

テラヘルツ波パラメトリック光源とイメージング応用

理化学研究所 川瀬晃道

我々は小型簡便な広帯域波長可変テラヘルツ(THz)光源である THz パラメトリック発振器(THz-wave Parametric Oscillator, TPO) の開発を進め、さらに本光源を用いた THz 分光イメージングによる主成分分析技術を開発した。これは、複数の物質が混ざった測定対象の中から特定試薬の空間パターンおよび濃度分布のみを指紋スペクトルを手がかりに画像抽出する技術である。具体的には、複数の異なる THz 周波数で撮像したマルチスペクトル画像データに対し、抽出対象物質の指紋スペクトルを行列演算することにより、対象物質のみを抽出できる。すなわち、「TPO の広帯域波長可変性」および「THz 帯指紋スペクトル」という2つの新しい要素技術を活用した成果である。この技術を用いて、郵便物検査、医薬品検査、病理組織診断、所持品検査などの非破壊検査への応用が期待される。

試作した THz 分光イメージングシステムの構成は、図1に示すように THz パラメトリック発振器(TPO)⁽¹⁾、イメージング光学系、検出器、ロックインアンプ、およびパーソナルコンピュータから成る。TPO は、Q スイッチ動作 Nd:YAG レーザーおよびパラメトリック発振器から構成される。Nd:YAG レーザー光 (ポンプ光 ,波長 1.064 μm)は非線形光学結晶 MgO:LiNbO₃(xxyxz = 65 \times 4 \times 5 mm³)を励起し、ノンコリニア位相整合のパラメトリック発振により THz 波 (波長 120-300 μm , 周波数 1.0-2.5 THz) およびアイドラー光 (波長 1.068 ~ 1.075 μm)が同時に発生する。実験における Nd:YAG レーザー光の出力、パルス幅、繰り返しは各々30mJ/pulse , 25nsec , 50Hz で、得られる THz 波強度の典型値は約 30pJ/pulse (ピーク値約 3mW) である。パラメトリック発振器を高精度回転ステージにて僅かに回転しポンプ光入射角を変えてノンコリニア位相整合条件を制御することによって THz 波の波長可変性が得られる。

発生した THz 波は焦点距離 50mm の透明プラスチックレンズ(パックス社製, Tsurupika)により測定サンプル上に集光され、ビーム径は約 0.5mm である。本レンズは光波および THz 波に対し透明かつ等しい屈折率を有するため He-Ne レーザーによる THz 波の光線追跡およびアライメントが容易である。サンプルを透過した THz 波はそのまま近接した検出器に入射する。検出器には試料の透過強度に応じて焦電素子 (日本分光社製, DTGS) あるいは Si ボロメーター (Infrared Laboratories 社製) を用いる。検出器からの出力は時定数 100 msec のロックインアンプで増幅され、AD 変換器を介してコンピューターにて記録した。計測中、サンプルは x-z ステージで連続的に 2mm/sec の掃引速度でラスタースキャンされる。スキャン領域は最大で縦横 50 \times 50mm で、その場合の画素数 L

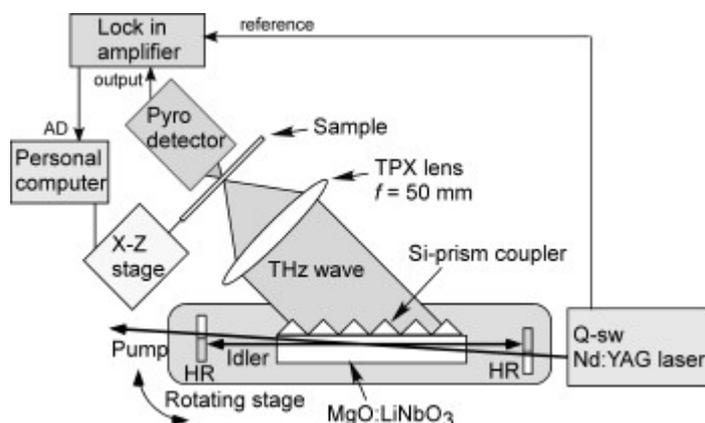


図1 テラヘルツ分光イメージングの実験系

は $100 \times 100 = 10000$ に相当する。

次に、主成分分析法の分光画像への適用について概略を説明する⁽²⁾。異なる吸収スペクトルを有する M 種類の物質から成る測定対象が、 N 通りの異なる波長でイメージングされた場合、線形行列方程式 $[I] = [S][P]$ で表せる。ここで、 $[I]$ は測定したマルチスペクトル画像を表し、各波長における画像の L 画素を 1次元に並べた行ベクトル($1 \times L$)を縦に N 波長分重ねた $N \times L$ 行列である。 $[S]$ は測定したスペクトルを表し、各物質のスペクトルの N 波長に対応した値 ($N \times 1$)を横に M 種類分重ねた $N \times M$ 行列である。 $[P]$ は求める各物質の空間パターンで、 L 画素を 1次元に並べた行ベクトル($1 \times L$)を縦に M 種類分重ねた $M \times L$ 行列である。最小 2 乗法により $[P]$ を解くと $[P] = ([S]^T[S])^{-1}[S]^T[I]$ となる。

我々は上述のシステムを用い、封筒中に隠された禁止薬物の非破壊検査技術の開発を進めている⁽²⁾。信書は小包とは異なり、法的に受取人しか開封が許されないため、殆どの国で検査は行われていない。封書を X 線スキャナーに通したり、探知犬に嗅がせたり、探知機で封書の外側をなぞったりすることもあるが、X 線スキャナーではビニール小袋や錠剤の形を見ることはできても薬物の種類の同定はできないため開封して調べるだけの根拠は得にくい。探知機や探知犬の場合は、薬物の一部が僅かでも封筒の外に漏れていなければ検出できない。他方、ミリ波イメージングの研究も進められているが、ミリ波帯域には試薬類の指紋スペクトルが見つかっていないため薬物の種類同定は困難である。また、赤外線イメージングの場合、赤外領域には試薬類の指紋スペクトルは存在するが、紙による吸収・散乱が強いことが測定の妨げとなる。

それに対し、周波数約 1THz 以上の帯域に主要な禁止薬物類および爆発物の指紋スペクトルが存在することが我々の測定によって確認され、かつ周波数約 3THz 以下の電磁波は紙類を透過するため、郵便物の非破壊検査の目的にとっておよそ 1-3THz の THz 領域が最適であると言える。なお、この領域は、TPO, is-TPG の波長可変域であるとともに、フェムト秒レーザーを用いた THz 時間領域分光法 (TDS: Time Domain Spectroscopy) の帯域でもあるため今後の実用化に期待が持てる。図 2 は封筒中の麻薬 (MDMA)、覚せい剤 (メタンフェタミン)、アスピリンを THz 分光イメージングにより非破壊検出した例である。

謝辞: 計測にご協力下さった科学警察研究所の井上博之室長, 中村順室長, 金森達之研究員に感謝致します。

参考文献:

- [1] K. Kawase, J. Shikata, H. Ito, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, R1 (2002).
- [2] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe and H. Inoue, Opt. Exp. **11**, 2549 (2003).



メタンフェタミン



アスピリン



MDMA

図 2 封筒中の覚せい剤 (メタンフェタミン)、アスピリン、および麻薬 (MDMA)を THz 分光イメージングにより非破壊検出した例。