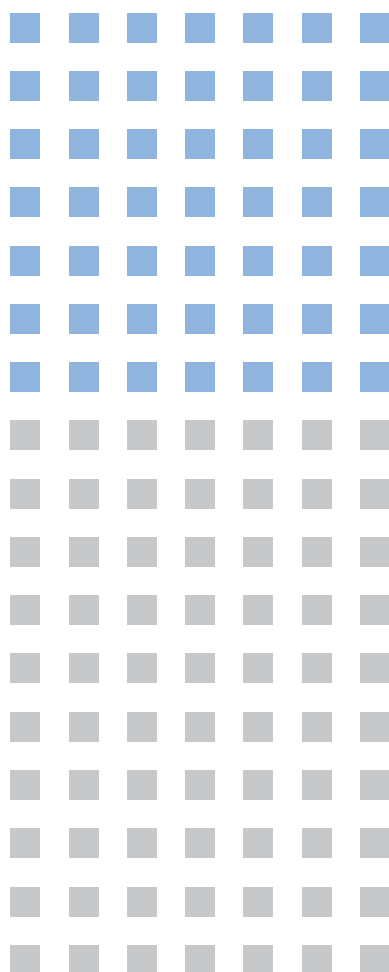


技 術 資 料

赤外線検出素子の 特性と使い方



はじめに

赤外線は、可視光とマイクロ波の間の $0.75\ \mu\text{m} \sim 1000\ \mu\text{m}$ の電磁波です。この広い領域をカバーするため多くの赤外線検出素子が開発されています。この小冊子では、浜松ホトニクスが製造販売している赤外線検出素子の特性と使い方について説明します。なお特注品にも対応いたしますので、お気軽にご用命ください。

目次

1. 赤外線	2
2. 赤外線検出素子の種類	7
3. 赤外線検出素子の選択	9
4. InGaAs/GaAs PINフォトダイオード	10
5. InGaAsリニアイメージセンサ	17
6. PbS/PbSe光導電素子	18
7. InSb光導電素子	22
8. InAs/InSb光起電力素子	23
9. MCT (HgCdTe)赤外線検出素子	25
10. 複合素子	28
11. フォンドラッグ検出素子	29
12. サーマパイル (Si熱型検出素子)	30
13. 赤外線検出素子の使い方	33
14. 応用例	37

1. 赤外線

赤外線は可視光より長い波長 0.75 μm (1.65 eV)から1000 μm (1.2 meV)までの電磁波をいいます。0.75 μm ~ 3 μmの波長を近赤外、3 μm ~ 6 μmの波長を中間赤外、6 μm ~ 15 μmの波長を遠赤外といい、それ以上を超遠赤外と呼ぶ場合もありますが、まだ定説とはなっていません。

赤外線は次のような特色を持った電磁波といえます。

(1) 人間の目に見えない。

この点はセキュリティの用途では有効ですが、測定や光学系の設定には不便なことです。

(2) エネルギーが小さい。

赤外線のエネルギーはちょうど分子の振動、回転エネルギーに相等します。この現象を利用して分子の検出同定が可能になります。

(3) 波長が長い。

赤外線は散乱しにくく、優れた透過率をもっています。

(4) すべての物質から放射されている。

1-1 赤外線の放射

絶対温度が0 K以上のすべての物体は、赤外線を放射しています。赤外線の放射量は物体の温度と表面状態によって決まります。

ここで、すべての波長の放射を吸収するような物体があると仮定します。このような物体を黒体 (black body) といいます。黒体については次のような法則が成り立ちます。

(1) 黒体の分光放射発散度 (プランクの放射則)

$$M\lambda = C_1\lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} [W/cm^2\mu m] \dots\dots\dots (1-1)$$

- T : 絶対温度 [K]
- C₁: 第1放射定数 = 3.74 × 10⁴ [Wμm⁴/cm²]
- C₂: 第2放射定数 = 1.44 × 10⁴ [μmK]
- λ : 波長 [μm]

(2) ステファン・ボルツマンの法則

$$M = \sigma T^4 [W/cm^2] \dots\dots\dots (1-2)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数 = 5.67 × 10⁻¹² [W/cm²K⁴]

(3) ウィーンの変位則

$$\lambda_{max} T = 2897.8 [\mu m K] \dots\dots\dots (1-3)$$

λ_{max}: 最大放射波長 [μm]

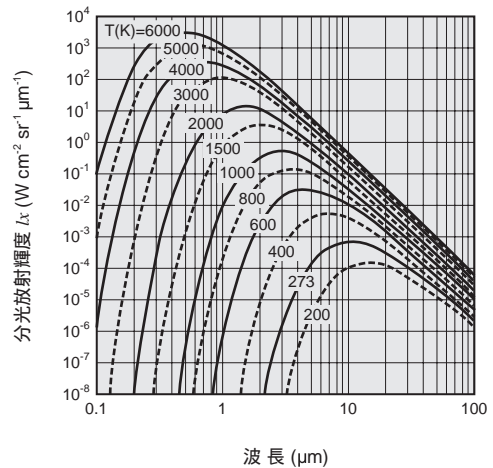
図1-1に黒体の分光放射輝度を示します。黒体でない物体については以下の関係が成り立ちます。

$$M' = \epsilon M \dots\dots\dots (1-4)$$

ε: 放射率

放射率 εは物体の表面状態によって異なります。また通常、波長や温度によっても異なります。放射率 εは吸収率に等しいため、反射率の大きい物質や透過率の大きい物質では放射率 εは小さくなります。詳しくは12-3の放射温度計の項を参照してください。

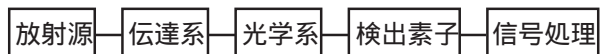
[図1-1] 黒体の分光放射輝度



KIRDB0014JB

1-2 赤外線の検出

赤外線を利用する分野は広く、新しい用途が次々に開拓されています。赤外線の検出系は、一般には下図のような構成になります。



放射源

前に述べたように、絶対温度0 K以上の物体はすべて赤外線を放射しています。たとえば、310 K (37 °C)の人体は10 μm付近にピーク波長をもつ赤外線を放射しています。放射源としては、黒体炉、タングステンランプ、シリコニットなどの発熱体が用いられます (表1-1)。また、特定波長の赤外線だけを放出する赤外線レーザーもあります (図1-2)。

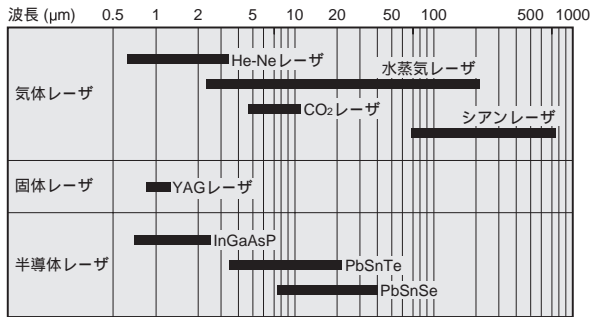
放射源について注意しなければならないのは、放射源以外に地上では300 Kの背景放射があることです。3 μm以上の測定系では、この背景放射のゆらぎによる雑音が無視できなくなります。この種の雑音を小さくするためには、コールドシールドやコールドフィルタを使用します。

赤外線検出素子

[表 1-1] 赤外線放射源の種類 ¹⁾

分類	方式	放射物質	放射源例	放射波長域 (μm)	備考
温度放射	通电による抵抗発熱利用	タングステン	赤外線電球	1 ~ 2.5	外管バルブ (ガラス)で長波長側が遮断される。外管バルブからの2次放射あり。
		ニクロム カンタル	電熱器 ヒータ	2 ~ 5	
		炭化けい素 (シリコニット)	グローバ	1 ~ 50	一定電圧、大電流
		セラミック	ネルンストグローア	1 ~ 50	通电初期予熱が必要
	他の電源による2次加熱利用	金属 (ステンレスなど)	シーズヒータ	4 ~ 10	
		セラミック	IRS形ランプ ラジアントバーナ	4 ~ 25 1 ~ 20	ガス燃焼による加熱
放電による加熱利用	カーボン	カーボンアーク灯	2 ~ 25	すす発生などの環境問題あり	
冷放射	気体放電利用	水銀 セシウム キセノン	水銀ランプ キセノンランプ	0.8 ~ 2.5	外管バルブで長波長側が遮断される。外管バルブからの2次放射あり。
誘導放出	レーザ作用	二酸化炭素	CO ₂ レーザ	9 ~ 11	
		ガリウム砒素化合物	InGaAsPレーザ	1.1 ~ 1.5	
		鉛化合物	PbSnTeレーザ	6 ~ 17	

[図 1-2] 主な赤外線レーザの発振波長域

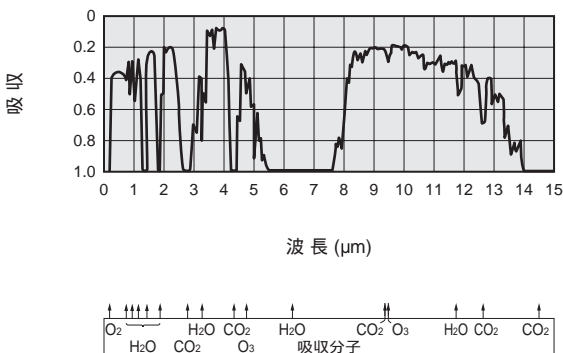


KIRDB0123JA

伝達系

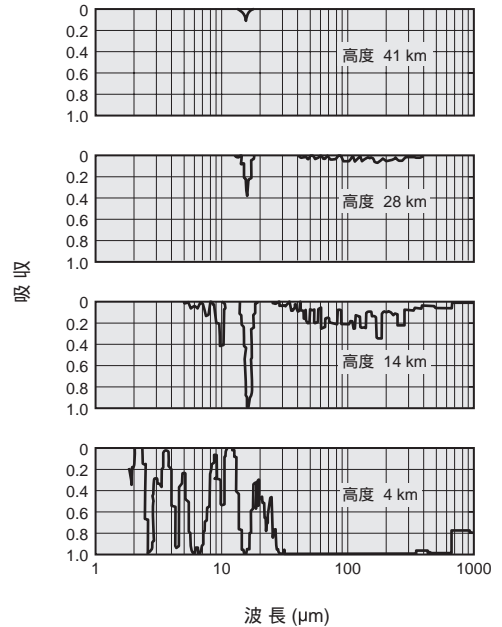
伝達系としては真空、大気、光ファイバが考えられます。大気では、H₂O、CO₂などによって特定波長に吸収があります (図1-3)。吸収の少ない3~5 μm帯、8~12 μm帯は大気の窓と呼ばれリモートセンシングに使われています。また、光ファイバのうち石英系の光ファイバは減衰率がほぼ理論値まで達していますが (図1-5)、その他の赤外線ファイバは現在も改良が進められています。

[図 1-3] 海面上での大気の吸収 ²⁾



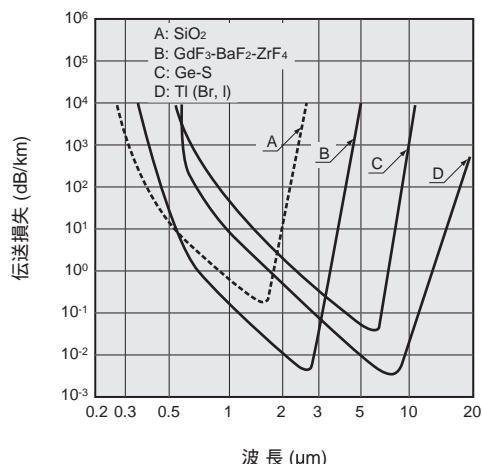
KIRDB0124JA

[図 1-4] 高い点での大気の吸収 ³⁾



KIRDB0125JA

[図1-5] 光ファイバの理論伝送損失⁴⁾



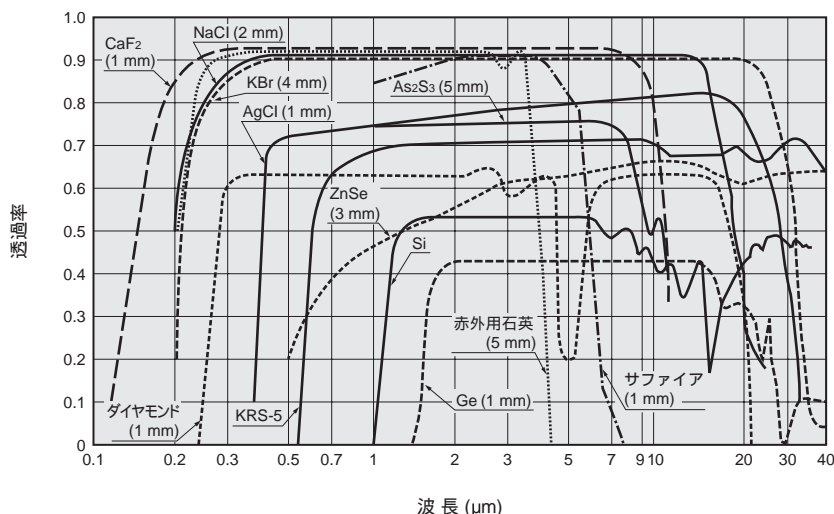
KIRDB0126JA

光学系

赤外線の集光用としては、波長によって石英、CaF₂、Ge、ZnSeあるいはポリエチレンのフレネルなどのレンズ、さらにAl、Auなどのミラーが使われます。図1-6は、主な赤外線用光学系の透過率を示したものです。また、特定波長だけを利用するためのバンドパスフィルタや赤外線をON-OFFするためのチョッパなどが必要な場合もあります。

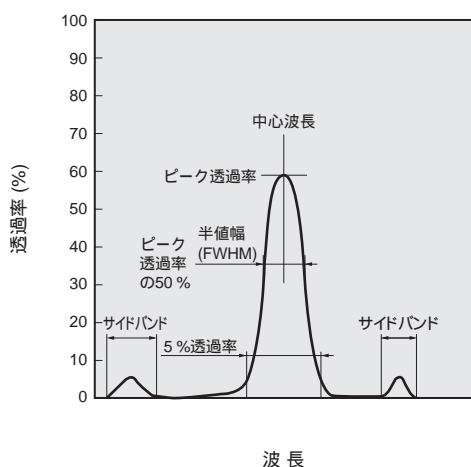
バンドパスフィルタを設計するときには、中心波長、半値幅 (FWHM)、5%透過率幅のほか、サイドバンド、すなわち使用する波長以外での2次の透過波長、および通常ブロッキングといわれる使用波長以外での透過率も考慮する必要があります (図1-7参照)。これらの特性は、使用する温度や入射する光の角度によって変化します。

[図1-6] 各種光学系の透過率



KIRDB0127JB

[図1-7] バンドパスフィルタの透過特性例



KIRDB0128JB

検出素子

検出素子には波長依存性のない熱型と波長依存性のある量子型があります。赤外線のもつエネルギーは次式で表されます。

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \text{ [eV]} \dots\dots\dots (1-5)$$

h: プランク定数
 = 6.626 × 10⁻³⁴ [J · s] = 4.14 × 10⁻¹⁵ [eV · s]
 c: 光速 = 3 × 10¹⁰ [cm/s]
 λ: 波長 [μm]

赤外線は、1 μmで1.24 eV、10 μmで0.12 eVと紫外線や可視光に比べエネルギーが小さいので、検出効率を上げるためには検出素子を冷却する必要があります。検出素子の性能を示すものに受光感度、NEP、D*があります。

(1) 受光感度

受光感度は雑音を考慮しないときの1 W当たりの出力電圧(または出力電流)です。

$$R = \frac{S}{PA} \quad [V/W] \quad \dots\dots (1-6)$$

S: 信号出力 [V]
P: 入射エネルギー [W/cm²]
A: 検出素子の受光面積 [cm²]

光起電力素子の場合、一般的に信号は光電流として取り出すため、受光感度の単位はA/Wです。ある特定の波長の光が入射した場合、光電流 I_{sc}は次式のように表されます。

$$I_{sc} = \eta q \frac{PA}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{\eta q PA \lambda}{hc} \quad \dots\dots (1-7)$$

q: 電子の電荷
η: 量子効率

したがって受光感度 R_λは、以下の式で表されます。

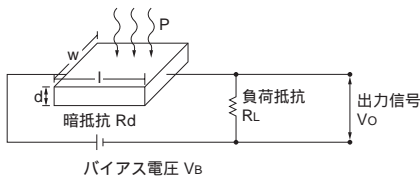
$$R_{\lambda} = \frac{I_{sc}}{PA} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \quad \dots\dots (1-8)$$

量子効率 ηとR_λは次のような関係になります。

$$\eta = 1.24 \frac{R_{\lambda}}{\lambda} \quad \dots\dots (1-9)$$

一方、光導電素子の場合、図1-8のような回路で電圧として信号を取り出すため受光感度の単位はV/Wです。

[図1-8] 光導電素子の出力信号測定回路



KIRDC0028JA

出力電圧 V_oは以下の式で表されます。

$$V_o = \frac{R_L}{R_d + R_L} \cdot V_B \quad \dots\dots (1-10)$$

光が入射したときR_dの変化 ΔR_dによるV_oの変化は

$$\Delta V_o = - \frac{R_L V_B}{(R_d + R_L)^2} \cdot \Delta R_d \quad \dots\dots (1-11)$$

となります。またΔR_dは以下の式で表されます。

$$\Delta R_d = - R_d \frac{q (\mu_e + \mu_h)}{\sigma} - \frac{\eta \tau \lambda PA}{l w d h c} \quad \dots\dots (1-12)$$

τ: キャリアの寿命
μ_e: 電子の移動度
μ_h: 正孔の移動度
σ: 電気伝導度

そのため、受光感度は以下の式で表されます。

$$R_{\lambda} = \frac{\Delta V_o}{PA} = \frac{q \eta \tau \lambda (\mu_e + \mu_h)}{\sigma l w d h c} - \frac{R_L R_d V_B}{(R_d + R_L)^2} \quad \dots\dots (1-13)$$

ただし、R_d、μ_e、μ_h、τ、σはそれぞれが関連づけられた変数のため、この式を用いて量子効率を求めるケースはほとんどありません。

(2) 雑音等価電力 (NEP: Noise Equivalent Power)

雑音量に等しい入射光量、つまり信号対雑音 (S/N)が1となる時の入射光量で示します。

$$NEP = \frac{PA}{S/N \cdot \sqrt{\Delta f}} \quad [W/Hz^{1/2}] \quad \dots\dots (1-14)$$

N: ノイズ出力 [V]
Δf: 雑音帯域幅 [Hz]

(3) 比検出能力 D* (ディ・スター)

D*は1 Wの光入力があったときの、検出素子の交流的なS/Nがどれだけあるかを示します。検出素子の面積によらずに材料の特性そのものを比べられるように検出素子面積1 cm²、雑音帯域 1 Hzで規格化されています。D*の表示は一般にD* (A, B, C)のように表し、Aは光源の温度 [K]または波長 [μm]、Bはチョッピング周波数 [Hz]、Cは雑音帯域幅 [Hz]を意味します。単位はcm · Hz^{1/2}/Wで、D*が高いほど、よい検出素子といえます。

なおD*は以下の式から求められます。

$$D^* = \frac{S/N \cdot \Delta f^{\frac{1}{2}}}{P \cdot A^{\frac{1}{2}}} \quad \dots\dots (1-15)$$

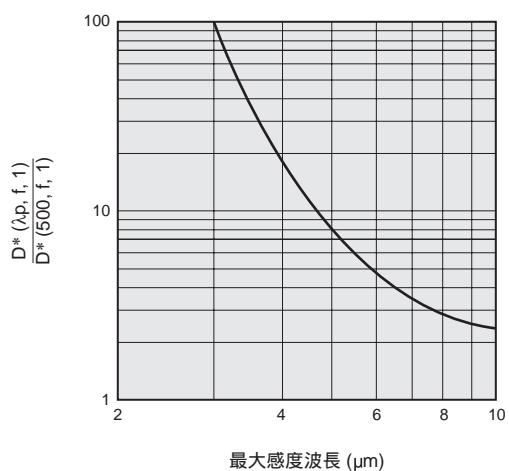
Sは信号、Nは雑音、Pは入射エネルギー [W/cm²]、Aは受光面積 [cm²]、fは雑音帯域幅 [Hz]を表します。また、D*とNEPの間には以下の関係が成り立ちます。

$$D^* = \frac{A^{\frac{1}{2}}}{NEP} \quad \dots\dots (1-16)$$

検出素子の選択に際しては、検出感度のほか、使用波長、応答特性、冷却方法、素子面積、形状、素子数(単素子、または1次元、2次元アレイなど)を考慮する必要があります。

■ 検出素子のD*と最大感度波長との関係

赤外線検出素子の特性を測定する場合、放射源として500 K黒体がよく用いられます。この500 K黒体を放射源としたD* (500, f, 1)と検出素子の最大感度波長におけるD* (λ_p, f, 1)との間には図1-9に示すような関係がほぼ成り立ちます。

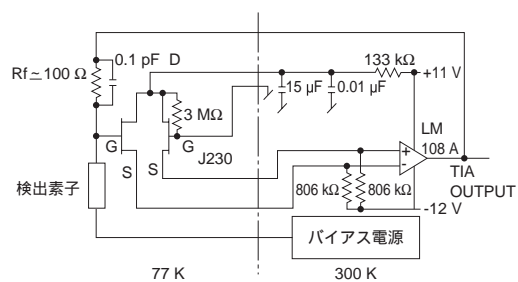
[図1-9] D^* - 最大感度波長

KIRDB0129JA

信号処理

通常は検出素子からの信号出力は極めて小さいため、増幅する必要があります。前置増幅器の設計にあたっては検出器とのインピーダンス整合、低雑音、帯域に留意する必要があります。入射光がチョッパなどによって変調されている場合には、同調増幅器を使用することが有効です。また検出素子が冷却されている場合には、増幅器の冷却も有効です。図1-10はInSb光起電力素子を使った微弱光測定用回路の例です。

[図1-10] 信号処理回路例



KIRDC0029JA

1-3 赤外線的应用

赤外線は工業、農業、医学、理化学、天文学、通信、宇宙からのリモートセンシングなどに広く利用されています。浜松ホトニクス
の赤外線検出素子は表1-2のような分野で使用されています。なお、応用例については、「14. 応用例」でも紹介しています。

[表1-2] 浜松ホトニクスの赤外線検出素子の主な用途

用途	検出素子	InGaAs	PbS	PbSe	InAs	InSb	MCT	複合素子
放射温度計		G8376-03	P9217シリーズ		P7163 P10090シリーズ	P6606シリーズ	P3981	K1713 シリーズ
HMD (ホットメタルディテクタ)		G8376-03	P9217シリーズ					
フレームモニタ			P9217シリーズ					K1713-01
炎検出器								K1713-02
水分計		G8372-01 G8373-01	P2532-01 P2682-01 P9217シリーズ					
ガス分析計		G8371-01 G8372-01 G8373-01		P9696シリーズ P2038-03 P2680-03	P10090 シリーズ	P5968シリーズ P6606シリーズ	P2750 P3981	
分光光度計		G8373-01 G9211-256S G9212-512S G9213-256S G9214-512S G9208-256W	P2532-01 P2682-01		P7163 P10090 シリーズ	P4247-16 P5968シリーズ	P3257シリーズ P4249-08 P5274 P5274-01	K1713-05 K1713-09
膜厚計				P9696シリーズ P2038-03			P3257シリーズ P3981	
レーザモニタ		G8376シリーズ G8941シリーズ			P10090 シリーズ		P3257-30 P3257-31	K1713-05 K3413-05
光パワーメータ		G8370-02 G8370-03 G8370-05						
レーザダイオード 寿命試験器		G8370-01						
O/E変換器		G8736-03 G6854-01						
FTIR					P10090 シリーズ	P5968 シリーズ	P3257シリーズ P2748-40 P2748-41 P2748-42 P5274 P5274-01	
赤外線映像装置 (サーマルイメージング)						P4247-44 P5968シリーズ	P2750 P3257シリーズ P4249-08	
リモートセンシング						P5968 シリーズ	P3257シリーズ	
人体検知								

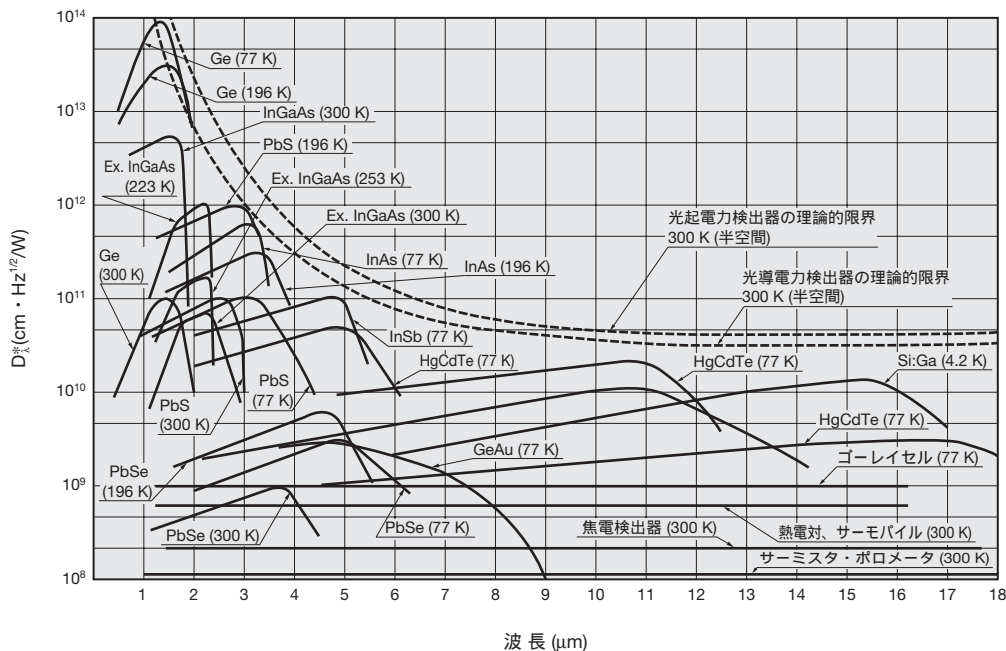
2. 赤外線検出素子の種類

赤外線検出素子を大きく分けると、熱型と量子型に分類できます。熱型検出素子は、赤外線のエネルギーを熱として利用する検出素子です。熱型検出素子は感度に波長依存性がなく、冷却を必要としません。しかし、応答速度が遅く、検出能力はあまり良くありません。また量子型検出素子は、検出能力が高く応答速度が速い反面、感度に波長依存性があり、近赤外域の検出素子を除いて一般に冷却して使用しなければなりません。

[表2-1] 赤外線検出素子の分類と特性

分類		検出器	波長範囲 (μm)	動作温度 (K)	D* (cm · Hz ^{1/2} /W)	
熱型検出素子	サーモカップル・サーモパイル ボロメータ ニューマチックセル 焦電素子	ゴーレイセル、コンデンサマイクロホン PZT, TGS, LiTaO ₃	窓材による	300	D* (λ, 10, 1) = 6 × 10 ⁸	
				300	D* (λ, 10, 1) = 1 × 10 ⁸	
				300	D* (λ, 10, 1) = 1 × 10 ⁹	
				300	D* (λ, 10, 1) = 2 × 10 ⁸	
量子型検出素子	真性型検出素子	光導電型	PbS	1~3.6	300	D* (500, 600, 1) = 1 × 10 ⁹
			PbSe	1.5~5.8	300	D* (500, 600, 1) = 1 × 10 ⁸
			InSb	2~6	213	D* (500, 1200, 1) = 2 × 10 ⁹
			HgCdTe	2~16	77	D* (500, 1000, 1) = 2 × 10 ¹⁰
	不純物型検出素子	光起電力型	Ge	0.8~1.8	300	D* (λp) = 1 × 10 ¹¹
			InGaAs	0.7~1.7	300	D* (λp) = 5 × 10 ¹²
			Ex. InGaAs	1.2~2.55	253	D* (λp) = 2 × 10 ¹¹
			InAs	1~3.1	77	D* (500, 1200, 1) = 1 × 10 ¹⁰
			InSb	1~5.5	77	D* (500, 1200, 1) = 2 × 10 ¹⁰
			HgCdTe	2~16	77	D* (500, 1000, 1) = 1 × 10 ¹⁰
不純物型検出素子		Ge: Au	1~10	77	D* (500, 900, 1) = 1 × 10 ¹¹	
		Ge: Hg	2~14	4.2	D* (500, 900, 1) = 8 × 10 ⁹	
		Ge: Cu	2~30	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹	
		Ge: Zn	2~40	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹	
		Si: Ga	1~17	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹	
		Si: As	1~23	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹	

[図2-1] 赤外線検出素子の分光感度特性



KIRDB0079JB

D*の理論的境界

赤外線を検出するときのノイズには赤外線検出素子自体からのノイズ、回路からのノイズのほか、背景光のゆらぎによるノイズがあります。赤外線検出素子および回路から発生するノイズが背景光のゆらぎによるノイズに比べて無視できると仮定した場合には、検出限界は背景光のゆらぎによるノイズのみによって決まります。これをBackground Limited Infrared Photodetection (BLIP)と称します。BLIPにおける光起電力素子または光導電素子のD*は、それぞれ次式で表されます。

$$\text{光起電力素子の } D_{\lambda}^* = \frac{\lambda\sqrt{\eta}}{hc\sqrt{2Q}} \quad [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}] \quad \dots\dots (2-1)$$

$$\text{光導電素子の } D_{\lambda}^* = \frac{\lambda\sqrt{\eta}}{2hc\sqrt{2Q}} \quad [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}] \quad \dots\dots (2-2)$$

- λ: 波長
- η: 量子効率
- h: プランク定数
- c: 光速度
- Q: 背景放射光子束

図2-1の点線は、FOV=180°、300 K背景における検出器の理論的境界 (BLIP)の値を示します。

3. 赤外線検出素子の選択

浜松ホトニクスは、約100種類の赤外線検出素子を製造・販売しております。これらの赤外線検出素子の中から、目的に合った品種を選ぶために、以下の項目について考慮してください。

使用する波長範囲または被測定物温度

図2-1の分光感度特性や表3-1の測温限界の表から用途に適した赤外線検出素子を選べます。

[表3-1] 測温限界 (目安)と検出素子

測温限界	検出素子
600 °C	Si
200 °C	InGaAs
100 °C	PbS
50 °C	PbSe
0 °C	InSb
-50 °C	MCT

感度、S/N

光信号の強さや必要とする情報の種類によって、赤外線検出素子に要求される感度とS/Nが異なります。赤外線検出素子の選択にはNEPとD*の値が目安になります。また、S/Nを良くするためには検出素子を冷却する必要も出てきますが、冷却する方法としては電子冷却素子による方法とドライアイスや液体窒素などの寒剤を使う方法、スターリング冷却などの機械式冷却機を使う方法があります。冷却する方法については29ページを参照してください。図2-1でわかるように、冷却することによって分光感度特性が変化します。PbS、PbSe、MCT光導電素子では長波長側に、InGaAs PINフォトダイオード、InAs、InSb光起電力素子では短波長側に分光感度がシフトします。また、PbS、PbSe光導電素子では冷却することによって応答速度が遅くなりますので注意が必要です。先にも述べましたが、感度は主に次の3つの特性で評価できます。

(1) 受光感度

入射光量 1 W時の光電変換 (電圧または電流)の大きさを示すもので、光導電素子の場合の単位はV/Wで、光起電力素子はA/Wです。

(2) NEP (Noise Equivalent Power)

雑音量に等しい入射光量、つまり信号対雑音比 S/Nが1となる入射光量のことです。

(3) D* (ディ・スター: 比検出能力)

D*は1 Wの光入力があったときに、検出素子の交流的なS/Nがどれだけあるかを示します。単位はcm・Hz^{1/2}/Wで、D*が高いほど、よい検出素子といえます。

応答速度、チョッピング周波数

使用目的により要求される応答速度は異なります。たとえば光通信では1 GHzが、また侵入警報機では0.1 Hzの応答速度が求められています。目的にあった応答速度をもつ赤外線検出素子を選ぶ必要があります。

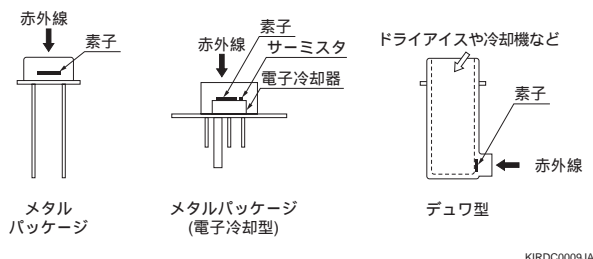
受光面サイズ、素子数

光学系や使い方によって受光面のサイズや形状、単素子または1次元・2次元アレイといった要求が出てきます。InGaAs PINフォトダイオード、PbS、PbSe光導電素子、InSb光起電力素子、MCT光導電素子は素子の形状、サイズ、素子数を比較的自由にすることができます。

外囲器 (パッケージ)

外囲器として、メタルパッケージ、セラミックパッケージ、DIP型、デュワ型 (ガラス、メタル) を用意しています。また用途によっては直線性、安定性、温度特性、価格なども選択のための重要な要素になります。

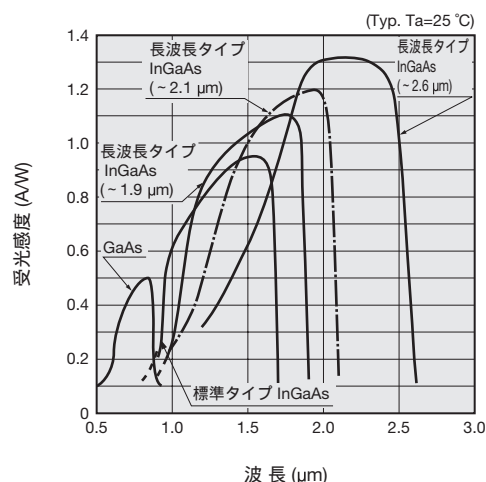
[図3-1] 外囲器



4. InGaAs/GaAs PINフォトダイオード

InGaAs/GaAs 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。

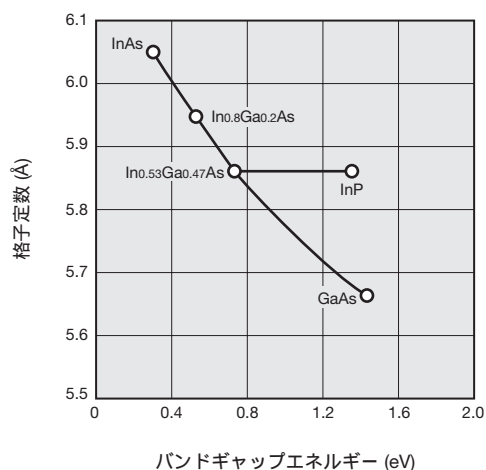
[図4-1] 分光感度特性 (InGaAs/GaAs PINフォトダイオード)



KIRDB0332JB

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より長い波長に対して感度をもっています。InGaAsは、InとGaの組成比によって図4-2のようにバンドギャップエネルギーの値が変わります。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の標準タイプのほかに、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4-2] In_{1-x}Ga_xAsの格子定数-バンドギャップエネルギー



KIRDB0130JA

4-1 特性

電流 - 電圧特性

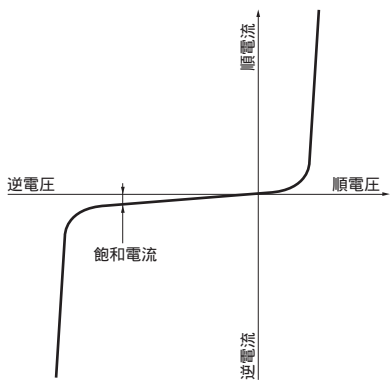
InGaAs/GaAs PINフォトダイオードに暗中で電圧を印加すると、図4-3 (a)のような電流 - 電圧特性が得られます。次にフォトダイオードへ光を入射すると、この曲線は図4-3 (b)のようになります。さらに光を強くすると、のようになります。ここでフォトダイオードの両端を開放しておくと順方向にVocの電圧が現れ、両端を短絡しておくと逆方向に短絡電流Iscが流れます。

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

図4-4 (b)は、オペアンプを使用した回路です。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(a)の回路よりも数けた小さくなるため、理想的な短絡電流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、Rfを必要に応じて切り替えます。

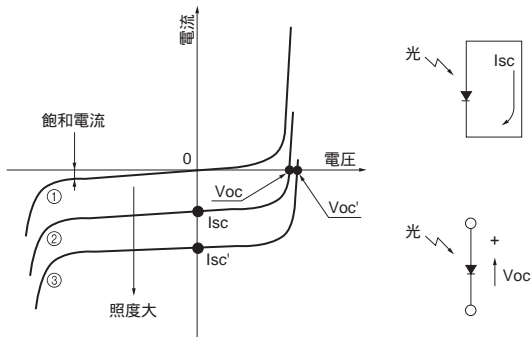
[図4-3] 電流 - 電圧特性

(a) 暗で



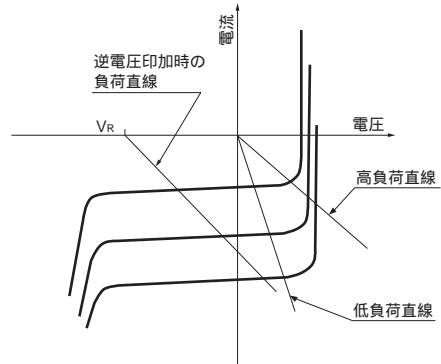
KIRDC0030JA

(b) 照射時



KPDC0005JA

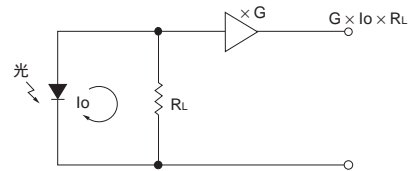
(c) 電流 - 電圧特性と負荷直線



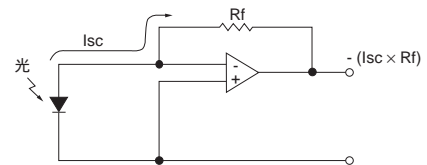
KPDC0003JA

[図4-4] 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



KPDC0006JB

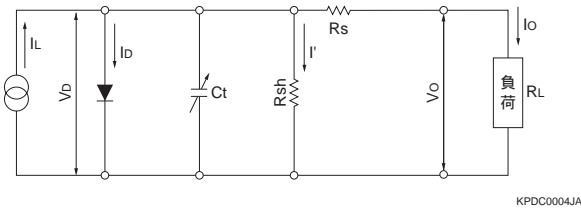
等価回路

InGaAs/GaAs PINフォトダイオードの等価回路を図4-5に示します。短絡電流Iscは、以下の式で表されます。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。

$$I_{sc} = I_L - I_s \left[\exp \frac{q(I_{sc} \times R_s)}{kT} - 1 \right] - \frac{I_{sc} \times R_s}{R_{sh}} \dots \dots (4-1)$$

- 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 : 電子の電荷
- 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4-5] 等価回路 (InGaAs/GaAs PINフォトダイオード)



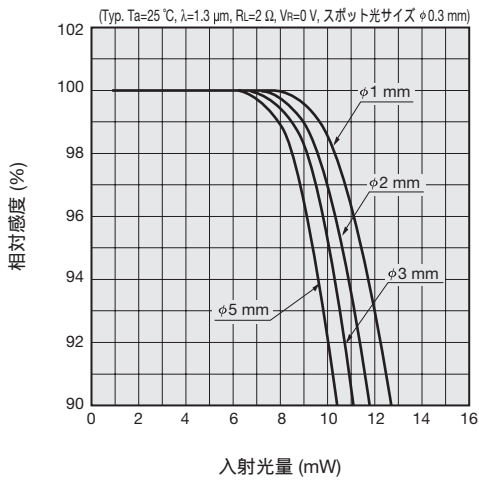
V_D : ダイオード両端の電圧
 I_D : ダイオード電流
 C_t : 端子間容量
 I' : 並列抵抗電流
 V_o : 出力電圧
 I_o : 出力電流

直線性

InGaAs/GaAs PINフォトダイオードの直線性は、下限は雑音で決まり上限は受光部の面積や電極構造で決まります。上限を伸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も印加すれば十分です。図4-7は逆電圧を印加する接続例です。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、一方で暗電流を増大させ雑音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。

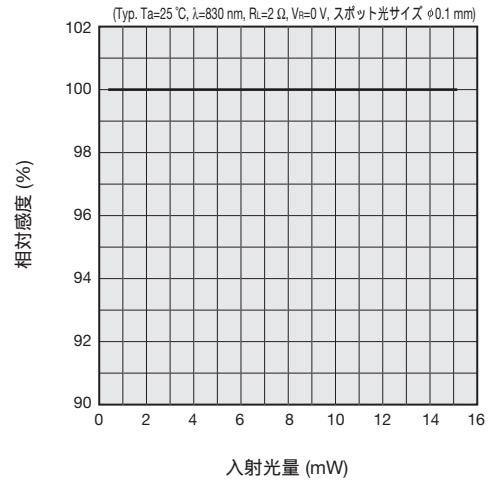
[図4-6] 直線性

(a) InGaAs PINフォトダイオード



KIRDB0333JA

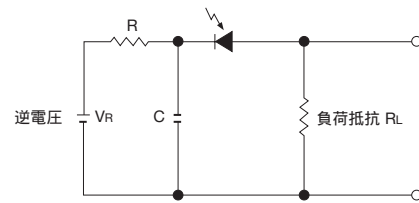
(b) GaAs PINフォトダイオード



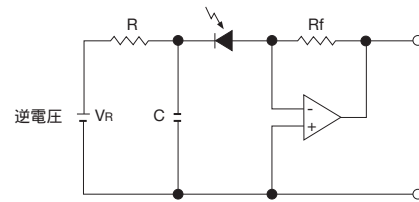
KIRDB0606JA

[図4-7] 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



KPDC0008JB

雑音特性

InGaAs/GaAs 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雑音特性で決まります。フォトダイオードの雑音電流 i_n は、並列抵抗 R_{sh} で近似できる抵抗体の熱雑音電流 (またはジョンソン雑音電流) i_j 、暗電流に起因するショット雑音電流 i_{sD} 、光電流に起因するショット雑音電流 i_{sL} の和で表せます。

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_{sD}^2 + i_{sL}^2} \text{ [A]} \dots\dots (4-2)$$

図4-4のように逆電圧を印加しない場合、 i_j は次のようになります。

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

k : ボルツマン定数
 T : 素子の絶対温度
 B : 雑音帯幅

赤外線検出素子

図4-7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} は次のようになります。

$$i_{sD} = \sqrt{2qI_D B} \text{ [A]} \dots\dots (4-4)$$

q: 電子の電荷
 I_D : 暗電流
 B: 雑音帯域幅

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、雑音電流は光電流に起因するショット雑音電流が支配的となり、以下の式で表されます。

$$i_n \approx i_{sL} = \sqrt{2qI_L B} \text{ [A]} \dots\dots (4-5)$$

これらの雑音の大きさは、測定帯域帯 (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、(3)式または(4)式の雑音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。

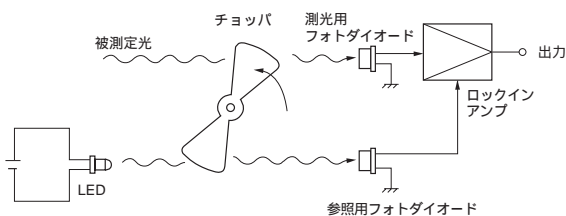
$$NEP = \frac{i_n}{S} \text{ [W/Hz}^{1/2}] \dots\dots (4-6)$$

i_n : 雑音電流
 S: 受光感度

図4-7 (b)の回路構成の場合、前述したフォトダイオードの雑音に加え、オペアンプおよび R_f の雑音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、フォトダイオード容量 (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があります。光検出限界は、増幅器の温度ドリフトや低周波数領域のフリッカ雑音、後述するゲインピーキングなどの影響も含め、(6)式の 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、不要な帯域の雑音を除去できるため、検出限界をさらに NEPへ近づけることができます(図4-8)。

[図4-8] 同期測定法



KPDC0004JA

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カットオフ波長が1.7 μm の標準タイプと長波長タイプの2種類に大別されます。

フォトダイオードのカットオフ波長 (λ_c)は、そのバンドギャップエネルギー (E_g)により次式で表されます。

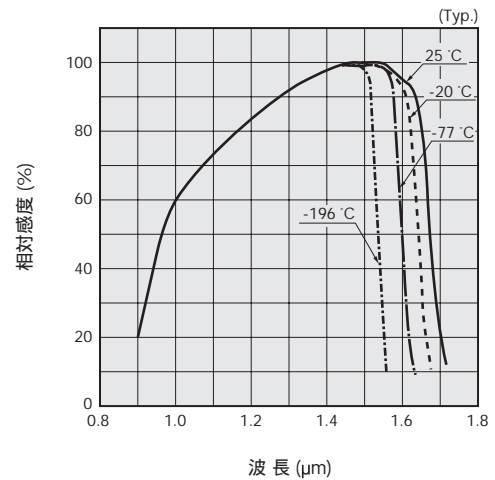
$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \text{ [\mu m]} \dots\dots (4-7)$$

標準タイプの 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延ばしています。

InGaAs PINフォトダイオードの感度波長範囲は素子の温度を下げることにより短波長側にシフトしますが、雑音量が減少するため D^* は図4-10のように大きくなります。

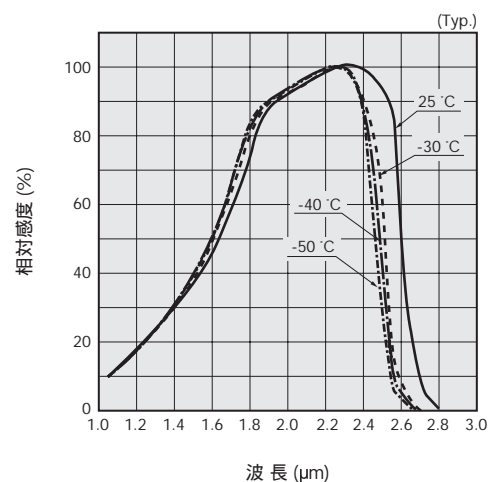
[図4-9] 分光感度特性

(a) InGaAs PINフォトダイオード (標準タイプ)



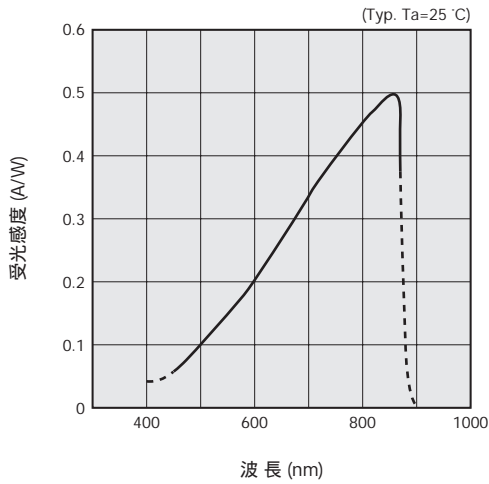
KIRDB0132JA

(b) InGaAs PINフォトダイオード [長波長タイプ (~2.6 μm)]



KIRDB0133JA

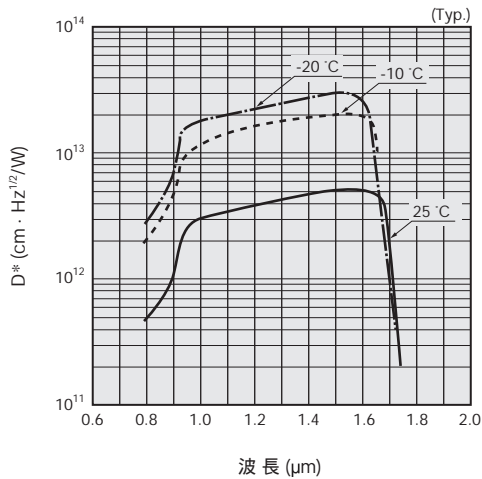
(c) GaAs PINフォトダイオード



KGPD0044JA

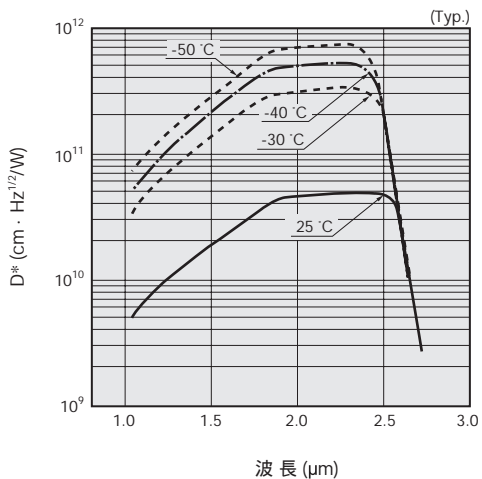
[図4-10] D* - 波長 (InGaAs PINフォトダイオード)

(a) 標準タイプ



KIRDB0134JA

(b) 長波長タイプ



KIRDB0135JA

応答特性

応答特性とは、生成したキャリアをどれだけ早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 (tr)または遮断周波数 (fc)で表します。

上昇時間は、出力信号がピーク値の10%から90%に立ち上がる時間で、以下の式で表されます。

$$tr = 2.2Ct(RL + Rs) \dots\dots (4-8)$$

通常 $RL \gg Rs$ となるため、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動かすことができません。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。

$$Ct \propto \frac{A}{\sqrt{VR}} \dots\dots (4-9)$$

したがって、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ることになります。

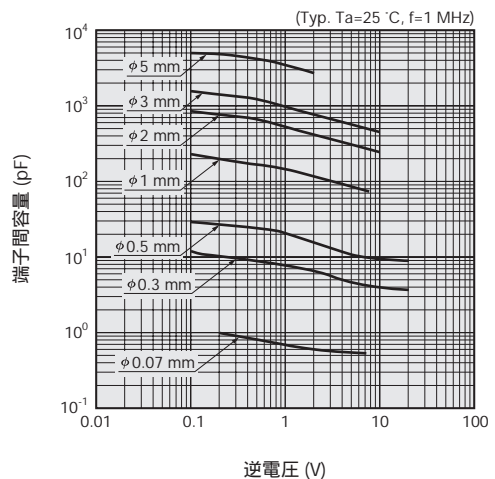
また、PN接合部以外に吸収された光によって生成した電荷が拡散によって電極に達するまで、数μs以上かかる場合があります。Ct × RL時定数が小さい場合は、この拡散時間によって応答速度が決定されます。高速応答を必要とする場合には、受光部以外に光を照射しないように注意してください。

上昇時間 tr [s]と遮断周波数 fc [Hz]との間には、以下の関係があります。

$$tr = \frac{0.35}{fc} \dots\dots (4-10)$$

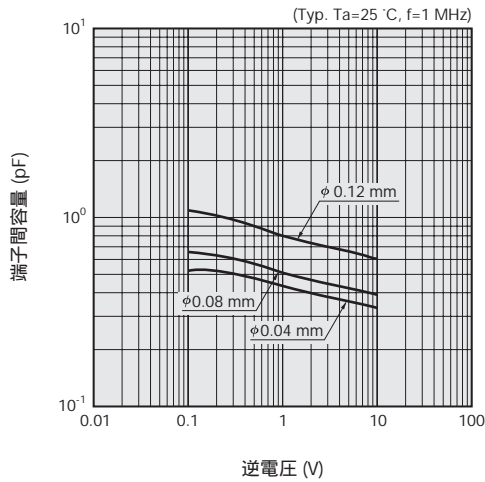
[図4-11] 端子間容量 - 逆電圧

(a) InGaAs PINフォトダイオード (標準タイプ)



KIRDB0331JB

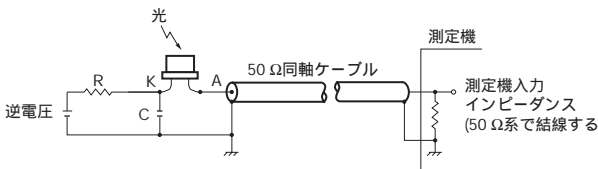
(b) GaAs PINフォトダイオード



KGPDB0059JA

図4-12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4-7 (a)の具体的な接続例で、負荷抵抗は50 Ωになっています。セラミックコンデンサ C は、逆電圧電源の内部抵抗を小さくするためのものです。抵抗 Rはフォトダイオードの保護用で、最大光電流による電圧降下は逆電圧より十分小さい範囲で選定します。なお、フォトダイオードとコンデンサのリード線、同軸ケーブルの芯線など高速パルスが通る経路は、極力短く配線する必要があります。

[図4-12] 高速光検出回路 (InGaAs PINフォトダイオード)



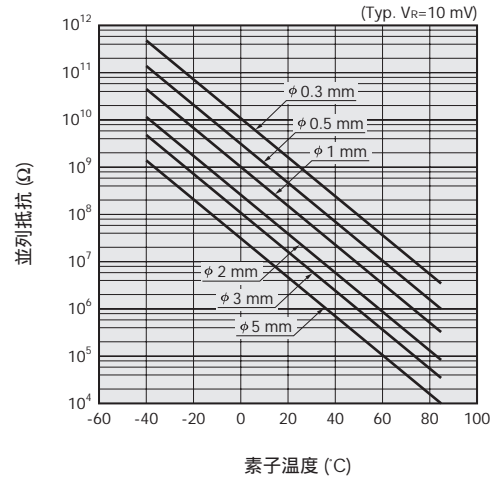
KPDC0009JA

温度特性

「分光感度特性」で述べたように、検出素子の温度が変わることによって分光感度特性も変化します。InGaAs PINフォトダイオードの並列抵抗の温度特性を図4-13に示します。素子温度を下げることによって並列抵抗 (R_{sh})は大きくなるため、S/Nはよくなります。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。使用方法は、「13-1 冷却方法」を参照してください。

[図4-13] 並列抵抗 - 素子温度

[InGaAs PINフォトダイオード (標準タイプ)]



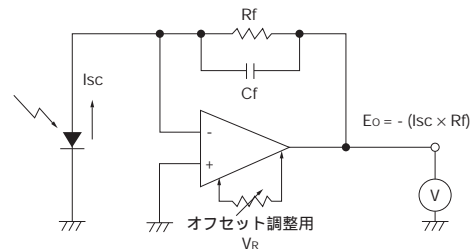
KIRDB0330JA

4-2 使い方

オペアンプとの接続

図4-14に基本接続図を示します。図4-14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 をオープンゲインで割った値であるため非常に小さくなり、短絡電流 I_{sc} の値に近くなります。そのため優れた直線性が得られます。

[図4-14] 基本接続図



KIRDC0040JB

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

図4-14では、短絡電流 I_{sc} は $I_{sc} \times R_f$ の電圧に変換されます。帰還抵抗 R_f は、 I_{sc} と必要な出力電圧 V_o とで決まります。 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 はダンピング容量とも呼ばれ、主に発振防止用で、数pFあれば十分です。

この帰還回路は、 $C_f \times R_f$ の時定数をも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値を選ぶ必要があります。また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変換抵抗

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。

(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。
これにより、検出電流の大きさによっては誤差が生じます。

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、バイポーラ型は数百pA～数百nA程度で
す。

FET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逆に
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。
なお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。

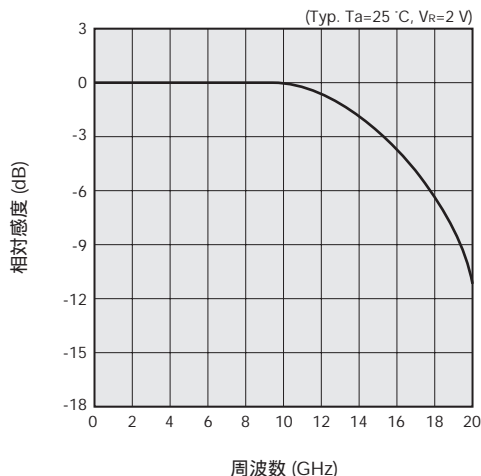
4-3 開発動向

InGaAs/GaAs PINフォトダイオードには、今後さまざまな
分野に合わせてカスタマイズされた要求が出てくることが
予想されます。特に光通信は、今後も最も大きな市場とし
て注目されます。どの分野においても、高速化・集積化・
多機能化・低価格化は共通のキーワードになります。

(1) 高速化

高速応答の受光素子として、低価格の10 Gbpsおよび40
Gbpsのフォトダイオードの商品化が求められています。こ
の場合、システム自体が高価になったのでは意味がなく、
低消費電力化やアセンブリの簡易化も同時に要求されま
す。そのため、フォトダイオードは低逆電圧下での高速動
作とMEMSとの融合が必要となります。現在、低逆電圧駆
動10 Gbps用 InGaAs PINフォトダイオードが商品化され、
VR=2 Vで10 Gbpsが実現しています。

[図4-15] 周波数特性 (10 Gbps InGaAs PINフォトダイオード)



KIRDB0329JA

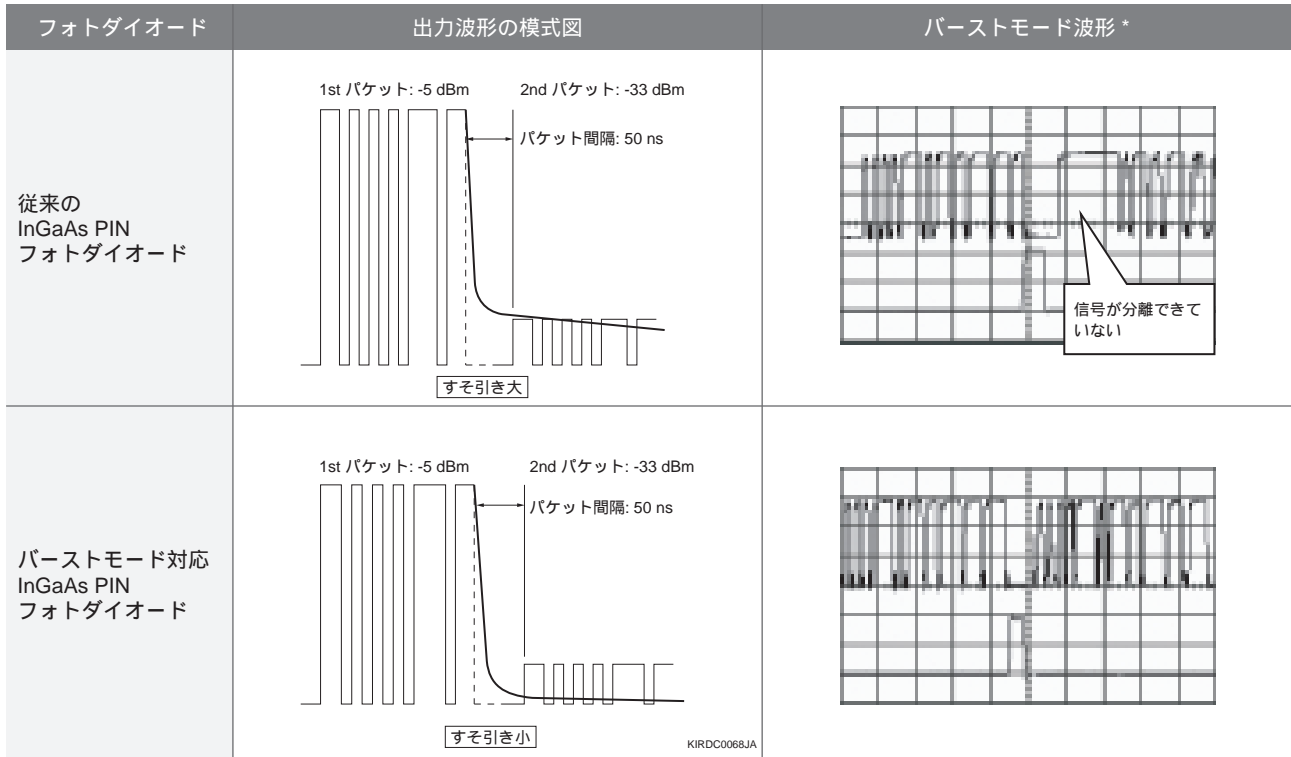
(2) パーストモード対応

近年 FTTH (Fiber To The Home)の普及が進んでいます。
FTTHでは、PON (Passive Optical Network)方式が採用される
場合が多くなっています。この方式のメリットとしては、1
本のファイバを共有する経済性があげられます。中継局か
ら家庭に配信される (下り)波長は1.48 ~ 1.56 μmが使用され
る場合が多く、家庭から中継局へ (上り)は1.3 μmが使用さ
れる場合が多くなっています。中継局 (上り)の受け側
(OLT: Optical Line Termination)では、強度の異なる複数の信
号の流入を正確に受信できるフォトダイオードが求められ
ます。これを可能にするため、パーストモード対応のすそ
引きが小さいフォトダイオードが必要となります。図4-16
では、遮断周波数 7 GHz (VR=2 V)でパーストモード対応の
InGaAs PINフォトダイオード (φ0.07 mm)の出力波形を示し
ます。

(3) C/Lバンド対応

DWDMが普及し、より多くの情報量を要求されればC/L
バンドが積極的に利用されてきます。光通信の受光用・監
視用として使用されるフォトダイオードは、C/Lバンドに対
応する必要があります。図4-17にC/Lバンド対応InGaAs PIN
フォトダイオードの分光感度特性を示します。

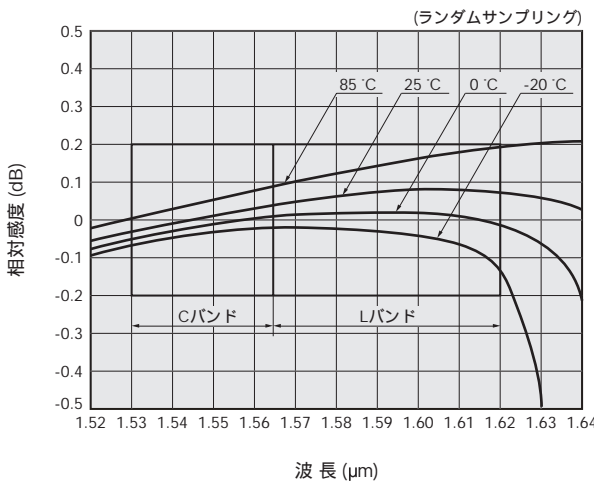
[図4-16] 出力波形の立ち下がり



* 当社評価回路を使用 (プリアンプ後、信号をデジタル処理)
VR=1.5 V、結合効率70%の状態にて測定

[図4-17] 分光感度特性

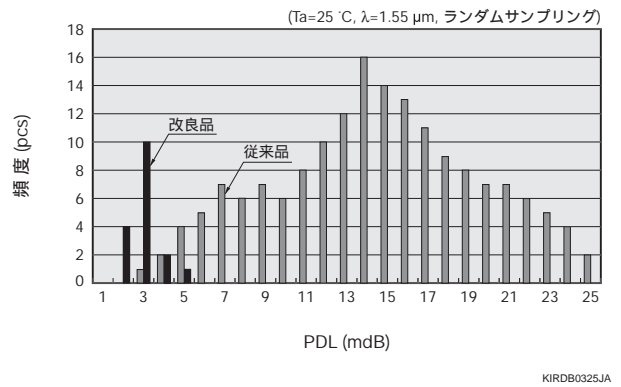
(C/Lバンド対応InGaAs PINフォトダイオード)



(4) 低偏波依存性

光学素子の偏波依存性の改善が進み、より高精度な光通信測定器が必要とされています。フォトダイオードにも偏波依存性に対して改善が要求されています。図4-18に偏波依存性を改良したInGaAs PINフォトダイオードのPDL (Polarization Dependence Loss)のパラツキを示します。

[図4-18] PDL分布例 (InGaAs PINフォトダイオード)



(5) 2次元センサ

フォトダイオードの特性の改善は、光通信の発展により牽引されてきました。また、地球観測や宇宙観測への応用による技術向上も大きく貢献してきました。人工衛星や探査機では2次元画像処理を行うことが多く、2次元センサが要求されます。現在、2次元フォトダイオードアレイとASICをバンプによる結合でハイブリッド化した異種接合2次元センサの開発が進められています。この2次元センサの開発において、高速化・集積化・多機能化など多くの分野で応用できる技術が開発されるものと思われます。

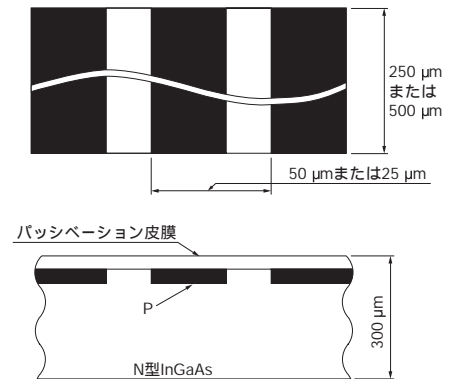
5. InGaAsリニアイメージセンサ

InGaAsリニアイメージセンサは、主にマルチチャンネル近赤外分光光度計用検知器として設計された自己走査型フォトダイオードアレイです。広い受光面積、高い量子効率、低暗電流と電荷蓄積時間の自由度から得られる広いダイナミックレンジ、優れた出力直線性とユニフォミティ、低消費電力などマルチチャンネル分光光度計に要求される数々の特長を備えています。受光窓はサファイア窓を使用しています。なお分光光度計のみならずイメージリードアウトシステム全般に使用することができます。

InGaAsリニアイメージセンサの特長

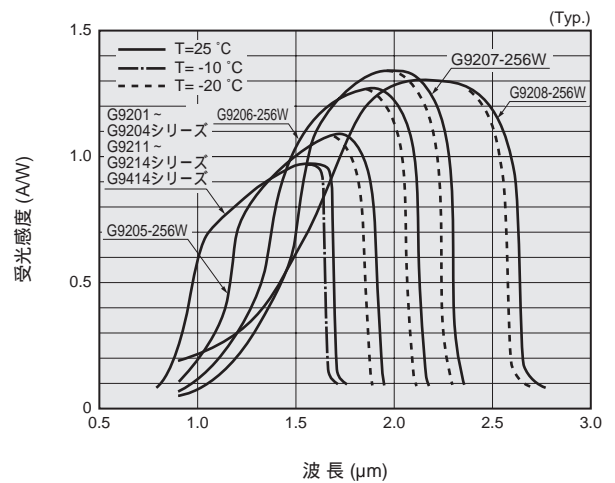
- ・ InGaAsからなる受光部が単なる電流源としてのみ扱われる電荷積分方式を採用しています。これにより、受光部のInGaAsフォトダイオードは低バイアス駆動が可能となり、イメージセンサとして非常に優れた特性を実現します。
- ・ 感度波長範囲0.9 ~ 1.67 μm 、0.9 ~ 2.55 μm のタイプを用意しています。
- ・ 安定した製造プロセスで InGaAs受光部が製作されているため、非常に小さな暗電流値が実現され、長時間露光が可能となり、微弱な光まで検出できます。
- ・ 電子冷却素子を内蔵しており、素子温度の制御および冷却が簡単に行えます。

[図5-1] InGaAsリニアイメージセンサ受光部 / 断面図



KIRDC0032JA

[図5-2] 分光感度特性



KMIRB0033JC

[表5-1] InGaAsリニアイメージセンサの主なラインアップ

項目	G9211-256S	G9212-512S	G9213-256S	G9214-512S	G9208-256W	単位
感度波長範囲	0.9 ~ 1.67				0.9 ~ 2.55	μm
冷却	1段電子冷却				2段電子冷却	-
画素数	256	512	256	512	256	-
画素ピッチ	50	25	50	25	50	μm
画素高さ	250		500		250	μm
パッケージ	28ピンDIP					-
パッケージ長	63.5					mm
窓材	サファイア					-

6. PbS/PbSe光導電素子

PbS/PbSe光導電素子は、赤外線が入射すると抵抗が減少する光導電効果を利用した赤外線検出素子です。同じ波長領域のほかの検出素子と比較して、検出能力が高い、室温動作が可能といった優れた面があります。しかし、周囲温度によっては暗抵抗・感度・応答速度が変化するため、使用上注意する必要があります。

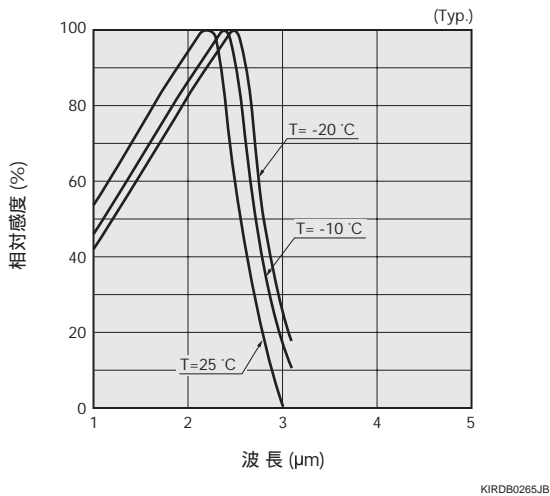
6-1 特性

分光感度特性

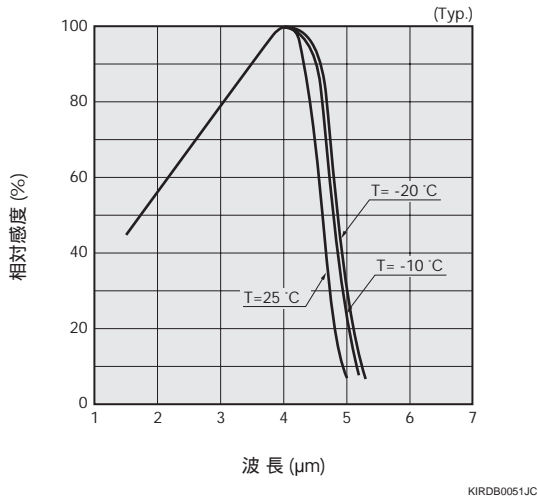
PbS、PbSeのバンドギャップエネルギーの温度特性は、負の係数をもっているため、素子を冷却することによって分光感度特性は長波長側にシフトします。

[図6-1] 分光感度特性

(a) PbS光導電素子



(b) PbSe光導電素子



応答特性

PbS/PbSe光導電素子の感度の周波数特性は、以下の式から求められます。

$$R(f) = \frac{R(0)}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}} \quad \dots\dots (6-1)$$

R (f) : 周波数応答
R (0) : 零周波数における応答
f : チョッピング周波数
τ : 時定数

PbS/PbSe光導電素子の雑音は、典型的な1/f雑音スペクトルをもつため、D*は以下の式で表されます。

$$D^*(f) = \frac{k\sqrt{f}}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}} \quad [V] \quad \dots\dots (6-2)$$

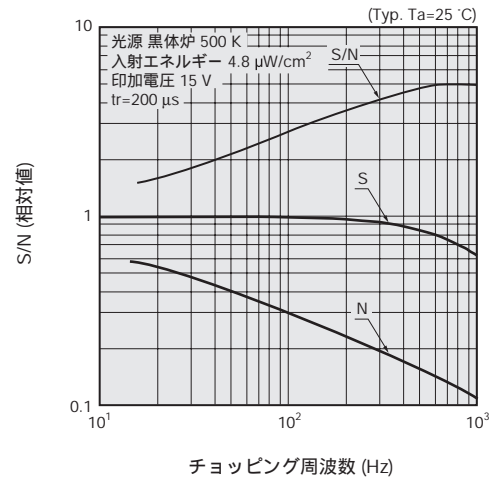
D* (f)は、 $f = \frac{1}{2\pi\tau}$ のときに最も大きくなります。

PbS/PbSe光導電素子のS/Nの周波数特性は、図6-2のようになります。

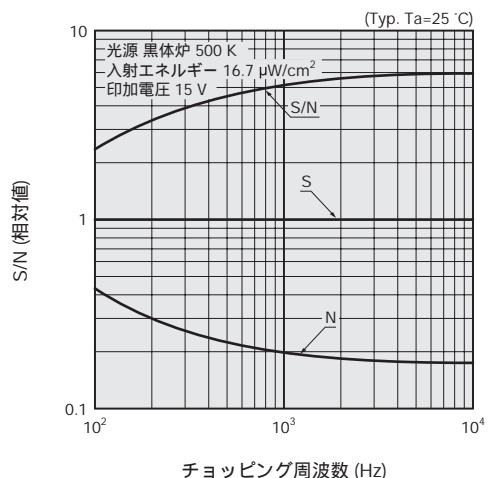
また PbS光導電素子の室温 (+25 °C)、電子冷却温度 (-20 °C)での感度の周波数特性は、図6-3のようになります。

[図6-2] S/N - チョッピング周波数

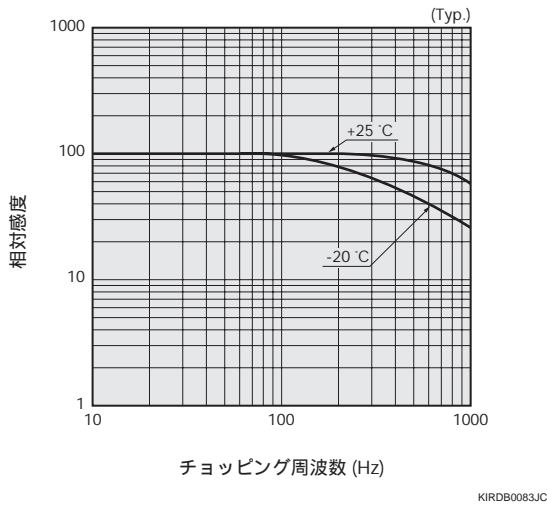
(a) PbS光導電素子



(b) PbSe光導電素子



[図6-3] 感度-チョッピング周波数 (PbS光導電素子)

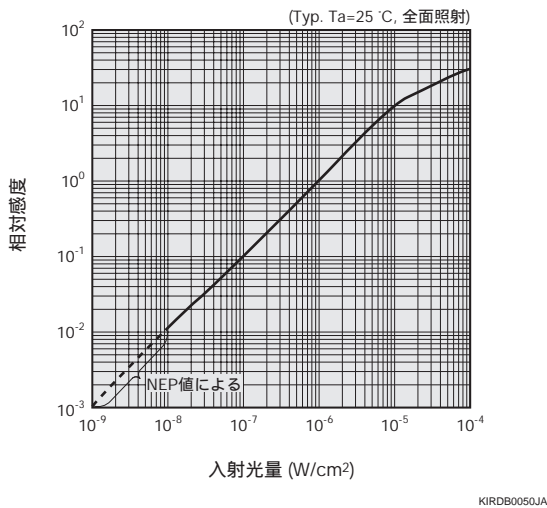


直線性

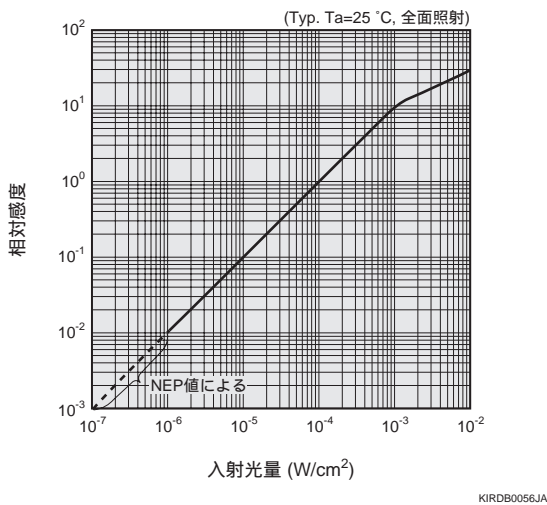
入射エネルギーと出力の関係を図6-4に示します。下限はPbS/PbSe光導電素子の NEPによって決まります。

[図6-4] 直線性

(a) PbS光導電素子



(b) PbSe光導電素子

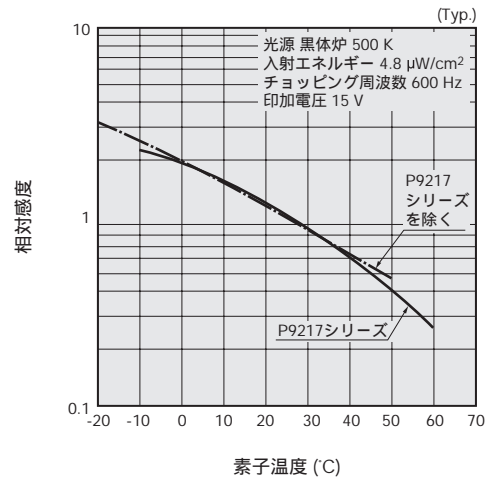


温度特性

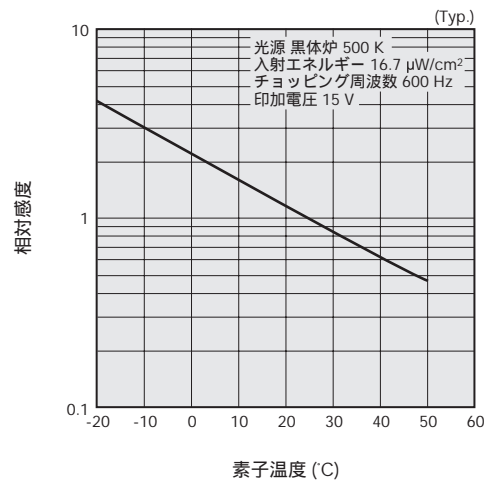
PbS/PbSe光導電素子は、素子温度の変化により、感度・暗抵抗・上昇時間が変化します(図6-5、図6-6参照)。

[図6-5] 感度 - 素子温度

(a) PbS光導電素子

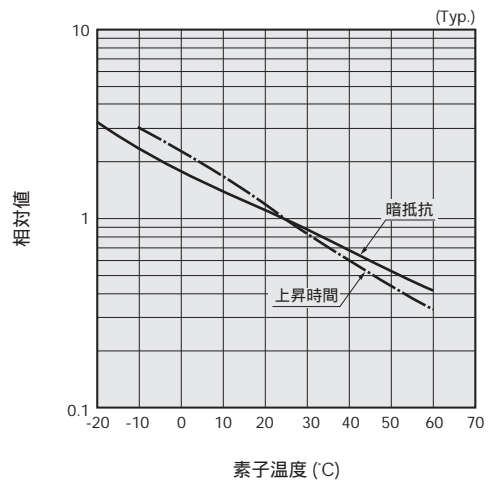


(b) PbSe光導電素子

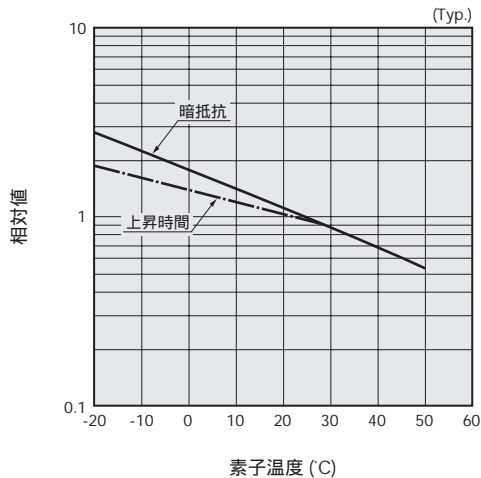


[図6-6] 暗抵抗、上昇時間 - 素子温度

(a) PbS光導電素子 (P9217シリーズ)



(b) PbSe光導電素子

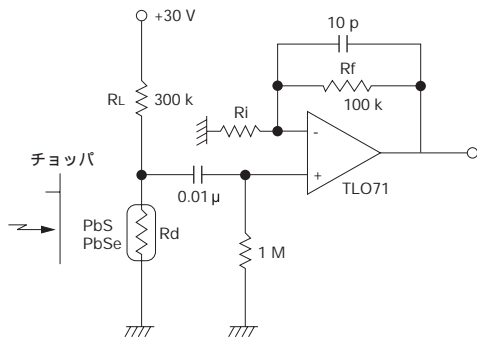


KIRDB0055JB

6-2 使い方

図6-7の回路のように PbS/PbSe光導電素子は、通常チョッパを使い交流で信号を取得します。

[図6-7] 動作回路例



KIRDC0012JA

信号電圧は以下の式で表されます。

$$V_o = -i_s \times R_d \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \dots\dots (6-3)$$

i_s : 信号電流

温度補正

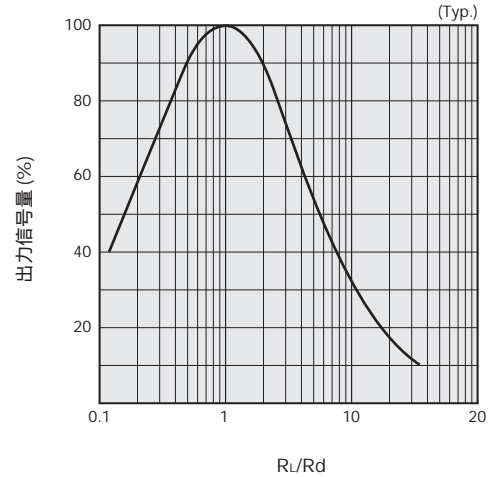
PbS/PbSe光導電素子は、感度、暗抵抗が素子温度によってドリフトするため、その対策が必要です。

電子冷却型のPbS光導電素子 (P2532-01, P2682-01)、PbSe光導電素子 (P2038-03, P2680-03)は、サーミスタを内蔵しており素子温度を一定にすることによってドリフトを抑えることができます。電子冷却型検出素子の使い方は「13-1 冷却方法」を参照してください。ヒータなどで素子を温め、温度を一定にして使う場合もありますが、感度の低下をもたらすだけでなく、素子の劣化を早める原因にもなりますので注意が必要です。

負荷抵抗

負荷抵抗 (R_L)が暗抵抗 (R_d)と同じとき、信号は最も大きく取れます。信号量と R_L/R_d の関係を図6-8に示します。

[図6-8] 出力信号量 - R_L/R_d



KIRDB0137JA

チョッピング周波数

「6-1 特性 / 応答特性」で述べたように、 D^* は $f = \frac{1}{2\pi\tau}$ で最大になります。またアンプの帯域を狭くすると、雑音が減少しS/Nがよくなります。特に微弱光測光では、チョッピング周波数と帯域幅に配慮する必要があります。

電圧依存性

PbS/PbSe光導電素子の雑音は、素子にかかる電圧が一定の値を超えると急激に大きくなります。信号は電圧に比例して増加しますが、カタログに記載されている最大印加電圧以内のできるだけ低い電圧で使用してください。

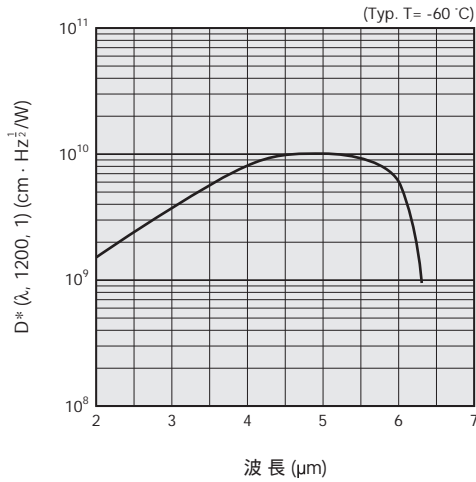
受光面サイズ

大面積の PbS/PbSe光導電素子を使用するよりも、小面積の素子を用いて光学的に光を絞ることによって単位面積当たりの光量大きい光を入射させる方が、S/Nの点から有利です。また、入射光が受光面からずれていたり、信号以外の光が入射することによって、S/Nが低下する場合がありますため十分注意してください。

7. InSb光導電素子

当社のInSb光導電素子は、電子冷却型の赤外線検出素子で、6.5 μm付近までの検出が可能です。

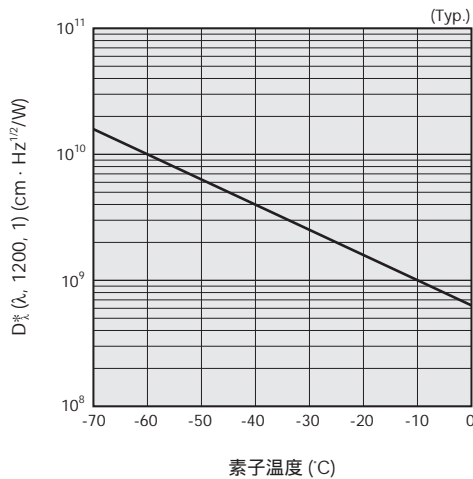
[図7-1] 分光感度特性 (P6606-310)



KIRDB0166JB

InSbは、バンドギャップエネルギーの温度係数が正のため、冷却するとカットオフ波長は短波長側にシフトします。これは、InSb光起電力素子においても同様です。

[図7-2] D* - 素子温度 (P6606-310)



KIRDB0142JB

8. InAs/InSb光起電力素子

InAs/InSb光起電力素子は、InGaAs PIN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。感度波長範囲は、それぞれ PbS/PbSe光導電素子に相当しますが、応答速度が速くS/Nがよいことから PbS/PbSe光導電素子とは異なる用途に使われます。

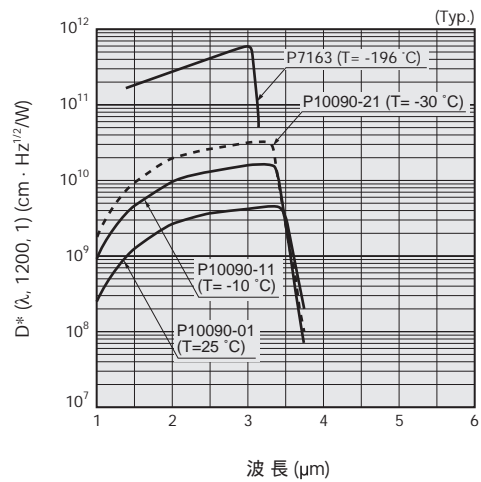
8-1 特性

分光感度特性

InAs光起電力素子には、非冷却 / 電子冷却 / 液体窒素冷却タイプがあり、用途・目的に応じて使用されます。またInSb光起電力素子は、液体窒素冷却で使用されます。図8-1にInAs/InSb光起電力素子の分光感度特性を示します。

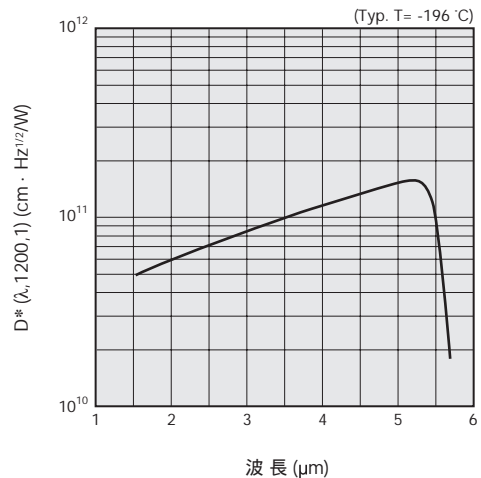
[図8-1] 分光感度特性

(a) InAs光起電力素子



KIRDB0165JB

(b) InSb光起電力素子



KIRDB0063JC

雑音特性

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

$$i = \sqrt{ij^2 + isD^2} \dots\dots\dots (8-1)$$

$$ij = \sqrt{4kTB / Rsh} \dots\dots\dots (8-2)$$

$$isD = \sqrt{2qIBB} \dots\dots\dots (8-3)$$

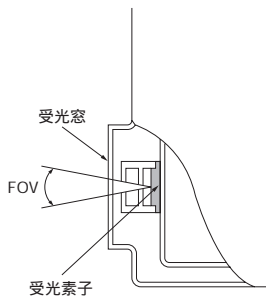
InSb光起電力素子の感度波長範囲において、300 K背景光のゆらぎが雑音として無視できません。雑音源が背景放射雑音だけと考えた場合、InSb光起電力素子の D*は以下の式で表されます。

$$D^* = \frac{\lambda \sqrt{\eta}}{hc \sqrt{2Q}} \quad [cm \cdot Hz^{1/2}/W] \dots\dots\dots (8-4)$$

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

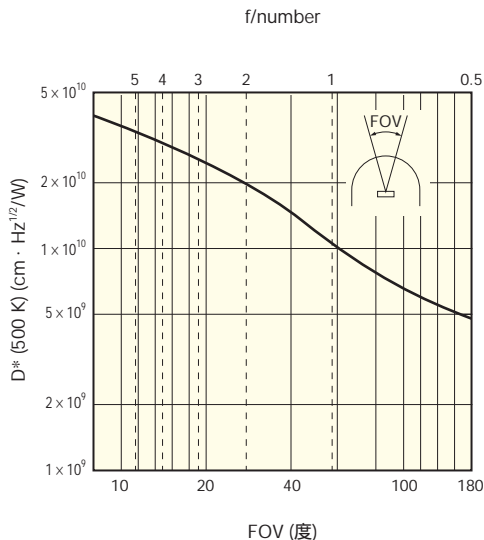
背景放射雑音を減少させるためには、視野角 (FOV: Field Of View)を制限するコールドシールドや不必要な波長をカットするバンドパスフィルタを冷却して使用する必要があります。視野角とD*の関係を図8-3に示します。

[図8-2] 視野角 (FOV)



KIRDC0033JA

[図8-3] 視野角とD*の関係



KIRDB0138JA

8-2 使用上の注意

InAs/InSb光起電力素子の使用上の注意については、以下に加えて、「13-1 冷却方法 / デュウ型」「13-2 取り扱い上の注意 / 静電気対策」も参照してください。

可視光などの入射

InSb光起電力素子は、赤外線以外の可視光や紫外線が入射すると、表面に電荷が蓄積して暗電流が増加する現象が生じます。暗電流が増加すると、雑音が増加しS/Nの低下を招きます。使用時は、まず可視光 (室内光)や紫外線などが入らないように入射窓にふた (黒テープを2重に貼るなど)をしてから、液体窒素を注入してください。液体窒素を注入してから可視光などにさらしてしまい暗電流が増加した場合には、液体窒素を抜いて素子の温度を室温まで戻してください。その後、上記の操作を行えば、暗電流は元の値に戻ります。

9. MCT (HgCdTe)赤外線検出素子

MCT (HgCdTe)赤外線検出素子には、PbS/PbSe光導電素子と同様に赤外線が入射すると抵抗値が減少する光導電素子と、InGaAsと同様にPN接合をもった光起電力素子があります。

9-1 特性

分光感度特性

HgCdTeの結晶は、HgTeとCdTe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ります。組成比を変えることによって、いろいろな波長に最大感度波長をもった赤外線検出素子を作ることができます。バンドギャップエネルギー (Eg)とカットオフ波長 (λc)の間には以下の関係があります。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} [\mu\text{m}] \dots\dots (9-1)$$

バンドギャップエネルギーは組成比のほか、素子温度によっても変わります。

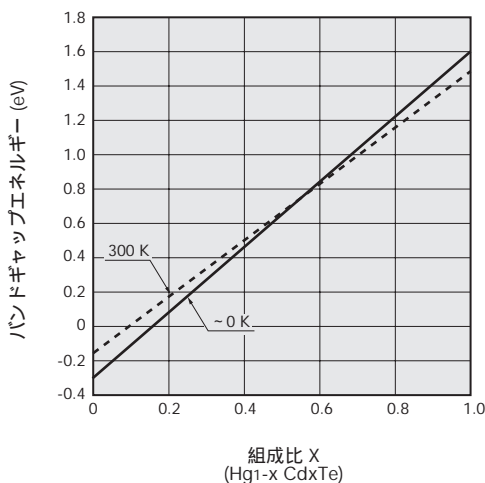
$$E_g = 1.59X - 0.25 + 5.23 \times 10^{-4} T (1 - 2.08X) + 0.327X^3 [\text{eV}] \dots\dots (9-2)$$

X: Hg_{1-x}Cd_xTeの組成比を表す
T: 絶対温度

素子温度が高くなるとバンドギャップエネルギーは大きくなり、最大感度波長は短波長側にシフトします。

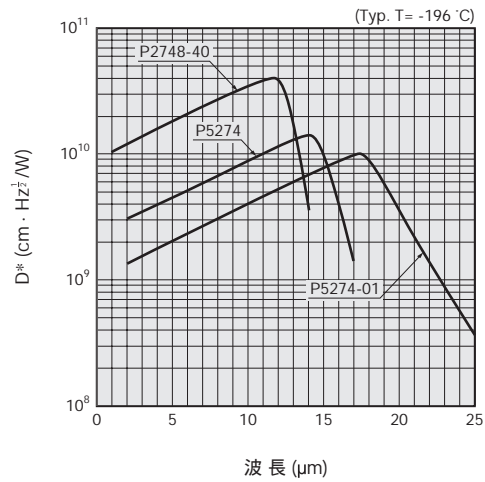
図9-2に MCT光導電素子の分光感度特性を示します。

[図9-1] バンドギャップエネルギーとMCT結晶の組成比の関係 ¹⁾



KIRDB0087JA

[図9-2] 分光感度特性 (MCT光導電素子)

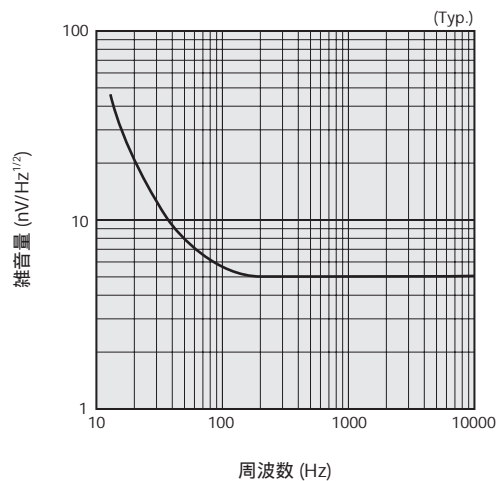


KIRDB0072JC

雑音特性

MCT光導電素子の雑音成分には、1/f雑音、電子 - 正孔の再結合による g-r雑音、ジョンソン雑音があります。数百Hz以下の周波数では1/f雑音が、それ以上では g-r雑音が支配的になります。MCT光導電素子の雑音量と周波数の関係を図9-3に示します。3 μm以上に感度をもつMCT光導電素子では、300 K背景光のゆらぎが雑音として無視できなくなります。この種の雑音は、視野角を小さくすれば減らすことができます。光起電力素子の雑音特性については「8. InAs/InSb光起電力素子 / 8-1 特性 / 雑音特性」を参照してください。光起電力素子は、光導電素子に比べ 1/f雑音が小さく、低い周波数で測定するのに有利です。

[図9-3] 雑音量 - 周波数 (MCT光導電素子)

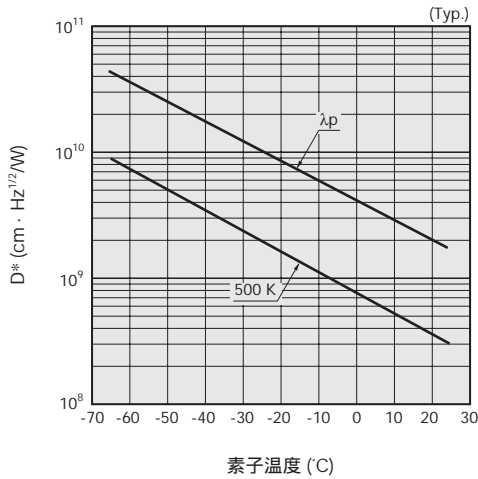


KIRDB0074JC

温度特性

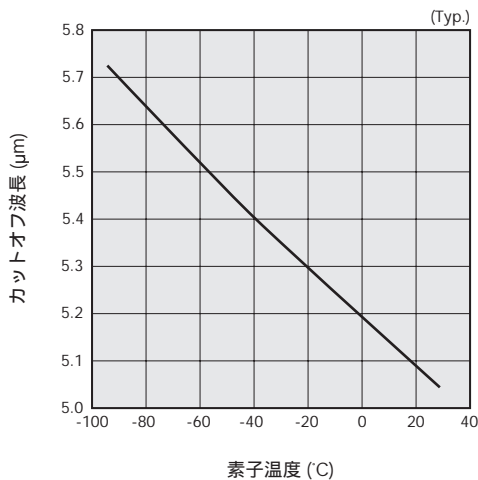
MCT赤外線検出素子のD*と分光感度特性は、素子温度によって変化します。温度が上がるにつれて、D*は減少し分光感度特性は短波長側にシフトします。その例として3~5 μm帯用MCT光導電素子 P2750のD*およびカットオフ波長の温度特性を図9-4、図9-5で示します。

[図9-4] D* - 素子温度 (P2750)



KIRDB0140JC

[図9-5] カットオフ波長 - 素子温度 (P2750)



KIRDB0141JB

直線性

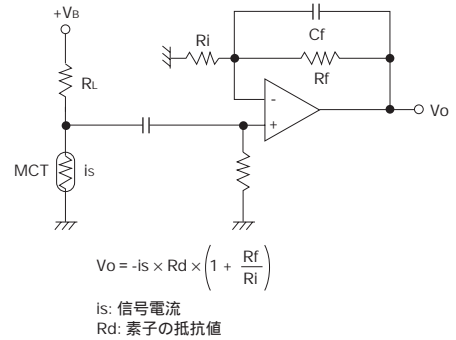
MCT光起電力素子の直線の上限は、MCT光導電素子の数 mW/cm²に比べると1けた以上よい特性を示します。

9-2 使い方

動作回路

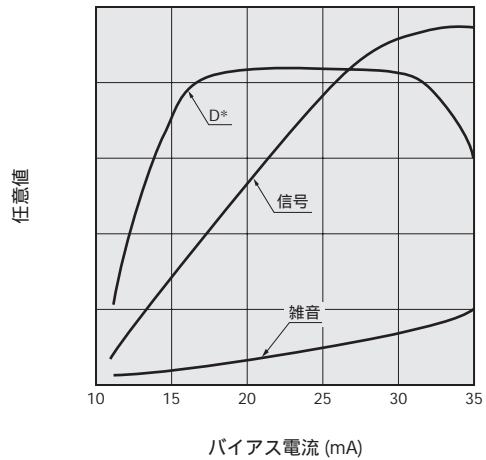
MCT光導電素子の基本動作回路例を図9-6に示します。電源は雑音・リップルの少ないものを使用してください。RLには数kΩの抵抗を使用して定電流源とする場合が一般的です。バイアス電流を増やすと信号・雑音ともに増加しますが(図9-7)、一定の値以上で雑音が増え始めるため、S/Nが一定になる範囲で使用してください。必要以上にバイアス電流を大きくすると、ジュール熱により素子温度が上がりD*を悪くし、さらには素子を破壊する恐れがありますので避けてください。

[図9-6] 動作回路例 (MCT光導電素子)



KIRDC0021JA

[図9-7] S/N - バイアス電流 (P3257-10)

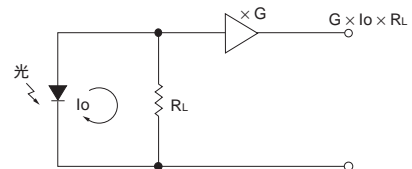


KIRDB0091JB

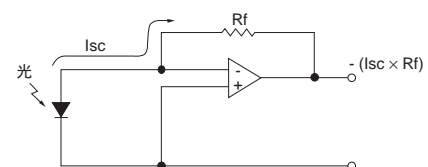
MCT光起電力素子の動作回路例を図9-8に示します。抵抗やオペアンプを用い、光電流を電圧として取り出します。

[図9-8] 動作回路例 (MCT光起電力素子)

(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



KPDC0006JB

周囲温度

MCT光導電素子は、使用する周囲温度の変化によって感度が変わることがあります。周囲温度が上昇すると、背景放射光子が増加し、素子内のキャリア数が増加します。そのため、信号光によって励起されたキャリアの平均寿命が短くなり感度が小さくなります。

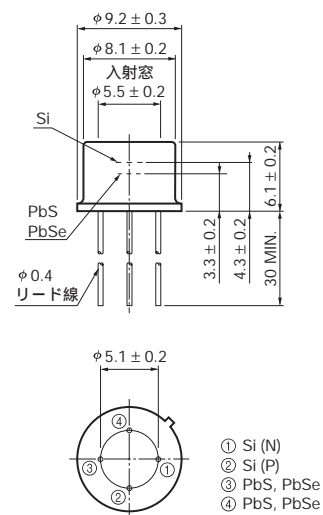
MCT光起電力素子においても、環境温度による背景放射の変化は暗電流の変化に反映されます。このような現象を防ぐためには、余分な背景光を拾わないようにコールドシールドの形状を工夫するなど、光学系の設計に注意する必要があります。

10. 複合素子

感度波長範囲を広げるために、2種類以上の赤外線検出素子をサンドイッチ構造あるいは平面上に並べることがあります。その例を図10-1に示します。検出素子の組み合わせには、Si-PbS、Si-PbSe、Si-InGaAs、InAs-InSb、InSb-HgCdTeなどがあります。

サンドイッチ構造の上の方にある検出素子は、赤外線検出を行うほかに、下の検出素子の短波長カットフィルタの役目を果たします。なお、同一の平面上に並べる方法では、さらに自由に素子を組み合わせることができます。

[図10-1] 複合素子の例 (単位: mm)



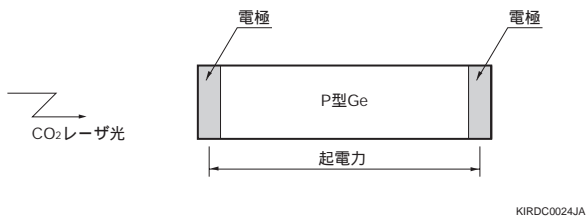
KIRDA0041JE

11. フォトンドラッグ検出素子

フォトンドラッグ検出素子は、フォトンドラッグ効果を利用した赤外線検出素子で、主にCO₂レーザ (10.6 μm)の検出に使用されています。

動作原理

[図11-1] フォトンドラッグ検出素子の構造



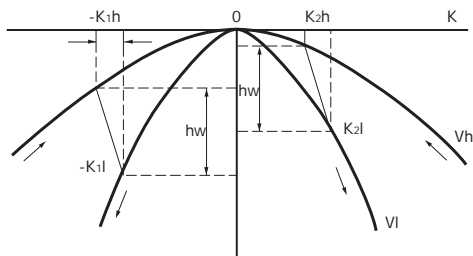
端面を光学研磨したP型GeにCO₂レーザ光を照射すると、起電力が発生します。この現象は、フォトン (Photon: 光子)の進行方向に正孔が引きずられていくことからフォトンドラッグ (Photon Drag)効果と呼ばれています。

半導体内で光が吸収されると、フォトンのエネルギーと運動量が電子あるいは正孔に与えられます。この光吸収に伴う運動量の授受は、可視域から赤外域ではフォトンの運動量が小さいため通常は無視できます。入射フォトン数が非常に多くなると、個々のキャリアがフォトンから受け取る運動量は小さくても、全体では電流あるいは電圧として検知できるレベルになります。

フォトンドラッグ検出素子のP型Geの価電子帯は、2つのバンド [Vh (Heavy mass band)とVI (Light mass band)]に分かれています。この様子を図11-2に示します。

フォトンが入射すると正孔は、そのエネルギーを吸収してVhからVIへ遷移します。この遷移によってVh・VI両バンド中の正孔の分布は、K空間で非平衡状態になります。この非平衡状態を緩和する方向に正孔の移動が生じます。これをフォトンドラッグ電流と呼んでいます。

[図11-2] Geの価電子帯構造



直線性

入射レーザ光強度が10 mW/cm²程度になると、フォトンドラッグ電圧が入射強度に比例しなくなる非線形特性が生じます。これは光の吸収の飽和が起こるためです。なお、10 mW/cm²以上ではコーティング膜に損傷が起こるため注意してください。

12. サーモパイル (Si熱型検出素子)

サーモパイルは、熱型赤外線検出素子の1つで、以下の特長を持っています。

- ・常温で動作する
- ・波長に依存しない分光感度特性
- ・光学的なチョッピングの必要がなく、入射エネルギー量に応じた電圧出力が得られる
- ・低価格
- ・長寿命

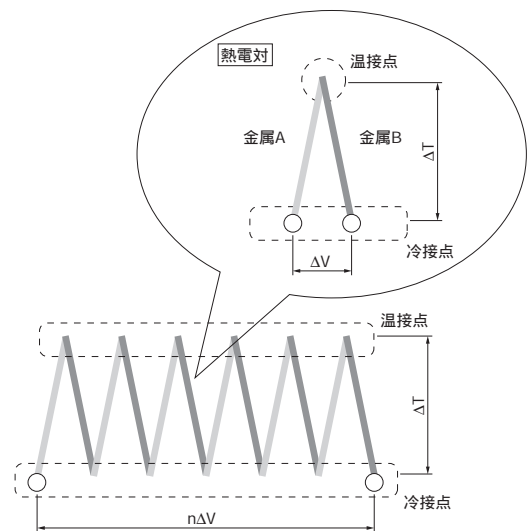
サーモパイルは、ゼーベック効果を利用し赤外線の入射エネルギー量に比例した熱起電力が得られます。

サーモパイルそのものには波長依存性はありません。さまざまな窓材を付けることによって、温度計測・人体検知・ガス分析などの用途に使われます。

当社製サーモパイルは、大きな出力電圧を得るために Si 基板上に多数の熱電対を直列接続し、温冷接点間の温度差を大きくしています。また、温接点側を熱分離構造にし、その上に赤外吸収膜を付けています。熱分離構造は、MEMS技術を用い、メンブレン (薄膜)が中空に浮いているように加工します (図12-2)。なおサーモパイルには、ゼーベック係数 (熱起電力量)が大きく、半導体プロセスで形成可能な材料を使用しています。

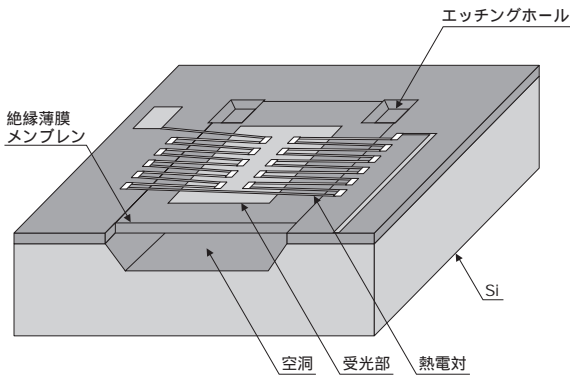
この構造により、赤外線が入射するとメンブレン上の受光部 (温接点)が温まり、冷接点との間に温度差 (ΔT)が生じ、それに伴う熱起電力 (ΔV)が得られます。

[図12-1] 熱分離構造 (サーモパイル)



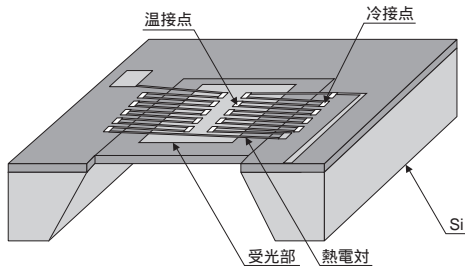
KIRDC0046JA

[図12-2] 表面マイクロマシン加工によるメンブレン構造



KIRDC0048JA

[図12-3] 裏面エッチングによるメンブレン構造



KIRDC0047JA

12-1 特性

感度

サーモパイルの感度 (Rv)は、以下の式に示すように熱電対数により決まります。

$$Rv = \eta \times n \times \alpha / G (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2} \text{ [V/W]} \dots\dots (12-1)$$

- η: 放射率
- n: サーモパイルの熱電対数
- α: ゼーベック係数
- G: 熱伝導率
- ω: 角周波数
- τ: 熱時定数

雑音特性

サーモパイルの雑音は、素子抵抗のジョンソン雑音が支配的です。雑音 (Vn)は、以下の式で表されます。

$$Vn = (4k \times T \times Rd \times \Delta f)^{1/2} \text{ [V/Hz}^{1/2}] \dots\dots (12-2)$$

- k : ボルツマン定数
- T : 絶対温度
- Rd: 素子抵抗
- Δf: 帯域幅

温度特性

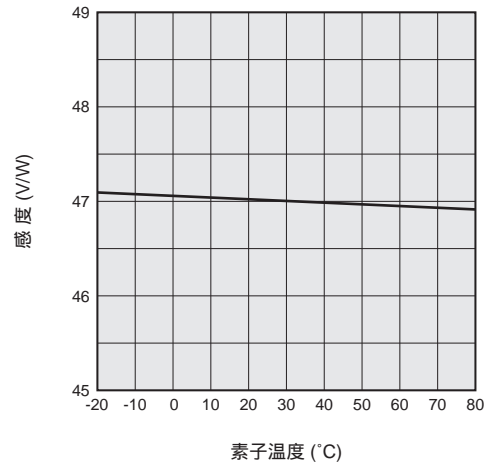
温度の変化により、素子の感度および抵抗は、図12-4、図12-5に示すように変化します。

周囲温度が大きく変化する場所で使用する際は、冷接点

温度も周囲温度の影響を受けるため、出力信号がドリフトし正確な検出ができません。このような場合は、サーミスタを内蔵した素子を使用するか、外付けのサーミスタを素子に近接し、常時素子温度をモニタして感度補正をする必要があります。

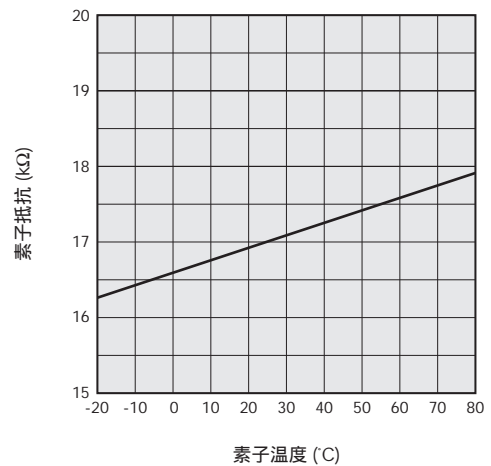
感度補正については、「12-2 使い方 / サーミスタ付回路」を参照してください。

[図12-4] 感度 - 素子温度 (測定例)



KIRDB0311JA

[図12-5] 素子抵抗 - 素子温度 (測定例)

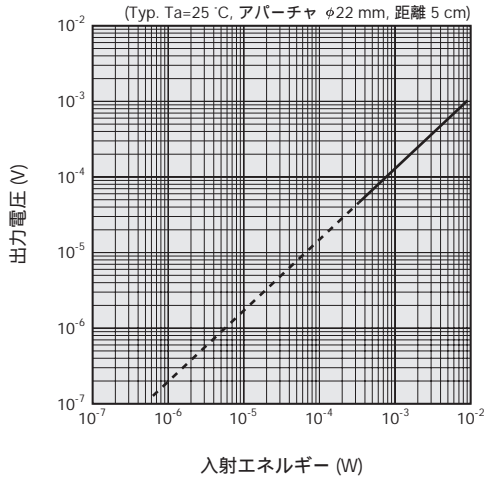


KIRDB0312JA

直線性

入射エネルギーと出力電圧の関係を図12-6に示します。

[図12-6] 出力電圧 - 入射エネルギー



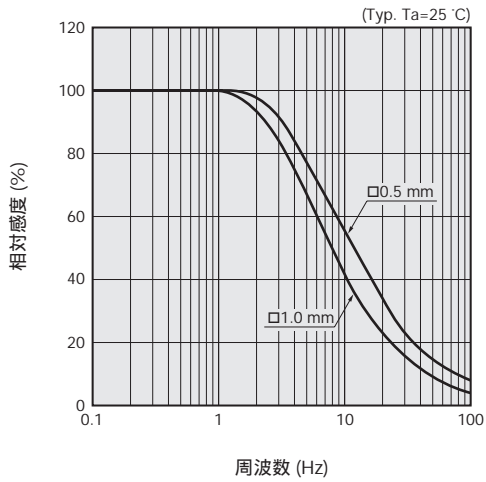
KIRDB0313JA

周波数特性

受光面サイズの異なるサーモパイルの感度と周波数の関係を図12-7に示します。

受光面サイズが小さいほど、応答性がよくなります。

[図12-7] 周波数特性

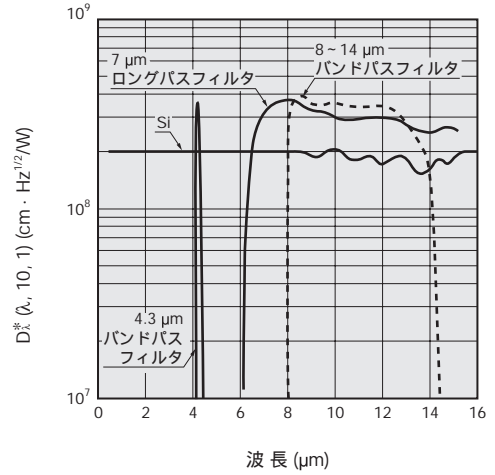


KIRDB0314JA

分光感度特性

サーモパイルは波長依存性がないため、使う窓材によって感度波長範囲が決定されます。図12-8に代表的な分光感度特性を示します。

[図12-8] 分光感度特性



KIRDB0095JA

12-2 使い方

動作回路

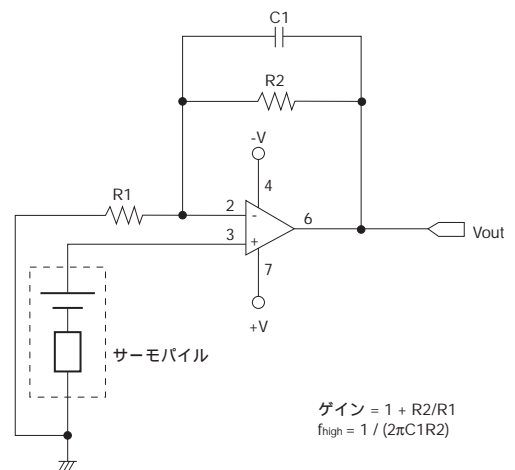
サーモパイルの出力信号は非常に小さいため、一般に直流信号増幅回路を通して信号処理をします。

サーミスタを使わない回路

周囲温度が一定の場合や測定精度を必要としない場合は、以下に示すような増幅回路を使用します。

(1) 両電源タイプ

[図12-9] 増幅回路 (両電源タイプ)

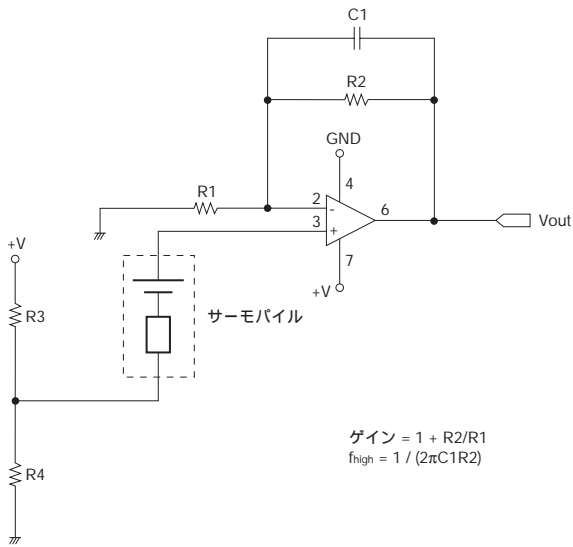


KIRDC0049JA

(2) 単電源タイプ

単電源タイプのオペアンプは、グランド付近での動作を避けるために、サーモパイルの片側をバイアスして動作させます。図12-10の例では、オペアンプの電源電圧をR3・R4の抵抗分割でバイアスしています。

[図12-10] 増幅回路 (単電源タイプ)



ゲイン = $1 + R2/R1$
 $f_{high} = 1 / (2\pi C1R2)$

KIRDC0050JA

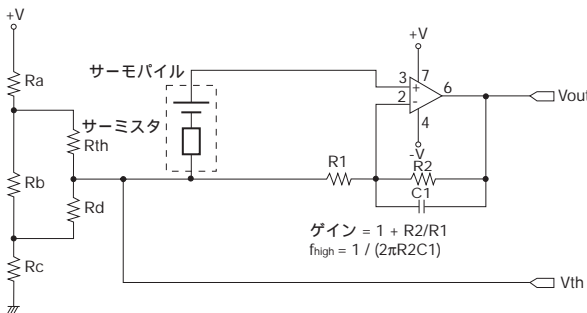
サーミスタ付回路

サーモパイルの出力信号は温度依存性をもっているため、素子温度が大きく変化する場所で使用する場合は、出力信号を一定にするための補正が必要になります。

代表的な補正方法には、サーモパイルとサーミスタの信号のそれぞれを直接マイコンに入力して補正する方法と、サーミスタの出力信号をアンプ回路内に組み入れる方法の2つがあります。高精度を必要とする場合は、前者のマイコンを使用する方法が一般的です。

以下に示す回路例は、サーミスタの出力信号をアンプ回路内へ組み入れたもので、測定精度をあまり必要としない場合に使われます。

[図12-11] サーミスタ付回路



ゲイン = $1 + R2/R1$
 $f_{high} = 1 / (2\pi R2C1)$

KIRDC0051JA

温度変化に対するサーモパイルの出力電圧の変動分がVthの変動分で相殺できるように、Ra・Rb・Rc・Rdの定数を決定します。

13. 赤外線検出素子の使い方

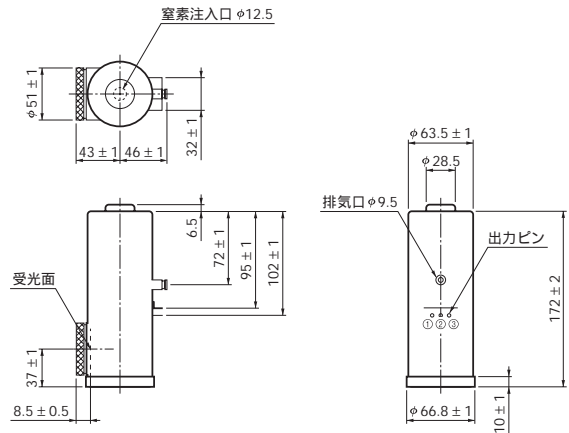
13-1 冷却方法

赤外線検出素子のS/Nを向上させたり、素子温度を一定に保つためには、一般的に素子を冷却します。冷却方法には、デュウ (真空容器)に寒剤を入れて冷却する方法、電子冷却、ジュールトムソン冷却、機械式冷却があります。

デュウ型

金属のデュウ内に検出素子を固定したメタルデュウ型検出素子の寒剤としては、液体窒素 (-196 °C)やドライアイス (-77 °C)が多く用いられます。通常、1回の寒剤注入によって約8時間使用できます。なお容器内の寒剤を減圧することによって、さらに低温にすることもできます。

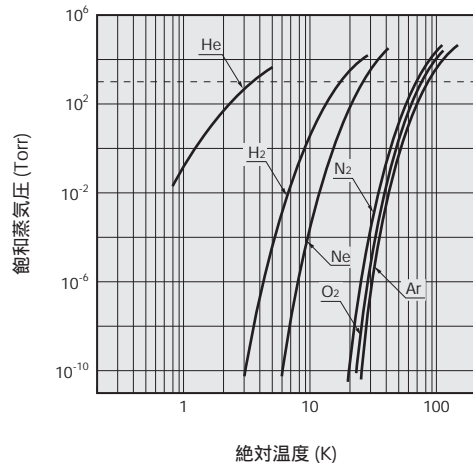
[図13-1] メタルデュウの外形寸法図 (単位: mm)



- ① 検出素子
- ② NC
- ③ 検出素子

KIRDA0131JC

[図13-2] 寒剤の温度 - 飽和蒸気圧¹⁾



KIRDB0143JA

■ デュウ型検出素子の使用上の注意

デュウは真空容器のため、強い力を加えないでください。デュウ内の水分を十分取り除いた後、液体窒素を注入してください。水分が中に残っていると、デュウが破損する恐れがあります。

ドライアイスは、砕いて砂状にした後、ピーカーに入れてください。その中にアルコールをゆっくり入れて、シャーベット状になり沸騰しなくなったら、スプーンでデュウへゆっくり入れてください。

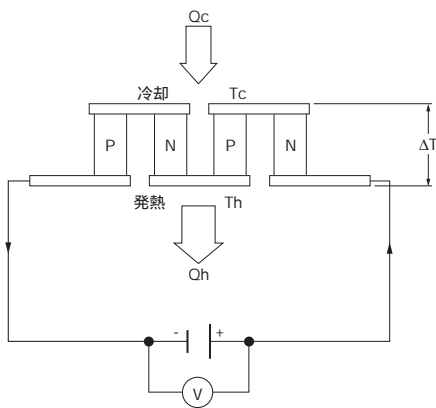
液体窒素は、初めは50 ccをゆっくり注入して白煙(液体窒素の沸騰による)がなくなるまでしばらく待ちます。その後また50 cc入れ、同様に待ち、その後必要量を注入してください。初めから急速に注入すると噴射する恐れがあります。また注入の際、デュウの外側に液がかかると受光窓が曇ることがあるため、オーバーフローには注意してください。

保存時は、できるだけ低温に保ってください。高温にすると、デュウ内部の放出ガスによる真空度の低下により寒剤の保持時間が短くなる恐れがあります。メタルデュウの真空寿命は約2~3年です。なおメタルデュウは、再排気で保持時間を回復することが可能です。

電子冷却型

ある種の半導体に電気を流すと、その半導体の1端は冷却され、もう1つの端は熱せられます(ペルチェ効果)。この効果を利用して素子を冷却することができます。

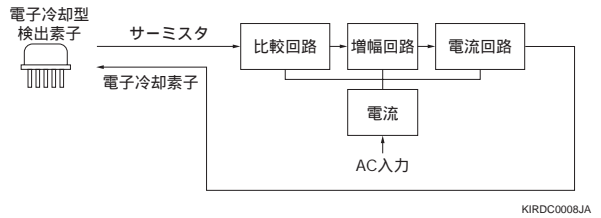
[図13-3] ペルチェ効果の模式図



KIRDC0034JA

電子冷却型検出素子にはサーミスタが内蔵され、サーミスタによって素子温度を電圧として検出します。素子温度を一定に保つために、基準電圧(設定された温度の電圧)と比較し、その差を補正する電流を電子冷却素子に流します。

[図13-4] ブロック図(電子冷却素子)



KIRDC0008JA

電子冷却型検出素子には、1段/2段/3段電子冷却型があります。素子とベース間の温度差 ΔT_p は、それぞれ 50°C / 70°C / 100°C です。

放熱を十分行ったとしても、ベースと放熱器間の熱抵抗のため、ベース温度は室温より約 15°C 上昇します。そのため室温 (25°C) で得られる素子の最低温度は、1段電子冷却型で -10°C 、2段電子冷却型で -30°C 、3段電子冷却型で -60°C になります。つまり、周囲温度に対するおおよその冷却温度 (ΔT) は、1段電子冷却型で約 35°C 、2段電子冷却型で約 55°C 、3段電子冷却型で約 85°C となります。

■ 電子冷却型検出素子の使用上の注意

電子冷却素子への供給電流は、検出素子やサーミスタの許容電流値よりも大きい電流のため、検出素子やサーミスタに瞬間的にも印加すると破損します。誤配線のないように注意してください。

1段/2段電子冷却型素子用には 3°C/W 以下、3段電子冷却型素子用には 2°C/W 以下の放熱器を必ず使用してください。そして、ベース部分が放熱されるように放熱器を密着して取り付けてください。放熱器の容量による冷却能力の違いの1例を図13-5に示します。

+と-を間違えないように十分注意してください。逆に付かないで急激に温度を上げると、検出素子が破損する恐れがあります。

電源はリップルの少ないものを使用してください。

電流を規定値(1段電子冷却型: 1.5 A 、2段/3段電子冷却型: 1.0 A)以上流すと、ジュール熱により加熱します。長時間安定して使用するためには、規定値の70%以下で使用してください。

測温用サーミスタは、消費電力が定格を超えないように使用してください。

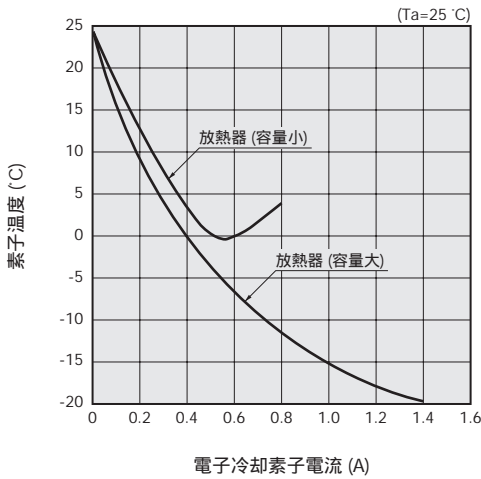
温度コントローラを使用する場合、電子冷却素子の冷却能力を十分に考慮した上、周囲温度条件に合った冷却温度に設定してください。電子冷却素子の冷却能力を超えた設定にすると、安定した温度制御ができなくなります。なお当社は、温度コントローラ C1103シリーズや放熱器 A3179シリーズを用意しています。

メタルパッケージと放熱器との間の熱抵抗は、できるだけ小さくしてください。また熱結合の向上のため、シリコングリスなどを使用してください。熱抵抗が大きいと、放熱が不十分となり、素子が破損することがあります。電子冷却素子は、落下などの衝撃によって破損することがあるため、取り扱いには十分注意してください。

放熱板への取り付け時は、パッケージの変形を防ぐために必要以上の力がかからないように十分注意してください。パッケージの気密が損なわれると、冷却性能や検出素子の特性が劣化します。

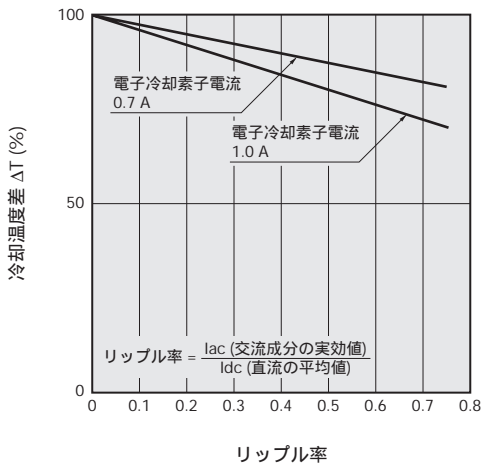
リード線 (特にリード根元)には加工時・使用時とも必要以上の力を加えないでください。リード線固定用のガラスがクラックすると、パッケージの気密が損なわれ冷却性能や検出素子の特性が劣化します。

[図13-5] 放熱器の容量による冷却能力の違い



KIRDB0144JA

[図13-6] 電源のリップルと冷却能力



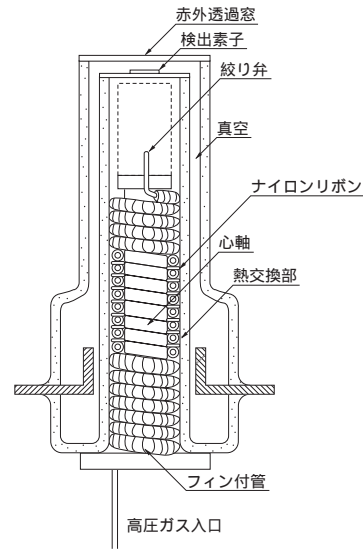
KIRDB0145JA

ジュールトムソン冷却型

高圧ガス (150 kg/cm²のアルゴンガスや窒素ガスなど)を急激に膨張させると、温度低下が生じます。このジュールトムソン効果を利用して、素子を高圧ガスの沸点と同程度の温度まで冷却することができます。

ジュールトムソン冷却は、冷却温度の安定性がよく、起動時間が短く、電力が不要です。しかし高圧ポンプが必要で、冷却用ガスは使い捨てのため長時間の冷却には難があります。

[図13-7] ジュールトムソン冷却型

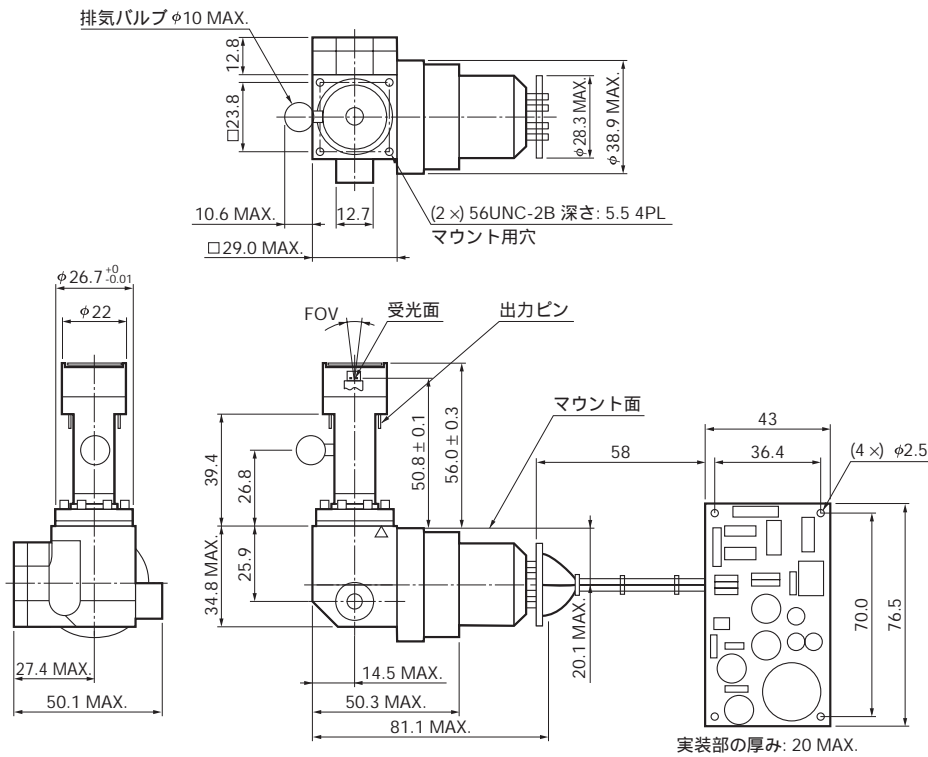


KIRDC0035JA

機械式冷却型

機械式冷却型は、クローズサイクルでヘリウムなど冷媒ガスの圧縮・膨張を繰り返して冷却を行うため、長時間の運転が可能です。機械式冷却機は、3つの要素 (膨張機、圧縮機、熱交換機)から成り立っています。膨張機・圧縮機には、回転式 (タービンなど)と往復動式 (ピストンなど)があり、熱交換機には高/低圧ガスが別経路を流れる換熱式と同じ経路を交互に周期的に流れる蓄熱式があります。これらの組み合わせによってスターリング・GM (Gifford-McMahon)・ソルベイ・ヴィルマイヤなどの冷却機があります。これらの中で赤外線検出素子の冷却には、構造が単純で小型/軽量化が容易なスターリング冷却機が適しており、幅広く利用されています。

[図13-8] スターリング冷却型検出素子 (P3257-50)の外形寸法図 (単位: mm)



KIRDA0130JA

13-2 取り扱い上の注意

保存

赤外線検出素子は常温・常湿・暗所で保存してください。また、太陽光や強い紫外線、可視光下で放置すると、特性劣化の原因となることがあるため避けてください。

ハンドリング

検出器を直接手で触らないでください。ゴム製指サックやテフロン製手袋を使用することを推奨します。受光窓には ZnS などの柔らかい素材を使用しています。ピンセットなどを使用する場合、受光窓に鋭利な先端が当たり傷が付くと測定に支障をきたすことがあるため注意が必要です。また検出素子を固定する場合、キャップに力を加えたり偏心した状態で機械的に固定すると、パッケージの気密性を損なったりキャップの損傷を招く恐れがありますので、注意してください。

リード線の加工

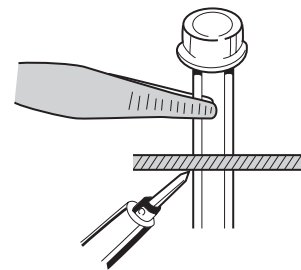
メタルパッケージのリード線を加工する場合、引っ張り力は 0.5 kg 以下で 5 秒以内、曲げは 90° で 2 回以内、ねじれは本体から 6 mm 以上離れた所を 3 回以内にしてください。

はんだ付け

はんだ付けに際しては、高温による検出器の損傷を防ぐため、特に注意が必要です。ピンセットなどを用いて、放

熱効果を上げる工夫をしてください (図13-9)。メタルパッケージの場合、はんだ温度 260 °C 以下、10 秒以内で行ってください。

[図13-9] ピンセットを用いたはんだ付け



KIRDC0026JA

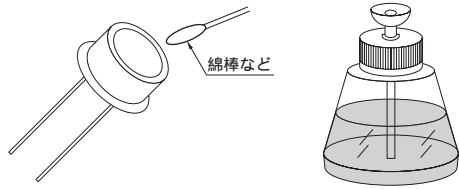
検出素子の洗浄

塩素系の蒸気洗浄やアルコール系の浸漬洗浄を行うとマーキングが消えることがあるため、これらの洗浄は行わないでください。

受光窓の洗浄

受光窓は、できるだけ汚れないように注意してください。もし汚れた場合は、汚れをエチルアルコールで軽く拭き取ってください。エチルアルコール以外の有機溶剤の使用は、できるだけ避けてください。なおサーモパイルの受光窓の洗浄にはエチルアルコールを使用しないでください。

[図13-10] 受光窓の洗浄



汚れはエチルアルコールを用い、軽く拭き取る

KIRDC0027JB

静電気対策

InGaAs PINフォトダイオード・InAs/InSb光起電力素子は、人体・梱包材に帯電する静電気、測定装置からのサージ電圧、はんだごての漏洩電圧などにより破壊または劣化を起こす危険性があります。そのため静電気対策として、素子・作業者・作業場所・治具などをすべて同電位にする必要があります。使用に際して次の事項に注意してください。

作業者および衣服に帯電した静電気による破壊を防止するため、リストトラップなどで人体を高抵抗 (1 MΩ) を介してアースしてください。衣類は帯電防止用のものが望ましく、帯電防止用以外のものでは羊毛・化学繊維を避け木綿のものを着用してください。

作業台と床に半導電性シート (1 MΩ ~ 100 MΩ) を敷いてアースしてください。はんだごては、絶縁抵抗が10 MΩ以上のものを使用してください。

運搬・梱包用の容器としては、導電性材料やアルミ箔などが有効です。帯電防止材料では、0.1 MΩ/cm² ~ 1 GΩ/cm² のものを使用してください。

14. 応用例

14-1 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1.5 μmの波長域の赤外線が使われています。この波長域の検出には 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、直線性とユニフォミティです。低いパワーの光も低雑音で検出できるように、冷却型の検出素子を使用する場合もあります。

14-2 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、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。

14-3 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ています。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) を補正しなければなりません。

図14-1は黒体からの放射エネルギーを示しています。黒体の場合は e=1です。図14-2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 (NEΔT) があります。NEΔTは以下のように定義されます。

$$NE\Delta T = \frac{LN}{\frac{dL}{dT} \Big|_{T=T_1}} \quad \dots\dots (14-1)$$

LN: 雑音等価輝度
T₁: 物体の温度
L: 物体の放射輝度

LNは、検出器のNEPと次の関係があります。

赤外線検出素子

$$NEP = T_o L N \Omega A_o / \gamma \dots\dots (14-2)$$

T_o : 光学系の損失
 Ω : 光学系から被測定エリアを見込む立体角
 A_o : 光学系の開口面積
 γ : 回路系の損失

(14-1)式の $\frac{dL}{dT} \Big|_{T=T_1}$ は、温度 T_1 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。

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\pi} M_{\lambda} d\lambda \dots\dots (14-3)$$

M_{λ} : 分光放射発散度

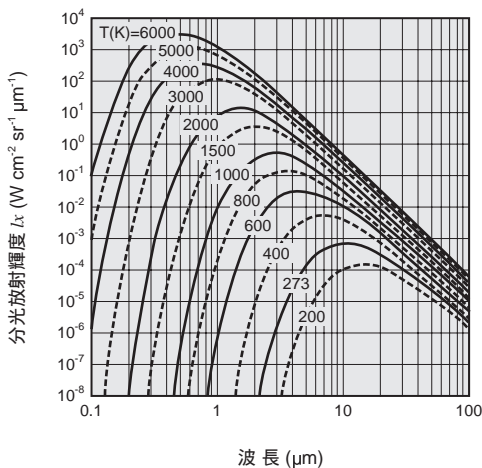
他の温度測定法と比べると、放射温度計には以下の特長があります。

- ・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 μm 付近、プラスチックフィルムでは3.4 μm や8 μm 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。

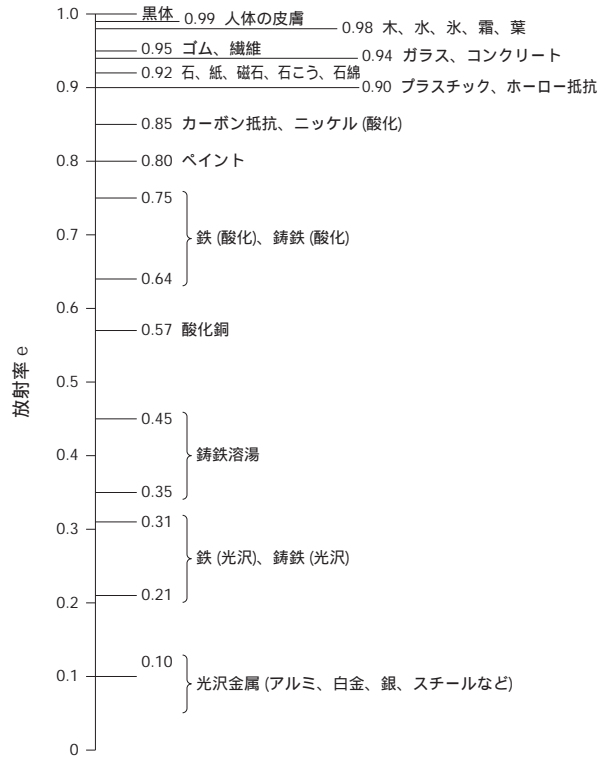
また、赤外ファイバと検出器を組み合わせることで、ホットメタルディテクタ (HMD)、回転体、内部の複雑な構造物、真空中・高圧ガス中などの危険な場所にある物体の温度測定が可能になりました。

[図14-1] 黒体放射



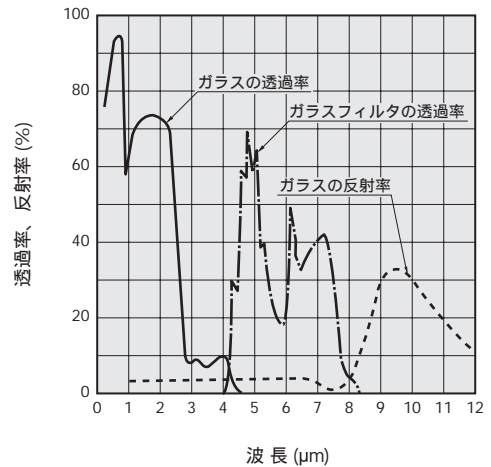
KIRDB0014JB

[図14-2] 各種物体の放射率²⁾



KIRDC0036JA

[図14-3] ガラスの分光透過率 / 反射率

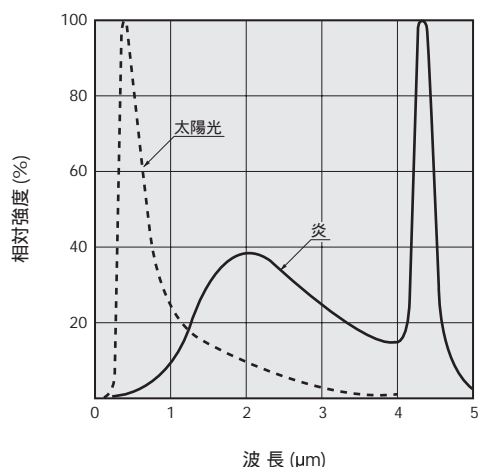


KIRDB0146JA

14-4 フレームアイ (炎検出)

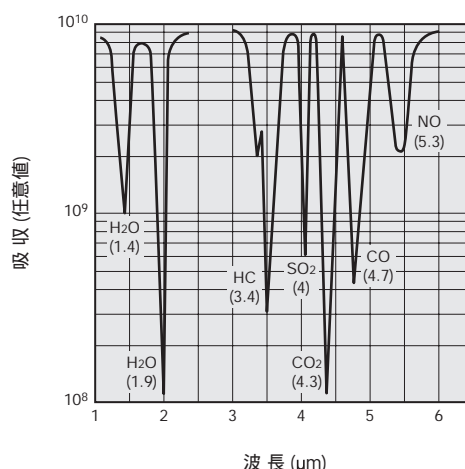
フレームアイは、炎から放射される光を検出し、燃焼状態を観察するものです。炎からの放射波長は、図14-4のように紫外域から赤外域にわたって広く分布しています。検出方法には、PbS光導電素子を使って赤外線を検出する方法、複合素子 (K1713-01) を使って紫外域から赤外域まで幅広い波長域を検出する方法、PbSe光導電素子を使って4.3 μm の波長を検出する方法などがあります。

[図14-4] 炎からの放射波長



KIRDB0147JA

[図14-5] ガス吸収スペクトル



KIRDB0148JA

14-5 水分計

近赤外域にある水分の吸収波長 (1.1 μm, 1.4 μm, 1.9 μm, 2.7 μm)の光とリファレンス光を植物や石炭などの被測定物に投光し、被測定物からのそれぞれ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フォトダイオードや PbS光導電素子が適しています。

14-6 ガス分析計

ガス分析計は、測定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特性を測定して試料の成分とその量を測る分散方式と、特定波長の吸収特性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, CO₂)、呼気の成分測定 (CO₂)、燃料排気ガスの管理 (CO_x, SO_x, NO_x)、燃料漏洩検知 (CH₄, C₂H₆)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CO₂ (4.3 μm)、糖分 (3.9 μm)の成分測定にも用いられます。図14-5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・InSb・PbS・PbSe・MCT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。

[表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、集積基板・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、森林分布の監視など
公害監視	海水・温排水の汚染監視など
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・天文探査など
医学	赤外線画像診断 (乳がんの検診など)
保安	ポイラなどの温度監視、火災探知など
自動車・航空機	視界補助用暗視装置、エンジン評価試験など

14-7 赤外線撮像装置

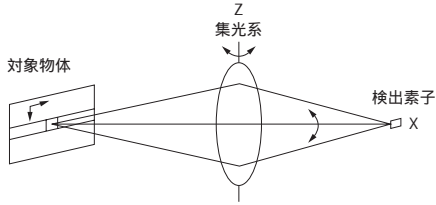
赤外線撮像方式の原理は、3つの世代に分けられます (図14-6)。第1世代では、単素子を用いているため、対象物を映像化するためには光学系をX軸とZ軸を中心に走査 (回転)させる必要があります。第2世代では、1次元アレイを用いているために、光学系はZ軸中心に走査させるだけで済みます。第3世代では、2次元アレイを用いているために光学系で走査する必要がありません。赤外線撮像装置の応用分野は、産業から医学、学術分野まで多方面に及んでいます (表1)。

なお、InSb・MCT・QWIPなどの量子型検出素子、微細加工技術を利用した熱型素子、CMOS回路との異種接合による2次元アレイが開発され、さらに高品質の画像が得られるようになりました。

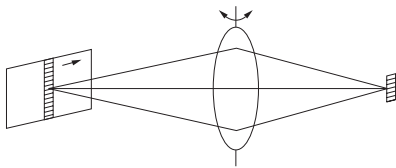
赤外線検出素子

[図14-6] 赤外線撮像装置の原理図

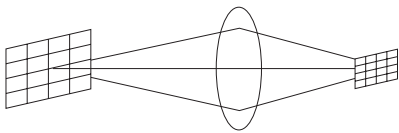
(a) 第1世代 (単素子による走査)



(b) 第2世代 (1次元アレイによる走査)



(c) 第3世代 (2次元アレイによる電子走査)

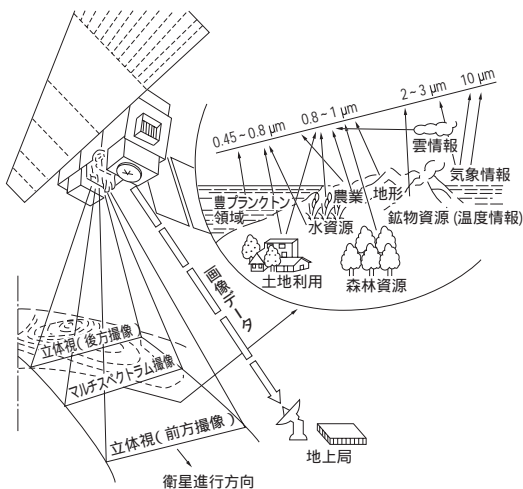


KIRDC0037JA

14-8 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14-7のように波長によって異なった情報を含んでいます。そ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別・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行われ、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14-7] 資源探査用光学システム³⁾



KIRDC0039JB

14-9 選別機器

有機物特有の吸収波長域を利用して、有機物が非有機物かの判別をすることができます。米・ジャガイモ・トマト・タマネギ・ニンニクなどの農作物と土塊・小石との区別を行うために、InGaAs PINフォトダイオードやPbS光導電素子が使われています。また、ベルトコンベアで移動する製品の温度・放射率・透過率の違いを検出することによって、製品の糖度などの選別を行う場合もあります。

14-10 FT-IR (フーリエ変換赤外分光法)

FT-IR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方法で、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を実現)のため光量が多い
- ・レーザ光によって波長を決めるために波長精度が高い

FT-IRの心臓部である赤外線検出素子には、以下の特長が必要とされます。

- ・広い感度波長範囲
- ・高感度
- ・光学系に合った受光面サイズ
- ・広い周波数帯域
- ・入射光強度に対して優れた直線性

2.5 μmから25 μmの広範囲の領域では、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MCTやInSbの量子型検出素子が使われています。

また、InGaAs PINフォトダイオードの利用によって、近赤外域への波長範囲が拡大しました。さらにMCTやInSbなどの1次元/2次元アレイによるマッピングや赤外イメージ分光への応用が期待されます。

参考文献

- 1) 大槻、赤外線技術、8 (1983)、P73
- 2) 宮内、センサ技術、15 (1985)10月号、P48
- 3) 工藤、奈倉、赤外線技術、11 (1986)、P73

必ずお読みください。

本資料の製品のご使用に際しては、最大定格や注意事項等の遵守をお願い致します。弊社は品質・信頼性の向上に努めておりますが、本製品の完全性を保証するものではありません。特に人の生命、身体または財産を侵害する恐れのある機器へご使用される場合には、通常発生し得る不具合を十分に考慮した適切な安全設計等の対策を施さなければ危険です。このようなご使用については、事前に仕様書等の書面による弊社の同意を得ていない場合は、弊社はその責を負いかねますのでご了承願います。

最終需要者における稼働の指導にあたっては、本資料の製品およびこれを使用した機器等の機能・性能や取扱いの説明、ならびに適切な警告・表示等を十分に行うようご配慮いただきたくお願い致します。

本資料の製品の保証は、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代品の納入を限度と致します。ただし保証期間内であっても、天災および不適切な使用（改造、ならびに本資料に記載の環境・適用分野・使用方法・保管・廃棄等に関する諸条件に反したこと等）に起因する損害等については、弊社はその責を負いかねますのでご了承願います。

本資料の応用例は、本資料の製品の代表的な使用例を説明するためのものであり、特定の使用目的への適合性や商業的利用の成否をも含め、何らの保証をするものではありません。また知的財産権の実施に対する保証または許諾を行うものでもありません。本製品の使用により、第三者と知的財産権に係る問題が発生した場合、弊社はその責を負いかねますのでご了承願います。

本資料の製品のうち、外国為替および外国貿易管理法に基づく戦略物資等に該当するものを輸出する場合には、同法に基づく日本国政府の輸出許可が必要になりますので、申請手続きをお願い致します。本資料に記載してある内容を、弊社の許諾なしに転載または複製をしないようお願い致します。

浜松ホトニクス株式会社

固体営業部 〒435-8558 静岡県浜松市東区市野町1126-1
東京支店 〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-8-21(虎ノ門33森ビル)
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)
仙台営業所 〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉1-6-11(日本生命仙台勾当台ビル)

本資料の記載内容は、平成19年9月現在のものです。製品の仕様は、改良のため予告なく変更することがあります。ご使用の際には、仕様書をご用命の上、最新の内容をご確認ください。

(053)434-3311 FAX (053)434-5184
(03)3436-0491 FAX (03)3433-6997
(06)6271-0441 FAX (06)6271-0450
(022)267-0121 FAX (022)267-0135

HAMAMATSU

jp.hamamatsu.com

Cat. No. KIRD9001J04
Sept. 2007