

# 化合物光半導体 受光素子



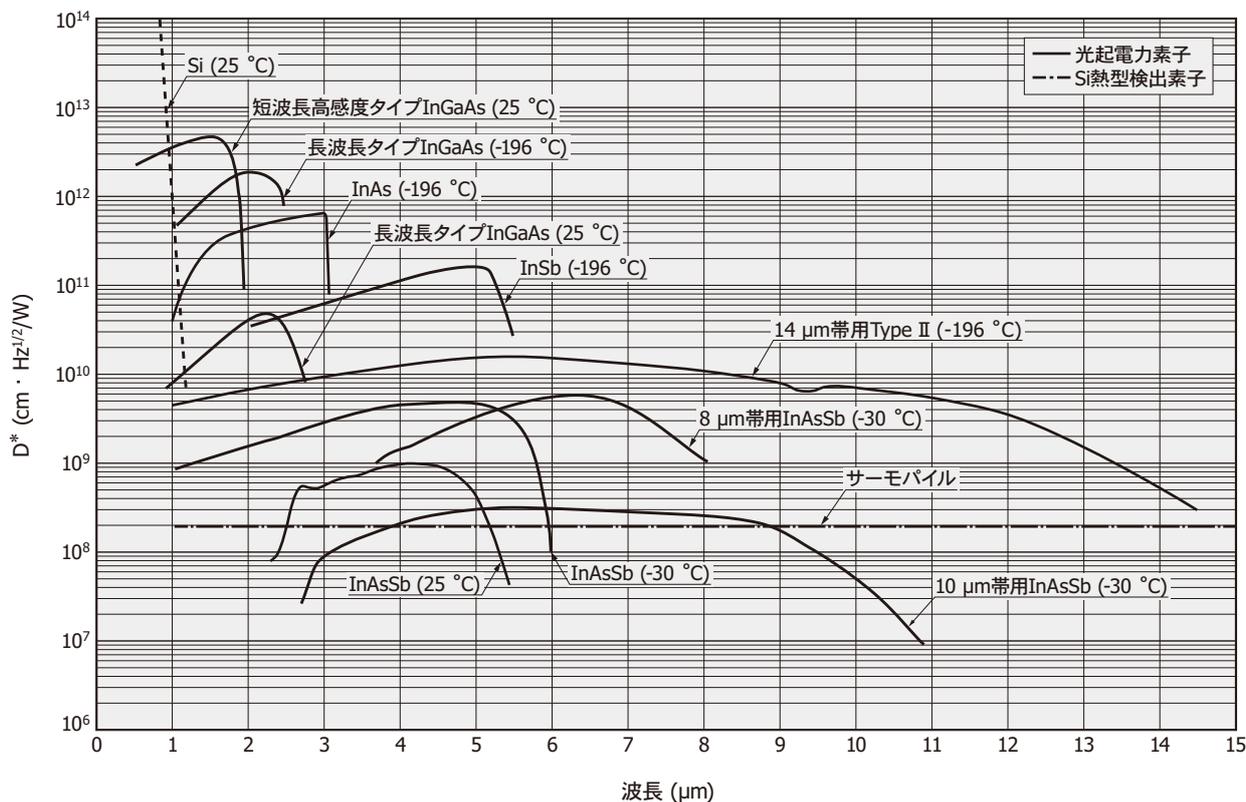
## 目次

<b>1.</b> InGaAs PINフォトダイオード p.03	<b>5.</b> 複合素子 p.16
<b>2.</b> InGaAs APD p.08	<b>6.</b> 新たな取り組み p.17
<b>3.</b> InAs/InAsSb/InSb光起電力素子 p.13	<b>7.</b> オプション p.18
<b>4.</b> Type II 超格子赤外線検出素子 p.15	<b>8.</b> 応用例 p.19

化合物光半導体 受光素子は、主にII~VI族の複数の元素によって構成された光半導体素子です。構成する元素によって異なった感度波長範囲をもち、紫外~赤外域でさまざまな波長域に感度のある受光素子を作製することができます。

当社は、長年培った化合物光半導体の製造技術を駆使し、さまざまな波長域の検出素子を取りそろえています。特に赤外線領域において幅広いラインアップの検出素子を用意しています。当社の化合物光半導体 受光素子の応用分野は、学術研究から情報通信機器、民生機器までの広い範囲に及んでいます。

### ⇨ 化合物光半導体 受光素子の分光感度特性 (代表例)



KIRD802593S

◆ 浜松ホトニクス の 化合物半導体 受光素子

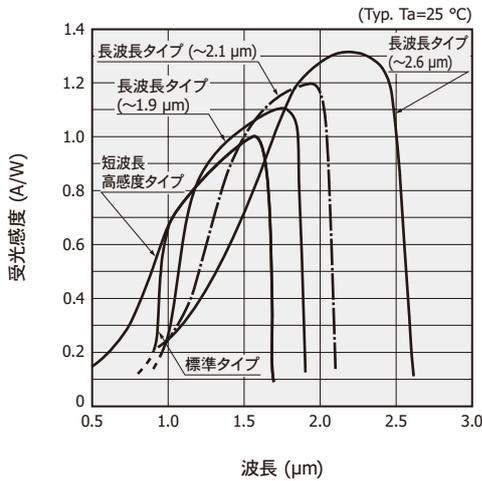
製品名	感度波長範囲 (μm)				特長
	0	1	2	3	
InGaAs PINフォトダイオード	0.5 — 1.7				<ul style="list-style-type: none"> <li>● 短波長高感度タイプ</li> <li>● 0.5 μmから検出が可能</li> </ul>
	0.9 — 1.7				<ul style="list-style-type: none"> <li>● 標準タイプ</li> <li>● 高速応答、高感度、低暗電流</li> <li>● 各種受光面サイズ、アレイ、パッケージを用意</li> </ul>
	0.9 — 1.9				<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1.7 μm付近の光計測用</li> <li>● 電子冷却型も用意</li> </ul>
	0.9 — 2.1				<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水分吸収波長帯 (1.9 μm)の光計測用</li> <li>● 電子冷却型も用意</li> </ul>
InGaAs APD	0.9 — 2.6				<ul style="list-style-type: none"> <li>● NIR分光器用</li> <li>● 電子冷却型も用意</li> </ul>
	0.95 — 1.7				<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高感度、高速応答、低容量、低暗電流</li> <li>● 各種受光面サイズを用意</li> </ul>

製品名	感度波長範囲 (μm)						特長
	0	5	10	15	20	25	
InAs光起電力素子	1 — 3.8						● 感度波長範囲はPbSに相当。PbSより高速応答を実現
InSb光起電力素子	1 — 5.5						● 大気の窓の範囲 (3~5 μm)で高感度を実現した高速センサ
InAsSb光起電力素子	1 — 11						<ul style="list-style-type: none"> <li>● カットオフ波長が5 μm帯・8 μm帯・10 μm帯の赤外線検出素子</li> <li>● 高速応答、高信頼性</li> </ul>
Type II 超格子赤外線検出素子	1 — 14.5						● InAsとGaSbの超格子構造により、14.5 μm付近まで検出が可能
複合素子	0.32 — 2.55						<ul style="list-style-type: none"> <li>● 広い感度波長範囲</li> <li>● 感度波長範囲の異なる2つの受光素子を同一光軸で上下に配置</li> </ul>
	0.32 — 5.3						
	0.9 — 2.55						

# 1. InGaAs PINフォトダイオード

InGaAs PINフォトダイオードは、Siフォトダイオードと同じくPN接合をもった光起電力素子です。

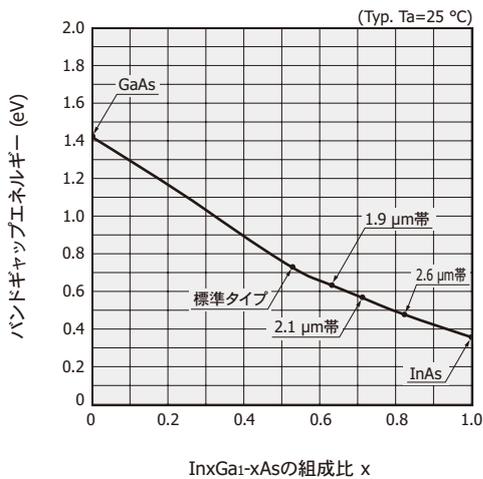
[図1-1] 分光感度特性



KIRDB0332JF

InGaAsは、Siに比べてバンドギャップエネルギーが小さいため、Siより長い波長領域に感度をもっています。InGaAsは、InとGaの組成比によってバンドギャップエネルギーの値が変わるため [図1-2]、組成比を変えることによって、さまざまな感度波長範囲の赤外線検出素子を作ることができます。当社は、カットオフ波長が1.7 μmの標準タイプ・短波長高感度タイプと、1.9 μm・2.1 μm・2.6 μmなどの長波長タイプを用意しています。

[図1-2] バンドギャップエネルギー - In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Asの組成比 x



KIRDB0130JB

## 1-1 特性

### 電流-電圧特性

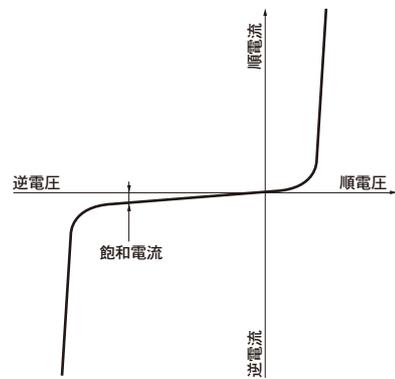
InGaAs PINフォトダイオードに暗中で電圧を印加すると、図1-3 (a)のような電流-電圧特性が得られます。フォトダイオードへ光を入射させると、この曲線は図1-3 (b)の②のようになります。さらに光を強くすると③のようになります。ここでフォトダイオードの両端を開放しておくとし、順方向に開放端電圧  $V_{oc}$  が現れ、両端を短絡しておくとし、逆方向に短絡電流  $I_{sc}$  が流れます。

光電流によって光量を測定する方法を図1-4に示します。図1-4 (a)は、負荷抵抗を接続し  $I_o \times R_L$  の電圧をゲイン  $G$  の増幅器で増幅する方法です。この回路では、直線性の範囲は限定されます [この様子を図1-3 (c)に示します]。

図1-4 (b)は、オペアンプを接続した回路を示します。オペアンプのオープンループゲインを  $A$  とすると、負帰還回路の特徴により等価入力抵抗は  $\frac{R_f}{A}$  となり図1-4 (a)の回路の入力抵抗よりも数桁小さくなるため、理想的な短絡電流 ( $I_{sc}$ ) の測定が可能になります。広範囲の短絡電流を測定する場合は、 $R_f$  を必要に応じて切り替えます。

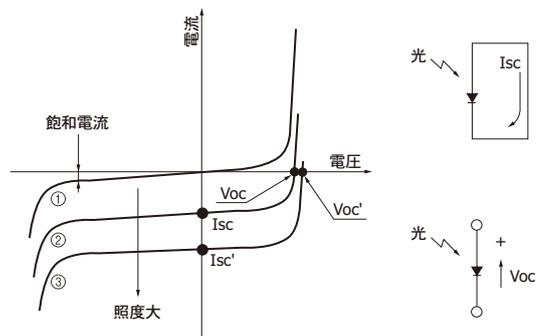
[図1-3] 電流-電圧特性

#### (a) 暗中



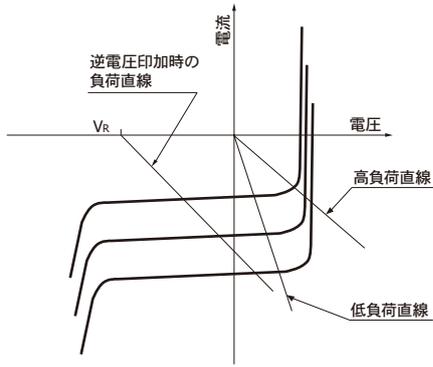
KIRDC0030JA

#### (b) 光照射時



KPDC0005JA

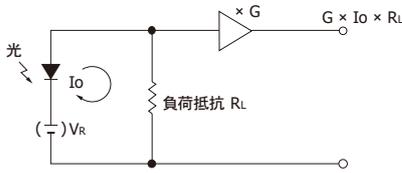
(c) 電流-電圧特性と負荷直線



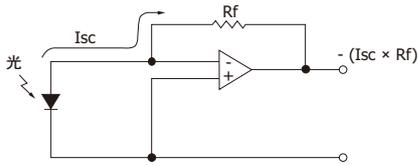
KPDB0003JB

[図1-4] 接続例

(a) 負荷抵抗を接続した場合



(b) オペアンプを接続した場合



KPDC0006JD

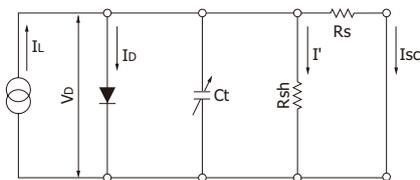
» 等価回路

InGaAs PINフォトダイオードの等価回路を図1-5に示します。短絡電流 (Isc)は、式 (1-1)で表されます。短絡電流の直線性の限界は、この式の第2項、第3項によって決定されます。

$$I_{sc} = I_L - I_s \left[ \exp \frac{q (I_{sc} \times R_s)}{k T} - 1 \right] - \frac{I_{sc} \times R_s}{R_{sh}} \dots\dots (1-1)$$

- IL : 入射光による発生電流 (光量に比例)
- Is : フォトダイオードの逆方向飽和電流
- q : 1電子当たりの電荷量
- Rs : 直列抵抗
- k : ボルツマン定数
- T : 素子の絶対温度
- Rsh: 並列抵抗

[図1-5] 等価回路



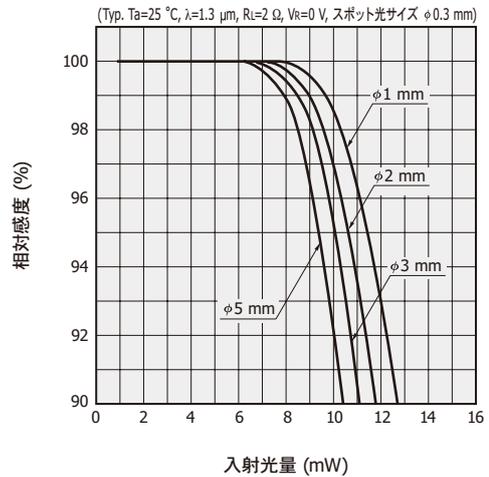
- Vo: ダイオード両端の電圧
- Io: ダイオード電流
- Ct: 端子間容量
- I': 並列抵抗電流
- Vo: 出力電圧
- Io: 出力電流

KPDC0004JB

» 直線性

InGaAs PINフォトダイオードの直線性は、下限はノイズで決まり、上限はチップの材料構造や組成、受光部の面積、電極構造、入射スポット光サイズなどで決まります。上限を延ばすために逆電圧を印加することもあります。直線性だけを考えれば1 V程度を印加すれば十分です。図1-7は逆電圧を印加する場合の接続例です。逆電圧を印加することは、直線性あるいは応答特性の改善に役立ちますが、一方で暗電流を増加させノイズレベルを引き上げることとなります。また、過大な逆電圧はフォトダイオードの破損または劣化の原因になるため、絶対最大定格内で使用し、必ずカソードがアノードに対して正電位になるように極性を設定してください。

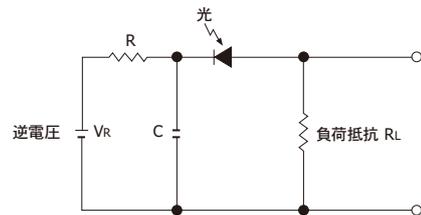
[図1-6] 直線性



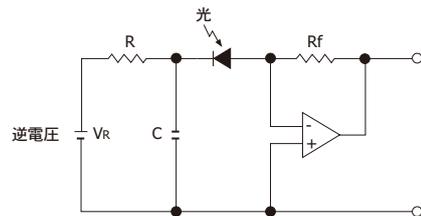
KIRD80333JB

[図1-7] 接続例 (逆電圧を印加)

(a) 負荷抵抗を接続した場合



(b) オペアンプを接続した場合



KPDC0008JB

## ノイズ特性

InGaAs PINフォトダイオードの微弱光に対する検出限界は、一般の受光素子と同様にそのノイズ特性で決まります。フォトダイオードのノイズ電流  $i_n$  は、並列抵抗  $R_{sh}$  で近似できる抵抗体の熱雑音電流（またはジョンソンノイズ電流） $i_j$ 、暗電流に起因するショットノイズ電流  $i_{sD}$ 、光電流に起因するショットノイズ電流  $i_{sL}$  の和で表すことができます [式 (1-2)]。

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_{sD}^2 + i_{sL}^2} \text{ [A]} \quad \dots\dots (1-2)$$

図1-4のように逆電圧を印加しない場合、 $i_j$  は式 (1-3) のようになります。

$$i_j = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{sh}}} \text{ [A]} \quad \dots\dots (1-3)$$

k: ボルツマン定数  
T: 素子の絶対温度  
B: 雑音帯域幅

図1-7のように逆電圧を印加する場合は、必ず暗電流が存在し、 $i_{sD}$  は式 (1-4) のようになります。

$$i_{sD} = \sqrt{2q I_D B} \text{ [A]} \quad \dots\dots (1-4)$$

q: 1電子当たりの電荷量  
 $I_D$ : 暗電流

入射光のため光電流 ( $I_L$ ) が存在し、 $I_L \gg 0.026/R_{sh}$  または  $I_L \gg I_D$  の場合、ノイズ電流は光電流に起因するショットノイズ電流が支配的となり、式 (1-5) で表されます。

$$i_n \approx i_{sL} = \sqrt{2q I_L B} \text{ [A]} \quad \dots\dots (1-5)$$

これらのノイズの大きさは、測定帯域幅 (B) の平方根に比例するため、単位はBで正規化した  $A/Hz^{1/2}$  で示します。

一般にフォトダイオードの最小光検出限界は、式 (1-3) または式 (1-4) のノイズ電流と等しい電流を発生させる入射光量、すなわち雑音等価電力 (NEP) で表します。

$$NEP = \frac{i_n}{S} \text{ [W/Hz}^{1/2}] \quad \dots\dots (1-6)$$

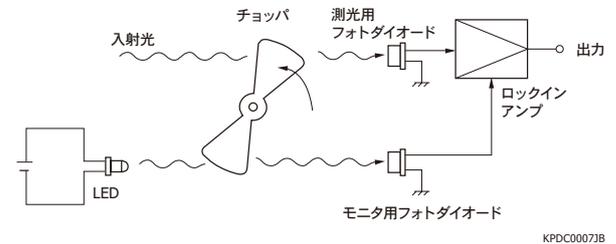
$i_n$ : ノイズ電流  
S: 受光感度

図1-7 (b) の回路構成の場合、前述したフォトダイオードのノイズに加え、オペアンプおよび  $R_f$  のノイズなどを考慮する必要があります。さらに高周波数領域では、端子間容量 ( $C_t$ )、フィードバック容量 ( $C_f$ ) などの容量成分を含めた伝達関数を考慮する必要もあります。さらにアンプの温度ドリフトや低周波数領域のフリッカノイズ、後述するゲインピーキングなどの影響があるため、光検出限界は式 (1-6) のNEPより大きくなります。

InGaAs PINフォトダイオードの場合、光検出限界を改

善するためには冷却型を使用する方法があります。また入射光を何らかの方法で周期的にオン・オフし、その周波数の信号だけを同期検出すれば、不要な帯域のノイズを除去できるため、検出限界をさらにNEPへ近づけることができます [図1-8]。

【図1-8】同期検出法



## 分光感度特性

InGaAs PINフォトダイオードは、感度波長範囲により以下の3種類に大別されます。

- ① 標準タイプ: 波長 0.9~1.7  $\mu\text{m}$  に感度をもつタイプ
- ② 短波長高感度タイプ: 標準タイプの短波長側の感度を上げたタイプ
- ③ 長波長タイプ: 標準タイプよりも長波長に感度波長範囲を伸ばしたタイプ

フォトダイオードの長波長側のカットオフ波長 ( $\lambda_c$ ) は、そのバンドギャップエネルギー ( $E_g$ ) により式 (1-7) で表されます。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \text{ [\mu m]} \quad \dots\dots (1-7)$$

$E_g$ : バンドギャップエネルギー [eV]

標準タイプと短波長高感度タイプのInGaAs光吸収層のバンドギャップエネルギーは0.73 eVです。長波長タイプは、InGaAs光吸収層の組成比を変えることによってバンドギャップエネルギーを小さくしカットオフ波長を長波長側へ伸ばしています。

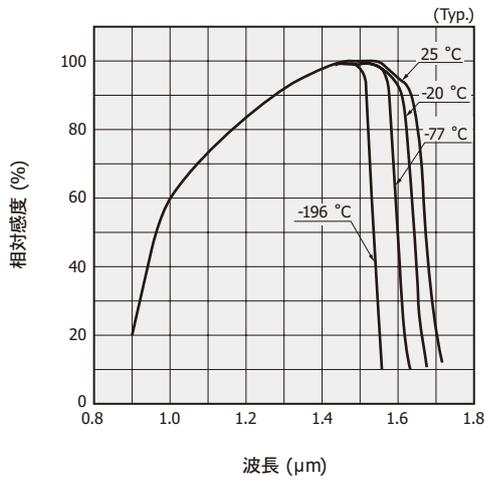
InGaAs PINフォトダイオードは、ノイズの原因となる表面リーク電流を抑制するために、InGaAs光吸収層の上にキャップ層と呼ばれる半導体の層を設けています。キャップ層を構成する半導体のカットオフ波長よりも波長の短い光は、そのほとんどがこのキャップ層で吸収され光吸収層に到達しないため感度に寄与しません。短波長高感度タイプでは、ウエハ構造やプロセス工程の改良により、キャップ層を標準タイプの1/10以下の厚さに薄くし、キャップ層で吸収される光を減少させ、光吸収層に達する光を増大させることで、短波長の感度を向上させています。

InGaAs PINフォトダイオードの感度波長範囲はチップ温度を下げることによりバンドギャップエネルギーが大きくなり短波長側にシフトしますが、ノイズ量が減少するため

$D^*$ は大きくなります [図1-10]。InGaAs PINフォトダイオードに使用している窓材の透過率を図1-11に示します。

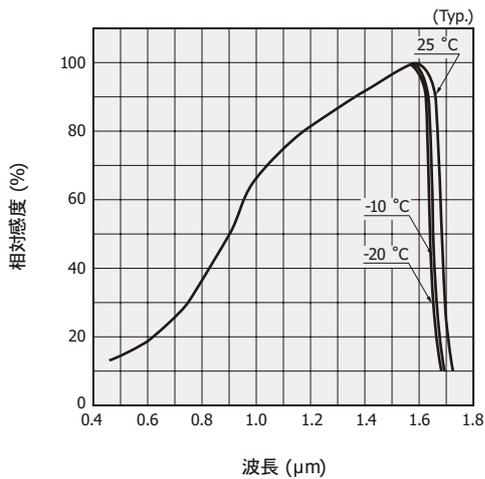
[図1-9] 分光感度特性

(a) 標準タイプ



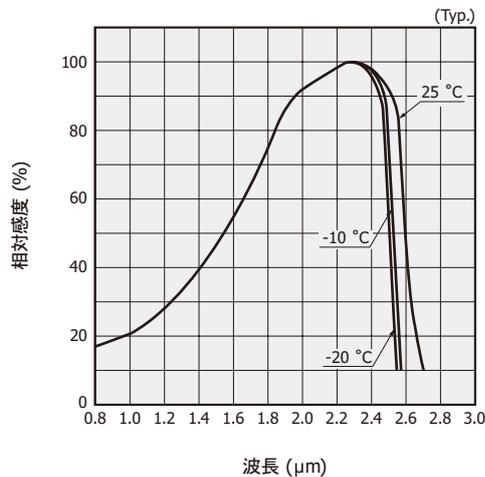
KIRD80132JA

(b) 短波長高感度タイプ



KIRD80395JA

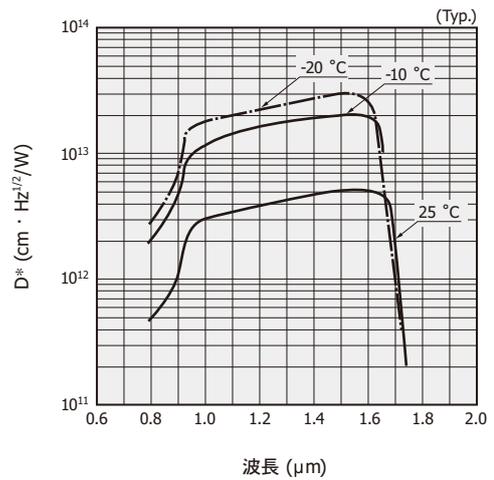
(c) 長波長タイプ (~2.6 μm)



KIRD80133JC

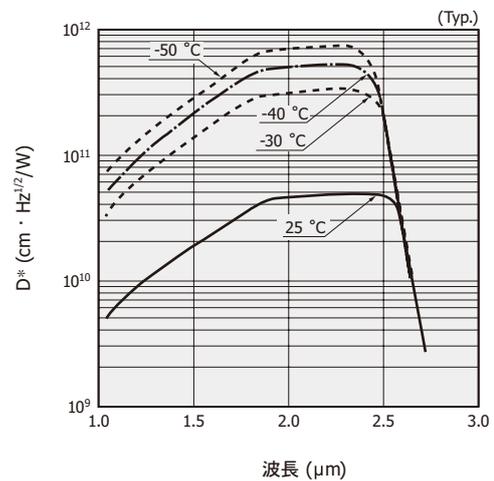
[図1-10]  $D^*$ -波長

(a) 標準タイプ



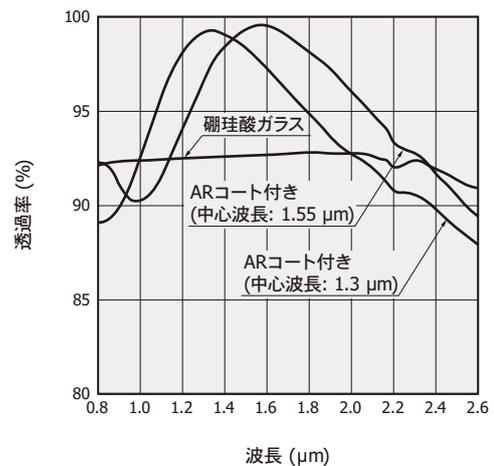
KIRD80134JA

(b) 長波長タイプ (~2.6 μm)



KIRD80135JA

[図1-11] 窓材の分光透過率 (代表例)



KIRD80550JA

» 応答速度

応答速度とは、生成したキャリアをどれだけ速く外部回路へ電流として取り出せるかを示す値で、通常、上昇時間または遮断周波数で表します。

上昇時間 (tr)は、出力信号がピーク値の10%から90%に立ち上がる時間で、式 (1-8)で表されます。

$$tr = 2.2Ct (RL + Rs) \dots\dots (1-8)$$

Ct: 端子間容量  
RL: 負荷抵抗  
Rs: 直列抵抗

通常は $RL \gg Rs$ のため、Rsは無視して差し支えありません。上昇時間を小さくするためにはCtとRLを小さくする必要がありますが、RLは外的要因で決められ自由に変更することができません。Ctは、受光面積 (A)に比例し逆電圧 (VR)の平方根に反比例します。

$$Ct \propto \frac{A}{\sqrt{VR}} \dots\dots (1-9)$$

受光面積が小さい素子に逆電圧を印加することによって、速い応答速度が得られます。

PN接合部以外で吸収された光によって生成した電荷が拡散によって電極に達するまで、数 $\mu$ s以上かかる場合があります。Ct  $\times$  RL時定数が小さい場合は、この拡散時間によって応答速度が決定されます。高速応答を必要とする場合には、受光部外に光を照射しないように注意してください。

上昇時間 tr (単位: s)と遮断周波数 fc (単位: Hz)との間には、おおよそ式 (1-10)の関係があります。

$$tr = \frac{0.35}{fc} \dots\dots (1-10)$$

応答速度の詳細については、「[Siフォトダイオード]技術資料/2-6 応答速度」を参照してください。

[図1-12] 端子間容量-逆電圧 (標準タイプ)

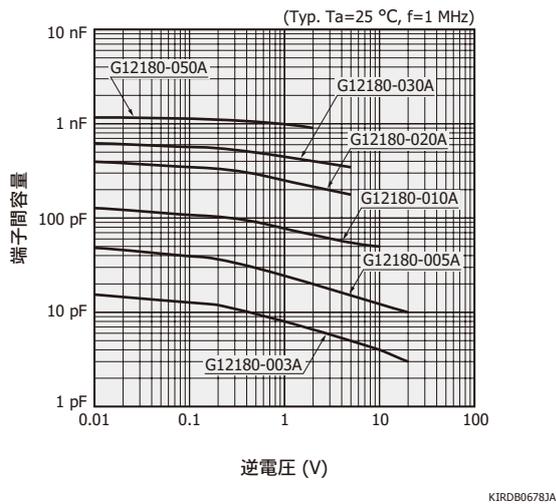
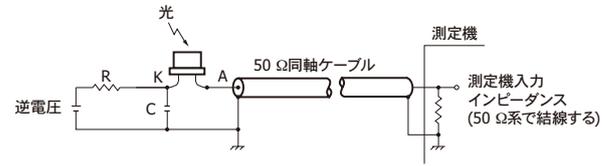


図1-13に InGaAs PINフォトダイオードを用いた高速光検出回路を示します。これは図1-7 (a)の具体的な接続例で、負荷抵抗は50  $\Omega$ になっています。直列抵抗 Rとセラミックコンデンサ Cによって逆電圧電源のノイズを低くするとともにフォトダイオードからみた電源インピーダンスを小さくしてい

ます。抵抗 Rはフォトダイオードの保護用としても働いており、最大光電流による電圧降下が逆電圧より十分小さい範囲になる抵抗を選択します。なお、フォトダイオードとコンデンサのリード、同軸ケーブルの芯線など高速パルスが通る経路は、極力短く配線してください。

[図1-13] 高速光検出回路



## 温度特性

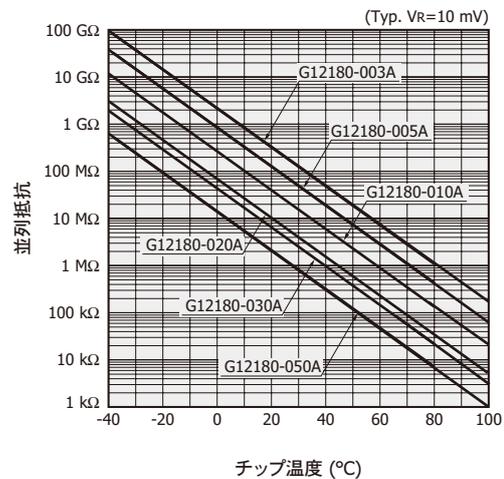
チップ温度が変わることによって分光感度特性や暗電流は変化します。InGaAs PINフォトダイオードの並列抵抗の温度特性を図1-14に示します。温度を下げることによって暗電流が減少し、並列抵抗が大きくなるためS/Nはよくなります。

暗電流は、温度が上昇すると指数関数的に上昇します。温度 xの暗電流  $I_{Dx}$ と温度 yの暗電流  $I_{Dy}$ の関係は式 (1-11)で表されます。暗電流の温度係数 aは検出素子のバンドギャップエネルギーによって異なります。また、検出素子に印加する逆電圧によって変化します。

$$I_{Dx} = I_{Dy} \times a^{x-y} \dots\dots (1-11)$$

当社は、動作温度を一定に (または冷却)して使用できる1段/2段電子冷却型InGaAs PINフォトダイオードを用意しています。

[図1-14] 並列抵抗-チップ温度 (標準タイプ)

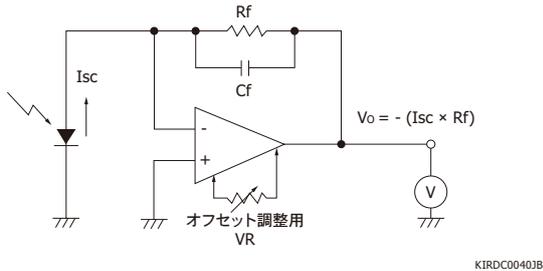


## 1-2 使い方

### ▶ オペアンプとの接続

図1-15にオペアンプとの接続例を示します。図1-15のオペアンプ回路の入力インピーダンスは、帰還抵抗  $R_f$  をオープンループゲインで割った値であるため非常に小さくなります。そのため優れた直線性が得られます。

【図1-15】接続例



以下にオペアンプを使用する場合の注意事項を述べます。

#### (1) 帰還抵抗の選択

図1-15では、短絡電流  $I_{sc}$  は  $I_{sc} \times R_f$  の出力電圧  $V_o$  に変換されます。 $R_f$  がフォトダイオードの並列抵抗  $R_{sh}$  より大きくなると、オペアンプの入力雑音電圧と入力オフセット電圧が  $(1 + R_f/R_{sh})$  倍されて出力電圧に重畳してきます。また、オペアンプのバイアス電流誤差も大きくなるため、 $R_f$  を無制限に大きくすることはできません。

帰還容量  $C_f$  は主に発振防止用で、数pFあれば十分です。この帰還回路は  $C_f \times R_f$  の時定数を持ちノイズフィルタの働きをしますが、同時に応答速度を制限するため用途に合わせて帰還抵抗の値を選ぶ必要があります。オフセット電圧による誤差は、オペアンプのオフセット調整端子に可変抵抗を接続することにより通常 1 mV 以下にすることができます。なお応用回路例については、「光半導体素子ハンドブック/2章 Siフォトダイオード/1. Siフォトダイオード/1-10 応用回路例」を参照してください。

#### (2) オペアンプの選択

実際のオペアンプの入力抵抗は無限大ではなく、入力端子にはいくらかのバイアス電流が流入または流出します。このため、検出電流の大きさによっては出力電圧値に誤差が生じます。

バイアス電流は、FET入力型オペアンプでは0.1 pA以下のものもありますが、バイポーラ型オペアンプは数百pA～数百nA程度です。

FET入力型オペアンプのバイアス電流は、一般に10°Cの温度上昇で2倍になりますが、バイポーラ型オペアンプでは減少します。このため高温仕様の回路を設計する場合、バイポーラ型オペアンプの使用も考慮する必要があります。バイアス電流による誤差電圧は、オフセット電圧と同様にオペアンプのオフセット調整端子に可変抵抗器を接続して微調整することができます。

## 2. InGaAs APD

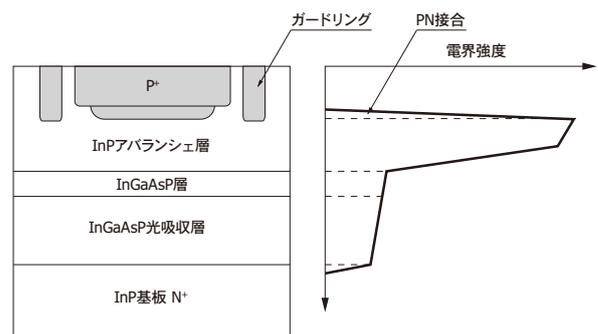
InGaAs APD (Avalanche Photodiode)は内部増倍機能をもつ赤外線検出素子です。適切な逆電圧を印加することにより光電流が増倍され、高感度・高速応答を実現します。

InGaAs APDは1  $\mu\text{m}$ 帯の光に対して感度をもっており、この波長帯では光ファイバの損失が低いことから光ファイバ通信で広く利用されます。また1  $\mu\text{m}$ 帯の光は目に対する安全性が高い (アイセーフ) ため、空間光伝送や光学式距離測定でも利用が進んでいます。

### 2-1 動作原理

PN接合に逆電圧を印加すると、空乏層内部で発生した電子-正孔対のうち、電界によって電子はN<sup>+</sup>側に、正孔はP<sup>+</sup>側にそれぞれドリフトします。このときのキャリアの走行速度は電界に依存しますが、電界が高くなると結晶格子との散乱頻度が増すため、平均的にある一定の速度に飽和するようになります。さらに逆電圧を上げると、衝突を免れた一部のキャリアは、非常に大きなエネルギーをもつようになります。そして、このキャリアが格子と衝突すると新たな電子-正孔対を発生させる現象 (イオン化) が起こります。さらにこの電子-正孔対が、新たに電子-正孔対を発生させるという連鎖反応が発生します。これが、アバランシェ増倍といわれる現象です。このアバランシェ増倍を利用した内部増倍機能をもったフォトダイオードがAPDです。

【図2-1】構造と電界プロファイル



InGaAsはバンドギャップエネルギーが小さいため、大きな逆電圧を印加すると、暗電流が大きくなってしまいます。そこでInGaAs APDでは、光を吸収して電子-正孔対を発生するInGaAs光吸収層と、光によって発生したキャリアをアバランシェ増倍するInPアバランシェ層を分離した構造を採用しています。このように光吸収層とアバランシェ層を分けた構造のAPDをSAM (Separated Absorption and Multiplication) 型と呼びます。当社のInGaAs APDではSAM型を採用しています。

## 2-2 特性

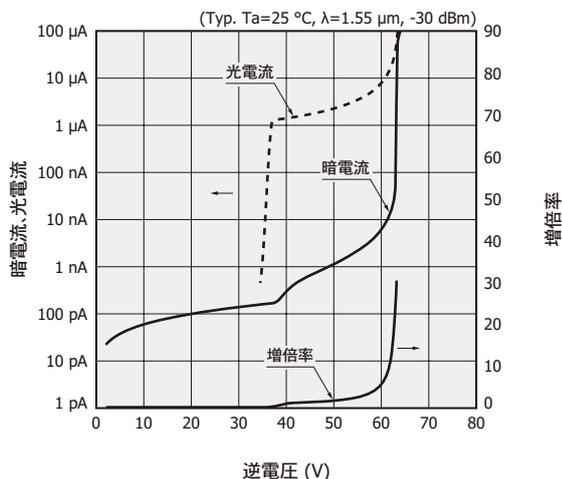
### 暗電流—逆電圧特性

APDの暗電流  $I_D$ は、増倍されない暗電流成分  $I_{DS}$  (PN接合と表面保護膜の界面を流れる表面リーク電流など)と増倍される暗電流成分  $I_{DG}$  (半導体内部で発生する再結合電流、トンネル電流、拡散電流など。M=1で規定する)から成ります。

$$I_D = I_{DS} + M \cdot I_{DG} \dots\dots (2-1)$$

図2-2にInGaAs APDの電流—逆電圧特性の例を示します。InGaAs APDは図2-1の構造をしているため、低逆電圧下で空乏層がInGaAs光吸収層まで広がらない場合は感度がありません。

【図2-2】 暗電流、光電流、増倍率—逆電圧 (G14858-0020AA)



当社のInGaAs APDでは、光が照射されていない状態で、逆方向電流が100 μA流れるときの逆電圧を降伏電圧 ( $V_{BR}$ )、逆電圧  $V_R = 0.9 \times V_{BR}$ のときの逆方向電流を暗電流と定義しています。

### 増倍率—逆電圧特性

InGaAs APDの増倍特性は、InPアバランシェ層にかかる電界強度に依存し、逆電圧を大きくするほど通常は増倍率は高くなります。さらに逆電圧を大きくすると暗電流も大きくなり、素子の直列抵抗成分における電圧降下によって、InPアバランシェ層にかかる電界が減少していきます。これにより逆電圧を大きくしても、増倍率が上がらなくなります。最大増倍率付近で動作させると、直列抵抗成分における電圧降下が大きくなるため、光電流が入射光量に比例しない現象が起こります。

【図2-3】 増倍率の温度特性 (G14858-0020AA)

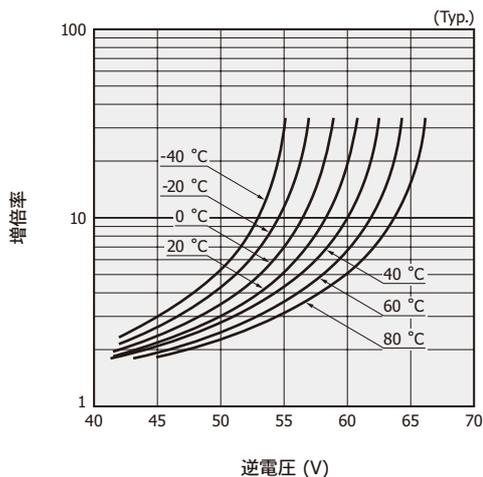
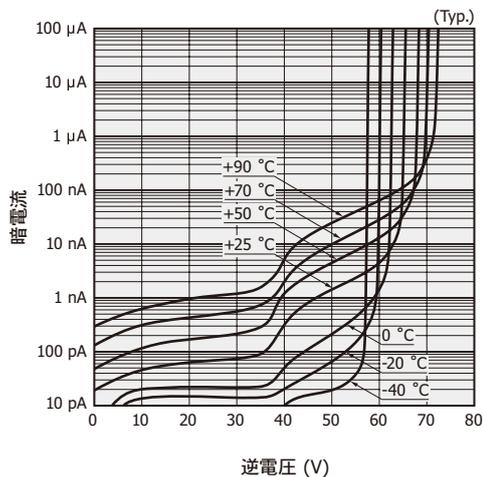


図2-3に示すようにInGaAs APDの増倍率は温度によって変化します。特定の逆電圧における増倍率は、温度が上昇すると小さくなります。これは、温度が上昇すると結晶格子の振動が激しくなり、電界により加速されるキャリアがイオン化を起こすエネルギーに達する前に格子と衝突する確率が高くなるためです。安定した出力を得るためには、温度変化に合わせて逆電圧を変化させるか、素子の温度を一定に保つ必要があります。

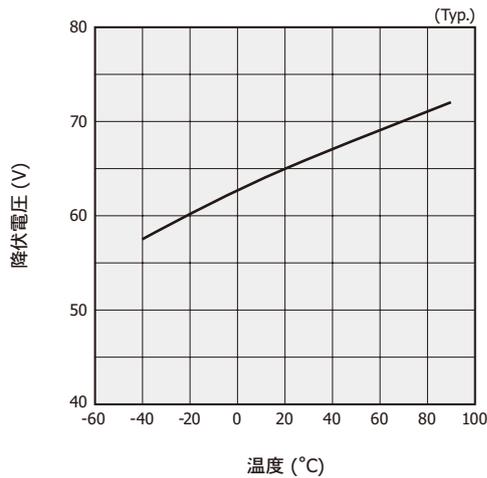
図2-4は、 $-40 \sim +80^\circ\text{C}$ における暗電流—逆電圧特性の温度依存性を示したグラフです。

【図2-4】 暗電流の温度特性 (G14858-0020AA)



降伏電圧の温度特性を図2-5に示します。

[図2-5] 降伏電圧—温度 (G14858-0020AA)



KIRD80681JA

### » 分光感度特性

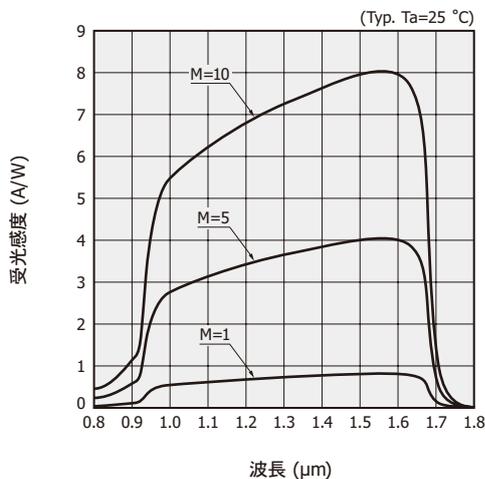
半導体のバンドギャップエネルギー以上の光がフォトダイオードに吸収されると電子-正孔対が発生し、信号として検出されます。バンドギャップエネルギー  $E_g$  (単位: eV) とカットオフ波長  $\lambda_c$  (単位:  $\mu\text{m}$ ) との間には式 (2-2) の関係があります。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} [\mu\text{m}] \quad \dots\dots (2-2)$$

InGaAs APDでは光を吸収する材料として、InPに格子整合した組成のInGaAsが使われており、そのバンドギャップエネルギーは室温で0.73 eVです。このため、InGaAs APDのカットオフ波長は約1.7  $\mu\text{m}$ となります。

InGaAs APDの分光感度特性は、増倍率によって異なります [図2-6]。InPキャップ層における短波長の光の吸収によって短波長側の感度が低下します。

[図2-6] 分光感度特性 (G14858-0020AA)



KIRD80686JA

InGaAs APDの分光感度の温度特性はInGaAsのバンドギャップエネルギーの温度特性の影響を受けます。

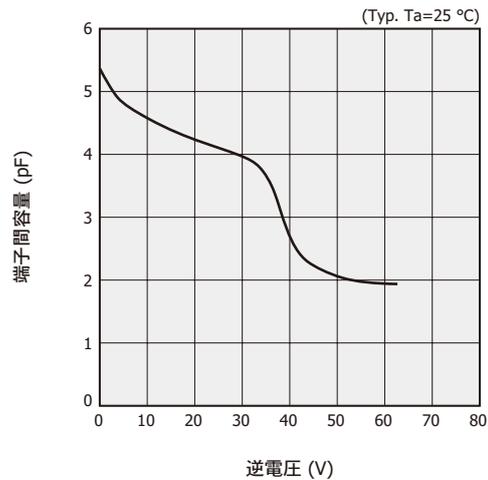
InGaAsのバンドギャップエネルギーは温度の上昇とともに小さくなるため、カットオフ波長は長くなります。

なお、InGaAs APDでは、素子の表面における反射により量子効率が悪化することを防ぐために、入射面に反射防止膜を形成しています。

### » 端子間容量—逆電圧特性

InGaAs APDの端子間容量—逆電圧特性のグラフはInGaAs PINフォトダイオードとは異なる曲線になります [図2-7]。これはPN接合の位置が異なるためです。

[図2-7] 端子間容量—逆電圧 (G14858-0020AA)



KAPD80418JA

### » ノイズ特性

InGaAs APDのキャリアごとの増倍率には統計的な揺らぎがあります。そのため、増倍過程において過剰雑音と呼ばれる増倍雑音に加わります。InGaAs APDのショットノイズ ( $I_n$ ) は、InGaAs PINフォトダイオードのショットノイズよりも大きくなり、式 (2-3) で表されます。

$$I_n^2 = 2q (I_L + I_{DG}) B M^2 F + 2q I_{DS} B \quad \dots\dots (2-3)$$

- q : 1電子当たりの電荷量
- $I_L$  : M=1における光電流
- $I_{DG}$  : 増倍される暗電流成分
- $I_{DS}$  : 増倍されない暗電流成分
- B : 帯域幅
- M : 増倍率
- F : 過剰雑音係数

1つのキャリアが半導体の単位距離を走行するときに発生する電子-正孔対の数をイオン化率と呼び、電子のイオン化率  $\alpha$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] と正孔のイオン化率  $\beta$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] が定義されます。このイオン化率は、増倍機構を決定する重要なパラメータです。また、 $\alpha$  と  $\beta$  の比はイオン化率比 (k) と呼ばれ、InGaAs APDのノイズを示すパラメータです。

$$k = \frac{\beta}{\alpha} \quad \dots\dots (2-4)$$

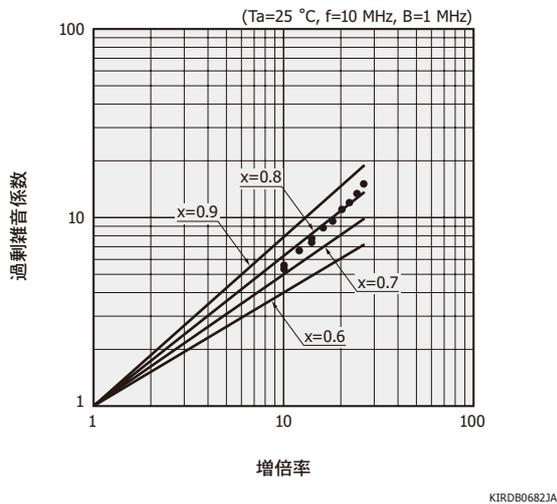
イオン化率比は、半導体材料固有の物性定数です。InPでは電子よりも正孔のイオン化率が大きく、 $k > 1$  となっています。そのため、InGaAs APDでは、InGaAs層で光を吸収して発生した電子-正孔対のうち正孔を逆電圧によってInPアバランシェ層へドリフトしています。

過剰雑音係数 (F) は、イオン化率比 (k) によって式 (2-5) で表されます。

$$F = M k + \left(2 - \frac{1}{M}\right) (1 - k) \dots\dots\dots (2-5)$$

過剰雑音係数は、近似的に  $F = M^x$  と表す場合があります (x: 過剰雑音指数)。図2-8にInGaAs APDの過剰雑音係数と増倍率の関係の一例を示します。この図では、過剰雑音指数が約0.7となっています。

【図2-8】 過剰雑音係数—増倍率 (G14858-0020AA)



このようにInGaAs APDでは、増倍に伴うノイズが発生し、増倍率を大きくすると過剰雑音が増加します。一方、出力信号も増倍率とともに大きくなるため、ある特定の増倍率でS/Nは最大の値になります。InGaAs APDのS/Nは、式 (2-6) で表されます。

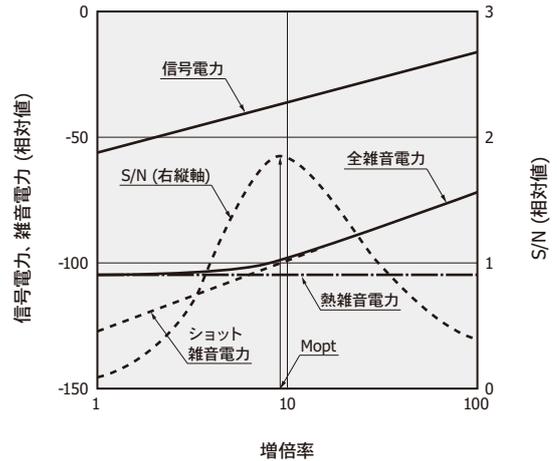
$$S/N = \frac{I_L^2 M^2}{2q (I_L + I_{DG}) B M^2 F + 2q I_{DS} B + \frac{4k T B}{R_L}} \dots\dots\dots (2-6)$$

2q (I<sub>L</sub> + I<sub>DG</sub>) B M<sup>2</sup> F: 過剰雑音  
 2q I<sub>DS</sub> B: ショットノイズ  
 k: ボルツマン定数  
 T: 絶対温度  
 R<sub>L</sub>: 負荷抵抗

最適な増倍率 (M<sub>opt</sub>) は、式 (2-6) を最大にする条件より求められ、I<sub>DS</sub> を無視できるとすると式 (2-7) で表されます。

$$M_{opt} = \left[ \frac{4k T}{q (I_L + I_{DG}) \cdot x \cdot R_L} \right]^{\frac{1}{2+x}} \dots\dots\dots (2-7)$$

【図2-9】 信号電力、雑音電力、S/N—増倍率



KIRD804003A

### 応答特性

APDの応答速度を決める主要因は、CR時定数、ドリフト時間 (キャリアが空乏層内を走行する時間)、増倍時間です。CR時定数により決まる遮断周波数は、式 (2-8) で求められます。

$$f_c(CR) = \frac{1}{2\pi C_t R_L} \dots\dots\dots (2-8)$$

C<sub>t</sub>: 端子間容量  
 R<sub>L</sub>: 負荷抵抗

CR時定数により決まる遮断周波数を大きくするためには、端子間容量を小さくする必要があります。そのため、受光面サイズが小さく空乏層が厚い方が有利です。遮断周波数 (f<sub>c</sub>) と上昇時間 (tr) との関係は、式 (2-9) で表されます。

$$tr = \frac{0.35}{f_c(CR)} \dots\dots\dots (2-9)$$

一方、空乏層を厚くした場合、ドリフト時間が無視できなくなります。ドリフト時間 tr<sub>d</sub>、およびドリフト時間により決まる遮断周波数 f<sub>c</sub>(tr<sub>d</sub>) は、それぞれの式 (2-10) (2-11) で表されます。

$$tr_d = \frac{W}{v_{ds}} \dots\dots\dots (2-10)$$

$$f_c(tr_d) = \frac{0.44}{tr_d} \dots\dots\dots (2-11)$$

W: 空乏層の厚さ  
 v<sub>ds</sub>: ドリフト速度

InGaAsにおける正孔のドリフト速度は電界強度が約 10<sup>4</sup> V/cm から飽和し、そのときのドリフト速度は約 5 × 10<sup>6</sup> cm/s です。ドリフト時間により決まる遮断周波数 f<sub>c</sub>(tr<sub>d</sub>) は空乏層が薄い方が有利であり、CR時定数により決まる遮断周波数 f<sub>c</sub>(CR) とはトレードオフの関係にあります。

アバランシェ層を通過するキャリアは結晶格子と衝突を繰り返しながら進むため、単位距離を進むのに要する時間は、アバランシェ層以外を進む場合よりも長くなります。キャリアがアバランシェ層を通過する時間（増倍時間）は増倍率が大きくなるほど長くなります。

一般に、増倍率が5～10の場合は応答速度においてCR時定数とドリフト時間が支配的な要因であり、それ以上の増倍率の場合は増倍時間が支配的な要因です。

増倍率が低い領域で応答速度を悪化させる原因として、空乏層外からのキャリアの拡散電流による時間遅れがあります。この時間遅れは、数 $\mu$ sオーダーとなることがあります。これは、入射光がInGaAs中へ到達する深さに対して、空乏層が十分に広がっていない場合に顕著に現れます。

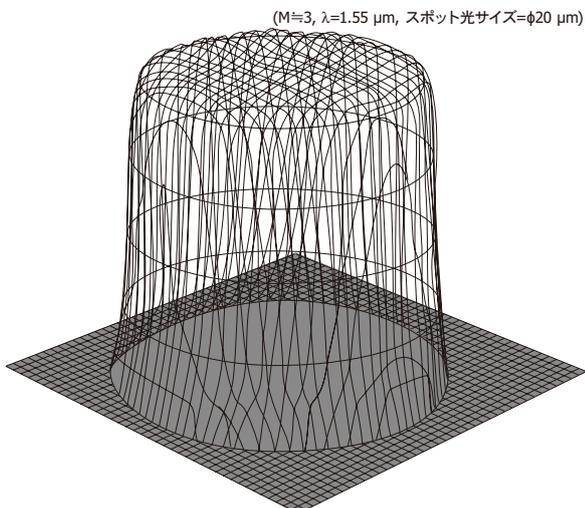
高速応答を実現するためには、一定以上の逆電圧を印加して、InGaAs光吸収層を十分に空乏化させる必要があります。InGaAs光吸収層が十分に空乏化していないと空乏層外で吸収された光により発生したキャリアが信号のすそ引きの原因となり、応答特性が劣化します。

入射光量が多く光電流が大きい場合、空乏層内の電子と正孔の引力が電界を打ち消す方向に働くため、InGaAs光吸収層のキャリアのドリフト速度が遅くなり、応答の低下をもたらす現象が起こります。これは空間電荷効果と呼ばれる現象で、特に光信号が途切れるときに現れやすくなります。

## ▶ 受光面の感度均一性

InGaAs APDには大きな逆電圧が印加され高電界がPN接合にかかるため、特に接合周辺で局所的な電界集中が起こり、ブレイクダウンが発生しやすくなります。これを防ぐために、当社のInGaAs APDはPN接合周縁にガードリングを形成する構造を採用しています。これによって受光面全体にわたって均一な電界がかかるようになり、感度均一性が確保されます。

【図2-10】 受光面の感度分布 (G14858-0020AA)



KIRDB0683JA

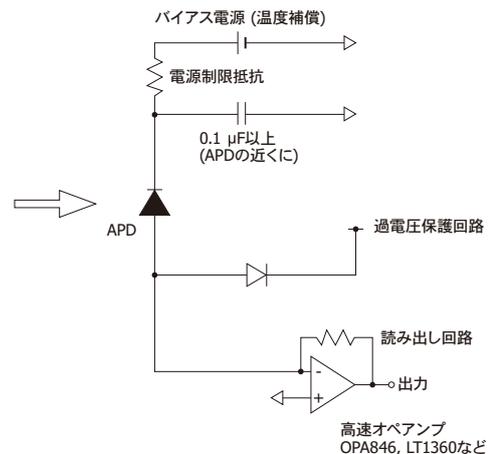
## 2-3 使い方

InGaAs APDは、InGaAs PINフォトダイオードやSi APDとほぼ同様に扱うことができますが、以下について注意する必要があります。

- ① InGaAs APDの逆電流の絶対最大定格は2 mAです。このためバイアス回路に保護抵抗を付加した上で、電流制限回路を組み込むといった対策が必要です。
- ② 通常、低ノイズの読み出し回路は、過大電圧に対して初段部の損傷を招く恐れがあります。この対策として、過大電圧の入力を電源電圧に逃がすための保護回路を接続してください。
- ③ APDの増倍率は、温度によって変化します。広い温度範囲で使用する場合には、温度変化に合わせて逆電圧を制御するか、APDの温度を一定に保つなどの対策が必要です。
- ④ 微弱な信号光を検出する場合、検出限界はショットノイズで決定されます。背景光がAPDに入射すると、そのショットノイズのためにS/Nが低くなる場合があります。このような場合は、光学フィルタを使用する、レーザの変調度を向上させる、視野角を制御するなど、背景光の影響を低減する必要があります。特にInGaAs APDは、構造上Si APDと比べて過剰雑音指数が大きいいため、過剰雑音を含むショットノイズによる影響を考慮する必要があります。

図2-11に接続例を示します。InGaAs APDのAPDモジュールについてカスタム対応が可能です。

【図2-11】 接続例



KIRDC00793B

### 3. InAs/InAsSb/InSb光起電力素子

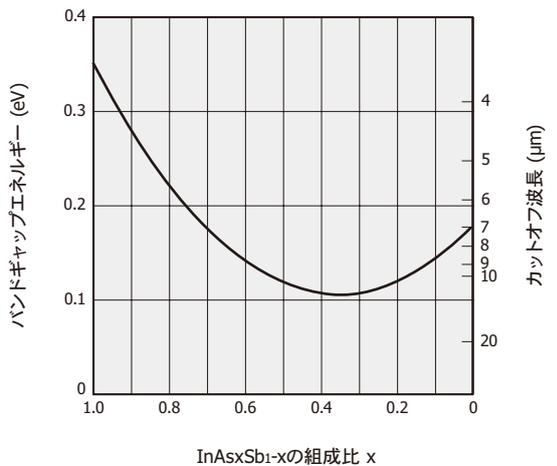
InAs/InAsSb/InSb光起電力素子は、InGaAs PINフォトダイオードと同様にPN接合をもった赤外線検出素子です。InAs光起電力素子はPbS光導電素子と同様に3 μm付近に感度を持ち、InSb光起電力素子はPbSe光導電素子と同様に5 μm帯に感度をもっています。InAsSb光起電力素子は、5 μm帯・8 μm帯・10 μm帯で高感度を実現しています。

#### 3-1 特性

##### 分光感度特性

III-V族系化合物半導体材料であるInAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>混晶の組成制御を行うことにより、室温におけるカットオフ波長が3.3 μm (InAs)から12 μm (InAs<sub>0.38</sub>Sb<sub>0.62</sub>)までの検出素子の作成が可能です。

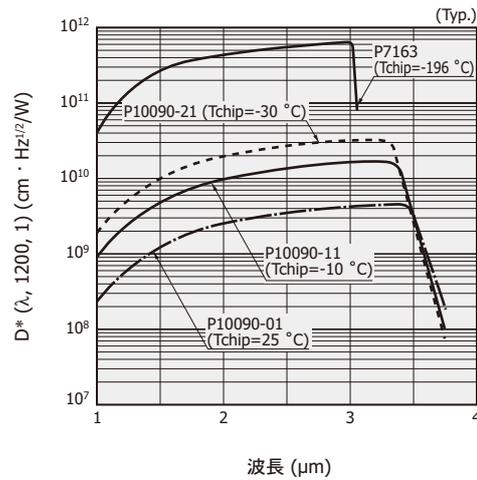
[図3-1] バンドギャップエネルギー、最大感度波長 - InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>の組成比 x



InAs光起電力素子には非冷却型、電子冷却型 (Tchip=-10 °C, -30 °C)、液体窒素冷却型 (Tchip=-196 °C)があり、用途に応じて使い分けられます。InAsSb光起電力素子には非冷却型、電子冷却型 (Tchip=-30 °C)があり、非冷却型にはバンドパスフィルタ付きや、2波長を検出できる2素子タイプもあります。InSb光起電力素子は液体窒素冷却型です。図3-2にInAs/InAsSb/InSb光起電力素子の分光感度特性を示します。これらの検出素子は、冷却によりカットオフ波長が短波側にシフトします。

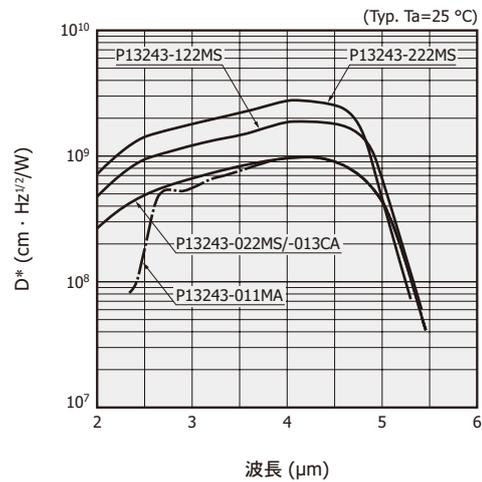
[図3-2] 分光感度特性

##### (a) InAs光起電力素子



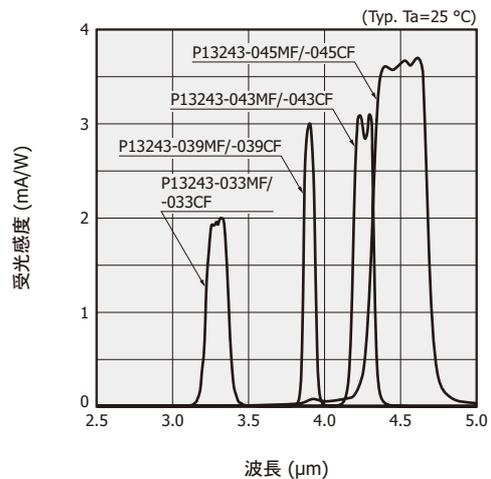
KIRD80356JE

##### (b) InAsSb光起電力素子 (カットオフ波長: 5 μm帯)



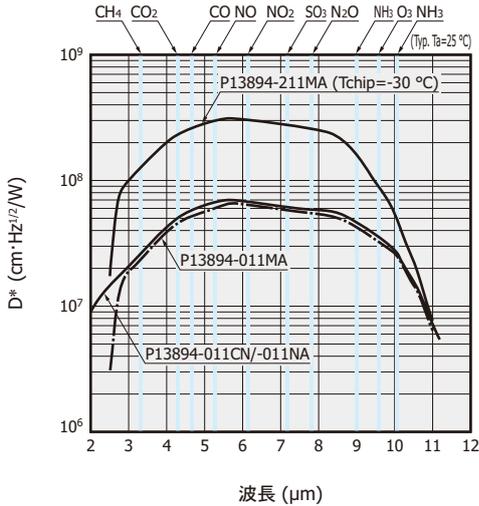
KIRD806583D

##### (c) バンドパスフィルタ付InAsSb光起電力素子



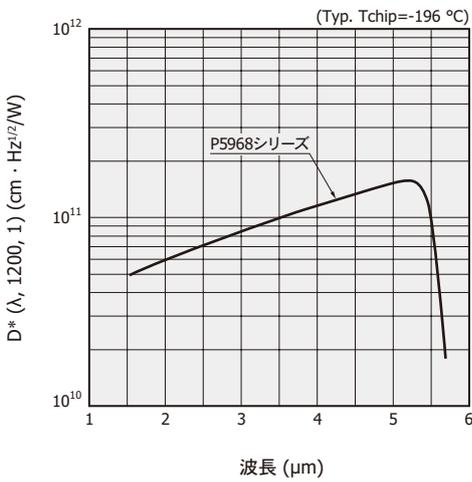
KIRD806763B

(d) InAsSb光起電力素子 (カットオフ波長: 10 μm帯)



KIRDB0632JB

(e) InSb光起電力素子



KIRDB0063JD

» ノイズ特性

InAs/InAsSb/InSb光起電力素子のノイズ (i)は、ジョンソンノイズ (ij)、暗電流 (背景光による光電流も含む) によるショットノイズ (isd)に起因し、それぞれは以下の式で表されます。

$$i = \sqrt{ij^2 + isd^2} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$ij = \sqrt{4k T B/Rsh} \dots\dots\dots (3-2)$$

$$isd = \sqrt{2q I_d B} \dots\dots\dots (3-3)$$

- k : ボルツマン定数
- T : 素子の絶対温度
- B : 雑音帯域幅
- Rsh: 並列抵抗
- q : 1電子当たりの電荷量
- I<sub>d</sub> : 暗電流

高感度な赤外検出素子では、周囲からの背景光の揺らぎによる背景放射ノイズが無視できなくなります。ノイズ源が背景放射ノイズだけと考えた場合、光起電力素

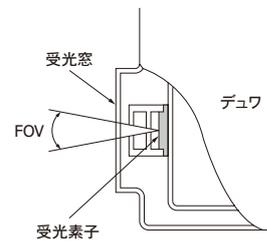
子の D\*は式 (3-4)で表されます。

$$D^* = \frac{\lambda \sqrt{\eta}}{h c \sqrt{2Q}} [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}] \dots\dots\dots (3-4)$$

- λ: 波長
- η: 量子効率
- h: プランク定数
- c: 光速
- Q: 背景放射光量子束 [フォトン数/cm²·s]

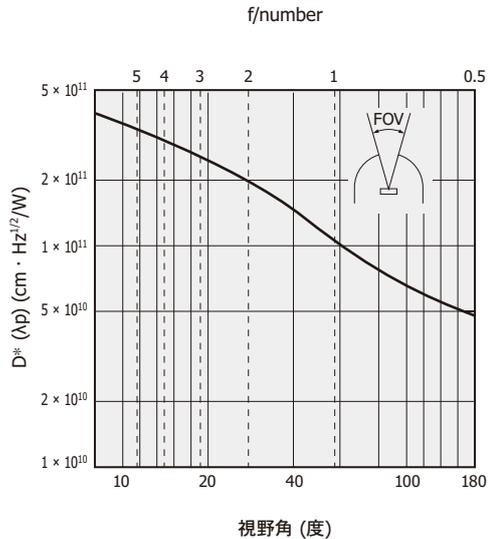
背景放射ノイズを減少させるためには、視野角 (FOV: Field of View)を制限するコールドシールドや不必要な波長をカットするバンドパスフィルタを冷却して使用する必要があります。D\*と視野角の関係を図3-4に示します。

[図3-3] 視野角 (FOV)



KIRDC0033JB

[図3-4] D\*–視野角 (P5968-060, 代表例)



KIRDB0138JC

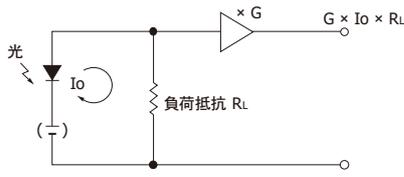
3-2 使い方

» 動作回路

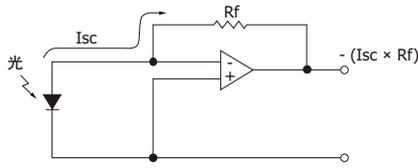
InAs/InAsSb/InSb光起電力素子の接続例を図3-5に示します。負荷抵抗またはオペアンプを用い、光電流を電圧として取り出します。なお、並列抵抗の小さなInAs/InAsSb光起電力素子にオペアンプを接続する場合、低電圧ノイズのオペアンプを推奨します。

[図3-5] 接続例

(a) 負荷抵抗を接続した場合



(b) オペアンプを接続した場合



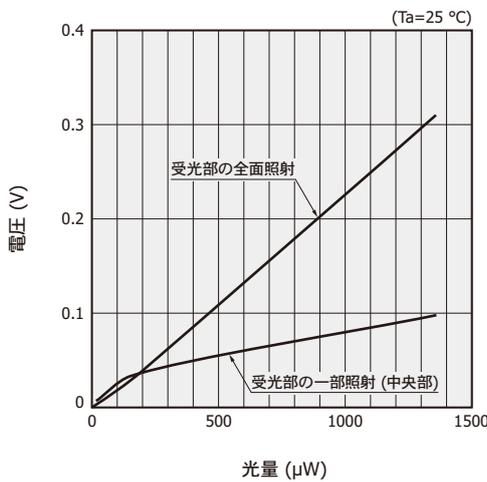
KPDC0061C

## 光の入射

P12691-201Gは、製品内部にレンズが組み込まれていますので、光入射は平行光を用いてください。検出器の前で集光すると、出力が小さくなる場合があります。

P13243シリーズやP13894シリーズをご使用の際は、受光部全面を均一に照射する必要があります。受光部の一部だけを照射した場合、出力信号が小さくなったり、直線性が低下する場合があります [図3-6]。

[図3-6] 直線性 (P13243シリーズ, 代表例)



KIRDB0691JA

## 並列抵抗の測定

InAs/InAsSb/InSb光起電力素子の並列抵抗をテストなどで測定すると素子を破壊する恐れがあります。測定時には、素子にかかる逆電圧は絶対最大定格の値以下にしてください。なお、冷却型は室温で並列抵抗を測定すると破壊されやすいため、必ず冷却した状態で測定してください。

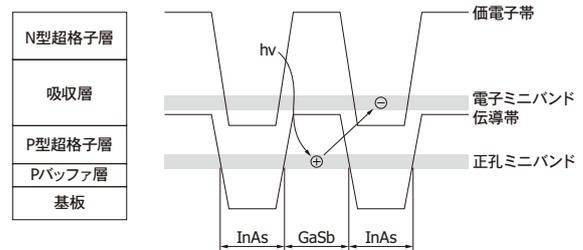
## 4. Type II 超格子赤外線検出素子

Type II 超格子赤外線検出素子は、当社独自の結晶成長技術とプロセス技術により、14 μm帯まで感度を広げた光起電力素子です。本製品は環境に配慮した赤外線検出素子で、RoHS指令制限物質の水銀・カドミウムを使用していません。これらの物質を含んだ従来品に代わる製品です。

### 4-1 構造

InAsとGaSbの薄膜を交互に積み重ねることで、バルク結晶の場合にはないエネルギー帯（ミニバンド）が形成されます。ミニバンドの位置は、薄厚や組成を変化させて制御することが可能です。

[図4-1] 断面構造とエネルギー準位



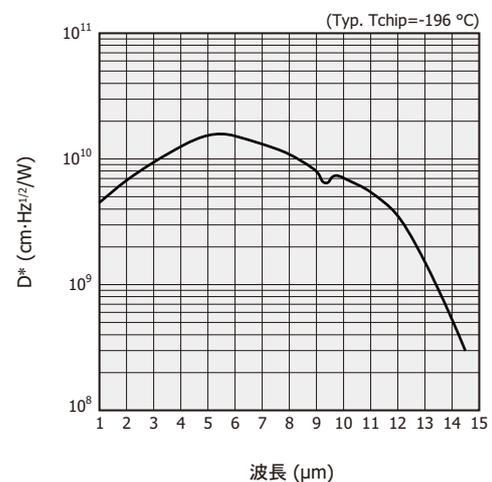
KIRDC01321A

### 4-2 特性

#### 分光感度特性

Type II 超格子赤外線検出素子は液体窒素冷却型です。図4-2に分光感度特性を示しています。

[図4-2] 分光感度特性

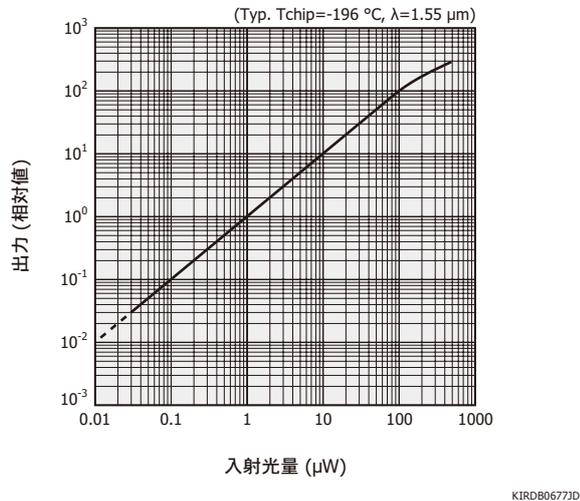


KIRDB06731B

## 直線性

Type II 超格子赤外線検出素子は、従来品のMCT光導電素子と比較して直線性が2桁程度優れています。

[図4-3] 直線性



## 4-3 使い方

### 動作回路

オペアンプを用いて光電流を電圧に変換して出力します。詳細は「1. InGaAs PINフォトダイオード / 1-2 使い方 (P.8)」を参照してください。

### 背景放射

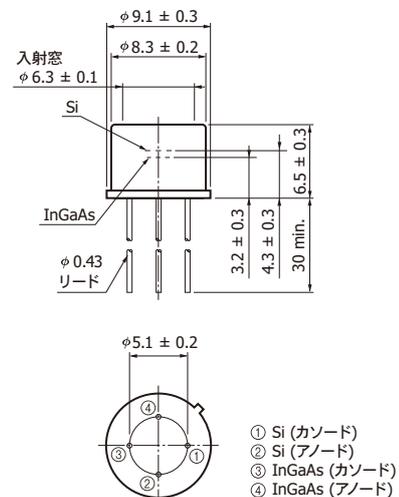
赤外線計測において、信号光ではない背景放射は測定に影響を与えます。コールドシールドを用いて適切な視野角を設定して、背景放射を検出しないようにしてください。

## 5. 複合素子

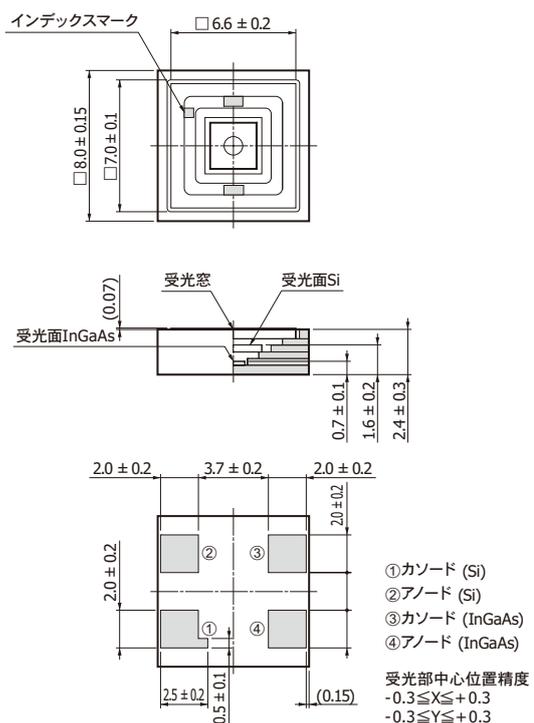
複合素子は、感度波長範囲を広げるために2種類以上の素子を上下に配置した赤外線検出素子です。Si上に配置して入射面とし、下にInGaAsを同一光路に配置した製品に加えて、標準タイプInGaAsを上配置し、下に長波長タイプInGaAsを配置した製品も用意しています。その他、SiとInAsまたはInAsSbなどの組み合わせにも対応できます。上に配置する検出素子は、赤外線を検出するとともに、下の検出素子の短波長カットフィルタの役目も果たします。

[図5-1] 外形寸法図 (Si + InGaAs, 単位: mm)

### (a) メタルパッケージ

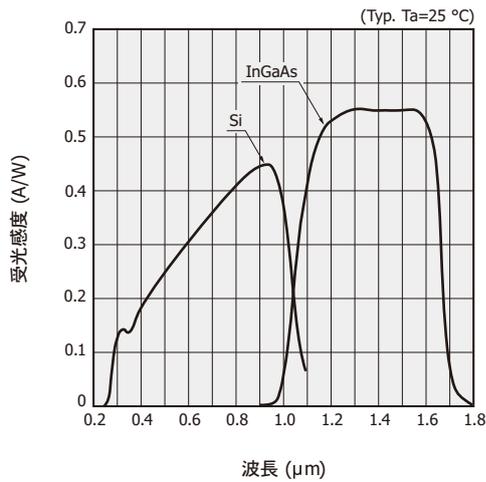


### (b) セラミックパッケージ

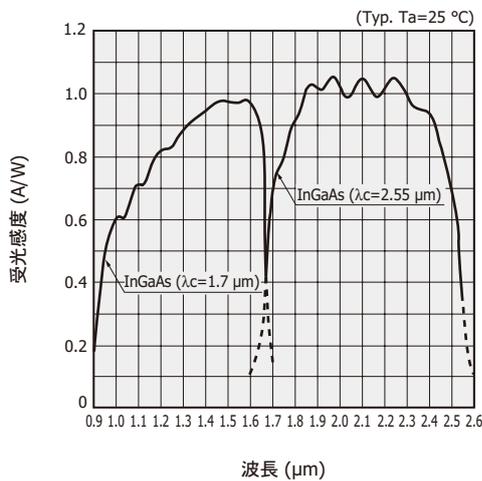


[図5-2] 分光感度特性

(a) Si + InGaAs



(b) 標準タイプ InGaAs + 長波長タイプ InGaAs

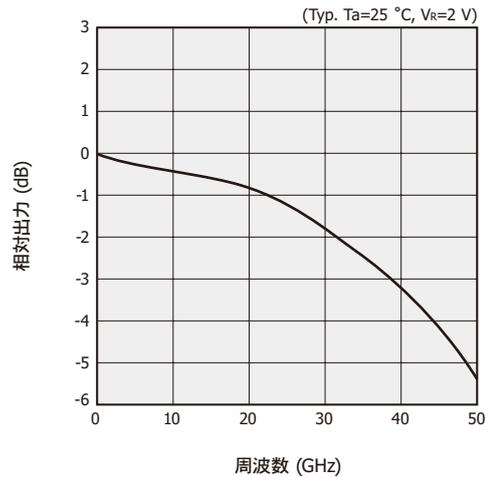


## 6. 新たな取り組み

### 6-1 超高速InGaAs PINフォトダイオード

超高速応答の受光素子として、25 Gbps、56 Gbpsに加えて、さらに高速のフォトダイオードの製品化が求められています。その際にシステム自体が高価にならないように、低消費電力化やアセンブリの簡易化が要求されます。S/Nを確保するためには、従来品からの感度の減少は許されません。フォトダイオードには、できる限り現状の受光感度を維持しつつ、低逆電圧下で高速動作するとともに、小さな受光部にできるだけ多くの光を入射させるための光学技術との融合が必要となります。現在、低逆電圧駆動の超高速InGaAs PINフォトダイオードとしては、最適なプリアンプと組み合わせることで $V_R=2$  Vで64 Gbpsまでの伝送帯域が確認され製品化されるとともに、さらなる高速化への対応を進めています。

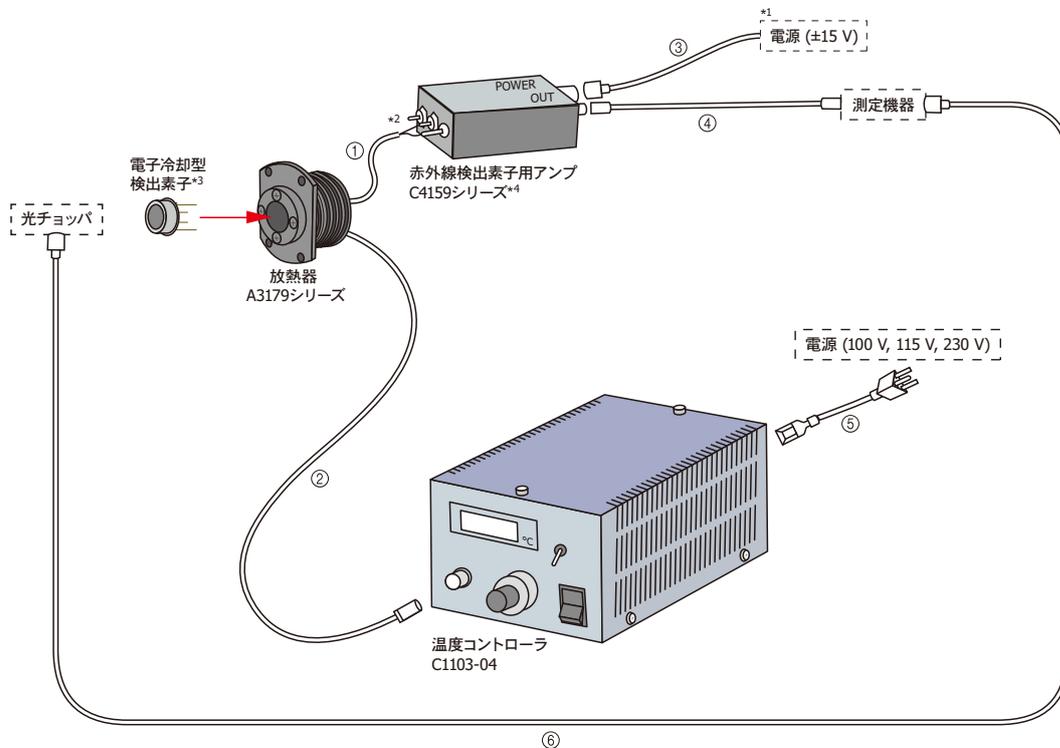
[図6-1] 周波数特性



## 7. オプション

当社は、化合物光半導体 受光素子用オプションとして、アンプ、温度コントローラ、放熱器、チョッパ、ケーブルなどを用意しています。温度コントローラ・放熱器は電子冷却型用で、温度コントローラは素子温度を一定に制御するために使用され、放熱器は電子冷却素子からの熱を効率よく放出するために使用されます。チョッパは、赤外線検出を行う場合に検出光だけを変調して背景光と区別することで、背景光の影響を低減することができます。その他、赤外線検出素子とプリアンプを一体化したプリアンプ付赤外検出モジュールも用意しています。

【図7-1】 化合物光半導体 受光素子用オプションの接続例



KACCC0321JE

ケーブル番号	ケーブル	およその長さ	備考
①	同軸ケーブル (信号用)	2 m	放熱器 A3179シリーズに付属しています。ケーブルはできるだけ短くして使用してください。(10 cm程度が望ましい)
②	4芯ケーブル (コネクタ付) A4372-05	3 m	温度コントローラ C1103シリーズに付属しています。別売もしています。
③	電源ケーブル (4芯コネクタ付) A4372-02	2 m	赤外線検出素子用アンプ C4159/C5185シリーズ、C3757-02、プリアンプ付赤外検出モジュール (常温型)に付属しています。別売もしています。
④	BNCコネクタケーブル E2573	1 m	別売品
⑤	電源ケーブル (温度コントローラ用)	1.9 m	温度コントローラ C1103シリーズに付属しています。
⑥	ケーブル	-	ユーザーにて用意してください。

\*1: バラ線を3~4ピンコネクタまたはバナナプラグに付けて電源に接続してください。

\*2: はんだ付けが必要です。

\*3: 専用ソケットはありません。はんだ付けが必要です。

\*4: 詳細は赤外線検出素子用アンプを参照してください。

## 8. 応用例

### 8-1 光パワーメータ

光パワーメータは、光の強さを測定するもので、光ファイバ通信・レーザ光検出など幅広い用途があります。光ファイバ通信は近／中距離用と長距離用に分類されますが、長距離用には光ファイバの伝送損失が小さくなる1.3 μmおよび1.55 μmの波長帯の赤外線が使われています。この波長帯の検出には InGaAs PIN フォトダイオードなどが使われ、光ファイバの伝送損失、中継のよしあし、レーザパワーの測定などを行います。光パワーメータに要求される特性は、直線性とユニフォームリティです。低いパワーの光も低ノイズで検出できるように、冷却型の検出素子を使用する場合があります。

[図8-1] 光パワーメータ



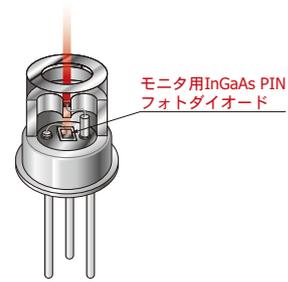
KIRDC01003A

### 8-2 LDモニタ

LD（レーザダイオード）の出力レベルと発光波長は、LD素子の温度によって変化します。LDを安定させるために、APC（Auto Power Control）を行います。APCには、LDからの光パルスの積分量をモニタする方法と、光パルスのピーク値をモニタする方法があります。LDの高出力化に伴い、モニタ用の検出器では、入射光量の多い領域での直線性が重要になってきました。また、光パルスのピーク値をモニタするためには、高速応答も要求されます。

LDモニタに用いられるInGaAs PINフォトダイオードは、LDと同じパッケージ内にマウントする場合と外部に取り付ける場合があります。さらに長い波長のレーザには、InAs/InSb光起電力素子も利用されます。

[図8-2] LDモニタ



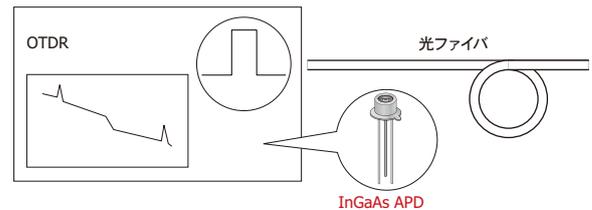
KIRDC00963B

### 8-3 OTDR

OTDR（Optical Time Domain Reflectometer）は、光ファイバ内での減衰量に加え、損失箇所やファイバ同士の接続状態などを検出することができる測定器です。

OTDRは非常に微弱な信号を検出する必要があり、センサとしてInGaAs APDが利用されています。

[図8-3] OTDR計測

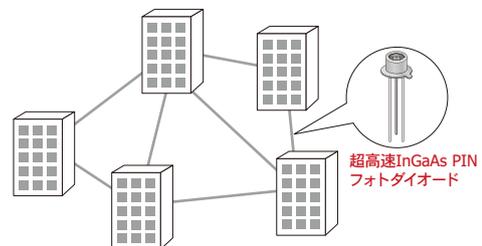


KIRDC01293A

### 8-4 100 Gbps~400 Gbps光通信

光通信ネットワークのデータトラフィック量の増大に伴い、使用されるトランシーバは100 Gbps~400 Gbpsへと高速化が進んでいます。その光通信の受信に超高速InGaAs PIN フォトダイオードが利用されています。

[図8-4] 光通信ネットワーク



KIRDC01303A

## 8-5 放射温度計

物質は、絶対零度以上であれば物質自体の温度に応じて赤外線を放出します。実際には物質から放射される赤外線の量は、温度によって一義的に決まるわけではなく、放射率 (e) を補正する必要があります。

図8-5は黒体からの放射エネルギーを示します。黒体の場合は $e=1$ です。図8-6にさまざまな物体の放射率を示します。放射率は、温度・波長によって異なります。

温度分解能を表す指標として、雑音等価温度差 (NE $\Delta$ T) があります。NE $\Delta$ Tは式 (8-1) のように定義されます。

$$NE\Delta T = \frac{LN}{\left. \frac{dL}{dT} \right|_{T=T_1}} \dots\dots (8-1)$$

LN: 雑音等価輝度  
T<sub>1</sub>: 物体の温度

LNは、検出器のNEPと式 (8-2) の関係にあります。

$$NEP = T_0 LN \Omega A_o / \gamma \dots\dots (8-2)$$

T<sub>0</sub>: 光学系の損失  
 $\Omega$ : 光学系から被測定エリアを見込む立体角  
A<sub>o</sub>: 光学系の開口面積  
 $\gamma$ : 回路系の損失

式 (8-1) の  $\left. \frac{dL}{dT} \right|_{T=T_1}$  は、温度 T<sub>1</sub> における物体の放射輝度 (L) の温度係数を表しています。放射輝度は、観測波長域 ( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ) にわたって分光放射発散度を積分して得られます。

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\pi} M_\lambda d\lambda \dots\dots (8-3)$$

M <sub>$\lambda$</sub> : 分光放射発散度

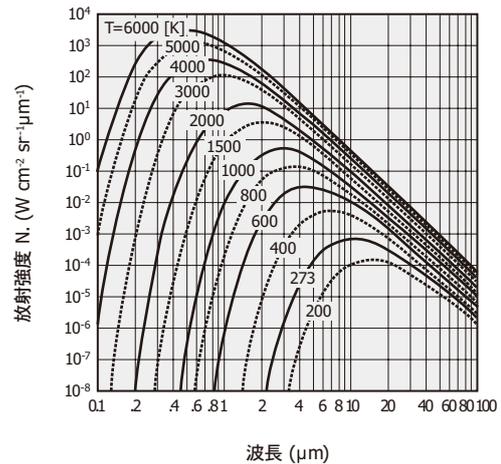
他の温度測定法と比べると、放射温度計には以下の特長があります。

- ・ 被測定物に直接接触しないで測定が可能
- ・ 高速応答
- ・ パターン計測が容易にできる

放射温度計に使用する赤外線検出素子は、対象物の温度や材質に合わせて選ぶ必要があります。たとえばガラス類では5  $\mu$ m付近、プラスチックフィルムでは3.4  $\mu$ mや8  $\mu$ m付近に放射率のピーク波長があります。この波長域に合わせて検出素子を選ぶ必要があります。

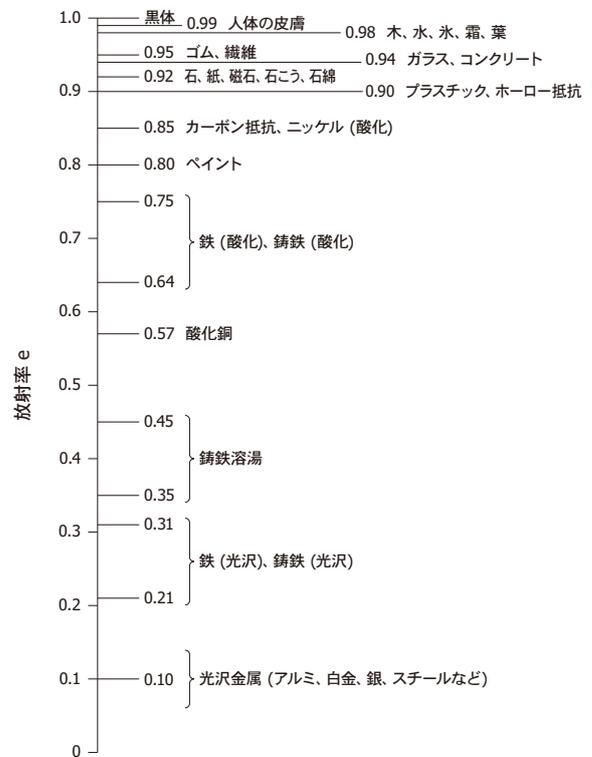
また、赤外ファイバと検出器を組み合わせることで、内部の複雑な構造物、高温・真空・高圧ガス中などの危険な場所にある物体の温度測定が可能になりました。

[図8-5] 黒体放射の法則 (プランクの放射則)



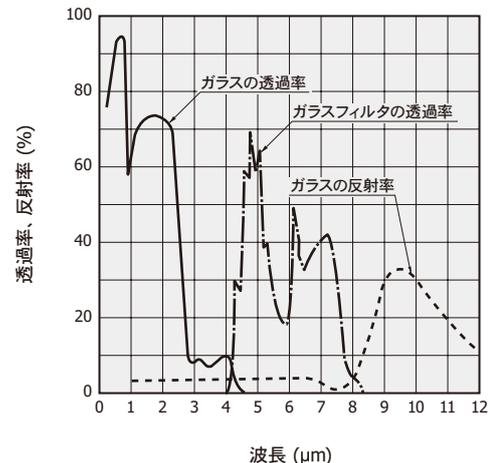
KIRD800143B

[図8-6] 各種物体の放射率<sup>1)</sup>



KIRD000363A

[図8-7] ガラスの透過率、反射率—波長

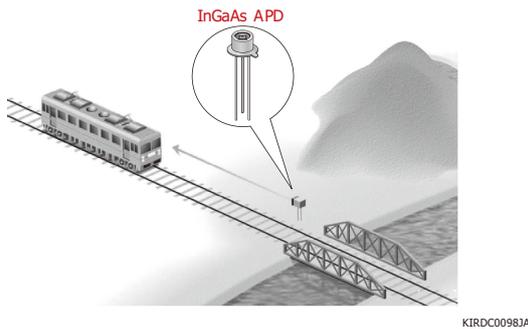


KIRD801463A

## 8-6 距離計測 (LiDARなど)

対象物にレーザを照射して反射した微弱光を検出することで、対象物までの距離を高速・高精度に測定することができます。InGaAs APDは、逆電圧を印加することによりS/Nの高い信号を得ることができ、微弱光の測定に適しています。アイセーフ波長 1.55  $\mu\text{m}$ の光を検出できるため、測距センサとして広く用いられています。

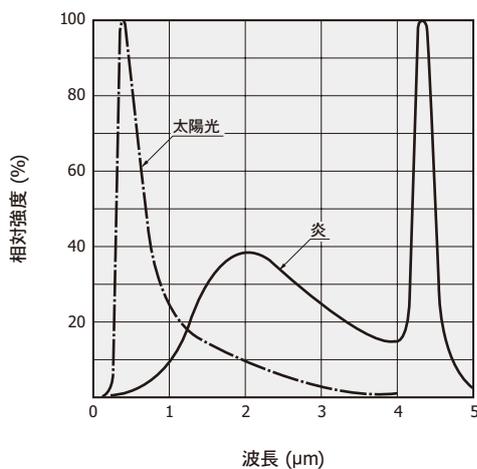
[図8-8] 距離計測



## 8-7 フレームアイ (炎検出)

フレームアイは、炎から放射される光を検出し、燃焼状態を観察するものです。炎からの放射波長は、図8-9のように紫外域から赤外域にわたって広く分布しています。検出方法には、複合素子を使って紫外域から赤外域まで幅広い波長域を検出する方法、InAsSb光起電力素子を使って近赤外域や波長 4.26  $\mu\text{m}$ の光を検出する方法などがあります。

[図8-9] 炎からの放射波長



## 8-8 水分計

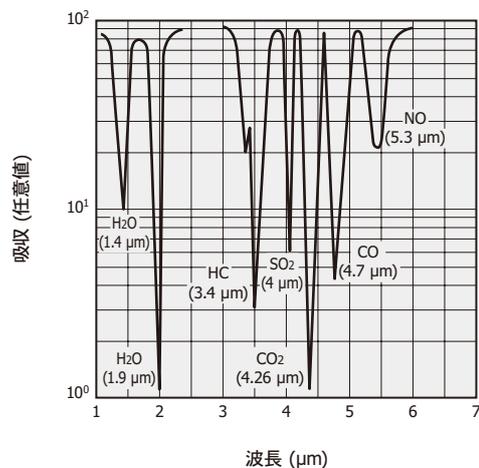
近赤外域にある水分の吸収波長 (1.1  $\mu\text{m}$ , 1.4  $\mu\text{m}$ , 1.9  $\mu\text{m}$ , 2.7  $\mu\text{m}$ )の光とリファレンス光を食品などの被測定物に投光し、被測定物からの反射光あるいは透過光の比率を演算することにより水分量を測定します。受光素子としては、InGaAs PINフォトダイオード、InAs光起電力素子が適しています。

## 8-9 ガス分析計

ガス分析計は、ガスの赤外域における光の吸収を利用して、ガス濃度を測定します。ガス分析計には、光源からの赤外線分光して波長ごとの吸収量を測定して試料の成分とその量を測る分散方式と、特定波長の吸収量だけに限る非分散方式とがあります。現在は非分散方式が主流です。非分散方式のガス分析計は、自動車の排気ガス測定 (CO, CH, CO<sub>2</sub>)、呼気の成分測定 (CO<sub>2</sub>)、燃料排気ガスの管理 (CO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>)、燃料漏洩検知 (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)などに用いられます。また、炭酸飲料 (ソフトドリンク、ビールなど)のCO<sub>2</sub> (4.26  $\mu\text{m}$ )、糖分 (3.9  $\mu\text{m}$ )の成分測定にも用いられます。図8-10にさまざまなガスの吸収スペクトルを示します。

当社では、InGaAs・InAs・InAsSb・InSbなど、さまざまな波長に合わせたセンサを用意しています。また、ガス分析計用の中赤外半導体レーザとして、量子カスケードレーザ (QCL: Quantum Cascade Laser)も用意しています。中赤外域 (4~10  $\mu\text{m}$ )の特定の波長に発振波長をもつ製品ラインアップがあります。

[図8-10] ガス吸収スペクトル



## 8 - 10 赤外線撮像装置

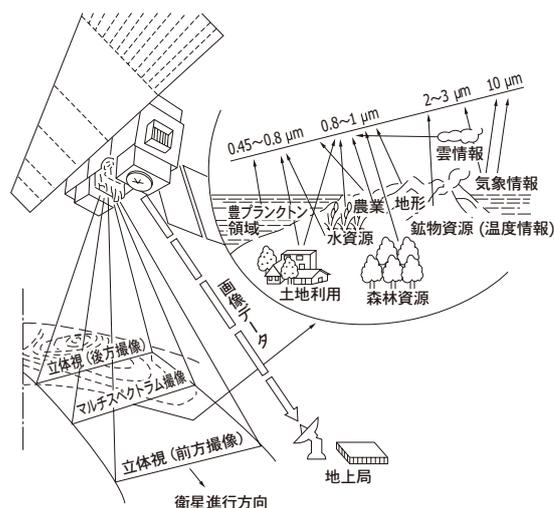
赤外線撮像装置の応用分野は、産業から医学、学術分野まで多方面に及んでいます [表8-1]。赤外線撮像方式の原理は、2つの方式に分けられます。検出素子として1次元アレイを用いる方式では、光学系をZ軸中心に走査させて画像化します。2次元アレイを用いる方式では、光学系で走査する必要がありません。

なお、InAsSb光起電力素子、QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector: 量子井戸型赤外線センサ)、MEMS技術を利用した熱型検出素子、CMOS回路との異種接合による2次元アレイによって、さらに高品質の画像が得られます。

## 8 - 11 リモートセンシング

物体から放射または反射される光には、図8-11のように波長によって異なる情報を含んでいます。これを波長別に計測することによって、物体についてのさまざまな情報を得ることができます。その中で赤外線を用いたリモートセンシングでは、固体・液体の表面温度や気体の種類・温度などの情報を得ることができます。特に最近では人工衛星や航空機によるリモートセンシングが盛んになり、地上や海面の温度、大気中のガス濃度など、地球規模の巨視的情報が得られるようになりました。これらの情報は、環境測定・気象観測・資源探査などに利用されています。

[図8-11] 資源探査用光学システム<sup>2)</sup>



KIRDC003918

## 8 - 12 FTIR

FTIR (Fourier Transform Infrared spectrometer: フーリエ変換赤外分光光度計)は、2光束干渉計で得た干渉信号をフーリエ変換してスペクトルを得る装置で、以下の特長をもっています。

- ・非分散方式 (同時に多くのスペクトルエレメントを測定するため高S/N)のため光量が多い。
- ・波長精度が高い。

FTIRの心臓部である赤外線検出素子には、以下の仕様が必要とされます。

- ・広い感度波長範囲

[表8-1] 赤外線撮像装置の応用分野

応用分野	応用例
産業	鉄鋼・紙などの加工工程の管理、溶接・はんだ加工部の非破壊検査、建造物・構造物の非破壊検査、ウエハ・ICチップの評価試験、送電線・発電機などの保守点検、車軸・圧延ロールなどの発熱の監視、海洋資源の探査、森林分布の監視
公害監視	海水・温排水の汚染監視
学術調査	地質探査、水資源探査、海流調査、火山調査、気象探査、宇宙・天文探査
医学	赤外線画像診断 (乳がんの検診など)
保安	ボイラなどの温度監視、火災探知、ガス漏れ検知
自動車、航空機	視界補助用暗視装置、エンジン評価試験

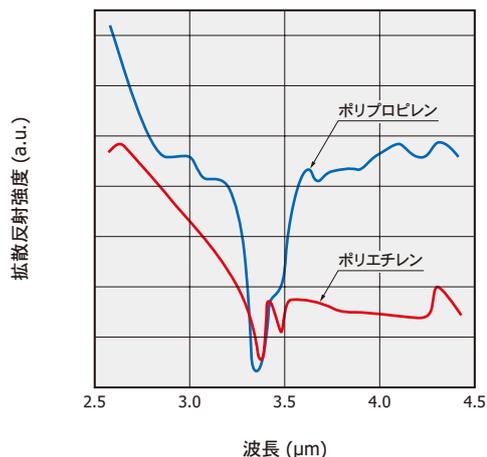
- ・高感度
- ・光学系に合った受光面サイズ
- ・広い周波数帯域
- ・入射光量に対して優れた直線性

2.5～25 μmの広い波長域では、通常、熱型検出素子が使われています。また高感度／高速測定用としてはInAs、InAsSb、InSbの量子型検出素子が使われています。

## 8-13 黒色プラスチック選別

プラスチックのリサイクルは、環境負荷軽減の取り組みとして、ますます重要となってきています。プラスチックは種類が多く、その選別が必要不可欠です。多くのプラスチックは近赤外域に特徴的なピークをもつため、近赤外線を用いて選別されています。しかし、黒色プラスチックでは、顔料のカーボンブラックなどにより近赤外線が吸収されるため、中赤外線が用いられています。中赤外域用の受光素子としては、InAsSb光起電力素子が適しています。

【図8-12】 黒色プラスチックの吸収スペクトル



データ提供: 河津 博文様 (近畿大学 産業理工学部 教授)

KIRD807011A

### ■ 参考文献

- 1) 宮内、センサ技術、15 (1985)10月号、P48
- 2) 工藤、奈倉、赤外線技術、11 (1986)、P73

本資料の記載内容は、令和4年8月現在のものです。

製品の仕様は、改良などのため予告なく変更することがあります。本資料は正確を期するため慎重に作成されたものですが、まれに誤記などによる誤りがある場合があります。本製品を使用する際には、必ず納入仕様書をご用命の上、最新の仕様をご確認ください。

本製品の保証は、納入後1年以内に瑕疵が発見され、かつ弊社に通知された場合、本製品の修理または製品の納入を限度とします。ただし、保証期間内であっても、天災および不適切な使用に起因する損害については、弊社はその責を負いません。

本資料の記載内容について、弊社の許諾なしに転載または複製することを禁じます。

## 浜松ホトニクス株式会社

www.hamamatsu.com

仙台営業所 〒980-0021 仙台市青葉区中央3-2-1 (青葉通プラザ11階)  
 筑波営業所 〒305-0817 つくば市研究学園5-12-10 (研究学園スクウェアビル7階)  
 東京営業所 〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-4 (常盤橋タワー11階)  
 中部営業所 〒430-8587 浜松市中区砂山町325-6 (日本生命浜松駅前ビル)  
 大阪営業所 〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 (大阪国際ビル10階)  
 西日本営業所 〒812-0013 福岡市博多区博多駅東1-13-6 (いちご博多イーストビル5階)

TEL (022) 267-0121 FAX (022) 267-0135  
 TEL (029) 848-5080 FAX (029) 855-1135  
 TEL (03) 6757-4994 FAX (03) 6757-4997  
 TEL (053) 459-1112 FAX (053) 459-1114  
 TEL (06) 6271-0441 FAX (06) 6271-0450  
 TEL (092) 482-0390 FAX (092) 482-0550

固体営業推進部 〒435-8558 浜松市東区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184