中央部が棒を通るように、「T字形の」PTFEサンプルをTDS測定すると、遅れた波面が明白に示された(Fig. 11(a)参照)。早い波面と遅れた波面の中央部分の間の遅延時間の差は、1.44psである。これは、計算された1.43psに相当している。波面の遅れた部分の高さは、2.14mmで、2mmの真の値と正確に一致する。完全なTHzラインセンサーの高さは、11.4mmあり、この結果は、コンポーネントから与えられたセットアップの絶対的な範囲(特に12.7mmの明瞭な口径を備えた4分の1波長板)に接近している。水蒸気量を減らした空気に囲まれたサンプルにおいて、この測定のスペクトルは、システムの帯域幅が2.5THzに達することを示す(Fig. 11(b),(d)参照)。低いスペクトル振幅を表わす小さな青いエリア(Fig. 11(b)の中の白い囲み)相殺的干渉に帰着する散乱および回折効果による。追加の発振はスペクトルのプロットで見ることができる。それらは約50psでのエコーパルスのフーリエ変換に起因する。いくつかの水蒸気吸収線は試料が乾燥した空気環境で完全に除去されなかったことから見ることができる。特に、1.4THzと1.6THz近辺と、2.2THzと2.3THzの間に顕著に見られる。

速い測定に対するシステムの能力を確認するために、カメラは1フレーム当たり150msの捕捉時間において、3.3kHzで操作された(12のフレームが1つのブロックへ平均される)。測定時間窓93ps、測定時間は14分だった。28.5mm²の領域の測定時間は、同等に高い空間・スペクトル分解で従来の走査システムが同じエリアをスキャンする必要がある時に匹敵します。これらの測定の中で決定されたSN比は、わずか25まで落ちた。測定速度は、時間遅延ラインの最高速によって制限され、増加することができるが、SN比の1層の低下を引き起こすだろう。SN比は、より強いエミッターの使用により増加させられるかもしれない。

3-3 まとめ

ラインセンサーを備えたTHzイメージングシステムが増幅されたレーザーシステムを用いることなく実現された。2台のCCDラインスキャンカメラで1Dバランス検出が実証された。更に、精巧なソフトウェアは、(信号)平衡を保つだけでなくロックイン手続きも各カメラのデータに適用することを可能にする。ラインセンサーは高さ11.4mm、幅2.5mmで測定された。空間、およびセットアップの遅延時間の測定は、「T字形の」PTFEサンプルで確認された。2mmの構造は完全に分解された。また、測定された遅延時間は予測と合致していた。SN比は30に達した。

4. Real-time terahertz near-field microscope [3]

テラヘルツ波の持つ性質は、医療、化学物質検知、DNA認識バイオセンシングへの応用が期待される。特に、セル次元に匹敵する規模内の情報へのアクセスのため、マイクロサイズの空間分解能は必要である。しかし、大きな波長が原因で、リアルタイムでのテラヘルツ近接場イメージング能力は、未完成のままである。特に、1THzの対応する波長については、イメージの遠距離場の空間分解能は、真空中でおよそ180 μ mに相当するレイリー基準に制限される。この限界を克服するために、我々はサンプルの近接場領域を用いなければならない。この場合、光回析が生じる前に、サンプル表面に接近してTHz波を捕らえなければならない。多くの手法が、THz近接場イメージングの最初のデモンストレーション以来提案され、それらの大部分はサブ波長の検出、あるいは口径をサンプル近くに置くものだった。しかしながら、10 μ mより下の空間分解能がTHz波で達成されても、従来の手法はすべてラスタ走査技術に基づいている。そのような場合、光学走査技術に関連したイメージング取得時間は比較的長く、領域サイズの関数として増加する(20 μ mの空間分解能で600 \times 600走査に数時間)。イメージングは、セルまたは微生物のようなサブ波長構造のリアルタイムでの形態変化を捉えるのが理想であり、より速い計測時間を備えた新しいアプローチを開発していなければならない。

本論文では、THz波の生成における最近の進歩を通じて高いダイナミック・レンジと高速獲得割合を備えた大規模なTHz近視野像を取得する方法を実証する。特に、370 \times 740 μ m²

エリアのイメージは、 $14\mu\text{m}$ (0.7THz の中心周波数に基づくと $\lambda/30$ に対応)の空間分解能を備えた 35Hz の繰返し速さで捕らえられる。

4-1 実験装置と原理

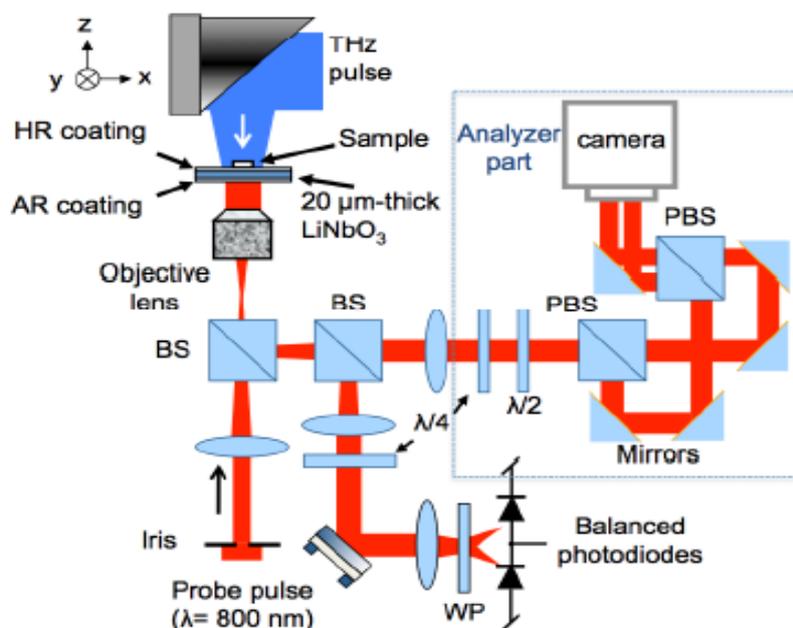


Fig. 11 Schematic of experimental setup: BS: non-polarized beam splitter, PBS: polarized beam splitter, WP: Wollaston prism.

THz 顕微鏡は Fig. 11 に示されるように、 1kHz の繰返し周波数で 85fs のパルス幅、 4mJ の出力を備えた Ti:S レーザービームラインに繋がれる。THz パルスの生成は LiNbO₃ にパルス波面を傾けて入射することで行っている。ガウス分布の仮定によって、焦点で 0.5mm および 200kV/cm であるために THz ビームスポットサイズ直径およびピーク電場を評価した。THz パルス波形の検出は、厚さ 0.5mm のガラスにマウントされた、 $20\mu\text{m}$ の厚さの LiNbO₃(LN)結晶を用いて自由空間 EO サンプリングで行なった。近傍領域を観察するために、サンプルは EO 結晶上に直接置かれる。EO 結晶のトップとボトムの表面が 800nm のプローブ光のために高い反射および反射防止コーティングをしていることに注目すべきである。Fig. 11 に示されるように、 800nm のプローブ光は、 18mm の焦点距離対物レンズ結合して 200mm の焦点距離色消しレンズを通り抜けた後に EO 結晶のトッププレート上で虹彩のイメージを形成する。反射像は対物レンズに返され、偏光ビームスプリッターを備えた CCD カメラパートに伝搬する。カメラにイメージを転送するために、別の 200mm の焦点距離色消しレンズが使用される（造影条件を満たすためにこのレンズの 200mm 後ろにカメラが置かれることに注意）。EO 結晶中の THz により引き起こされた複屈折の測定は、 4 分の 1 波長板、半波長板および偏光ビームスプリッターの組み合わせによって検出さ

れる。さらに、バランスイメージング法が信号対雑音比(SNR)およびイメージング獲得速度を改善するために使用された。このオペレーションは、1台のカメラ(512×512ピクセルを備えた浜松 C9100-12)によって、空間に分離したそれぞれ垂直と水平の偏光を持つ2つのプローブイメージを同時に捕らえることにより行われた。対応するピクセル(SおよびP偏光のイメージ両方からの)はすべてリアルタイムで差分を取られ、毎秒35の背景フリーのイメージが256×512ピクセルのサイズおよび15ビットの深さ分解能で得られる。THzイメージに対処する場合光学素子の高空間分解能を保存するためのポイントは、回折前にサンプルからTHz電場を集めるために非常に薄い電気光学(EO)結晶を使用することである。

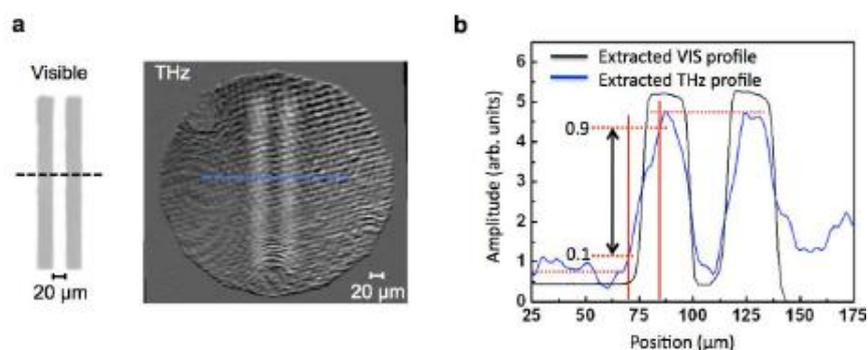


Fig. 12 Evaluation of spatial resolution: a, Visible and THz images of a metallic mask. b, Extracted visible and THz profiles of metallic mask shown in (a). Spatial resolution of $\sim 14 \mu\text{m}$ was found for time-resolved THz image. Extracted profile of visible image confirms that optical elements do not restrict spatial resolution for THz imaging.

Fig. 12(a)は、EO結晶上に直接置かれた金属マスクの可視とTHzイメージを示し、Fig. 12(b)はそのサンプル中から抽出されたプロファイルを示す。振幅中の10%から90%まで変わる端の電場波形の空間分布をとることにより、顕微鏡の空間分解能を評価した。20 μm の厚みを持つLN結晶において、14 μm の空間分解能を確認した。Fig. 12(b)の抽出された可視のプロファイルは、光学素子がTHz空間分解能を制限しないことを示す。

4-2 実験結果

この顕微鏡の整合性を実証するために、一定のTHzパルスの放射の後に金属のダイポールアンテナの近傍領域でTHz電場を測定した。Fig. 13(a)に、概要の記述およびサンプルの可視画像をそれぞれ示す。ダイポールアンテナは、2本の隣接した(73.5×10.0×0.2 μm)金の棒からなっていて、3 μm のエアギャップは、LN水晶上で直接作り上げられた。

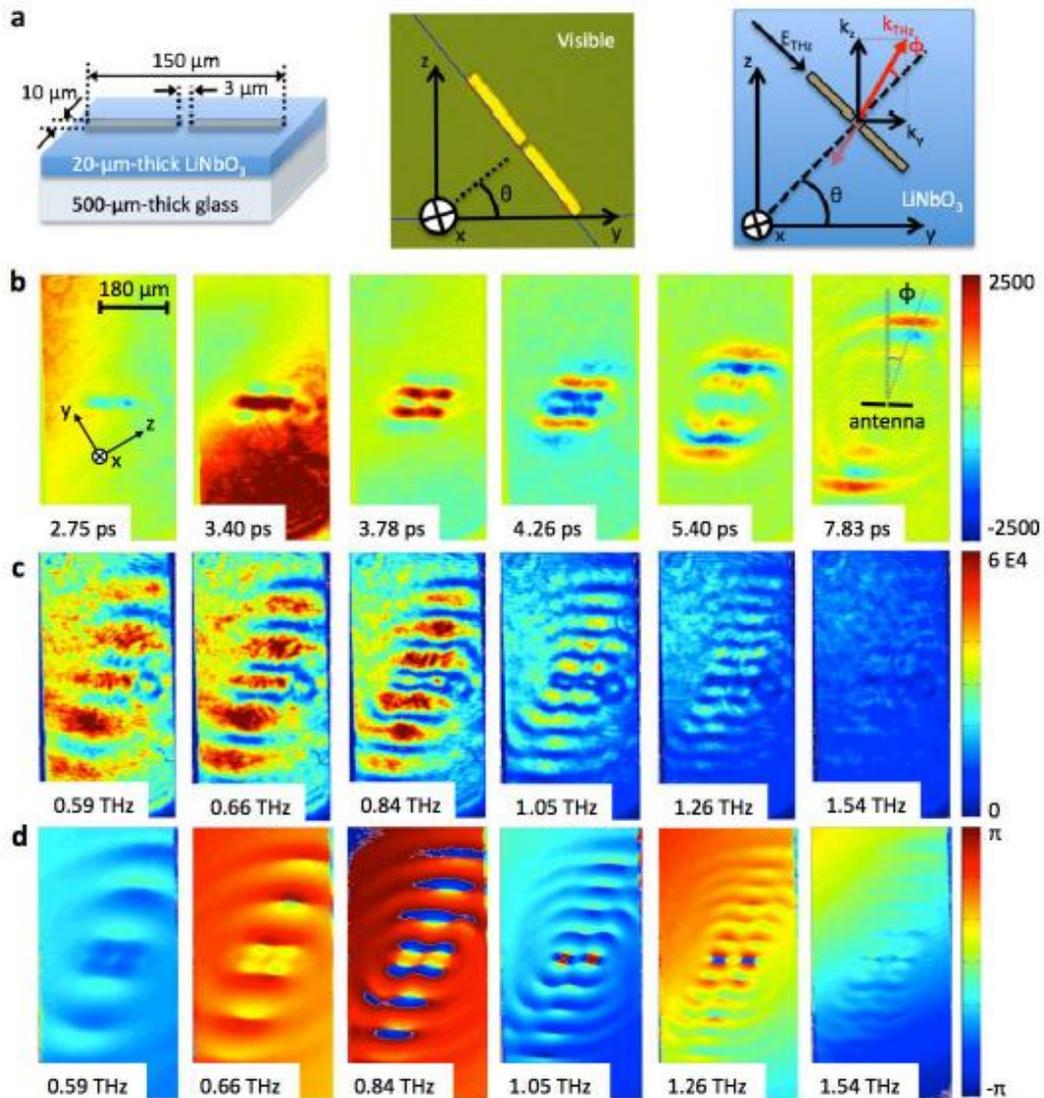


Fig. 13 Real-time THz near-field imaging: a, Schematic and visible representations of dipole antenna together with the emitted THz field relative to the dipole antenna and LN crystal orientations. b, Temporal snapshots of THz electric field. c, Amplitude and d, Phase components of Fourier transforms obtained from time-dependent field distribution for each pixel.

この顕微鏡によって前もって形作られた電場測定を定量的に有効にし、かつ含まれていた物理学に対する一層の洞察力を得るために、シミュレーションは有限差分時間領域 (FDTD) ソフトウェアを使用して実行された。シミュレーションは、 $1 \times 1 \mu\text{m}$ の空間分解能を備えた $101 \times 215 \mu\text{m}$ エリア上で行なわれた。ダイポールアンテナは、 $3 \mu\text{m}$ のエアギャップを備えた 2 本の隣接した ($73.5 \times 10.0 \times 0.2 \mu\text{m}$) 金の棒によって形成され、厚さ 1mm の LN 結晶の Y 軸に沿っている。LN の屈折率は、複屈折を無視して 5.11 とされた。金の金属の

誘電パラメータは入力としてドルーデ・モデルに使用された。励起された THz パルスは、1THz の中心周波数および 1.0psFWHM を持つ。

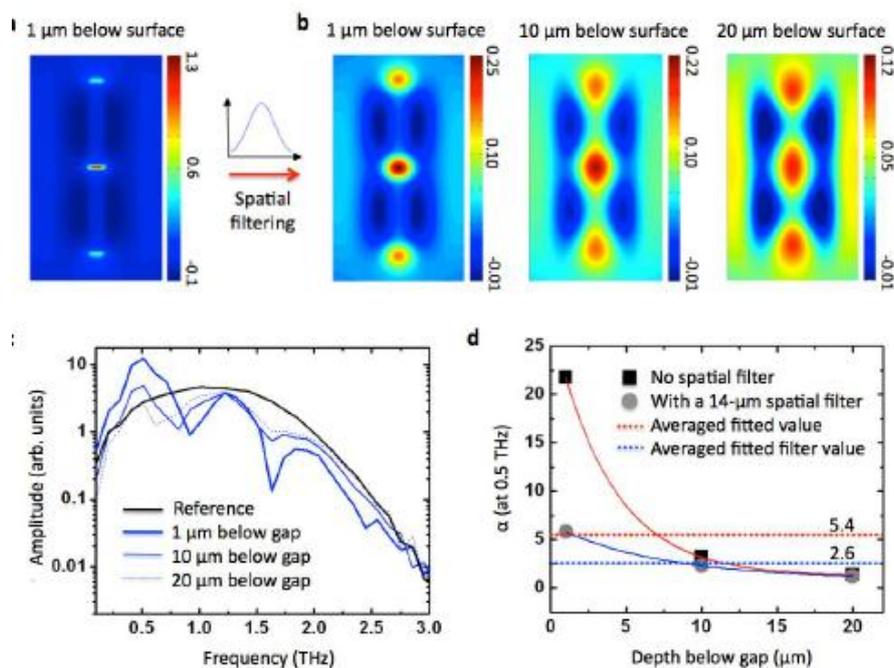


Fig. 14 Simulated electric field mapping of the dipole antenna: a, Mapped field 1 μm below LN crystal surface with a mesh resolution of $1 \times 1 \mu\text{m}$. (Antenna is oriented vertically) b, Mapped field as a function of depths below crystal surface including a Gaussian low pass filter that lowered the spatial resolution to $14 \mu\text{m}$. c, Fourier transformed of simulated reference THz pulse with Fourier transformed of THz field at gap position as a function of z direction. d, Peak electric field at 0.5 THz normalized with THz pump reference as a function of z direction. Red and blue dotted lines are average enhancement factors for $1\text{-}\mu\text{m}$ and for $14\text{-}\mu\text{m}$ spatial resolutions.

Fig. 14(a)では、ダイポールアンテナの電場イメージが LN 結晶表面より $1\mu\text{m}$ 下で得られたことを示す。シミュレーションでは、明確に $1\times 1\mu\text{m}$ メッシュ分解能を備えた $3\mu\text{m}$ のギャップ内側の電場分布を見ることができる。

前述のように、顕微鏡のイメージング分解能は $\lambda/30$ で、EO 結晶の厚さに強く影響を受ける。フィールドのイメージングが z 方向に関してどのように影響されるかもっと理解するために、3つの異なる深さのフィールドをシミュレートした ($1, 10, 20\mu\text{m}$)。さらに、十分に顕微鏡振る舞いをシミュレートするために、およそ $14\mu\text{m}$ の空間分解能へのシミュレートされたフィールドの分解能解決を低下させるために $7\mu\text{m}$ の半径を備えたガウスの低域フィルターを適用した。Fig. 14(b)は、LN 結晶表面より下の3つの層のシミュレートされた電場イメージを示す。シミュレートされた増大因子 $\alpha(\omega)$ を評価するために、アンテ

ナ・ギャップの位置でアンテナのある時と、アンテナのない時の振幅比を使用した。図 4(c)は、3つの対応するギャップより下のフィールドの電場を参照信号を用いてフーリエ変換したものである。図 4(c)に示されるスペクトルを見ることによって、フィールド増強は、約 0.5 THz の頻度で見つけることができる。LN 結晶内部のフィールド増強の分布を理解するために、z 方向の関数として 0.5THz での増強フィールドを Fig. 14(d)に示す。青および赤線は、それぞれ空間フィルタリングありと、空間フィルタリングなしで得られたシミュレーションを表す。第一次近似として、顕微鏡によって測定された電場増強は、図 4(d)に得られた青いカーブの異なるコンポーネントの平均値によって評価することができる。したがって、図 4(d)に示される点線は、完全に結晶深さによって統合された増強フィールド要因の平均値である。増大因子が 0.5THz においておよそ 2.6 であると推測する。

私たちの顕微鏡が定量的にサブ波長電場を測定できることを確認するために、シミュレートされた増大因子を実測と比較した。ギャップ(3 ピクセル×7 ピクセルのエリアに相当)より下の各ピクセルの時間依存の界分布を抽出し、この対応するエリアのフーリエ変換を行なった。所定のピクセル(ここで 1 ピクセルは $1.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ のエリアに相当)の SN 比が 100 であるので、特に 400 を超える SN 比を備えたダイポールアンテナのギャップ位置で分光解析を行なうことができた。Fig. 15(a)では、測定された THz パルスとシミュレートされた THz パルスのそれぞれについて、アンテナがあるときとない時の THz パルスのフーリエスペクトルを示す。Fig. 15(b)は、参照スペクトルを備えた増強フィールドの比率から得られた実験とシミュレーションデータを比較する。理論値と実験結果の間に多少の差が見られる。それは、シミュレーション中で使用されるアンテナと実際に用いたアンテナ間のエラーに起因する可能性がある。さらにシミュレーションは、LN 結晶の複屈折を考慮せず、等方性で厚いものとして作られたが、これは実際の LN 結晶の有効屈折率の過小評価となる。しかしながら、このデモンストレーションは、シミュレーションによく合い、サンプルの近接場およびリアルタイムで定量的に THz 電場を測定することができることを示す。

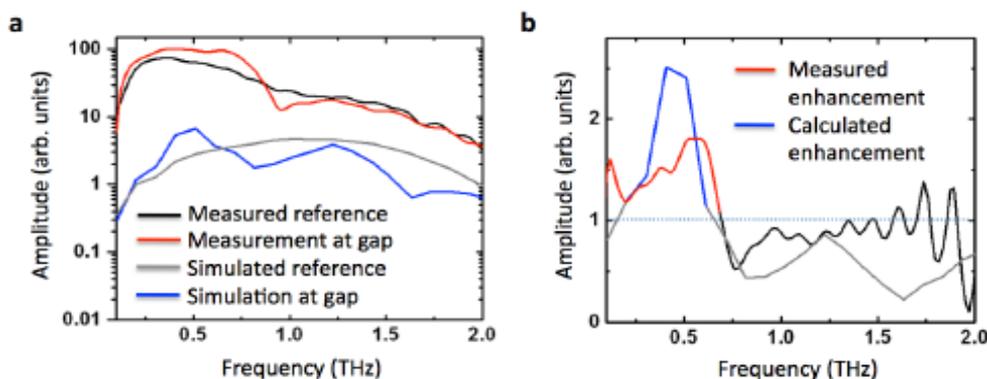


Fig. 15 Comparison between simulated and experimental enhancement fields at the gap position of dipole antenna: a, Fourier transformed of simulated and measured THz pulses at gap position with and without antenna. b, Ratios of spectrums presented in (a).

4-3 まとめ

薄いEO結晶のセンサーと高強度THzパルス源を組み合わせる新しいタイプのTHz近接場顕微鏡を導入した。このシステムは、高い空間分解能およびダイナミックレンジを備えたリアルタイムの大規模イメージを捉えることができる。特に、35Hzの繰返し速さで得られた $370 \times 740 \mu\text{m}^2$ イメージ領域で $14 \mu\text{m}$ (0.7THzの $\lambda/30$)の空間分解能を達成した。この結果は、さらに定量的にFDTDシミュレーションへのよい一致と共にダイポールアンテナのギャップ位置で電場増強をイメージングする能力を実証する。空間分解能におけるさらなる改良はより薄いEO結晶の使用によって期待される。さらに、より大きな画像センサーの選択によって、結像領域は空間分解能を犠牲にすることなく増加する可能性がある。補助情報として上映されたノーカットのTHzニアフィールドムービーを形成するために、それは、数分で2290万の単一のデータポイント相当のデータをとることができる。この顕微鏡がセルまたは微生物のような生体内の微構造の実時間追跡変化への適用に大きな可能性を持っていると考えられる。

5 コメント

基本的にイメージングはロックイン検出が出来なかつたりという理由でSN比の向上には苦勞するが、バランス検出やロックイン検出を用いてイメージングを行うというのは少し興味があった。今回紹介した論文では、速度自体はそれほど速いとは感じなかったが、どれも工夫した光学系により目的を達成していることに感銘を受けた。また、最後の論文の近接場イメージングは、分解能の向上という点で非常に面白いと思う。エバネッセント光は非常に弱いので、かなり光学系が制限されるだろうが、微細な物体を対象とする分野では非常に有用だと感じた。