

「赤外線 Q & A」

- Q 1. HgCdTe や InSb の赤外線センサはどうして液体窒素温度に冷やさなくてはならないのですか？
Q 2. 非冷却型赤外線センサはどうして熱型センサというのですか？
Q 3. 赤外線カメラのレンズは何でできているのですか？

本号は日本の赤外線センサ技術の特集ですので、赤外線センサに関連する Q&A を 3 つ取り上げました。赤外線カメラを使用しているとあまり意識しませんが、カメラによっては内部でセンサが液体窒素温度まで冷却されているものもあります。近年市販されている比較的安価なカメラでは冷却無しでかなり高感度なものがありますが、センサの原理が全く違うことが分かります。また、遠赤外線領域ではレンズにガラスが使えないため、特殊な材料をレンズとして使わざるを得ない理由も良く分かります。センサが冷却型から熱型（非冷却型）に変化し量産が可能になる状況で、レンズ材料での技術的ブレークスルーの兆しが見えつつあるところも興味深いところです。

次号の特集は「赤外線天文技術」です。天文や宇宙関連で質問、疑問がございましたら赤外線学会編集委員会 Q & A 担当（株東芝 研究開発センター 重中圭太郎 E-mail: keitaro.shigenaka@toshiba.co.jp）までお寄せください。一般的な赤外線に関する質問、疑問も常時募集しています。お気軽にメールでお問い合わせください。

（重中圭太郎； 株東芝 研究開発センター）

Q 1. HgCdTe や InSb の赤外線センサはどうして液体窒素温度に冷やさなくてはならないのですか？

A :

冷却する理由は、簡単に言うと、2つあります。1つは、これらの化合物半導体結晶を用いる場合、n型やp型の特性がきちんと現れるまで冷やさなければならないこと。2つ目は、様々なノイズ成分のうち熱励起ノイズを減らすためです。以下、詳しく説明します。

InSbやHgCdTe化合物半導体の単結晶は、赤外線を検出するためよく使われており、図のようなバンド構造を持っています。電子が詰まっている価電子帯、禁制帯および導電帯です。禁制帯のエネルギーバンドギャップ (E_g) 以上のエネルギー (hc/λ) の赤外線が結晶に入射すると、電子が導電帯に励起され、価電子帯に正孔が発生します。このような電子や正孔をフォトキャリアと呼び、バイアス電圧を印加したりして電気信号に変えて検出します。 E_g の大きさは、波長 $10\mu\text{m}$ 帯の赤外線を検出する場合 120meV ほど、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯の場合 250meV ほどです。これらの値はSiの E_g の値に比べて遥かに小さく、HgCdTeやInSbがnarrow bandgap semiconductorsと言われる所以です。

HgCdTeやInSbは電子移動度が大きいことで知られています。一方、正孔の移動度は、HgCdTeを例にとると、電子移動度に比べて2桁ほど小さい。そのため波長 $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯や波長 $10\mu\text{m}$ 帯のHgCdTe結晶は、室温ではn型の特性しか示しません。HgCdTe光伝導型赤外線センサがn型結晶を、光起電力型がp-n接合を用いることを考えると、p型やn型の特性がきちんと現れる温度まで冷却する必要があります。

センサのノイズには、フォトンノイズ、ジョンソンノイズ、熱励起ノイズ、 $1/f$ ノイズ等があります。フォトンノイズは、センサに入射する赤外線フォトンの数の統計的揺らぎで決まるもので、センサの動作温度に関係しません。このノイズを減らすには、冷却したコールドシールド又はラディエーションシールドをセンサ直前に取り付けることがポイントの一つです。

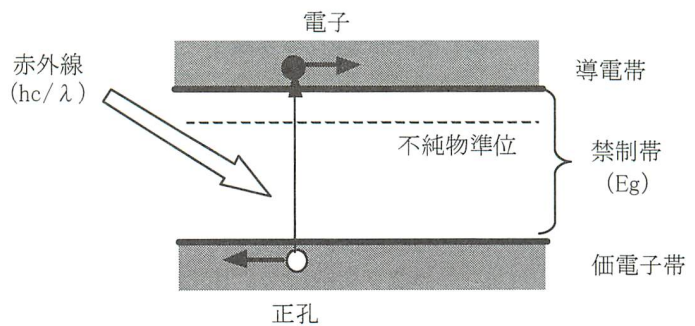
温度に関係するノイズは、ジョンソンノイズと熱励起ノイズで、前者は、抵抗と温度の積の平方根で決まります。冷却してジョンソンノイズを減らすのはそれなりに意味はありますが、本質的に熱励起ノイズを減らさないと大きな改善にはなりません。

熱励起ノイズは、温度に対応する熱エネルギーによって価電子帯から導電帯に熱的に励起されるキャリアの数の統計的揺らぎで決まり、温度に対して指数関数的に変化します。冷却すると熱励起ノイズが非常に減少します。HgCdTeやInSbのようなnarrow bandgap semiconductorsの場合、室温 300K の熱エネルギー 26meV は、前述のバンドギャップに比べ無視できないのですが、 77K に冷やすと 6.6meV となり、熱励起ノイズを殆ど無視できるようになります。

最後に不純物準位の影響について述べます。例えばn型のHgCdTe結晶の場合、ドナー不純物準位から導電帯への熱励起が考えられますが、不純物濃度は価電子帯の電子密度に比べて何桁も小さいので、殆ど考えなくて良いと思います。

以上述べたように、HgCdTeやInSbの赤外線センサを使うには、p型やn型の結晶特性をきちんと出すため及び主に熱励起ノイズを減らすために冷却しています。

(回答者：小田直樹；NEC 誘導光電事業部)



Q2. 非冷却型赤外線センサはどうして熱型センサというのですか？

A :

赤外線センサは、赤外線の検出方法の違いから、図1のように分類することができます。

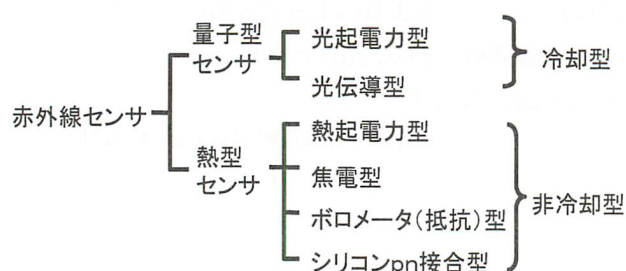


図1 赤外線センサの分類

量子型センサは、入射赤外線の光子によってセンサ素子が直接励起され、この励起で生じた電子により、センサ素子の抵抗や電圧が変化したところを信号として読み出すものです。この為、励起で生じた電子の熱揺らぎによるノイズを抑える為に、液体窒素温度レベル(約-200℃)にセンサ素子を冷却する必要がありますので、冷却型とも呼ばれています。詳細に関しては、本号Q1の回答で解説してありますのでご覧ください。

これに対し、熱型センサは、図2のように、赤外線吸収膜と熱電変換素子の2層構造からなるセンサ素子が、読み出し配線を介して中空に浮いている構造をとっています。

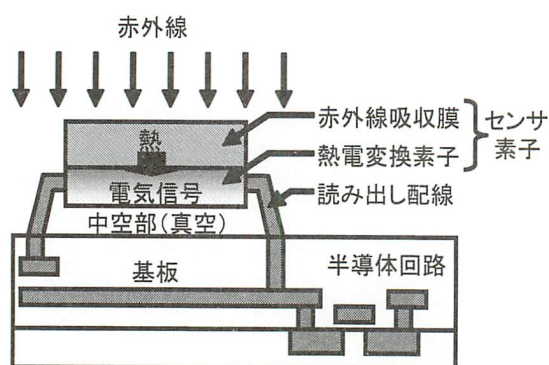


図2 熱型センサの構造例

まず、センサ素子に入射した赤外線は、赤外線吸収膜により一旦熱に変換されます。次に、この熱によるセンサ素子の温度上昇を、熱電変換素子が電気的信号に変換し、読み出します。この時、赤外線センサとしての感度を上げる為には、入射赤外線により生じた熱を、効率良くセンサ素子の温度上昇に繋げる事が重要となります。そこで、近年進展著しいマイクロマシン技術を応用することにより、センサ素子を読み出し配線を介して中空に浮かせ、基板との熱分離を行った上で、さらに中空部を真空とすること

とで、中空部での空気による熱伝導も抑えています。同時に、読み出し配線部での熱伝導を抑える為に、熱伝導率の低い電極材料の使用と共に、配線断面積の縮小と配線長の伸長も欠かせません。

このように、熱型センサは、入射赤外線を一旦熱に変換してから電気信号として読み出しますので、励起電子を赤外線の検出手段として用いている量子型センサとは異なり、液体窒素温度レベルでの冷却の必要がない為、非冷却型とも呼ばれるのです。

熱型センサは、用いられる熱電変換の方法の違いにより、大きく4種類に分類することができます。熱起電力型は、温点(センサ素子)と冷点(基板)との間を導電体で繋げた時に生じる電位差を信号として読み取ります。実際には、熱起電力の極性の異なるn⁺ポリシリコンとp⁺ポリシリコンを交互に配列したサーモパイルを利用したものが有名です。焦電型は、熱電変換膜としてバリウムチタン酸ストロンチウム等の強誘電体を利用し、この分極特性の温度変化を、容量変化として読み取ります。ボロメータ型は、熱電変換膜の抵抗値の温度変化を、定電流印加時の電圧変化として読み取ります。熱電変換膜としては、酸化バナジウム等の抵抗温度係数の高い材料が用いられます。シリコンpn接合型は、pn接合ダイオードの順方向特性の温度変化を、定電流印加時の電圧変化として読み取ります。メモリ、CPU等で用いられるシリコンLSIプロセスと互換性があり、低コストで歩留まり良く作成できる点がメリットです。

また、熱型センサでは、赤外線吸収膜の吸収波長特性により使用波長帯域を選択できます。例えば波長10μm帯ではシリコン酸化膜、黒金(綿状の金)等が用いられます。

従来熱型センサは、赤外線感度や応答速度の点で量子型に劣っていました。しかし、近年のマイクロマシン技術の進展に伴い、センサ素子の微細化、断熱中空構造の改善や歩留まりの向上が進み、熱型センサでも、量子型センサと同等の、数十mKの温度差が判別できる感度レベルにまで達しています。熱型センサは、液体窒素温度へ冷却する装置を必要としない為に、小型・軽量・低コスト化が容易であり、民生用としての応用が大変期待されています。

(回答者：藤原 郁夫；(株)東芝 研究開発センター)

Q 3. 赤外線カメラのレンズは何でできているのですか？

A :

周知の通り、レンズは光の屈折作用を利用して、光束を収束もしくは発散させる光学素子です。レンズは我々の生活の周りにたくさんあります。今回の質問にあるカメラレンズは、1枚または複数枚のレンズを組み合わせ、被写体の像をフィルムや検出器面上に形成します。CDやDVDのピックアップ用のレンズは、レーザ光を1点に集光する働きがあります。いまや講演会に欠かせないプロジェクタには投射レンズが備わっています。灯台などの投光器もレンズの1つで、遠くまで光が届くように光源からの光を平行にします。眼鏡は視覚系を補正するレンズと言えます。

レンズ材料には何が求められるのでしょうか。第一に透明であること、すなわち吸収が無いことが必須です。他に、レンズに足るだけの大きさであること、自立できる硬度であること、加工性に優れていること、耐湿性などの耐久性があることなどが考えられます。

可視光領域では、ガラスとプラスチックがこれらの条件を满足します。加えて安価に製造する技術が爆発的な普及に貢献し、デジタルカメラや携帯電話用カメラなどはすでに我々のデジタル生活に欠かせないものとなっています。

ガラスを透過できる光の波長はだいたい $3\mu\text{m}$ 位までなので、近赤外領域まではレンズにガラスを利用できます。最近では防犯を主目的として、昼間は通常のカラーカメラとして使用するのですが、夜間は近赤外LED照明と組み合わせて近赤外カメラとして使用するカメラが市場に出ています。波長は $1\mu\text{m}$ 以下なので、ここで使われているレンズはガラス製です。ただし、カラーカメラに比べて波長帯域が広いので、特別な色収差補正がレンズ設計に必要です。また、光通信で利用する波長をカバーする近赤外カメラとしてInGaAsを使ったカメラが市販されています。波長帯は $0.9\text{--}1.7\mu\text{m}$ なので、このレンズもガラスで作ることができます。

では、もっと長い波長ではどうでしょうか。波長 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 、または波長 $8\text{--}12\mu\text{m}$ の赤外線カメラの画像は、被写体の温度情報を映し出しているために熱画像と呼ばれます。残念ながら、これらの波長帯ではガラスの恩恵を受けることはできません。透明な材料にはどのようなものがあるのでしょうか。参考文献¹⁾に約30種類がリストアップされています。その中でレンズとして使用されている材料は少なく、主としてゲルマニウム(Ge、屈折率4.0)とシリコン(Si、同3.4)が用いられます。他に、セレン化亜鉛(ZnSe、同2.4)や硫化亜鉛(ZnS、同2.2)が用いられます。ZnSeとZnSは可視光線を透し

ますが、GeとSiは全く透しません。このうちGeは波長 $8\text{--}12\mu\text{m}$ で分散(屈折率の波長依存性)がほとんどないので、Geだけの単一材料でレンズを構成することができます。通常は分散を無視できないので、分散特性の異なる異種材料と組み合わせて色収差補正が成立するようにレンズ設計がなされます。近年注目を浴びている非冷却赤外線カメラの波長は $8\text{--}12\mu\text{m}$ に相当しますので、レンズ材料にGeを用いることが多いようです。

赤外線カメラ用のレンズは、ガラス(屈折率1.4-2.0)に比べて屈折率が大きいことが特徴です。レンズの屈折力は、レンズ材料と空気との屈折率差に比例しますので、同じ形状であれば屈折率が大きいほど光の曲がりが大きくなります。また、屈折率が大きいほどフレネル反射率が大きくなります。Geの場合1面あたりの反射率が約36%(垂直入射)となり、屈折率1.5のガラスの反射率4%と比べるとおよそ1桁違いです。したがって、赤外線カメラ用のレンズには反射防止膜が必須となります。目で見るとレンズは様々な色を呈しますが、その色はレンズ材料そのものの色ではなく、反射防止膜の色であると考えられます。

最近の話題では、欧州でカルコゲナイドガラスを使ったレンズが開発されています。モールド加工が可能なのが特徴で、低コストをうたっています。非球面や回折面をもつレンズを、型を使って製造することができます。

また、自動ドアやエアコンの人検出センサにポリエチレンを使ったレンズが用いられていますが、ポリエチレンは吸収があるために、カメラレンズにはあまり用いられないようです。

参考文献

- 1) 赤外線技術研究会編、赤外線工学-基礎と応用-, (1991), pp.99-101, オーム社

(回答者：玉川 恭久；三菱電機株式会社)