

# 高感度テラヘルツカメラの最前線 「非冷却TVフレームレートQVGAセンサ」



特集

 日本電気株式会社 誘導光電事業部  
 エグゼクティブエキスパート 小田直樹

はじめに

私はNICTの委託研究「ICTによる安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」に2007年度から参加して、そこで開発してきた成果について述べます。概要として、**応用分野** センサの開発 **THz** で高い透過率の材料開発 **カメラの開発** THzにおける技術動向 - などについて話したいと思います。

## 1. THz 応用分野

大雑把にいて0.5 THz以下の電磁波を服はほとんど透します。その性質を用いて、この写真のようにSago Systems社ではCWD (Concealed Weapon Detection) を90 GHzでやっています。Thru Vision社は0.5~0.6 THzを採用しています。私はThru Vision社の方が良いと思っています。いずれにしても製品としてどうなるかを今後見ていきたいと思えます。こうした製品が出現しているため、その領域にボロメータを持ち込んだとしても感度的に苦しいと思えます。市場として狙う分野は、0.5~10 THzの間のどこかで、例えば禁止薬物や医薬品、農薬、食品分析、水分の有無、爆薬などに応用することを想定しています。

## 2. 非冷却TVフレームレートTHz QVGAセンサの開発

ボロメータ型非冷却赤外線QVGAセンサのTHz感度

赤外線QVGAセンサのテラヘルツ感度について、2006年11月に測定しました。QCLを搭載したヘリウムクライオスタットは動作温度15 K。赤外線カメラTVS200GSのレンズをとり払ってオフアクシスマラーで集光したものを、メタルメッシュフィルターを通してどの程度の感度があるのかを測定しました。メタルメッシュフィルターは、テラヘルツを透過して10 μm帯をブロックするタイプを使いました。QCLの発振周波数は3.1 THz、波長97 μm

です。ボロメータは時間平均パワーが重要です。この時は8.7 μWがあったのですが、距離が50 cm程度あるので、湿気が多いか少ないかで受けるパワーメータ出力は2倍程度変わります。センサは市販のものを使用し、画素ピッチは23.5 μmです。

私たちが使っているボロメータは、すでに製品化されています。アレイサイズ640 × 480のVGAと320 × 240のQVGA。QVGAの方が値段も安くて好まれているので、これを使ってテラヘルツでの高感度化にトライしました。基本的な構造はMEMS技術を使っていて、シリコン読出回路に320 × 240のICが入っています。ICのある領域には積分や信号処理をする回路も増幅回路も入っていて、一種のシステムオンチップです。この上に宙に浮かした状態でボロメータ薄膜を保護膜でサンドイッチ状にしています。吸収したエネルギーが熱となってボロメータの抵抗が変わるので、溜まった熱を逃がさないようにするのがセンサの高感度化のポイントです。支持脚をいかにして細く長く薄く作るのか、ダイアフラムの製造プロセスマージンがどの程度あるのかによって検出器の歩留まりが決まってきます。この



講師 小田直樹氏

アレイセンサは2階建て構造で、1階部だけの状態ではダイヤフラムのフィルファクターが60%程度で開口率が小さいので、底を作ることで90%程度までフィルファクターを上げてやります。23.5 μmの画素に入射するエネルギーを底で集め、熱伝導でポロメータ薄膜に伝える仕組みです。感度としては、 $F/1$ という光学系を使って640 × 480では30 Hz、320 × 240では60 Hzのフレームレートで約50 mKの温度分解能が得られています。

NICTと2年前に感度評価実験を行いました。QCLの時間平均パワーが約9 μW。QCLの画像が映っていて、ピークの半値である点線で囲った領域よりパワーメータの受光サイズ2 mmの方が大きいので、エネルギーが点線の領域に入っていることが分かります。等高線の半値幅の中の画素数が1140と勘定できるので、メタルメッシュの透過率、ゲルマニウム窓の透過率を用いると、NEPのパワーが計算できます。

#### THz感度の向上

感度の向上について、次の3つをやりました。高透過率材料について、高比抵抗シリコンとZeonexという材料をTDSで測りました。Siの透過率は割とフラットで、透過率と厚みと吸収率の計算式を当てはめて、厚みを縦軸にとって透過率を横軸にとってみると、5 mmの厚さに対して3 THzで46%の透過率なので、吸収係数は $0.3 \text{ cm}^{-1}$ という値が出ます。同様にZeonexでやってやると、透過率はいいいのですが、 $1 \text{ cm}^{-1}$ と吸収係数が大きい。Topsil社のSiの透過率を波長2.5 μmから1 mmまでの約3桁の範囲にわたって測定してみました。NICTのTDS、NICTのブルッカー社のFTIR、私たちのFTIRのデータが何もせずスムーズにつながっているのは驚きでした。波長25 μmから50 μmの透過率を平均したものから100 μm以外の波長でどの程度の吸収係数があるのかと、Topsil社とTDY社のもので測ってみました。両者とも大体 $0.3 \text{ cm}^{-1}$ 以下と吸収係数が小さい。Topsil社のものを論文で最初に見たのですが、たぶんTDYのものも使えるのではないかと思います。

シリコンは屈折率が大きいので反射率も大きい。そこでTHzでの無反射コーティングを検討しました。パリレンCとSiO<sub>2</sub>を成膜して比較しました。この

例は1 mmのシリコンの上に、パリレンCを両側に15.8 μmつけたものです。狙いは3 THzだったのですが、設計がうまくいかなくて2.7 THzになってしまいました。しかしピーク透過率は90%を越えており、ゲルマニウムに比べて3.5倍の改善が見られます。

私たちのセンサは真空パッケージの中に入っており、ゲルマニウムの窓をTHz波の検出用に無反射コート付きシリコンの窓に換えました。無反射コートの製造条件について、パリレンの厚みと最大透過波長の制御性について調べました。波長2.5 μmから1 mmの間の透過特性を、15.8、12.5、8.3、4.4 μmの厚さのパリレン付のシリコンに対して測定し検量線を引く。この図は無反射コート膜の厚さと最大透過波長の関係をグラフにしたもので、実線が実測値で点線が計算値です。1次の干渉、2次の干渉、3次の干渉をデータが読める限りやったところ、矛盾のない結果が出ているので、これを検量線としました。透過材料を作る技術としては、この範囲内であれば割と制御できると思います。



#### センサチップの高感度化

BAE社も当社も酸化バナジウムというポロメータ材料薄膜をSiN膜で挟んでいます。ここに金属膜があって完全反射膜になり、ここが真空になっています。この構造の場合、2通りの吸収メカニズムがあります。1つはただ単にSiN膜が吸収する。これはSiN膜の吸収特性で、10 μm帯、20 μm帯、30 μm帯でよく吸収しています。もう1つのメカニズムは干渉フィルターに用いられているもので、この間隔を $\lambda/4$ にしてやると、波長の電磁波に

対して効果的に吸収します。金属膜同士で誘電体を挟むのですが、誘電体は透明でないといけません。SiN 膜は波長  $60\ \mu\text{m}$  以上でほぼ透明なので擬似光学的共振構造で考えました。小技として金属薄膜のシート抵抗を真空インピーダンス整合した値  $377\ \Omega$  からわざと変えてやり、ある計算をするとシート抵抗に対してこのような吸収率のカーブが得られます。吸収率をとにかく高くしたいわけです。20 とか 40、100 くらいにシート抵抗をもっていったら、3 THz では当社比で 6 倍は感度が上がるだろうと予測しました。それがもの見事に当たりました。他の波長でこれを見ると、例えば 1 THz ( $300\ \mu\text{m}$ ) に対して、このようなカーブになります。300  $\mu\text{m}$  をやる時は 20 程度にしてやった方が感度はよくなるのが推測されます。

従来の  $320 \times 240$  のポロメータアレイにこのような金属薄膜をつけたもの、パッケージの窓として無反射コート付きのシリコンをつけてやると、SN が 6 ~ 7 しかなかったものが、SN 1000 くらいにまで上がりました。アレイセンサ自体の NEP でいうと当社比で 6 倍よくなっています。また BAE 社と比べると 8 倍くらいよくなっています。20、40、100 を作ってみて、100 がいちばん悪くなるかと予想していたら、そうではなく 3 条件に対して NEP は同じように改善されていることが分かりました。



次に信号処理です。NICT のプロジェクトでは、広視野のパッシブカメラと狭視野のアクティブカメラを作ることになっています。目的は 5 m 程度先の災害現場の向こうにある生命体を見つけてやろう

というのですが、その場合にパッシブカメラで 5 m 先の  $1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$  の所で何があるかを見つけ、その中の  $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$  の所を詳しく見たい。空間分解能については  $1\ \text{cm}$  程度にしたい。そうすると自動的に焦点距離等が決まり、パッシブカメラの場合 28 mm、アクティブカメラの場合、1 桁長い 280 mm の焦点距離になります。

次にどれくらい画素積分とフレーム積分をしたらよいのかと考えます。赤外と違って波長  $100\ \mu\text{m}$  となると、フラウンホーファー回折限界が効いてきます。パッシブで  $40\ \mu\text{m}$  くらいの波長を見ないと SN 的にしんどいので、 $1.7\ \text{mrad}@40\ \mu\text{m}$  という値が得られます。それに対して 1 画素の瞬時視野角を考え合わせると、パッシブに対し  $3 \times 3$  画素くらい、アクティブに対しては  $24 \times 24$  画素くらい積分しても構わないことになります。フレーム積分には条件があって、5 秒以内に 1 フレームをとることになっているため、フレーム積分は 300 回までやるプログラムを作りました。画素積分とフレーム積分の効果を  $24 \times 24$  くらいの範囲でしないといけないため、デフォーカスにして測定しました。上の図のデータが参考の SN 比になります。 $41 \pm 4\ \text{pW}$  の NEP がそれに対応します。これが画素積分  $3 \times 3$ 、フレーム積分 64 回 (1 秒のフレームレート) という積分効果によってノイズが見えなくなっています。そして SN は 8 倍よくなっています。これはパッシブカメラに対応します。アクティブカメラの方は  $24 \times 24$  まで画素積分できますから、64 回のフレーム積分と合わせて、SN が 60 倍よくなっています。そのかわり空間分解能は悪くなります。信号処理によってこれくらい SN が向上するのが分かります。画素積分とフレーム積分のどちらがどう効いているのか。じつはフレーム積分というのはあまり効いていなくて、最後の 1 ビット辺りで量子化ノイズが出てきたりして、64 回や 300 回近くやっても 2 ~ 3 倍くらいしか SN は上がりません。ということは画素積分がほとんど効いています。

### 3. THz カメラの開発

#### THz カメラ光学系

昨年度にテラヘルツの光学系を開発しました。アクティブカメラは 30 cm くらいの焦点距離になるので、非球面ミラーにしました。悩んだのはパッシブ

の方です。まずは透過率を重視することから薄く作ることに注力しました。2枚合わせて3mm程度の厚みで、第1番目のレンズは非球面レンズ、第2番目のレンズはフレネルレンズという日本初のものだと思います。アクティブカメラとパッシブカメラは1つの台上に載っていて、方位角方向と仰角方向に変えられます。ある方向を見てやって、パッシブカメラのうちどこを見たいかということで、アクティブカメラの所に別な台を設けて方位角方向と仰角方向に変えられるようにしています。アクティブカメラでは、QCLから出てきたTHz波を放物面鏡でコリメートして走査鏡で方向を変えてやることを考えています。

非球面・フレネルレンズの性能ですが、10月8日に実験をしました。まず320×240の真ん中にQCLのビームを入れて、カメラを振ってやって四隅にビームをあてるビームの画像を比べます。真ん中に対し周辺のビーム形状があまりずれていないので、デザインとして適していると思います。実験で気づいたことは、ピーク値772、823、787など5%程度の誤差なら許せるが、1つだけピーク値1046というのがありました。これはおそらくセンサチップ自体が対角方向に感度勾配があることを示しているのではないかと思います。このカメラを検査する際に波長10 $\mu\text{m}$ 帯の赤外でしか感度較正していないわけで、波長100 $\mu\text{m}$ では感度ムラが出てきていると思います。最終製品にするにはテラヘルツの使いたい波長にフィルターをつけて、フォーカルブレイアレイを照らす光源があって、テラヘルツで感度補正のテーブルを出荷時に入力しないとイケないと考えています。レンズとしては成功しているが、副産物として10 $\mu\text{m}$ 帯で合わせた感度補正のテーブルが、波長100 $\mu\text{m}$ には適用できないことが分かりました。

#### 画像(第1報)

10月8、9日、2つのモードで画像取得実験をNICTで行いました。3THzのQCL光源を置き、2枚の軸外し放物面鏡の間にサンプルを入れ、THzカメラを用いて透過モードで測りました。もう1つは反射モードで測りました。テラヘルツカメラとしてはQVGAのセンサを用い、メタルフィッシュフィルターを新たに購入して35 $\mu\text{m}$ 以上を透すもの

にしました。量子カスケードレーザは時間平均パワー7 $\mu\text{m}$ 。ペーパーカッターナイフを黒いポリエチレンバッグの中に入れて見た画像がこれです。クライオスタット内部の15Kの黒体輻射の非常に低いレベルを背景に、300Kのナイフを出し入れした状況です。黒いポリエチレンを透しても見ることができました。もう1つ、中国の1元硬貨を反射モードで測ったところ、これも分かりました。動画では、チョップを置いた状態とその前に紙を置いて遮った状態で測りました。QCL光源がうっすらと見えています。紙は3テラヘルツぐらいを透すことがよく分かるのではないのでしょうか。性能はまだ悪いですが、最初の画像としては出てよかったというのが正直な心境です。



#### 世界の技術動向

これはMITのQCL光源とブリティッシュエアロスペース(BAE社)の赤外カメラのコンビネーションです。MITは、MITと鉛筆で描いた文字を封筒の中に入れて、透過モードと反射モードで測った。彼らはメタルメッシュフィルターを使わずに、フレーム1の時にQCLをオンにして赤外バックグラウンドを含んだ画像、次にQCLをオフにし、1フレーム休んでフレーム3の時に赤外バックグラウンドの画像を取得し、その差をとってMITと出る。透過モードでは1回のフレーム積分で出ているのですが、反射モードでは紙で散乱されているので20回足しても1回の画像よりもよくないようです。

ネイビー・ポストグラジュエート・スクールにいるペーンケン氏らもQCLを開発しています。エビ層の厚みが14 $\mu\text{m}$ 程度で、クライオスタット内に

放物面鏡を入れ、集光してパワーをなるべく取り出しています。波長2.8 THz レーザの光源で不透明なテープで包んだ刃が見えています。この表で示したのはQCL とポロメータのコンビネーションでやっているチームの技術動向です。酸化バナジウムのポロメータということで、どれも構造は似ています。BEA 社と私たち NEC の改造前の感度は非常に似ています。NEC 改良版はよくなっています。現在は NICT で、ミリワットを超えるようなものを研究していただいています。

THz における大気透過と Standoff range  
波長  $10\ \mu\text{m}$  帯とテラヘルツでは、波長毎の輝度が桁で違います。300 K の黒体放射で 6 桁。またテラヘルツになると大気吸収が非常に大きいという特徴があります。次にテラヘルツでは  $10\ \mu\text{m}$  帯に比べてダイナミックレンジが小さい。300 K と 500 K では波長  $10\ \mu\text{m}$  帯だと 1 桁変わりますが、波長  $100\ \mu\text{m}$  だと 2 ~ 3 倍にしか変わりません。コントラストが非常に少ない世界です。大気の透過についてはモデル計算があるのですが、必ずしも正確ではありません。そこで名古屋大学でガスセル長 2 m、周波数分解能約 150 GHz の条件の下で 1 THz から 11 THz までの吸収係数を測定してもらいました。このデータを使ってどのくらいの距離まで見えるのか。例えば 300 K の所に温度差 10 K の人間が居た場合に、F1 の光学系（総合透過率 65% のレンズ）で観測した場合、1 画素あたりに入ってくるエネルギーの距離依存性を示したのが、この図です。波長  $50\ \mu\text{m}$  以上の THz を検出した場合にこのようなグラフになります。 $30\ \mu\text{m}$  以上の波長の電磁波を入れると、5 ~ 6 倍多いエネルギーが入ってきます。つまり 10 THz 以下の電磁波を入射させないとパッシブとしてなかなか難しい。感度が 40 pW、積分しても受かるのですが、基本的にリアルタイムでやろうとすると 5 m の距離だと実際には難しいことが分かります。5 m 以下に限った場合の目標 NEP は 10 pW と書いてありますが、実際に SN 6 ~ 7 を眼で見るとというのは非常に難しく、パッシブでは 1 m 以内のところを実用化できる場所ではないかと思っています。

アクティブに関して、例えば時間平均 10 mW パワーの光源があったとして、それを面積 A のもの

にあててランバーティアンな散乱を想定する。吸収係数の少ない波長  $88\ \mu\text{m}$  の所を見ても  $0.2\ \text{m}^{-1}$  くらい大きい。これを計算式にあてはめ  $23.5\ \mu\text{m}$  ピッチの画素に何ワット入ってくるのかを計算すると、このようなグラフが得られます。距離がゼロの所で数 pW、それが指数関数で落ちていくので、なかなか難しい。結論的に言えば、応用として近い距離で顕微鏡的に使うのがよいのではないかと思います。例えば創薬、薬の原料が流れて来た時に波長 1、2、3 としてマルチ波長で、透過で撮って、主成分分析をやるとというのが 1 つの解ではないかと思っています。さきほどのプロテインの免疫反応ですが、バイオエクスポで ELISA という方法があって、同方法の 2 番の所で、テラヘルツで測れば画期的でしょうかと私が質問したら、バイオエクスポの人はそれは画期的です。1 から 5 番までのプロセスをやるのは大変だと答えるとともに、かつラベリング分子を付けることが必ずしもできるとは限らない、ラベリング分子を付けることで反応がモデファイされる場合があると言われていました。テラヘルツで ELISA 法の 2 番目の段階で免疫反応が分かるなら、生物剤の検知やたんぱく質の検知に威力を発揮するだろうと思います。



#### まとめ

感度向上のためにセンサチップの高感度化、高透過率材料の開発、信号処理を行い、更に THz カメラを開発して、動画を撮りました。3 ~ 10 THz でのスタンドオフ・レンジとして、1 m くらいの近距離でやるのがよいのではないかと考えています。