

非線形効果による高出力テラヘルツ光源と テラヘルツイメージング



特 集

名古屋大学エコトピア科学研究所・融合プロジェクト部門
教授 川瀬 晃道

はじめに

本日の講演は前半で光源開発のことについて紹介し、後半でテラヘルツイメージングの応用について話をします。私たちが考えているテラヘルツ波の特徴としては、いろいろなものを透過する。レーザービームのように扱いやすい。多くの試薬類にテラヘルツ帯指紋スペクトルが見られる。簡単に言えばそのようなことです。

光源ですが、テラヘルツ帯では電波側からも光側からも、1~3 THzの間で明らかなギャップがあります。たまたま私たちの光源がこの領域をカバーしていたので、欧米の複数の研究者からもそのギャップを埋める便利な光源だと認めていただいています。波長可変光源として既存の自由電子レーザーやp型Geレーザーがありますが、大型であることや液体ヘリウムを消費することから、産業応用には少し厳しいかと思われます。私たちの光源はテーブルトップのもので、パラメトリック発振器と呼ばれる共振器構造を持つ光源や、光注入型発生器などを開発してきました。

THz波パラメトリック光源

THz波パラメトリック発生の原理を簡単に説明しますと、まず非線形光学結晶をレーザーで励起します。ポンプ光で励起してたたき上げられたエネルギーを、アイドラ光と呼ばれる近赤外のエネルギーと、遥かに波長が長く周波数が低いテラヘルツ光に分割するというプロセスで、これを広義の意味でパラメトリック変換といいます。ノンコリニアな位相整合条件を主に使っています。

THz波パラメトリック発振器(TPO)

この写真がテラヘルツ波パラメトリック発振器(TPO)で、光源はNd:YAGレーザー。TM00モードのビームで結晶を励起します。結晶長は60mmなど長いものを使っています。ポンプ光より波長が長いアイドラ光が2枚のミラー間で発振す

ると同時に、遥かに波長が長いテラヘルツが出てくるというものです。共振器が回転ステージの上に固定されていて、ポンプ光の結晶への入射角を変えることで波長可変性が得られます。シリコンプリズムカメラを使っていて、これによって結晶の中で発生したテラヘルツが斜め方向に出るわけです。何もしないと結晶端面で全反射するので、端面にモノシタックグレーチングやシリコンプリズムカプラーなど、何かを施す必要があります。

光注入型テラヘルツパラメトリック発生器

2000年頃に光注入型発生器(is-TPG)を作りました。これの特徴ですが、seededND:YAGレーザーで結晶励起し、同時にアイドラ光に相当する近赤外のレーザーダイオードで光注入を行いました。アイドラ光にイニシャルエクサイテーションを与えることで、アイドラ光がきれいなスペクトルで力強く育つ。それに伴ってテラヘルツ波もきれいなスペクトルで力強く育つ。パルスですが、フーリエ限界の狭線化が得られていますし、TPOを超える高出力と波長可変域が得られます。共振器構造を使って



講師 川瀬 晃道 氏

いせんから、モードホップフリー性を得ることができ、シーダーさえモードホップフリーであれば、テラヘルツもモードホップフリーということになります。波長可変域は0.6 ~ 2.6 THz、ピーク出力が300 mW程度で、水蒸気の分光をしてみると確かに100 MHzの分解能がある。これでフーリエ限界の線幅を得られていることが分かります。

オール・イン・ワン型の発生器

オールインワンタイプ(is-TPG)も作りました。YAGレーザーがあり、シーダーがあり、結晶があって、テラヘルツができるというものです。シーダーはジクザクしていますが、これは単に長いから折っているだけなのです。シーダーの波長を変えると同時に、ノンコリニア位相整合条件に合うように入射角を変えなければならないのですが、グレーティングの1次回折角をうまくリレー光学系で3倍にすると、位相整合角をぴったり満たす角度で入射してくれます。メカニカルな動きはなしで、チューナブルシーダーの波長を変えるだけで、インジェクションシーディングがかかるシステムになっています。is-TPGは便利なので、当研究室ではいろんな目的に使っています。



TPOを用いた分光イメージングシステム

THz波パラメトリック発振器(TPO)を使った分光イメージングの事例を紹介します。封筒の中に麻薬、アスピリン、覚せい剤の袋を隠した上で、1.3 THz ~ 2 THzまで周波数を変えながらマルチスペクトラルイメージをとって、あらかじめパソコン

内に格納しておいた試薬の吸収スペクトルを行列演算し、主成分分析を使って画像で抽出してみました。実験はたった2日間でしたが、その結果は驚くほど好評を得ました。禁止薬物の非破壊検出のような目的には、0.5 ~ 3 THzがよいと考えています。なぜかといえば、X線領域または最悪3 THz以下の電波域はいろんなものを透過します。3 THzは波長で言えば100 μm ですが、いろんなものがこの辺りで不透明になります。いろんな試薬の指紋スペクトルが0.5 THzから赤外域にかけての領域に存在し、郵便物の中の覚せい剤や服の下の爆薬の分光イメージングが可能となります。将来的には患者に薬を渡す際の、間違った薬の配合を防止できる装置ができたら素晴らしいことだと思います。

テラヘルツ分光イメージング例

別に研究開発した分光イメージングシステムですが、これは乾燥唐辛子と乾燥エビの中の構造が見えるという事例です。X線で撮像しようとする、サンプルごとに条件をきっちり合わせて特殊な方法でやらないと撮れませんが、テラヘルツの場合は置くだけで撮れる。その特徴は適度な吸収なのです。X線は透過率があり過ぎるために、同じような素材、とくにソフトマテリアルのような軽い元素系素材の中の構造などに対しては非常に難しいことです。それに対しテラヘルツには、適度な吸収力があるということです。

マイクロチップレーザー

浜ホトと分子研が共同開発したマイクロチップレーザーは、出力も結構あるし、シングルフリーケンシーであるし、尖頭値が高く、パルス幅が短い。私どものパラメトリック発振器にはぴったりです。折り曲げると10 cm程度になるのですが、テラヘルツがある程度出るので便利だと思います。これを使ってTHzパラメトリックジェネレーション、あるいは光注入を施して、インジェクションシーディッドタイプのTHzパラメトリックジェネレーションをやっています。このレーザーの1つの魅力はパッシブQスイッチにあります。従来はアクティブQスイッチであり、電磁ノイズを出すので、すごくノイズな中での測定でした。このレーザーではパッシブQスイッチであり、スイッチングノイズが出なくて

ショットキーバリアダイオードとのマッチングが非常によいということから、その組み合わせでシステムを組んでいました。サブナノ秒パルツのテラヘルツの尖頭値のフラクチュエーションがRMSで5%。これは驚くほど安定意的な値だといえます。

パームトップサイズTPG

これは米国カテル社のウルトラという小型レーザーで、パラメトリックオシレーションに特化されたYAGレーザーです。トップハットビームプロファイルを持っていて、これによってガウシアンプロファイルのビームよりも、結晶をダメージすることなく入射させることができるという特徴を持っています。これは小型で安く、うまく組み合わせるとかなりコンパクトな光源にもなります。

チェレンコフ型位相整合テラヘルツ波放射

最近ホットな話題になっているのが、チェレンコフ型位相整合テラヘルツ波放射です。結晶中を光が速く走る。例えばリチウムナイオベートにとって光の屈折率は2、テラヘルツの屈折率は5~6で、光のほうが数倍速く進むわけです。超音速のジェット戦闘機と音波という関係が成り立ちます。光が透って、それを追いかけるように等位相面のテラヘルツ波が出ていく。これをチェレンコフ型位相整合と呼ぶのですが、有限の大きさのビームがテラヘルツ波を発生する。結晶に対してテラヘルツの出口方向から見たときに、奥行き方向に分布があるとテラヘルツ波に対して位相不整合が起きてしまう。それを回避するためにはスラントストライプ型ドメイン反転を起こすか、あるいはビーム径を絞って、テラヘルツ波の波長よりも数分の1のビーム径で出すという2通りの方法があります。

CCDカメラを用いたテラヘルツ分光イメージングの高速化

すごい出力のテラヘルツ発生が可能になると何ができるのか。1例として以前に取り組んだ研究事例を紹介します。これは再生増幅器付チタンサファイアレーザーを使って大出力のテラヘルツを出し、CCDカメラでEO結晶を介してテラヘルツのムービーを撮るといったものでした。私どもはそこに主成分分析の分光イメージング手法を導入し、封筒内の

覚せい剤を撮ることを試みました。1THz以下しか出せなかったのですが、マラカイトグリーン、ピオチン、シスチンによるペレットを作って、マルチスペクトル画像を出してみました。分光スペクトルで主成分分析をして何とか分かる程度にはなりました。現在はこの当時より4桁程度上のテラヘルツが出せることになっているので、SNが6桁程度あるテラヘルツムービーが撮れてしまうことになります。今後はファイバーレーザーのフェムト秒の高出力なものをぜひ開発、製品化していただきたいと思っています。



差周波混合用の2波長光源の特徴

私たちは差周波光混合による波長可変THz波発生というテーマに取り組んでいます。ダストという結晶を使った1998年の研究で、私はダストから差周波でテラヘルツ波が出るということが分かりましたが、その後にこれほどまで発展するとは思っていませんでした。ダストという結晶は底知れない力を持っていて、数十THzどころか100THzまで出せるというように、とにかくチューニングレンジが広いわけです。私は20~30THzまで出して行っています。何とんでもd係数も高いし、光からテラヘルツを出す目安となるr係数も高いのです。コリニア位相整合がとれるというのも魅力です。位相整合条件がとれるということを伊藤研が見つけれましたが、位相整合条件に合わせることも高出力化につながります。私たちはダストの結晶成長に取り組んでいますが、耐久性のよい高品質のダストができて

きております。有機線形結晶で 2 GW/cm^2 のしきい値というのはものすごく高いのです。歴史上で最も完成度の高い非線形結晶はリチウムナイオベートなのですが、それでもせいぜい 200 MW/cm^2 程度で、その10倍程度のダメージしきい値を有機線形結晶が持つということは驚きでして、そういうものを使うと、今後ますます高出力化も期待できると思われれます。



フィルターによる排ガス浄化

排ガスフィルターの中のススを測ろうとしています。このような分野でもテラヘルツが応用できます。これはフィルター内のススの透過イメージングですが、少々ぼやけた像でも依頼元のメーカー関係者から喜ばれています。というのはフィルタの中のススの分布を調べる方法がこれまで全くなかったからです。

タイムオブフライト型テラヘルツトモグラフィ

タイムオブフライト型テラヘルツトモグラフィは1990年代後半に他の研究機関でも行っていますが、私どもはファイバーレーザーベースで世界最短のテラヘルツパルスを作ろうと取り組んでいます。光スイッチは少し間延びするのでダストを使いました。ダストの素晴らしさは例えば $1.5 \mu\text{m}$ 帯で叩くと 20 THz や 30 THz まで位相整合がとれてしまいます。周波数を広く発生できるということは、時間軸に直せば超短パルス化ができることなので、そこにもダストの素晴らしさがみられます。広帯域 THz-TDS に成功し、トモグラフィの画像としては紙3枚、あるいは3層の $15 \mu\text{m}$ 程度の塗装膜が見えており、

奥行き分解能 $5 \mu\text{m}$ を達成。 $10 \mu\text{m}$ 程度の薄いコーティングのマルチレイヤーを見たのも世界初ですし、テラヘルツトモグラフィとしては最もよいのではないかと考えております。

メタルメッシュの THz 帯センサー応用

メタルメッシュは昔からテラヘルツ帯で使われている素子ですが、最近になって面白くなってきました。原理は割りと単純で、メッシュの上にコーン油などサンプルを塗り、サンプルの屈折率による透過特性の変化を測定するものです。スロープの上のシフト量を測ってもいいし、スペクトル上のディップのシフトによってサンプルの屈折率変化を測ってもいいというセンシング方法です。

メタルメッシュを用いたアビディン・ピオチン結合の検出

テラヘルツイメージングもなかなかのものだと言える例を紹介します。従来の蛍光ラベル法と比較してアビディン・ピオチン結合を見てみようという共同研究です。蛍光ラベルとテラヘルツとは遜色がありません。右に行くほどピオチン濃度が薄くなっていて、どこまで薄い所が見えるかなのですが、この段階ではまだメタルメッシュを使っていません。これにメタルメッシュを使えば感度が3桁ほど上がるから、テラヘルツイメージングが圧勝だと喜んでいました。しかし、実はサンプルをシリコン板で挟んでいたため、その薄い領域で共振効果が起きていてテラヘルツが何往復もして、結果的に感度がよくなったのです。こうした面白い方法で、感度をよくすることもできるということが分かりました。

シリコンロッド導波路からのエバネッセント波を用いたテラヘルツ分光イメージング

次の話題はシリコンロッド導波路からのエバネッセント波を用いたテラヘルツ分光イメージングです。直径 1 mm 、長さ 50 mm 程度のシリコンロッドにテラヘルツをきれいに入射させてやると、伝搬モードが走って表面に均一に近接場光が出る。それをセンサーとして使おうというものです。表面上に何かを押し当てての形状をイメージングすることや、ロッドを入れて溶液濃度を測ることなど、さまざまなことが可能となります。

光によるテラヘルツ波変調の可能性

光でテラヘルツ波を変調できることが分かってきています。最初、何か出力が変動するのでおかしいなと思ったら、蛍光灯の光でテラヘルツが変調されてしまっていました。何かと言いますとシリコン表面上に均一にテラヘルツエバネッセント波が出てくるのに対して、光があたるとフリーキャリアが発生してテラヘルツを食ってしまう。半導体基板がそう

いった変調ができるということは従来からシリコンの板で分かっていたことです。その場合、結構なパワーが必要でした。今回はエバネッセントなので従来の報告に対して格段に微量な光で数十%の変調がきくので、テラヘルツの光変調などに使えないものかと思っております。また、シリコンのロッドを短くしたら 10 GHz 程度の変調スピードとかができないものだろうかと思っております。

