



Siフォトダイオード

目次

1. 動作原理

- p02
- 1-1 構造
 - 1-2 等価回路

2. 特性

- p03
- 2-1 電流-電圧特性
 - 2-2 直線性
 - 2-3 分光感度特性
 - 2-4 ノイズ特性
 - 2-5 感度均一性
 - 2-6 応答速度

3. 使い方

- p08
- 3-1 オペアンプとの接続
 - 3-2 応用回路例

4. 応用例

- p15
- 4-1 粒度分布計 (レーザ回折・散乱法)
 - 4-2 バーコードリーダ
 - 4-3 UVセンサ
 - 4-4 ロータリーエンコーダ
 - 4-5 カラーセンサ
 - 4-6 VICS (道路交通情報通信システム)

フォトダイオードは、光半導体素子のPN接合部に光を照射すると電流や電圧を発生する受光素子です。広い意味では太陽電池も含まれますが、通常は光の強弱の変化を精密に検出するセンサを意味します。Siフォトダイオードは以下の特長があり、光の有無・強弱・色などの検知に幅広く使用されます。

■ 入射光に対する優れた直線性 ■ 高い機械的強度 ■ 低ノイズ ■ 小型、軽量 ■ 広い感度波長範囲 ■ 長寿命

当社独自の半導体プロセス技術を生かしたSiフォトダイオードは、近赤外から紫外・高エネルギーまでの波長域にわたり、高速・高感度・低ノイズを特長としています。当社のSiフォトダイオードは、医療・分析・科学計測から光通信・民生機器まで幅広い用途に用いられています。メタル・セラミック・プラスチックから表面実装型まで多様なパッケージをそろえて、カスタムデザインにも幅広く対応しています。

浜松ホトニクスSiフォトダイオード

タイプ	特長	製品例
Siフォトダイオード	高感度・低ノイズを特長とした精密測光用、一般測光／可視域用のフォトダイオードです。	● 紫外～近赤外域用 ● 可視～近赤外域用 ● 可視域用 ● RGBカラーセンサ ● 真空紫外(VUV)検出用 ● 単一波長検出用 ● 電子線検出器用
Si PINフォトダイオード	任意の逆電圧を印加することにより、優れた応答特性を実現する高速フォトダイオードです。光ファイバ通信や光ピックアップなどの用途に適しています。	● 遮断周波数:10 MHz～
赤外高感度 Si PINフォトダイオード	900 nm以上の近赤外域の感度を向上させたフォトダイオードです。	● YAGレーザモニタ用
多素子型Siフォトダイオード	1パッケージ内に、複数の受光部を1次元・2次元に配列したフォトダイオードです。光の位置検出や分光光度計などの幅広い用途に応用できます。	● 分割型フォトダイオード ● 1次元フォトダイオードアレイ
プリアンプ付Siフォトダイオード 電子冷却型Siフォトダイオード	プリアンプ付Siフォトダイオードは、1パッケージ内にフォトダイオードとプリアンプが内蔵されているため、外来ノイズに強く、コンパクトな回路設計が可能になります。電子冷却型は、S/Nが大幅に改善されています。	● 分析／計測用

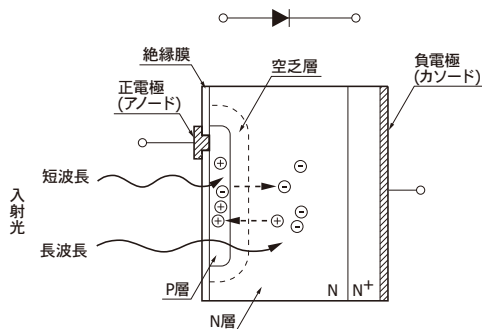
1. 動作原理

1-1 構造

図1-1にSiフォトダイオードの断面構造の例を示します。受光面側のP型領域（P層）と基板側のN型領域（N層）は、PN接合を形成し光電変換部として働きます。Siフォトダイオードの場合、P層は通常ボロンの選択拡散で、1 μm以下の厚さに形成されます。P層とN層の接合部の真性領域を空乏層といいます。表面のP層・N層および底面のN⁺層の厚さや不純物濃度をコントロールすることで、後述する分光感度特性や周波数特性を制御することができます。

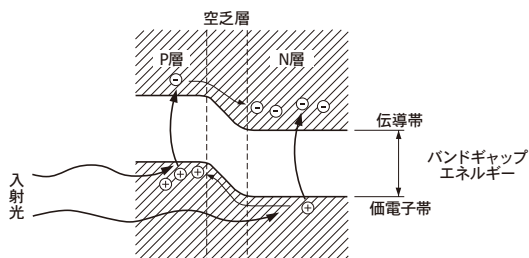
Siフォトダイオードに光が照射され、その光エネルギーがバンドギャップエネルギーより大きいと、価電子帯の電子は伝導帯へ励起され、もとの価電子帯に正孔を残します〔図1-2〕。この電子-正孔対は、P層・空乏層・N層のいたる所で生成し、空乏層中では電界のため電子はN層へ、正孔はP層へ加速されます。N層中で生じた電子-正孔対のうち、電子はP層から流れてきた電子とともにN層伝導帯に残り、正孔はN層中を空乏層まで拡散し、加速されてP層価電子帯に集まります。このように入射光量に比例して発生する電子-正孔対は、それぞれN層・P層中に蓄積され、P層は正に、N層は負に帯電します。P層とN層から電極を取り出し外部回路を接続すれば、N層側からは電子が、P層側から正孔がそれぞれ反対側の電極へ向かって流れ、電流が発生します。このような電流のもとになる半導体中の電子あるいは正孔は、キャリアと呼ばれます。

〔図1-1〕 Siフォトダイオードの断面構造の例



KPDC00023A

〔図1-2〕 SiフォトダイオードのPN接合の状態

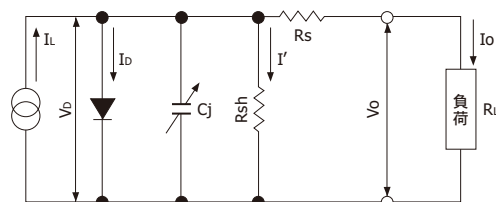


KPDC00033A

1-2 等価回路

Siフォトダイオードの等価回路を図1-3に示します。

〔図1-3〕 Siフォトダイオードの等価回路



I_L : 入射光による発生電流 (光量に比例)
 V_D : ダイオード両端の電圧
 I_D : ダイオード電流
 C_j : 接合容量
 R_{sh} : 並列抵抗
 I' : 並列抵抗電流
 R_s : 直列抵抗
 V_o : 出力電圧
 I_o : 出力電流

KPDC00043A

この等価回路から出力電流 (I_o)を求めると、式 (1-1) のようになります。

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{q V_D}{k T} - 1 \right) - I' \dots\dots\dots (1-1)$$

I_s : 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
 k : ボルツマン定数
 T : 素子の絶対温度

開放端電圧 (V_{oc})は、 $I_o=0$ のときの出力電圧で、式 (1-2)で表されます。

$$V_{oc} = \frac{k T}{q} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} + 1 \right) \dots\dots\dots (1-2)$$

I' が無視できる場合、 I_s は周囲温度に対し指数的に増加するため、 V_{oc} は周囲温度に逆比例し、 I_L の対数に比例することになります。しかし微弱光を検出する場合は、この関係が崩れてきます。

短絡電流 (I_{sc})は、 $R_L=0$ 、 $V_o=0$ のときの出力電流で、式 (1-3)で表されます。

$$I_{sc} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q \times I_{sc} \times R_s}{k T} - 1 \right) - \frac{I_{sc} \times R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (1-3)$$

式 (1-3)の第2項、第3項が、短絡電流の直線性の限界を決定する原因となります。ただし R_s は数Ω程度、 R_{sh} は $10^7 \sim 10^{11} \Omega$ となり、第2項、第3項は広い範囲において無視できることが分かります。

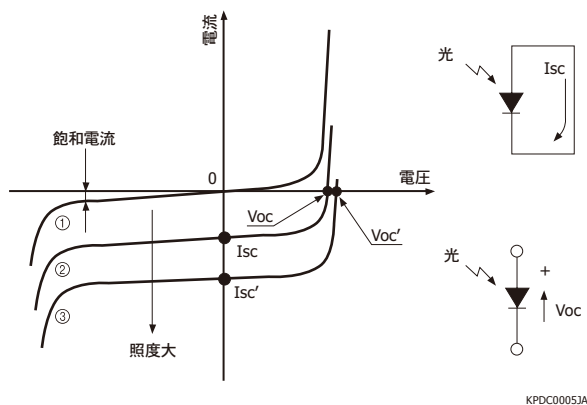
2. 特性

2-1 電流-電圧特性

暗中でSiフォトダイオードに電圧を加えると、図2-1の①の曲線のように整流用ダイオードと同様の電流-電圧特性が得られます。光が照射されると①の曲線は②へ平行移動し、さらに光を強くすると③へと平行移動します。②または③の場合に、Siフォトダイオードの両端子を短絡しておくと、光の強度に比例した短絡電流 I_{sc} 、 I_{sc}' がアノード側からカソード側へ向かって流れます。回路が開いている場合には、アノード側を正とした開放端電圧 V_{oc} 、 V_{oc}' が発生します。

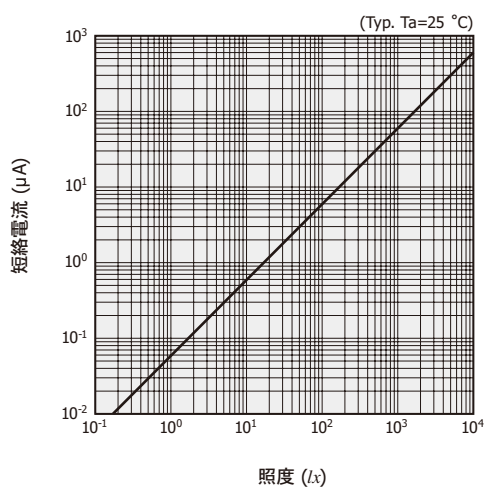
V_{oc} は、光量変化に対して対数的に変化しますが、温度による変化が大きく光量測定には不適當です。 I_{sc} と V_{oc} の入射光量に対する関係は図2-2のようになります。

[図2-1] 電流-電圧特性

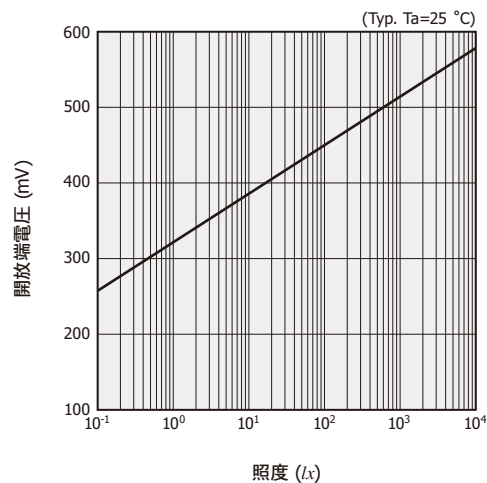


[図2-2] 入射光量と出力信号の関係 (S2386-5K)

(a) 短絡電流



(b) 開放端電圧

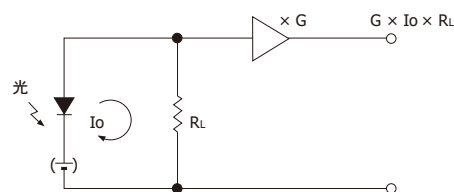


KPDB0002JB

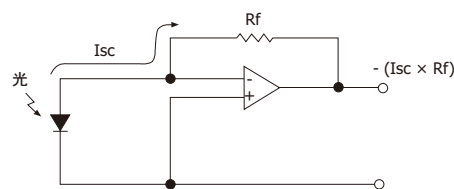
光電流を測定する基本回路を図2-3に示します。(a)は、 $I_o \times R_L$ の電圧をゲイン G の増幅器で増幅する方法です。逆電圧を印加することで、より高い直線性が確保されます [図2-6 (a)、図2-7]。また、(b)はオペアンプを接続する方法です。オペアンプのオープンループゲインを A とすると、負帰還回路により、負荷抵抗 R_L に相当する等価入力抵抗は $\frac{R_f}{A}$ と数桁小さくなり、理想的な短絡電流の測定が可能になります。広範囲の光電流の測定をする必要のある場合には、大きな光量に対しても出力が飽和しないように R_L や R_f を適切に選択する必要があります。

[図2-3] 接続例

(a) 負荷抵抗を接続した場合



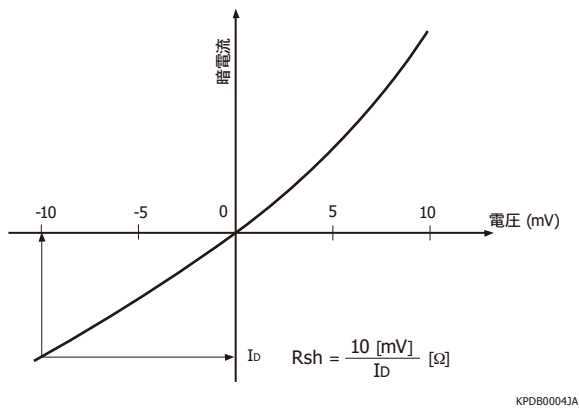
(b) オペアンプを接続した場合



KPDC0006JA

図2-1①の曲線の原点付近を拡大した図を図2-4に示します。電圧が ± 10 mV程度の範囲では暗電流 (I_D)がほぼ直線的に変化します。この直線の傾きにより並列抵抗 (R_{sh})が表され、後述する熱雑音電流源になっています。当社製Siフォトダイオードは、カソードに10 mV印加時の暗電流を用いて並列抵抗を求めています。

[図2-4] 暗電流-電圧 (図2-1①の原点付近を拡大)



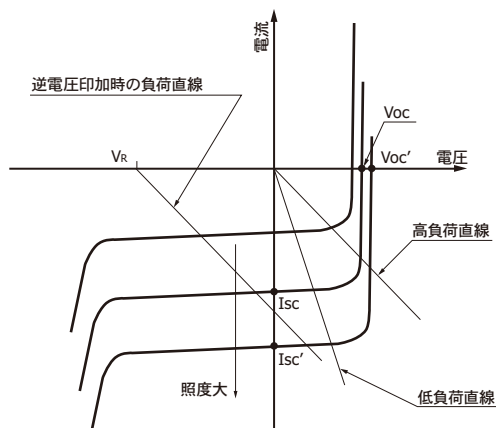
2-2 直線性

Siフォトダイオードの光電流は入射光量に対して優れた直線性を持ち、入射光量 $10^{-12} \sim 10^{-2}$ W程度の範囲では、9桁以上に及ぶ直線性をもっています（フォトダイオードの種類や使用回路などで異なります）。直線性の下限は雑音等価電力（NEP: Noise Equivalent Power）により決定され、上限は負荷抵抗、逆電圧などから式（2-1）で求められ、直列抵抗成分が大きいほど直線性は悪化します。

$$P_{\text{sat}} = \frac{V_{\text{bi}} + V_{\text{R}}}{(R_{\text{s}} + R_{\text{L}}) \times S_{\lambda}} \quad \text{..... (2-1)}$$

P_{sat} : 直線性上限入射エネルギー [W] ($P_{\text{sat}} \leq 10$ mW)
 V_{bi} : 接触電圧 [V] (0.2~0.3 V程度)
 V_{R} : 逆電圧 [V]
 R_{s} : 素子直列抵抗 (数Ω程度)
 R_{L} : 負荷抵抗 [Ω]
 S_{λ} : 波長 λ における受光感度 [A/W]

[図2-5] 電流-電圧特性と負荷直線



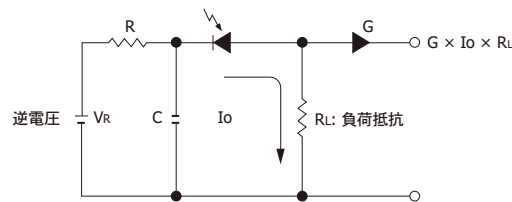
直線性の上限を高める目的で逆電圧を印加すると効果的な場合があります。図2-6は逆電圧を印加する場合の接続例です。(a)は負荷抵抗で光電流を電流-電圧変換してアンプで増幅する例です。負荷抵抗が大きいと直線性の上限が制限されるため [式 (2-1)]、大きな負荷抵抗を接続することができず微弱光の検出には適し

ていません。(b)はオペアンプ入力端子へ直接にフォトダイオードを接続してフィードバック抵抗 (R_{f}) で電流-電圧変換する例です。この場合、フォトダイオードに対する負荷抵抗はオペアンプの入力抵抗であり不変の値です。オペアンプの入力抵抗は数Ωと低い値なのでフィードバック抵抗をいくら大きな値にしてもオペアンプの出力が飽和しない範囲では光電流は飽和しないため、(b)は微弱光の検出に適しています。また、図2-7は逆電圧 (V_{R}) による直線性上限の変化を示します。逆電圧を加えることは、直線性の改善に役立ちますが、一方では暗電流を増大させノイズの増加をもたらします。また、過大な逆電圧はフォトダイオードを破損するため、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の電位になるように極性を設定してください。

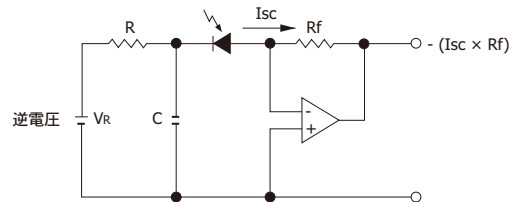
なお、レーザ光を微小スポットに集光して入射したときは、単位面積当たりの入射光量が大きくなり、直線性が悪くなりますので、注意が必要です。

[図2-6] 接続例 (逆電圧を印加する場合)

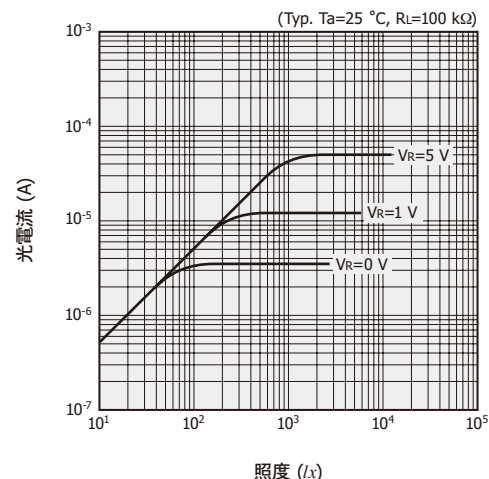
(a)



(b)



[図2-7] 光電流-照度 (S1223)



2-3 分光感度特性

「1-1 動作原理」で述べたように、吸収された光のエネルギーがSiフォトダイオードのバンドギャップエネルギーより大きくないと光起電力効果は起こりません。

カットオフ波長 (λ_c)は、式 (2-2)で表されます。

$$\lambda_c = \frac{1240}{E_g} [\text{nm}] \dots\dots\dots (2-2)$$

E_g : バンドギャップエネルギー [eV]

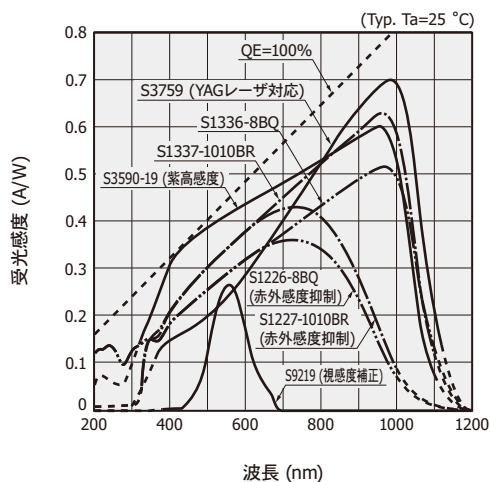
Siの場合は、常温時のバンドギャップエネルギーは1.12 eVのため、カットオフ波長は1100 nmです。短波長側では、入射光が表面拡散層内で吸収される割合が急速に増大するため [図1-1]、拡散層が薄くPN接合が表面に近いものほど感度が高くなります。短波長側のカットオフ波長は、一般のSiフォトダイオードでは320 nm、紫外域用のSiフォトダイオード (S1226/S1336シリーズなど)では190 nmです。

カットオフ波長は、Siフォトダイオード固有の物性と受光窓の波長透過率によって決まります。硼珪酸ガラスやコーティング樹脂は、約300 nmより短波長側では光を吸収してしまうため、これらを窓材として使用すると短波長の感度がなくなります。

300 nmよりも短い波長を検出する場合は、石英窓のタイプを使用します。また、可視域だけの測光を行う場合は、可視域だけ透過する視感度補正フィルタのタイプを用います。

図2-8に各種Siフォトダイオードの分光感度特性を示します。BQタイプは石英窓、BRタイプは樹脂コーティング窓のタイプです。なおS9219は、視感度補正フィルタ付Siフォトダイオードです。

【図2-8】 分光感度特性 (Siフォトダイオード)



KSPD80247JB

ある波長において、光電流として取り出される電子あるいは正孔の数を入射光子 (光子)数で割った値を量子

効率 (QE)と呼びます。量子効率 は式 (2-3)で表されます。

$$QE = \frac{S \times 1240}{\lambda} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (2-3)$$

S: 受光感度 [A/W]
 λ : 波長 [nm]

赤外高感度Si PIN フォトダイオードは、波長 900 nm～1100 nmの近赤外域で大幅な高感度化を実現したタイプです。

Siは可視域や紫外域において光吸収係数が大きいため、薄いウエハでも十分検出できます。しかし、近赤外域では光吸収係数が極端に小さくなり透過する割合が増えるため、感度が低下します。近赤外域においてSiで高感度を実現するには、厚いSiウエハを用いて光吸収層を厚くする方法がありますが、この場合、高い印加電圧が必要、暗電流が大きくなる、応答速度が遅くなるなどのデメリットが発生します。

2-4 ノイズ特性

Si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。Si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 i_j (またはジョンソン雑音電流)、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。

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

i_j は R_{sh} の熱雑音と考えられるため、式 (2-5)のようになります。

$$i_j = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{sh}}} [A] \dots\dots\dots (2-5)$$

k: ボルツマン定数
T: 素子の絶対温度
B: 雑音帯域幅

図2-6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 (2-6)のようになります。

$$i_{SD} = \sqrt{2q I_D B} [A] \dots\dots\dots (2-6)$$

q: 1電子当たりの電荷量
 I_D : 暗電流

入射光による光電流 (I_L)で発生するショットノイズ i_{SL} は式 (2-7)のようになります。

$$i_{SL} = \sqrt{2q I_L B} [A] \dots\dots\dots (2-7)$$

$I_L \gg 0.026/R_{sh}$ 、または $I_L \gg I_D$ の場合、式 (2-5) または式 (2-6) の代わりに式 (2-7) のショットノイズ電流 i_{SL} が支配的になります。

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

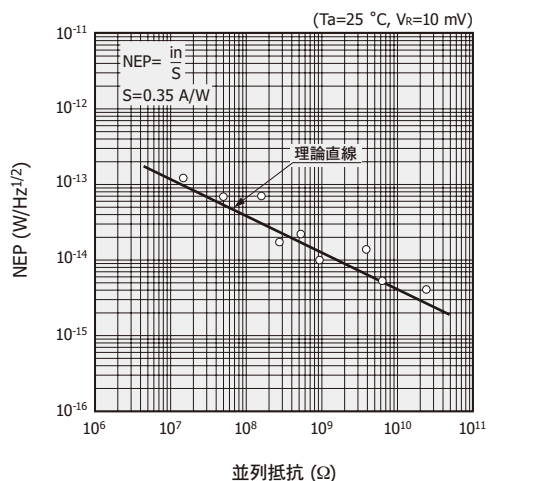
一般に Si フォトダイオードの最小光検出限界は、式 (2-5) または式 (2-6) のノイズ電流と等しい電流を発生させる入射光量 (雑音等価電力: NEP) で表します。

$$NEP = \frac{i_n}{S} [W/Hz^{1/2}] \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

i_n : ノイズ電流 [$A/Hz^{1/2}$]
 S : 受光感度 [A/W]

i_j が支配的な場合の NEP と並列抵抗の関係を図 2-9 に示します。理論値にほぼ一致していることが分かります。

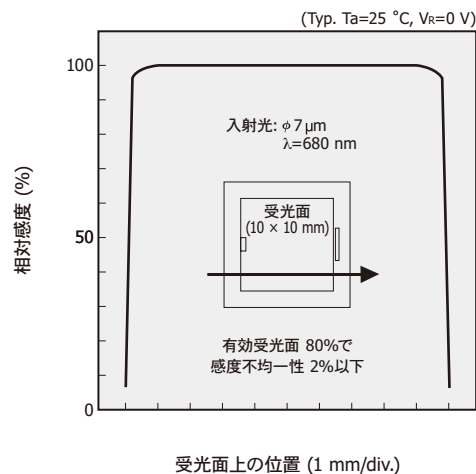
[図2-9] NEP-並列抵抗 (S1226-5BK)



2-5 感度均一性

感度均一性は、受光面内での感度の均一性を示す値です。Si フォトダイオードは感度均一性が非常に優れており、可視～近赤外域で有効受光面内 80% の範囲のバラツキは 2% 以下です。感度均一性の測定は、数 μm から数十 μm に集光された光 (レーザダイオードなど) を用いて行われます。

[図2-10] 感度均一性 (S1227-1010BQ)



KPD800063B

2-6 応答速度

フォトダイオードの応答速度は、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、通常は上昇時間または遮断周波数で表します。上昇時間は、出力信号が 10% から 90% に達する時間で、主に以下の要素で決まります。

(1) 端子間容量 C_t と負荷抵抗 R_L の時定数 t_1

C_t は、パッケージ容量とフォトダイオード接合容量 (C_j) の和です。 t_1 は式 (2-9) で表されます。

$$t_1 = 2.2 \times C_t \times R_L \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

t_1 を速くするためには、 C_t または R_L を小さく設計する必要があります。 C_j は、受光面積 (A) にほぼ比例し、空乏層幅 (d) に逆比例します。空乏層幅は逆電圧 (V_R) と基板材料の比抵抗 (ρ) との積の 2 乗根から 3 乗根に比例し、式 (2-10) のように表されます。

$$C_j \propto A \{(V_R + 0.5) \times \rho\}^{-1/2 \sim -1/3} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

したがって、 t_1 を速くするためには、 A が小さく ρ の大きなフォトダイオードに逆電圧を印加する必要があります。ただし、それは t_1 が応答速度の支配的要素となっている場合であり、 ρ が大きくなるとキャリアの空乏層走行時間 (t_3) が遅くなるため注意が必要です。また逆電圧を印加した場合、暗電流が増大するため、低照度領域での使用時には注意が必要です。

(2) 空乏層外生成キャリアの拡散時間 t_2

空乏層外生成キャリアは、フォトダイオードの受光部から外れたチップ周辺や空乏層よりさらに深い基板部で入射光が吸収された場合に発生します。このキャリアが拡散するのに要する時間 (t_2) は、数 μs 以上になる場合があります。

(3) キャリアの空乏層走行時間 t_3

空乏層中をキャリアが走行する速度 (v_d) は、キャリアの移動度 (μ) と空乏層中の電界 (E) で表すと $v_d = \mu E$ となります。平均的な電界は、逆電圧 (V_R) と空乏層幅 (d) で表すと $E = V_R/d$ であるため、 t_3 はおおよそ式 (2-11) で近似されます。

$$t_3 = \frac{d}{v_d} = \frac{d^2}{\mu V_R} \dots\dots\dots (2-11)$$

t_3 を速くするためには、キャリアの走行距離を短くするか、逆電圧を高くする必要があります。比抵抗が大きいほど、 t_3 は遅くなります。

以上の3要素がフォトダイオードの上昇時間を決定します。上昇時間 (t_r) は式 (2-12) で近似されます。

$$t_r = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2} \dots\dots\dots (2-12)$$

式 (2-12) から分かるように、応答速度はこの3要素の中で最も遅い要素が支配的になります。前述したように t_1 と t_3 は相反する要素を含み、どちらかを速くすればどちらかが遅くなるため、用途に合わせたバランスのよい設計を行う必要があります。

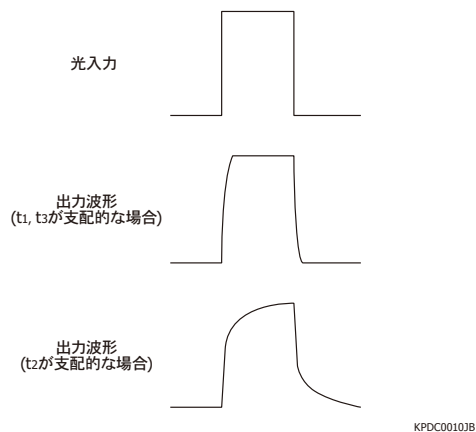
遮断周波数 (f_c) は、正弦波発光させたレーザダイオードなどの光が入射した場合、フォトダイオードの出力が正弦波の周波数変動に対して相対的に100%を維持している出力より3 dB減衰する周波数で、上昇時間 (t_r) とは式 (2-13) でおおよそ近似されます。

$$f_c = \frac{0.35}{t_r} \dots\dots\dots (2-13)$$

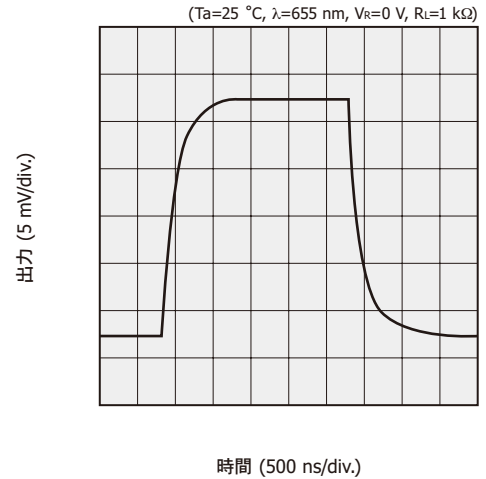
図2-11にSiフォトダイオードの応答波形と周波数特性の例を示します。

[図2-11] 応答波形と周波数特性の例

(a) 応答波形

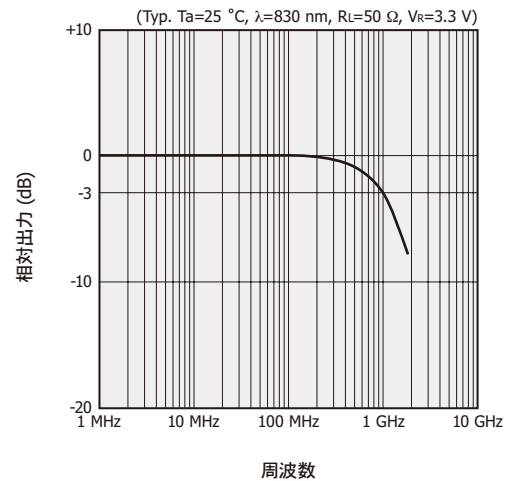


(b) 応答波形 (S2386-18K)



KPDB00103A

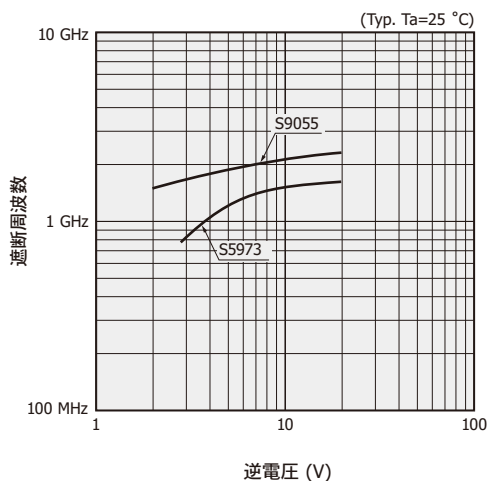
(c) 周波数特性 (S5973)



KSPDB02983A

PINフォトダイオードは、空乏層外生成キャリアの発生が少なく、端子間容量が小さく、空乏層走行時間が短くなるように設計されています。そのため、高速応答が要求される光通信などに適しています。当社製PINフォトダイオードは、逆電圧を加えた際の暗電流が比較的少ない上、優れた耐圧性をもっています。図2-12に遮断周波数の逆電圧による変化を示します。

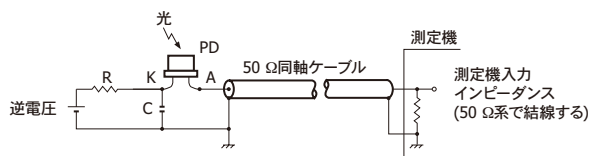
[図2-12] 遮断周波数-逆電圧 (S5973, S9055)



KSPD802973A

図2-13は簡易的な接続例で、負荷抵抗（測定機入力インピーダンス）は50 Ωになっています。セラミックコンデンサ Cは逆電圧電源からのリップルやノイズを抑えるためのもので、抵抗 RはSiフォトダイオードの保護用です。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となるようにRの値を選定します。Si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ます。

[図2-13] 同軸ケーブルとの接続例



PD: 高速Si PINフォトダイオード (S5972, S5973, S9055, S9055-01など)
R : 10 kΩ, 光電流による電圧降下は逆電圧より十分小さいこと
C : 0.1 μFセラミック

KPDC00093A

3. 使い方

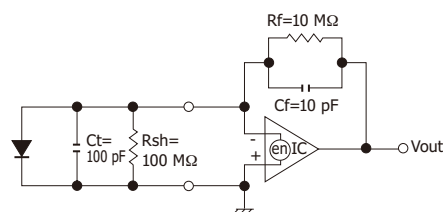
3-1 オペアンプとの接続

» 帰還回路

図3-1は、Siフォトダイオードとオペアンプの基本的な接続例です。この極性の接続において出力電圧 V_{out} は、直流や低い周波数の範囲では入力電流（フォトダイオードの短絡電流 I_{sc} ）の逆相になります ($V_{out} = -I_{sc} \times R_f$)。帰還抵抗 R_f は、入力電流をどれだけ増倍したいかによって決まりますが、フォトダイオードの並列抵抗 R_{sh} より大きくなると、オペアンプの入力換算雑音電圧 e_n と入力オフセット電圧が $(1 + \frac{R_f}{R_{sh}})$ 倍されて V_{out} に重畳してきます。さらに後述するオペアンプのバイアス電流誤差も大きくなるため、帰還抵抗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、入力容量 C_t が存在する場合に高い周波数領域で回路が不安定になるのを防ぐためのものです。帰還容量と帰還抵抗は、同時に $C_f \times R_f$ の時定数をもつローパスフィルタとしても作用するため、用途に合わせた値に設定します。放射線検出など入射光の光量を積算する場合は、 R_f を取り去りオペアンプと C_f の積分回路を構成します。ただし連続した信号検知を行うためには、 C_f を放電するスイッチが必要です。

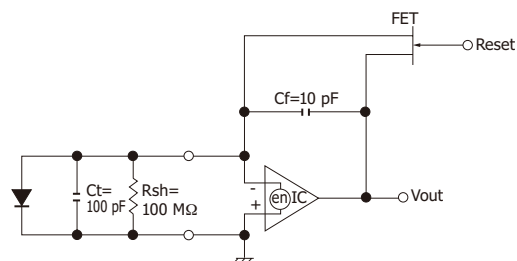
[図3-1] Siフォトダイオードとオペアンプの接続例

(a)



KPDC00113A

(b)



KPDC00353A

IC: オペアンプ
 e_n : オペアンプの入力換算雑音電圧

» バイアス電流

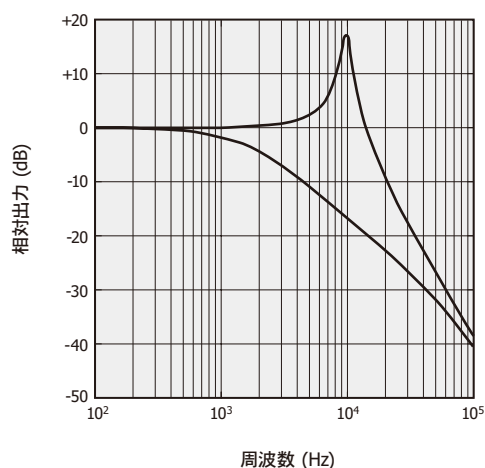
実際のオペアンプの入力インピーダンスは無限大ではなく、入力端子にはいくらかのバイアス電流が流入または流出します。検出電流の大きさによっては、このバイアス電流が誤差になります。バイアス電流は、FET入力型オペアンプでは0.1 pA以下のものもありますが、バイポーラ型オペアンプでは数百pA～数百nA程度です。FET入力型オペアンプのバイアス電流は、一般に10 °Cの温度上昇で2倍になりますが、バイポーラ型オペアンプでは減少します。このため、高温仕様の回路を設計する場合、バイポーラ型オペアンプの使用も考慮する必要があります。バイアス電流による誤差電圧は、オフセット電圧と同様にオペアンプのオフセット調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。回路を構成する基板のリーク電流は、場合によってはオペアンプのバイアス電流より大きくなる場合があります。そのため、最適なオペアンプの選択とともに、パターンと部品の配置や、ガードリングやテフロン端子の採用について適切な配慮をする必要があります。

» ゲインピーキング

Siフォトダイオードとオペアンプ回路の高域周波数特性は、 $R_f \times C_f$ の時定数で決まりますが、端子間容量すなわち入力容量が大きい場合には、ゲインピーキングが起ることがあります。図3-2はゲインピーキングの周波数特性の例です。高い周波数領域で出力電圧が異常に大きくなり [図3-2 (a) 上トレース]、パルス光に対する出力電圧波形に著しいリングングが発生しています [図3-2 (b)]。また、オペアンプ入力ノイズに対しても前述のゲインが作用するため、異常に大きなノイズが観測されます [図3-2 (c) 上トレース]。これらは高い周波数領域で、オペアンプの入力容量と帰還容量の各リアクタンスがノイズに対して不安定な増幅器を形成するために生ずる現象で、光検出性能に悪影響を与えます。

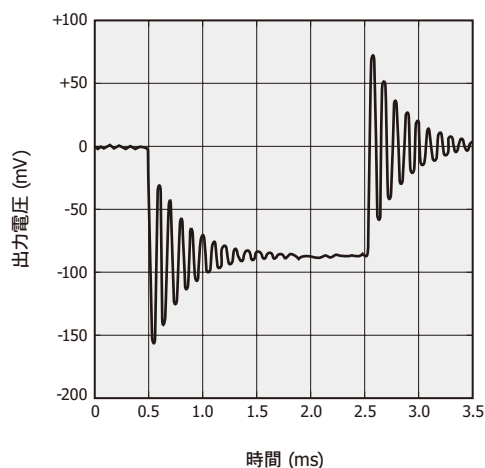
【図3-2】 ゲインピーキング

(a) 周波数特性



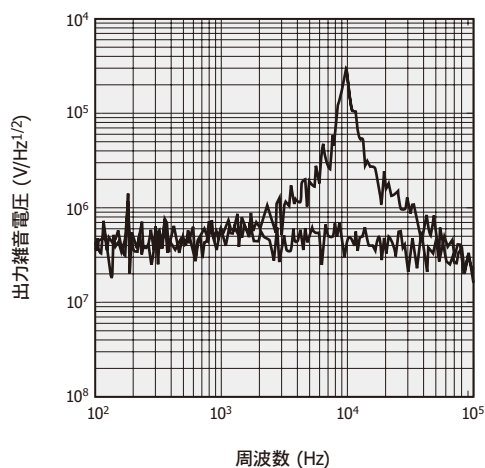
KPD800193A

(b) パルス光応答



KPD800203A

(c) ノイズ出力の周波数特性



KPD800213A

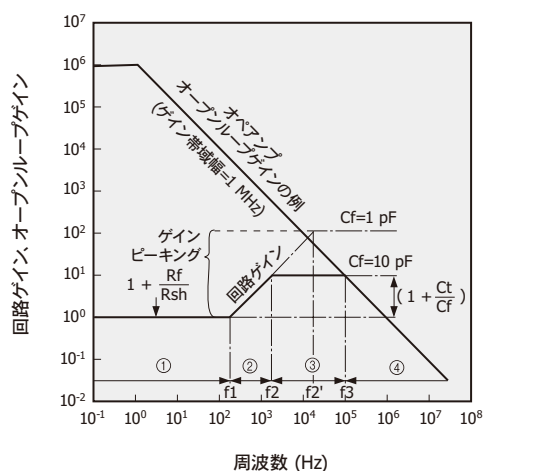
ゲインピーキングの対策

ゲインピーキングやリングングを起こさないで広い周波数特性を達成するためには、フォトダイオード・オペアンプ・帰還抵抗・帰還容量を最適に設定する必要があります。この場合でも「2-6 応答速度」で述べたように端子間容量 (C_t) を小さくすると効果的です。オペアンプは、一般的に高速・広帯域特性のもののほどゲインピーキングを起こしにくくなりますが、内部の位相補償が十分でないと逆に発振する場合があります。帰還素子には、抵抗だけでなく帰還容量も並列に接続してゲインピーキングを避けます。以上の対策方法について図3-1 (a)の回路を例にとると、次のように説明できます。

図3-3において低い周波数領域①では、オペアンプの回路ゲインは R_{sh} と R_f の抵抗比だけで決まります。

$\frac{R_{sh} + R_f}{2\pi R_{sh} R_f (C_f + C_t)}$ の周波数 f_1 からは、周波数の増大とともにゲインが増加する②の区間になります。次に $\frac{1}{2\pi C_f R_f}$ の周波数 f_2 より高い周波数では、オペアンプの回路ゲインは C_t と C_f の比で決まる③の平坦な区間になります。そして、オペアンプのオープンループゲイン (通常 6 dB/oct. で減衰) の曲線に接する周波数 f_3 から④の領域になります。ここで f_1 、 f_2 は、図3-1 (a)の回路の条件ではそれぞれ 160 Hz、1.6 kHz に相当します。 $C_f = 1$ pF とすると、 f_2 は f_2' に移動し、回路ゲインはさらに大きくなります。このとき注目すべきことは、③の回路ゲイン上昇の設定がオペアンプのオープンループゲイン曲線を上回っているため、③の領域が存在しないということです。この状態においては、オペアンプ回路の周波数特性ではゲインピーキング、パルス光応答特性ではリングングを生じ、不安定になります [図3-2]。

[図3-3] ゲインピーキングの図式的求め方



ゲインピーキングの対策のためには、以下の点が必要です。

- (1) 図3-3の③のような平坦な領域が存在するように R_f と C_f を決定します。
- (2) f_2 がオペアンプのオープンループゲイン直線の右側に位置する場合、ゲインが1になる周波数 (ゲイン帯域幅) が高いオペアンプにかえて、③の領域を設定します。
- (3) C_t の値が小さいフォトダイオードと取り替えます。図3-3の例では、 $(1 + \frac{C_t}{C_f})$ を1に近づけるようにします。

(1)(2)により、ゲインピーキング、リングングは減少あるいは発生しなくなります。しかし、高い周波数領域③では回路ゲインが存在しており、オペアンプの入力ノイズや帰還抵抗のノイズが減衰を受けず、場合によっては増幅されて出力に現れます。これを避けるためには (3) の方法を行います。

このような手順で、通常のゲインピーキングやリングングによるS/N劣化は解決できます。なお、上記対策とは関係なく、オペアンプの出力に数百pF～数nF以上の負荷容量 (数メートル以上の同軸ケーブルやコンデンサなど) を接続すると、オペアンプによっては発振することがあるため、負荷容量はできるだけ小さくする必要があります。

3-2 応用回路例

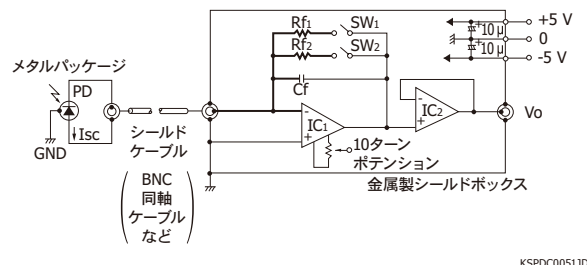
極微弱光検出回路

極微弱光を検出する回路では、周囲からの電磁ノイズ、電源からの交流ノイズ、オペアンプのもつノイズなどを低減するための対策が必要です。

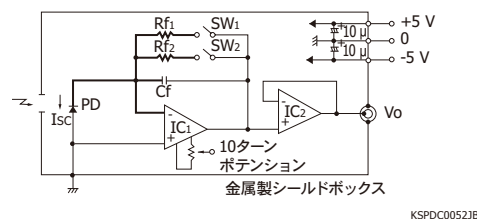
周囲からの電磁ノイズに対しては、図3-4のような対策を行います。

[図3-4] 極微弱光センサヘッド

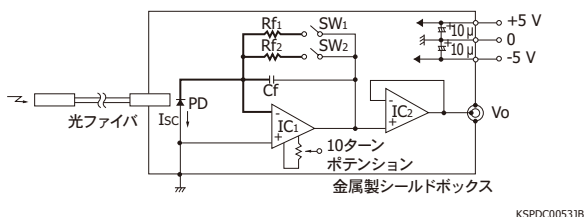
(a) シールドケーブルをフォトダイオードに接続した例



(b) 回路全体を金属製シールドボックスに収納した例



(c) 光ファイバを使用した例



太線の部分は、ガードパターン内またはテフロン端子上に配線
 IC1: FET入力オペアンプなど
 IC2: OP07など
 Cf: 10 pF~100 pF スチコン
 Rf: 10 GΩ max.
 SW: リーク電流の小さいリードリレースイッチ
 PD: S1226/S1336/S2386 シリーズ, S2281 など

$$V_o = I_{sc} \times R_f [V]$$

フォトダイオードの受光部をGNDに終端してシールド層として使い、信号をカソード端子から取り出すことも有効な対策です。電源からの交流ノイズに対しては、電源ラインにRCフィルタやLCフィルタを入れることで対策を行います。なお、電源として乾電池を使用することも有効な対策となります。オペアンプのもつノイズに対しては、 $1/f$ ノイズが小さく入力換算雑音電流の低いオペアンプを選択することによって対策を行います。さらに、信号の周波数帯域に合わせて回路の周波数帯域を帰還容量 (C_f) を用いて制限することによって、高周波ノイズを低減します。

次に、出力誤差 (オペアンプの入力バイアス電流や入力オフセット電圧、回路配線の引き回し、回路基板表面のリーク電流などによる) の低減が必要です。入力バイアス電流が数百fA以下で、FET入力型オペアンプか低 $1/f$ ノイズでCMOS入力のおペアンプを選択します。さらに、入力オフセット電圧が数mV以下で、オフセット調整端子があるオペアンプが有効です。回路基板は、高絶縁抵抗の材質のものを使用します。フォトダイオードからオペアンプの入力端子までの配線、および帰還抵抗と帰還容量の入力側配線は、ガードパターンを使用するか、テフロン端子を使用した空中配線を行い、基板表面のリーク電流対策を行います。

なお、極微弱光検知用フォトダイオード用アンプとしてフォトセンサアンプ C6386-01、C9051-01、C9329-01を用意しています。

[図3-5] フォトセンサアンプ

(a) C6386-01

(b) C9051-01



(c) C9329-01

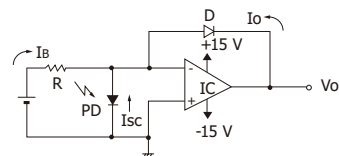


フォトダイオード、BNC-BNCプラグ付同軸ケーブルは別売

▶ 光量-対数電圧変換回路

光量-対数電圧変換回路 [図3-6] の出力電圧は、検出光量の対数的変化に比例します。対数変換用のログダイオード D は、低暗電流で低直列抵抗のタイプを使用します。小信号トランジスタのB-E間や接合型FETのG-S間をログダイオードとして利用することもできます。 I_B は、D にバイアス電流を供給して回路動作点を設定するための電流源です。 I_B を供給しないと、フォトダイオードの短絡電流 I_{sc} がゼロになったとき回路がラッチアップします。

[図3-6] 光量-対数電圧変換回路



D: 低暗電流で低直列抵抗のダイオード
 I_B : 回路動作点設定用電流源, $I_B \ll I_{sc}$
 R: 1 GΩ~10 GΩ
 I_o : D の飽和電流, $10^{-15} \sim 10^{-12}$ A
 IC: FET入力型オペアンプなど

$$V_o \approx -0.06 \log \left(\frac{I_{sc} + I_B}{I_o} + 1 \right) [V]$$

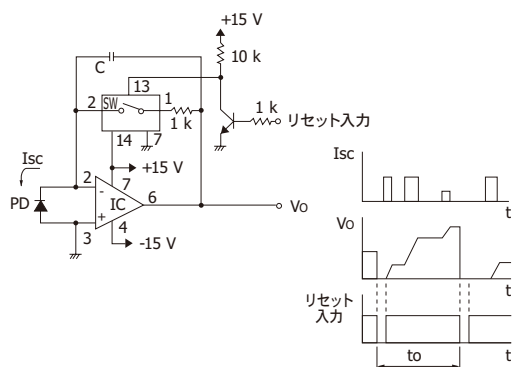
KPDC00213A

▶ 光量積分回路

フォトダイオードとオペアンプの積分回路を用いた光量積分回路です。波高値・周期・パルス幅などが不規則な光パルス列の積算光量や平均光量の測定などに使用します。

図3-7のICとCは積分器を構成し、パルス光によって発生する短絡電流 I_{sc} を積分コンデンサ C に蓄えます。リセット直前の出力電圧 V_o と積分時間 t_o および既知のCの値から、短絡電流の平均値が求められます。リセット時の誤差をなくするため、Cは誘電吸収が小さいコンデンサを使用します。なお、SWはCMOS型アナログスイッチです。

[図3-7] 光量積分回路



リセット入力: TTL Lowレベルでリセット
IC: LF356など
SW: CMOS 4066
PD: S1226/S1336/S2386シリーズなど
C: ボリカーボネートコンデンサなど

$$V_o = I_{sc} \times t_o \times \frac{1}{C} [V]$$

KPDC0027JB

簡易照度計 (1)

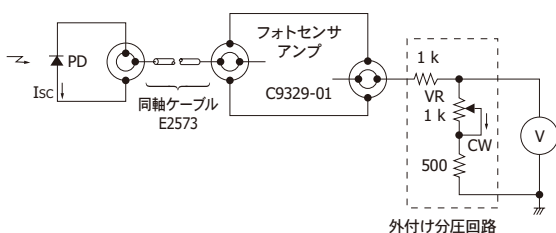
視感度補正された当社製Siフォトダイオード S9219とフォトセンサアンプ C9329-01を用いた簡易照度計回路です。図3-8のように、C9329-01の出力に抵抗を用いた分圧回路を外付けして1 Vレンジの電圧計に接続することによって、最大1000 lxの照度を測定できます。

この回路の校正には標準光源を使用しますが、標準光源がない場合は100 Wの白色光源を利用して簡易的な校正を行うことも可能です。

校正方法を以下に示します。初めにC9329-01のLレンジを選択し、可変抵抗器 VRを時計方向へ止まるまで回します。この状態でS9219を遮光して、電圧計が0 VになるようにC9329-01のゼロ調整ボリュームを回して調整します。次に白色光源を点灯させ、電圧計の表示が0.225 Vとなるように白色光源とS9219との距離を調整します（このときS9219の表面の照度は約100 lxになります）。続いて電圧計の表示が0.1 VとなるようにVRを反時計方向に回して調整し、校正を終了します。

校正後は、C9329-01のLレンジで1 mV/lx、Mレンジで100 mV/lxの出力となります。

[図3-8] 簡易照度計 (1)



PD: S9219 (4.5 μA/100 lx)

KSPDC0054JC

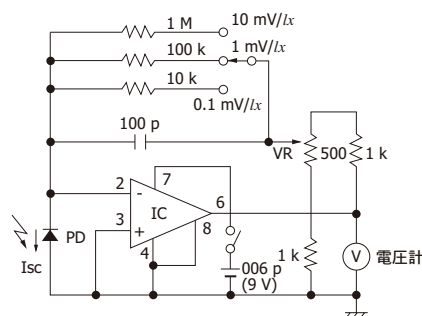
簡易照度計 (2)

視感度補正されたSiフォトダイオード S16839-01MSとオペアンプの電流-電圧変換回路を用いた簡易照度計回路です。1 Vレンジの電圧計に接続することによって、最大10000 lxの照度を測定できます。

オペアンプは、入力バイアス電流が小さい単電源の低消費電流タイプを使用します。この校正は100 Wの白色光源を利用した簡易的な方法で行うことが可能です。

初めに10 mV/lxレンジを選択し、メータ校正用ボリュームのしゅう動端子とオペアンプの出力端子を短絡します。次に白色光源を点灯させ、電圧計の表示が0.45 Vとなるように白色光源とS16839-01MSとの距離を調整します（このときS16839-01MSの表面の照度は約100 lxになります）。続いて電圧計の指示が1 Vとなるようにメータ校正用ボリュームを調整し、校正を終了します。

[図3-9] 簡易照度計 (2)



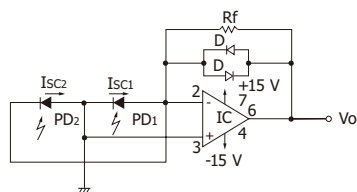
VR: メータ校正用可変抵抗
IC: TLC271など
PD: S16839-01MS (0.45 μA/100 lx)

KPDC0018JF

光量バランス検知回路

図3-10は、逆並列接続した2つのSiフォトダイオード PD1・PD2とオペアンプの電流-電圧変換回路を用いた光量バランス検知回路です。受光感度は帰還抵抗 Rfの値で決まります。PD1・PD2に入射する光量が等しいとき、出力電圧 Voはゼロになります。2つのダイオード Dが逆接続されているため、PD1・PD2の受光量がアンバランスの状態ではVo=±0.5 V程度の範囲に制限され、バランス状態の近傍だけを高感度に検知できます。またフィルタを用いて、特定波長域の光量バランス検知に利用することができます。

[図3-10] 光量バランス検知回路



PD: S1226/S1336/S2386シリーズなど
IC: LF356など
D: ISS226など

$$V_o = R_f \times (I_{sc2} - I_{sc1}) \text{ [V]}$$

(ただし $V_o < \pm 0.5 \text{ V}$)

KPDC00173B

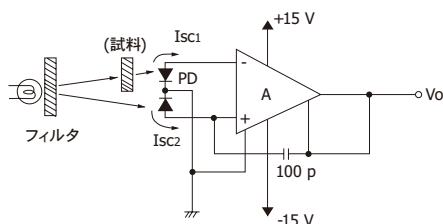
吸光度計

専用ICと2つのSiフォトダイオードを使用した、2つの電流入力の対数比が得られる吸光度計です [図3-11]。光源の光の強度と試料を通過した後の光の強度を2つのSiフォトダイオードで測定して比較することで、試料の吸光度を測ることができます。

初めに2つのSiフォトダイオードの短絡電流が同じ値になるように絞りなどの光学系を調整して、出力電圧 V_o が 0 V となるようにします。次に、試料を片側の光路に挿入します。このときの出力電圧の値が、試料の吸光度となります。吸光度 A と出力電圧 V_o の関係は、 $A = -V_o \text{ [V]}$ で表されます。

必要に応じて、図3-11のように光源の前にフィルタを設置することで、特定波長域や単色光での分光吸光度を測定することができます。

[図3-11] 吸光度計



A: Logアンプ
PD: S5870など

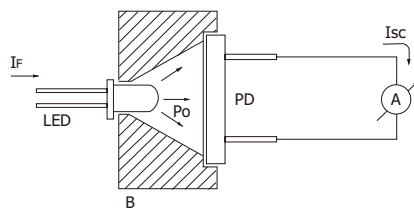
$$V_o = \log(I_{sc1}/I_{sc2}) \text{ [V]}$$

KPDC00253C

LEDの全放射光量の測定

LEDの発光波長幅は数十nm程度と狭いため、LEDのピーク発光波長におけるSiフォトダイオードの受光感度からLEDの放射光量を知ることができます。図3-12においてLED側面からの光放射成分は、表面を鏡面加工した反射ブロック B で正面側に反射され、全放射光量がSiフォトダイオードで検知されます。

[図3-12] LEDの全放射光量の測定



A: 電流計, 1 mA~10 mA
PD: S2387-1010R
B: アルミニウムブロック、内側金メッキ
S: Siフォトダイオードの受光感度
データシートの特性表参照
S2387-1010R: 930 nmでは $S \approx 0.58 \text{ A/W}$
Po: 全放射光量

$$P_o \approx \frac{I_{sc}}{S} \text{ [W]}$$

KPDC00263A

高速／光検出回路 (1)

逆電圧を印加して低容量化したSi PINフォトダイオードと、高速オペアンプの電流－電圧変換回路を使用した高速／光検出回路です [図3-13]。この回路の周波数帯域は、オペアンプの特性で制約され、100 MHz程度以下になります。

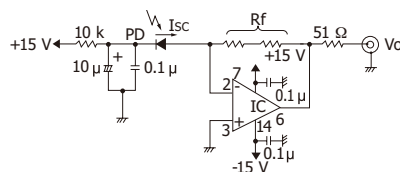
周波数帯域が1 MHzを超える回路では、各 부품のリードインダクタンスや帰還抵抗 R_f の浮遊容量が応答速度に大きな影響を与えます。そのため、チップ部品を使用して部品のリードインダクタンスを低減したり、複数の抵抗を直列接続して抵抗の浮遊容量を低減して、その影響を抑えます。

また、オペアンプの入力部分の基板パターンで生じる浮遊容量やインダクタンス、フォトダイオードのリードインダクタンスの影響を低減するため、フォトダイオードのリードは極力短くし、オペアンプとできる限り短く太いパターンで配線します。性能向上のためには、基板銅箔面全面を接地電位として使用するグランドプレーン構造が効果的です。

なお、オペアンプの電源ラインに接続するコンデンサ 0.1 μF にはセラミックコンデンサを使用し、直近の接地電位に最短距離で接続します。

当社は、周波数帯域 100 MHzのPINフォトダイオード用フォトセンサアンプ C8366を用意しています。

[図3-13] 高速／光検出回路 (1)

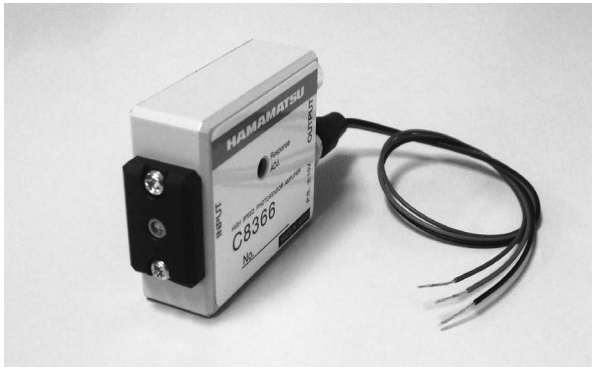


PD: 高速PINフォトダイオード (S5971, S5972, S5973など)
Rf: 並列容量を避けるため複数個直列
IC: AD745, LT1360, HA2525など

$$V_o = -I_{sc} \times R_f \text{ [V]}$$

KPDC00203D

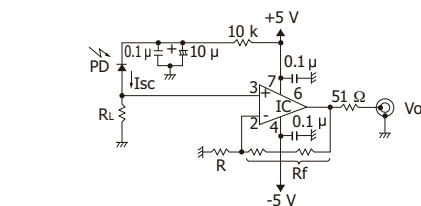
[図3-14] フォトセンサアンプ C8366



高速／光検出回路 (2)

逆電圧を印加して低容量化したSi PINフォトダイオードの短絡電流を負荷抵抗 R_L で電圧変換し、高速オペアンプで電圧増幅する高速／光検出回路です [図3-15]。この回路では、オペアンプの位相ズレに基づくゲインピーキングの恐れがありません。オペアンプの選択によって周波数帯域が100 MHz以上の回路が可能です。使用部品・パターン・構造についての注意点は前述の「高速／光検出回路 (1)」と同様です。

[図3-15] 高速／光検出回路 (2)



PD : 高速PINフォトダイオード
(S5971, S5972, S5973, S9055, S9055-01など)
 R_L , R , R_f : オペアンプの推奨条件に合わせて調整
IC : AD8001など

$$V_o = I_{sc} \times R_L \times \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) [V]$$

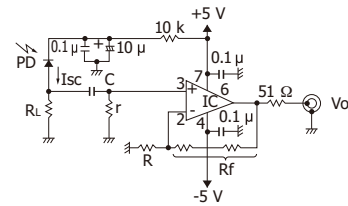
KPDC0015JE

交流光検出回路 (1)

逆電圧を印加して低容量化したSi PINフォトダイオードの光電流を負荷抵抗 R_L で電圧変換し、高速オペアンプで電圧増幅する交流光検出回路です [図3-16]。この回路では、オペアンプの位相ズレに基づくゲインピーキングの恐れがありません。オペアンプの選択によって、周波数帯域が100 MHz以上の回路が可能です。

使用部品・パターン・構造についての注意点は、前述の「高速／光検出回路 (1)」と同様です。

[図3-16] 交流光検出回路 (1)



PD : 高速PINフォトダイオード
(S5971, S5972, S5973, S9055, S9055-01など)
 R_L , R , R_f , r : オペアンプの推奨条件に合わせて調整
IC : AD8001など

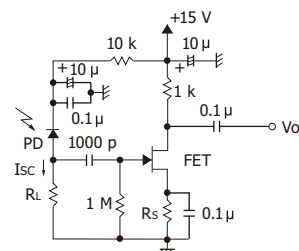
$$V_o = I_{sc} \times R_L \times \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) [V]$$

KPDC0034JA

交流光検出回路 (2)

逆電圧を印加して低容量化したPINフォトダイオードと、FETによる電圧増幅回路を用いた交流光検出回路です [図3-17]。低ノイズFETを使用することによって、安価で小型な低ノイズ回路が実現でき、空間光伝送や光リモコンなどの受光部に使用します。図3-17ではFETのドレインから信号出力を取っていますが、入力抵抗の小さい次段回路へのインターフェースにはソース側から信号出力を取り出すか、ボルテージ・フォロアを追加します。

[図3-17] 交流光検出回路 (2)



PD : 高速PINフォトダイオード (S2506-02, S5971, S5972, S5973など)
 R_L : フォトダイオードの感度と端子間容量により決定
 R_s : FETの動作点で決定
FET: 2SK362など

KPDC0014JE

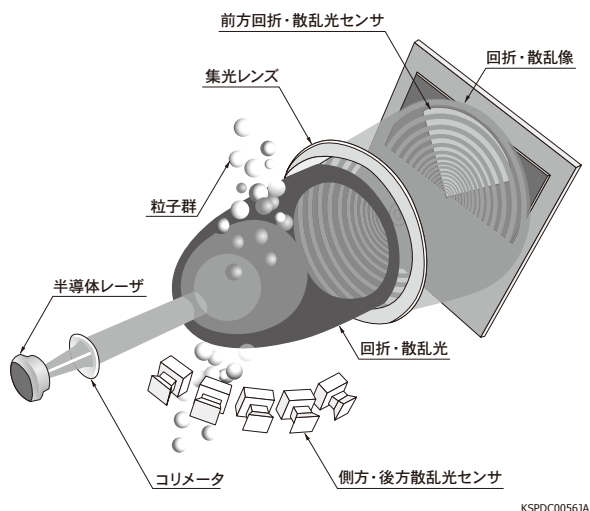
4. 応用例

4-1 粒度分布計 (レーザ回折・散乱法)

レーザ回折・散乱法は、測定時間が短い、再現性がよい、流動状態の粒子が測定できるなどの特長をもった粒度分布測定法です。測定対象となる粒子にレーザ光（単色・平行ビーム）を照射すると、空間的に回折・散乱光の光強度分布パターンが生じます。この光強度分布パターンは、粒子の大きさに依存して変化します。回折・散乱光を検出するためには、大面積で分解能の高いセンサが要求されます。

当社の多素子タイプSiフォトダイオードは、素子ごとの特性のバラツキが小さく、優れた感度特性をもった受光素子です。また、当社の優れた「大型チップの実装／加工技術」を採用しています。そのため、粒度分布計の心臓部に当たるセンサ部（前方回折・散乱光センサ&側方・後方散乱光センサ）として、多く使用されています。10 nm～300 μ mの粒子の測定が可能な粒度分布計などに内蔵され、環境測定に用いられています。

【図4-1】 粒度分布計（レーザ回折・散乱法）の構成



4-2 バーコードリーダー

バーコードリーダーにおいては、LEDやレーザダイオードなどの光源の光をバーコード面に照射し、その反射光をレンズで集光し、光センサで検知します。検知されたパターンと登録されたパターンを比較照合することにより、文字・数字などに変換します。

バーコードリーダーの光センサには高感度や高速応答が要求される上に、反射光を高精度に検出する必要が

あります。当社のSi PINフォトダイオードは、これらの特性に優れ、受光面内の感度バラツキが小さいため、受光面内のどの位置に光が入射しても安定して検出することができます。また、外乱光をカットするフィルタの実装や小型実装技術にも優れており、バーコードリーダーの小型化に貢献しています。

4-3 UVセンサ

紫外線はエネルギーが高く、殺菌作用や光触媒作用をもちます。一方、吸収により物質を劣化させる作用もあります。

当社のSiフォトダイオードは紫外域にも高い感度をもっているため、紫外線の検出に広く利用されています。たとえばSiフォトダイオードと紫外線単波長バンドパスフィルタを高信頼性パッケージに実装した製品は、水質汚濁の1つである有機汚染を検出する装置に広く使用されています。

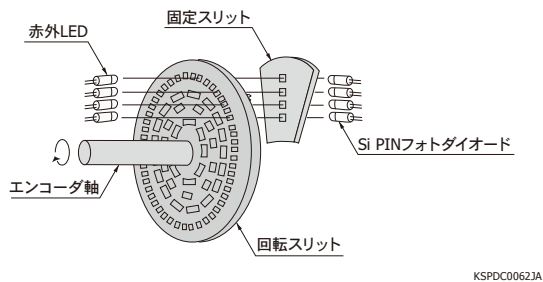
紫外線を受光する際、使用環境によってパッケージ内の樹脂から発生したアウトガスが紫外線と反応することで感度が劣化する恐れがあります。当社では、樹脂を用いないパッケージ技術や、紫外線耐性に優れたSiチップの開発などにより、高い信頼性をもった紫外域用Siフォトダイオードも実現しています。

4-4 ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダは、FA機器などに広く用いられています。ロータリーエンコーダにおいては、発光素子と受光素子（フォトダイオード）の間に回転スリットと固定スリットがあります。回転スリットの回転により、発光素子の光が透過・遮断されますが、この光の変化を受光素子がとらえることで回転を検出します。

軸の回転数（アナログ値）をパルス（デジタル値）に変換するために、受光素子には高速応答と高いチップ位置精度が要求されます。当社の多素子タイプSi PINフォトダイオードは、高速で変化する光信号の検出に適しており、素子間の感度や応答速度のバラツキが少ないため、安定した検出能力を実現しています。なお、受光素子の低ノイズ化のために、受光部以外を遮光するパターンニング技術を適用することができます。

[図4-2] ロータリーエンコーダの構成例



4-5 カラーセンサ

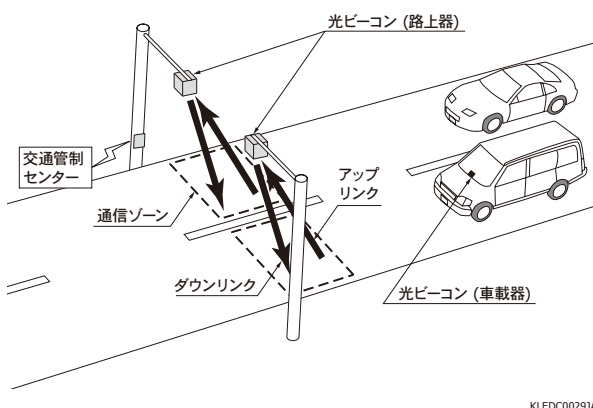
色の検出を行う場合、光の3原色である赤（R）・緑（G）・青（B）のそれぞれの信号を分けて検出することで、色識別はもとより、紙幣鑑別、塗装色識別、印刷物・繊維製品の色管理などが可能となります。Siフォトダイオードは広い波長にわたって感度をもちますが、フィルタを組み合わせることで、RGB個々の波長の検出が可能となります。当社のカラーセンサ用Siフォトダイオードは、RGBの各センサが一体になっているため小型サイズで、容易に色信号を検出することができます。

4-6 VICS (道路交通情報通信システム)

VICS (Vehicle Information and Communication System)は、渋滞状況・工事・交通規制・所要時間などについての情報提供をFM多重放送・電波・光を媒体として行うシステムです。

光媒体による情報提供は、道路の主要箇所を設置された光ビーコン（路上器）と車内に設置される光ビーコン（車載器）の間で、近赤外線的光を用いて双方向の通信を行います。この方式の利点は他の媒体とは異なり双方向の情報交換が可能である点で、欠点は通信エリアが限定されてピンポイントでの情報提供しか行えない点です。なお、アップリンク（車載器→路上器）とダウンリンク（路上器→車載器）では通信範囲が異なります。

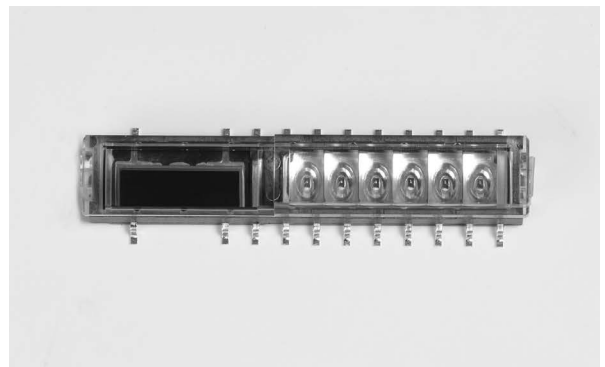
[図4-3] 光ビーコンの構成



光ビーコン内には、LEDとフォトダイオードが搭載されています。車載器は設置スペースの問題から小型化が要求され、表面実装型フォトダイオードが使用されます。車載器は過酷な環境条件が想定されるため、動作／保存温度範囲が通常のフォトダイオードより広い設計が必要になります。

当初のVICSではLEDアレイとフォトダイオードを別々に搭載しているタイプがほとんどでしたが、現在は一体化された小型モジュールが広く使用されています [図4-4]。

[図4-4] VICS用 投／受光モジュール P12793



本資料の記載内容は、令和5年10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代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)	TEL (022) 267-0121 FAX (022) 267-0135
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)	TEL (03) 6757-4994 FAX (03) 6757-4997
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)	TEL (053) 459-1112 FAX (053) 459-1114
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)	TEL (06) 6271-0441 FAX (06) 6271-0450
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 (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