

パブリックセーフティを支える 赤外線センサ技術

佐々木 得人・倉科 晴次

要旨

非冷却赤外線センサは、従来の冷却型赤外線センサに比べ、小型・安価な赤外線センサとしてセキュリティやサーモグラフィといった応用分野での用途拡大が図られています。本稿では、NECの非冷却赤外線センサの技術及び活用事例を紹介するとともに、同センサ技術をベースとして新規開発した非冷却テラヘルツセンサの技術紹介と今後期待する活用分野を紹介します。

キーワード

- 非冷却 ●赤外線 ●テラヘルツ ●ボロメータ
- ダイアフラム ●MEMS ●真空パッケージ

1. はじめに

1800年頃、イギリスのウィリアム・ハーシェルにより発見された赤外線は、目に見えない光でした。赤外線は、人間の体温などの検知や煙などを透過して物体を検知することに利用できたり、可視光のスポットライトやヘッドライトの影響を受けないという特徴を持っています。この赤外線を検知するために、これまで特殊な半導体をセンサ材料として用いる冷却型と呼ばれる赤外線センサが使われてきました。しかしながら、冷却型ではセンサ本来の検知性能を発揮するためには、この材料をマイナス196°C以下に冷やす冷凍機が必要でした。このため、冷却型赤外線センサは冷凍機付きで大きく、冷凍機保守も含めたコストがかかるため、赤外線センサの普及の阻害要因となっていました。

一方、近年の半導体微細加工技術の進展に伴い、基板から熱的に分離したMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 構造素子が基板上に形成できるようになったことから、これを熱型センサとして応用することが考えられました。これが非冷却赤外線センサです。非冷却赤外線センサは信号読出し回路上に形成でき、冷凍機が不要なことから小型、安価な赤外線センサとして普及してきました。本稿ではその要素技術と活用例を紹介します。また、このセンサ技術をベースにすることでテラヘルツ波のセンサとしても展開できるようになりました。その新規センサ技術についても紹介します。

2. 非冷却赤外線センサのキーテクノロジー**(1) 素子構造とボロメータ材料**

NECの非冷却赤外線センサの1単位画素は、髪の毛の1/3ほどの $23.5\mu\text{m}$ の大きさです。図1にその構造を示します。この構造は、半導体のフォトリソグラフィと呼ばれる微細加工装置を用いたMEMS技術を使い、シリコン基板上に直接作り込まれています。非冷却赤外線センサは熱型であることから基板と熱分離する必要があります、梁と呼ばれる細長い2本の脚だけで支えられています。この中空構造（ダイア

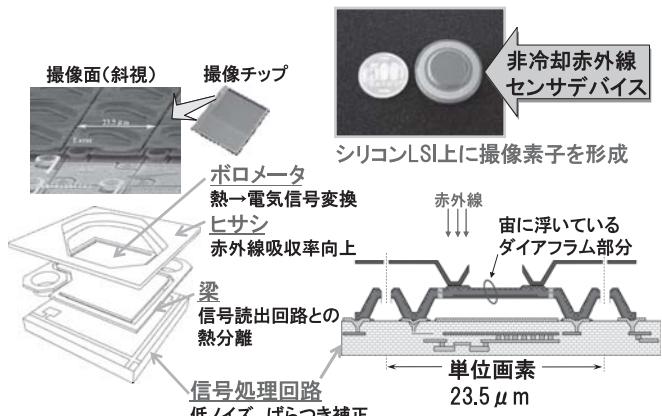


図1 非冷却赤外線センサの構造

ラム)は、絶縁膜であるシリコン窒化膜で構成されており、プロセスの最後にエッティングで除去される高さわずか1.5μm程度の犠牲層と呼ばれる土台の上に形成され、この中には熱で抵抗値の変わりやすいボロメータと呼ばれる材料(金属酸化物)が成膜・加工されています。

外から入射した赤外線(波長10μm帯)はダイアフラムのシリコン窒化膜で吸収され、ダイアフラムの温度が上昇します。温度上昇分だけボロメータの抵抗値が変化します。ここに通電することで抵抗変化分、すなわち赤外信号成分を電気信号としてチップの外へ読み出すことができます。

またNECでは、画素に入射する赤外線を効率よく吸収させるため、ヒサシと呼ばれる赤外線吸収構造¹⁾を設けています。

一方、ボロメータ材料である金属酸化物は、温度に対する抵抗値の変化(抵抗温度係数)の大きいものが選ばれます。ただし、一般的な半導体の製造工程では、抵抗温度係数の大きな材料は使われていないため、NECではこの材料の開発から始め、シリコン基板上に成膜・加工する技術を開発しました。

(2) 真空パッケージ

画素ダイアフラムの周囲に空気などのガス分子が存在すると、ダイアフラムで吸収された熱がガス分子の熱伝導により逃げ、センサの感度が低下してしまいます。この損失を抑えるため、画素ダイアフラムを基板のチップごと真空中

に閉じ込めるために真空パッケージが必要になります。真空パッケージには、赤外線をパッケージ内の画素に入射させるための窓が必要ですが、普通のガラスでは赤外線を透過しませんので、反射防止膜のついたゲルマニウム(Ge)がパッケージの撮像面の赤外窓として使われています(図2中の写真参照)。最近では、パッケージの中を真空排気するための排気管がない、チューブレスタイプの真空パッケージが主流になりつつあります。

(3) 信号処理回路

赤外線による信号は非常に微弱なため、信号処理回路のノイズと素子間のばらつきが赤外線センサでは問題になります。このため、信号処理回路では低ノイズ化を図るとともに素子間のばらつきを補正する機能を持っています。

3. 非冷却赤外線センサの活用分野

第2章で述べた要素技術を組み合わせた非冷却赤外線センサの実現により、セキュリティやサーモグラフィ用として小型、低価格な赤外線カメラが実現されてきました。

そのほかの応用事例として、図2上の写真のような航空機搭載用小型赤外線カメラ(画素数640×480)があります。このようなカメラは、例えば航空機が飛行中に衝突の危険性のある山の稜線や送電線などの障害物を早期に認知できるなど、航空機運航支援の有力なツールとなります。

また、赤外線センサも可視光センサと同様に強い光と弱い光(赤外線の場合は、高温部と低温部)を同時に表示することが困難でしたが、NECでは画像処理により、高温部と低温部を同時に鮮明に表示する技術を開発し、これを克服しました。火災現場などにおける火災のような高温部とそれ以外の低温部が同時に写るようなシーンにおいても、高い視認性を得ることができます(図2下の写真参照)。

4. 更なる市場拡大のための低価格化、小型化へ向けて

前述のように、非冷却赤外線センサの普及によってその活用分野が広がっています。NECにおいて開発してきた非冷却赤外線センサの経緯を図3に示します。これまで画素の大きさを縮小するとともに、QVGA(画素数320×240)からVGA(画素数640×480)タイプまで多画素化も進めてきました。しかし、更に市場を拡大していくためにはセンサをより

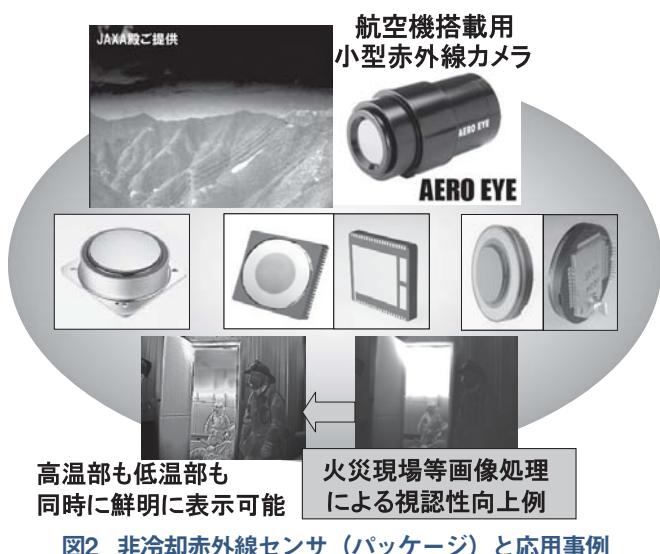


図2 非冷却赤外線センサ(パッケージ)と応用事例

入退場管理システム

パブリックセーフティを支える赤外線センサ技術

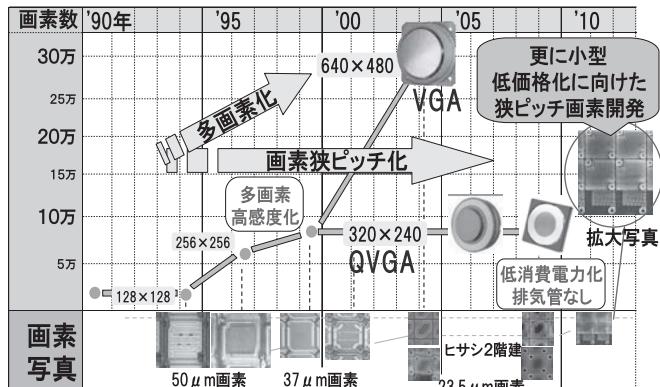


図3 NECにおける非冷却赤外線センサ開発経緯

低価格化、小型化する要求も高まっています。これに応えていくには、画素を更に小さくしていくことが考えられます。画素を小さくできれば同じ画素数ならチップが小さくなり、真空パッケージも小さくすることができるためです。また、画角が同じ場合、画素が小さいとレンズ径を小さくできるので、コスト高なGe材料が使われている赤外レンズのコスト低減を図ることができ、いっそその低価格化と小型化が進められると期待されています。

しかしながら、画素サイズを更に小さくしていくと画素面積に比例して入射光量が減少することや、更に画素サイズそのものが赤外線で扱う波長 $10\text{ }\mu\text{m}$ の回折限界（約 $12\text{ }\mu\text{m}$ ）に迫っているため、面積比以上に光量が減少していくと予想され、それを補うための新たな画素開発が必要になります。NECではこの課題を解決するため新しい構造による狭ピッチ画素開発を進めています。

5. テラヘルツ (THz) センサ

(1) テラヘルツ波とは

テラヘルツ波とは、おおむね $0.1\sim10\text{ THz}$ の周波数帯の電磁波を示し、その波長は $3\text{ mm}\sim30\text{ }\mu\text{m}$ であり、電波と光の境界に位置します。テラヘルツ波は手軽に使える撮像検出器や高輝度光源の入手が困難であり、また、地球大気の吸収が大きく影響するなど、研究開発が進んでおらず、未開拓周波数領域と呼ばれてきました。しかし、その利用価値は高く、医療、バイオ、セキュリティ、近距離大容量通信などの幅広い分野での応用が期待されています。

約 0.5 THz 以下の周波数（波長 $600\text{ }\mu\text{m}$ 以上）では衣服の透過率の高さを利用して、衣服中に隠した凶器の検出などへの有効性が示され、製品化されています²⁾。一方、 0.5 THz 以上の周波数領域では、分子量の大きな生体高分子が、分子全体にわたるゆっくりした捻じれ運動や弱い水素結合による低周波の振動モードに起因する吸収線や吸収帯を有することから、医療・創薬・生命科学などの分野に有効であると考えられています。例えば、抗原抗体反応が起きたかどうかにに関して、現在では標識分子や酵素を付加する工程を経ないと判断できませんが、テラヘルツ波を用いると非標識で判断できる可能性があります³⁾。またテラヘルツ波は非常に波長が長いため塵埃による散乱減光が可視光や赤外線より小さく、災害現場における生命体の検出などの状況把握に貢献すると考えられています。

以上のような用途を実現するには、実時間テラヘルツ波イメージング技術の開発が必須となります。

(2) テラヘルツセンサの開発

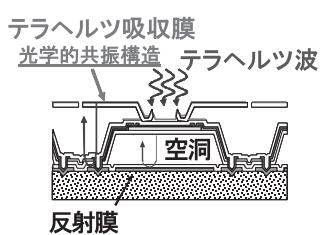
赤外線センサをテラヘルツセンサとするために、1) テラヘルツ吸収構造の開発、2) 高透過率窓材の開発を行いました（図4 参照）。

1) テラヘルツ吸収構造の開発

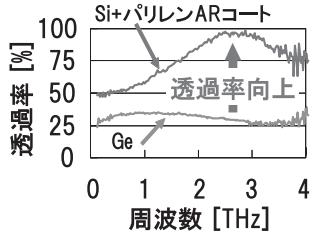
図4の左図はテラヘルツセンサの画素の断面構造で、図1と比較して分かるように赤外線センサ画素にテラヘルツ吸収膜（金属薄膜）を追加した構造となっています。テラヘルツ吸収膜のシート抵抗を適切な値とすることで、約 3 THz （波長 $100\text{ }\mu\text{m}$ ）での吸収率が約20%となり、従来の非冷却赤外線センサの吸収率 約3%⁴⁾に比べて大幅に向上させることに成功しました。

2) 高透過率窓材の開発

第2章で紹介した非冷却赤外線センサのパッケージ窓に使



1) テラヘルツ吸収構造の開発



2) 高透過率窓材の開発

図4 テラヘルツセンサ開発のポイント

われているGeは、テラヘルツ波での透過率は約30%と小さい（図4右図参照）ため、テラヘルツ波の透過性の良い窓材が必要となります。これまでの調査から高比抵抗シリコン（Si）が窓材やレンズ材料として最適であることが分かりました。しかし、Siの屈折率は3.42と大きく反射率が約30%と高いため、テラヘルツ波の透過率を高めるために反射防止膜を形成する必要があります。NECではテラヘルツ波での反射防止膜として、パリレンが適していることを見出し、3THz（波長100μm）付近で90%以上の透過率を得ることに成功しました（図4右図参照）。

（3）テラヘルツ波イメージング

以上のような1) テラヘルツ吸収構造の開発、2) 高透過率窓材の開発、を行うことで、テラヘルツ波の高感度イメージングに成功しました。図5にその撮像例を示します。図5の左図は、情報通信研究機構が開発した発振周波数が約3THz（波長約100μm）の量子カスケードレーザをテラヘルツセンサで撮像した例で、比較として従来の非冷却赤外線センサで撮像した場合のビームプロファイル（縦軸を5倍に表示）も示しています。同図より、NECが開発したテラヘルツセンサは、従来の非冷却赤外線センサに比べて、大幅にテラヘルツ波の感度が向上していることが分かります。図5の右図は、小分子-蛋白質反応をラベルフリーで検出した例で、従来方式では標識（ラベル）分子や酵素を付加する工程を経ないと判断できなかった反応が、標識分子を付

加することなく小分子-蛋白質の反応を検知できることが分かりました（サンプルは京都大学/小川准教授よりご提供いただきました）。

テラヘルツセンサでは、光学的共振構造の最適化などで更にセンサの感度を向上できる余地があり、今後も引き続きセンサの高感度化を目指すとともに、将来の応用分野での活用を実現させていきます。

6.まとめ

以上述べたように、非冷却赤外線センサはパブリックセーフティを支える重要な情報入力デバイスとして認知されてきており、今後もますます活用の場が期待されています。テラヘルツセンサにおいても、今後更に感度向上を行い、テラヘルツ計測技術の1つとして確立することで、第5章の冒頭でも述べたような用途の拡大が見込まれています。

なお、本稿の狭ピッチ化開発については、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の委託研究「非冷却赤外検出器の大フォーマット化に関する設計検討および要素試作」のもとで実施されました。また、テラヘルツセンサについては、独立行政法人情報通信研究機構（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」のもとで実施されました。

このような研究機会を与えていただいたことに対し感謝いたします。

参考文献

- 1) S.Tohyama et al., Optical Eng. vol.45(1), pp014001-1-014001-10 (2006).
- 2) ThruVision Systems
<http://www.thruvision.com/>
- 3) 小川雄一：第74回テレコム技術情報セミナー、p51、財団法人テレコム先端技術研究支援センター、2008年6月27日
- 4) N.Oda et al., Proc. SPIE, vol.6940, pp69402Y-1-69402Y-12 (2008).

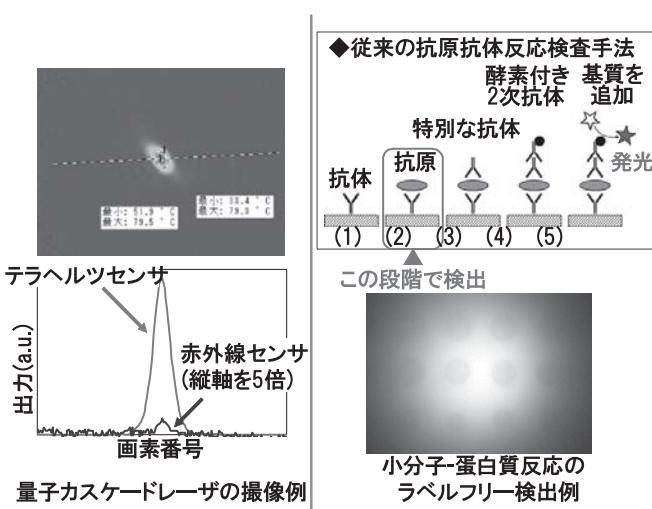


図5 テラヘルツセンサによる撮像例

執筆者プロフィール

佐々木 得人
航空宇宙・防衛事業本部
誘導光電事業部
非冷却センサグループ
グループマネージャー

倉科 晴次
航空宇宙・防衛事業本部
誘導光電事業部
光波センサ技術部
エキスパートエンジニア