

特性と使い方

フォトダイオードとは...

フォトダイオードは、半導体の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捕らえるセンサを意味します。フォトダイオードには、機能・構造で区別すると次のようなものがあります。

フォトダイオードの種類

- 1) PNフォトダイオード
- 2) PINフォトダイオード
- 3) ショットキ型フォトダイオード
- 4) APD (アバランシェ・フォトダイオード)

これらはいずれも次のような特長を備え、光の有無、強弱、位置、色などの検知に広く使用されています。

フォトダイオードの特長

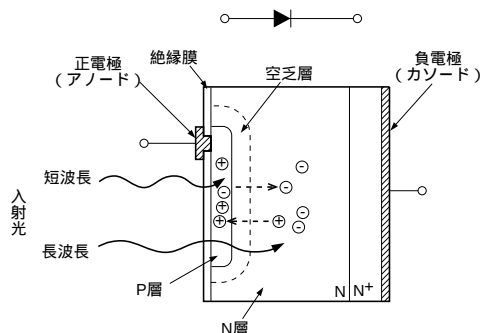
- 1) 入射光に対する直線性が優れている
- 2) 雑音が小さい
- 3) 感度波長範囲が広い
- 4) 機械的強度が高い
- 5) 小型・軽量
- 6) 長寿命

1. 動作原理

図1-1は、フォトダイオードの断面構造の例です。受光面側のP型領域と基板側のN型領域はPN接合を形成し、光電変換部として働きます。P層はSiフォトダイオードの場合、通常は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層の接合部の中性領域を空乏層といいます。表面P層、基板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、後述の分光感度や周波数特性を制御することができます。

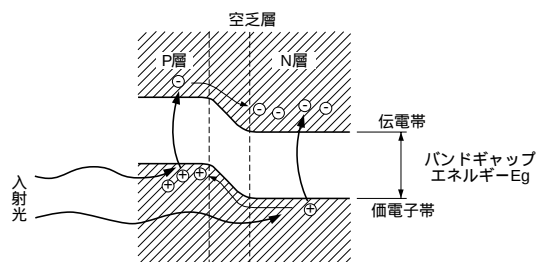
フォトダイオードに光が照射され、その光エネルギーがバンドギャップエネルギー E_g より大きいと、価電子帯の電子は伝導帯へ励起され、もとの価電子帯に正孔を残します。(図1-2参照)この電子 - 正孔対は、P層、空乏層、N層の至るところで生成し、空乏層中では電界のため電子はN層へ、正孔はP層へ加速されます。N層中で生じた電子 - 正孔対のうち、電子はP層から流れて来た電子とともにN層伝導帯に残り、正孔はN層中を空乏層まで拡散し、加速されてP層価電子帯に集まります。このように入射光量に比例して発生する電子 - 正孔対は、それぞれN層、P層中に蓄積され、P層は正に、N層は負に帯電します。P層とN層か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 フォトダイオード断面図



KPDC00023A

図1-2 フォトダイオードのPN接合の状態



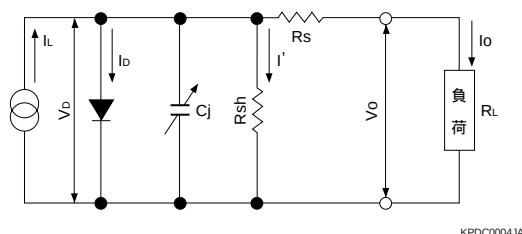
KPDC00033A

2. Siフォトダイオード

2-1. 等価回路

フォトダイオードを等価回路で表すと図2-1のようになります。

図2-1 フォトダイオードの等価回路



IL : 入射光による発生電流 (光量に比例)
 ID : ダイオード電流
 CJ : 接合容量
 Rsh : 並列抵抗
 Rs : 直列抵抗
 I' : 並列抵抗電流
 VD : ダイオード両端の電圧
 Io : 出力電流
 Vo : 出力電圧

この等価回路から出力電流 Io を求めると、次のようになります。

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{eV_D}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2-1)$$

Is : フォトダイオードの逆方向飽和電流
 e : 電子の電荷
 k : ボルツマン定数
 T : 素子の絶対温度

開放端電圧 Voc は Io = 0 のときの出力電圧で、以下の式で表されます。

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} + 1 \right) \quad (2-2)$$

I' が無視できるとき Is は周囲温度に対し指数的に増加するため、Voc は周囲温度に逆比例し、IL の対数に比例することになります。しかし微弱光になると、この関係が崩れてきます。

短絡電流 Isc は RL = 0、Vo = 0 のときの出力電流で、以下の式で表されます。

$$I_{sc} = I_L - I_s \left(\exp \frac{e \cdot (I_{sc} \cdot R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2-3)$$

ここで第2項、第3項が Isc の直線性の限界を決定する原因となります。ただし Rs は数 Ω 程度、Rsh 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わかります。

2-2. 電流—電圧特性

フォトダイオードに暗中で電圧を加えると、図2-2の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。しかし、光が照射されるとの曲線はへ移動し、さらに光を強くするとへとこの曲線は光強度に応じて平行移動します。またはの場合に、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光電流 Isc, Isc' 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電圧 Voc, Voc' が発生します。光電流は入射光量に対する直線性が優れ、入射光量 $10^{-12} \sim 10^{-2} \text{ W}$ 程度の範囲では、フォトダイオードの種類や使用回路などで異なりますが、9桁以上に及ぶ直線範囲をもっています。この直線性の下限はNEPにより決定され、上限は負荷抵抗・逆電圧から次式のように求められます。

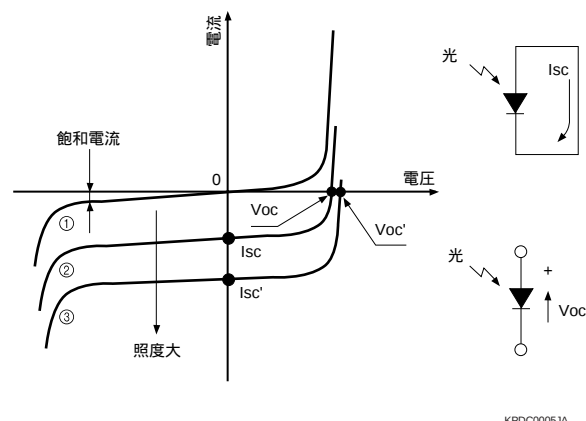
$$P_{sat} = \frac{V_{Bi} + V_R}{(R_s + R_L) \cdot S_\lambda} \quad (2-4)$$

Psat : 直線性上限入射エネルギー (W) ただし Psat 10 mW
 VBi : 接触電圧 (V) 0.2 ~ 0.3 V 程度
 VR : 逆電圧 (V)
 RL : 負荷抵抗 (Ω)
 Sλ : 波長 λ における受光感度 (A/W)
 Rs : 素子直列抵抗 数 Ω 程度

ただしレーザ光を微小スポットに集光して入射したときは、実効的な素子の直列抵抗が大きくなり、直線性は悪くなります。

Voc は光量変化に対して対数的に変化しますが、温度変化が大きく光量測定には不适当です。Isc と Voc を入射光量に対してグラフに表すと図2-3のようになります。

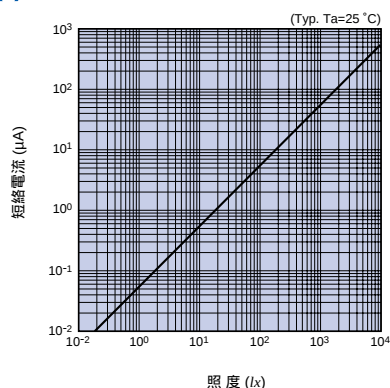
図2-2 電流 - 電圧特性



KPDC00053A

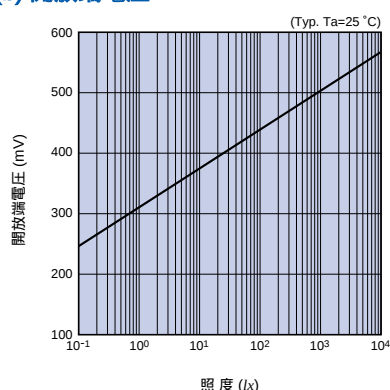
図2-3 光量と出力信号の関係 (S2386-5K)

(a) 短絡電流



KPD80001JA

(b) 開放端電圧

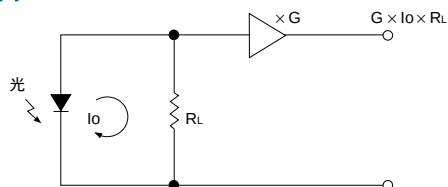


KPD80002JA

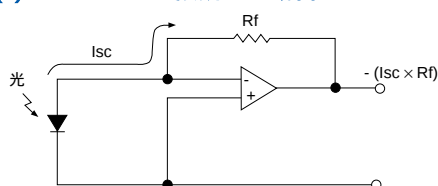
光電流を測定して光量測定をする方法は、図2-4 (a)と (b) のようになります。(a)は $(I_o \times R_L)$ の電圧をゲイン G の増幅器で電圧増幅する方法です。回路としての直線性の範囲は (2-4) 式に従い限定されます。この様子は図2-5に示されます。図2-4 (b)は、オペアンプを使用する方法です。オペアンプのオープンループゲインを A とすると、負帰還回路の特徴のため、負荷抵抗 R_L に相当する等価入力抵抗は $\frac{R_f}{A}$ と数桁小さくなり、理想的な I_{sc} 測定が可能になります。広範囲の測定をする場合は、 R_L , R_f を必要に応じて切り替えます。

図2-4 フォトダイオードの動作回路

(a) 負荷抵抗を接続した場合

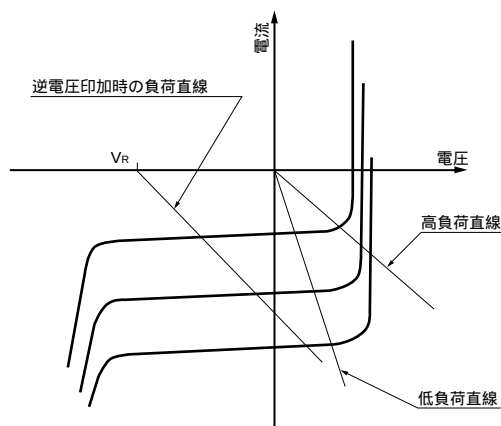


(b) オペアンプを接続した場合



KPD80006JA

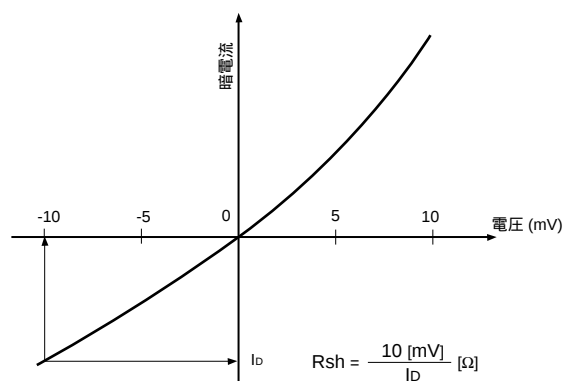
図2-5 電流 - 電圧特性と負荷直線



KPD80003JA

図2-2 の曲線の0点付近を拡大しますと、図2-6のように電圧が ± 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。データシートでは -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2-6 暗電流 - 電圧 (0点付近拡大図)



KPD80004JA

2-3. 分光感度特性

動作原理の項でも触れましたが、吸収された光のエネルギーが受光素子のバンドギャップエネルギー E_g より大きくないと光起電力効果は起こりません。この限界波長 λ_h は、 E_g を用いると次式で与えられます。

$$\lambda_h = \frac{1240}{E_g} [\text{nm}] \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

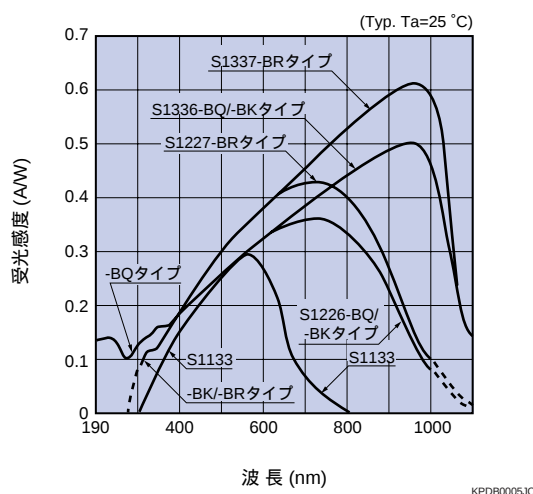
E_g は常温では、Si で 1.12 eV、GaAsP では 1.8 eV のため限界波長はそれぞれ 1100 nm、 700 nm になります。一方、短波長側では入射光の表面拡散層内で吸収される割合が急速に増大するため、拡散層が薄く PN 接合が表面に近いもの程感度が高くなります。(図1-1参照) 一般のフォトダイオードでは 320 nm、紫外域用として開発された S1226/S1336 シリーズなどは 190 nm が短波長側の限界波長になります。

限界波長はフォトダイオード固有の物性で決まりますが、フォトダイオードの受光窓材の波長透過率でも分光感度特性は変わります。硼硅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感度がなくなります。

300 nmより短波長で使用する場合は、石英窓付のフォトダイオードを採用します。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を受光窓として用います。

図2-7に各種フォトダイオードの分光感度特性を示します。ここでBQタイプは石英窓のもの、BKタイプは硼硅酸ガラス窓のもの、またBRタイプは樹脂コーティング窓であることを示します。S1133は視感度補正フィルタ付フォトダイオードです。

図2-7 分光感度特性例



2-4. 雑音特性

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 i_j (またはジョンソン雑音電流) と暗電流および光電流に起因するショット雑音電流 i_{SD} , i_{SL} の和で表せます。

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_{SD}^2 + i_{SL}^2} \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

i_j は R_{sh} の熱雑音と考えられるため、次のようになります。

$$i_j = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{sh}}} \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

k: ボルツマン定数
T: 素子の絶対温度
B: 雑音帯域幅

また図3-1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。

$$i_{SD} = \sqrt{2qI_{DB}} \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

q: 電子の電荷
 I_{DB} : 暗電流
B: 雑音帯域幅

一方入射光のため光電流 I_L が存在し、 i_{SL} は次のようになります。

$$i_{SL} = \sqrt{2qI_L B} \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$I_L \gg 0.026/R_{sh}$ 、または $I_L \gg I_{DB}$ の場合、上記 (2-7) 式または (2-8) 式の代わりに (2-9) 式のショット雑音電流が支配的になります。

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 ($\text{A}/\text{Hz}^{1/2}$) で示します。

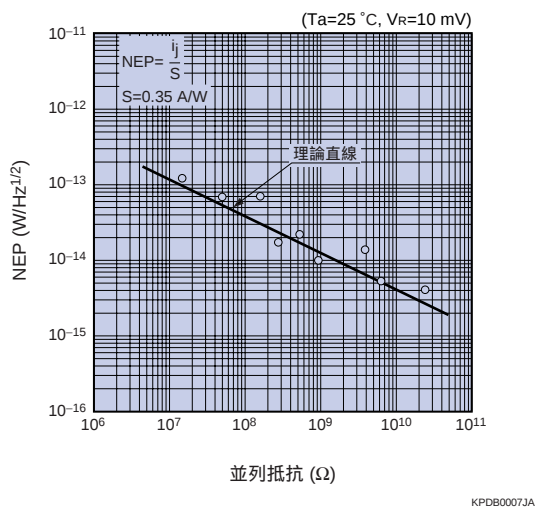
一般にフォトダイオードの最小光検出限界は、上記 (2-7) または (2-8) 式の雑音電流と等しい電流を発生させる入射光量、すなわち雑音等価電力 NEP で表します。

$$\text{NEP} = \frac{i_n}{S} \quad [\text{W}/\text{Hz}^{1/2}] \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

i_n : 雑音電流 ($\text{A}/\text{Hz}^{1/2}$)
S: 受光感度 (A/W)

図2-8にNEPと並列抵抗の関係を示します。ほぼ理論値に一致していることがわかります。

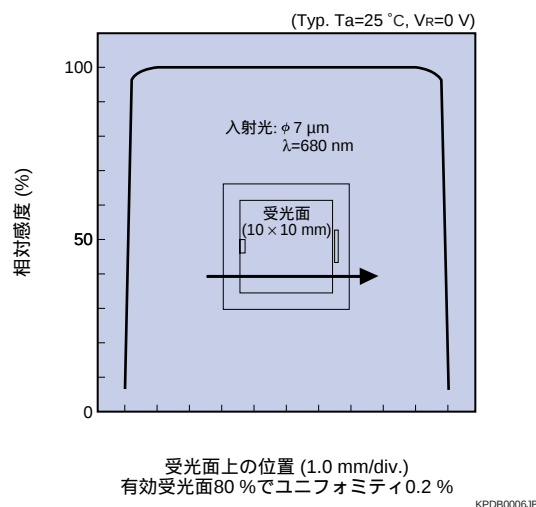
図2-8 NEP - 並列抵抗 (S1226-5BK)



2-5. 感度のユニフォミティ

感度のユニフォミティは、受光面内での感度の均一性を示す値で、フォトダイオードでは非常に小さく、通常 1 % 以下です。測定は数 μm から数十 μm に集光された光 (680 nm レーザダイオードなど) を用いて行われます。

図2-9 感度のユニフォミティ (S1227-1010BQ)

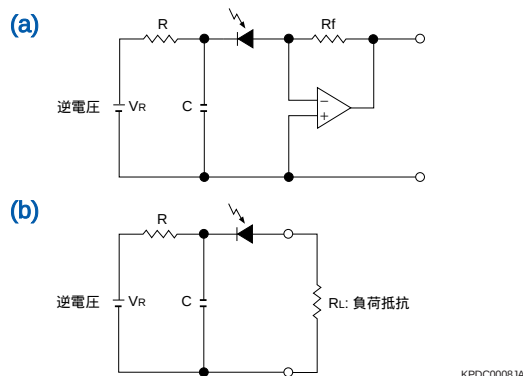


3. Si PINフォトダイオード

3-1. 逆電圧

フォトダイオードは光起電力効果による電力を発生するため、外部電源なしで動作させることができます。しかし周波数特性や直線性上限を高める目的で逆電圧 V_R を印加すると効果的な場合があります。フォトダイオードを流れる電流は電子・正孔対の数で決まるため、信号電流 I_L は逆電圧のあるなしにかかわらず一定で、光電変換の直線性が損なわれることはありません。図3-1は逆電圧の接続例です。図3-2、図3-3は遮断周波数と直線性上限の逆電圧による変化を示します。このように逆電圧を加えることは、周波数特性と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雑音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しますから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極性を設定してください。

図3-1 逆電圧接続例



PINフォトダイオードは高速応答が要求される光通信や光リモートコントロールなどに使用されるため、応答特性ばかりでなく、逆電圧を加えた際の暗電流や耐圧が特に優れています。データシートに記載されている電圧値は推奨値です。各PINフォトダイオードは推奨値で最適動作するように設計されています。

図3-2 遮断周波数 - 逆電圧 (S5973シリーズ, S7911, S7912)

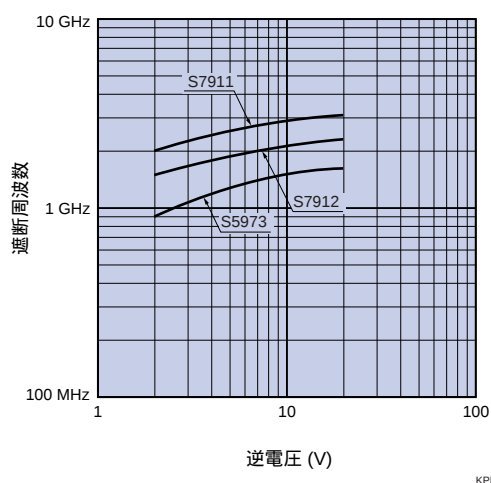


図3-3 出力電流 - 照度 (S1223)

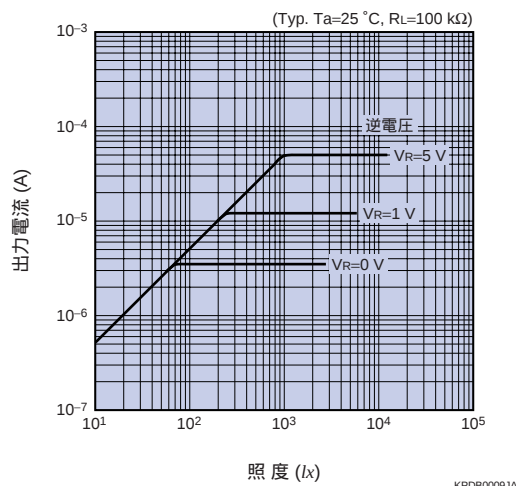
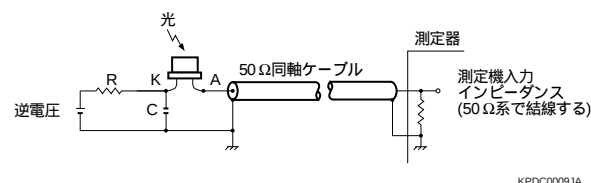


図3-4は、図3-1 (b)の具体的な接続の例で、負荷抵抗は 50 Ω になっています。セラミックコンデンサ C は、逆電圧電源の内部抵抗を小さくするため、抵抗 R はフォトダイオードの保護用で、最大光電流による電圧降下は逆電圧より十分小さい範囲で選定します。フォトダイオードとコンデンサのリード線、同軸ケーブルの心線など高速パルスが通る経路は極力短く配線します。

図3-4 同軸ケーブルへの接続



3-2. 応答速度、周波数特性

フォトダイオードの応答速度とは、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し得るかを示す値で、通常上昇時間、または遮断周波数で表します。上昇時間は出力信号が 10 % から 90 % に達する時間で、主に次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_t

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 の和であり、 t_t は次式で表されます。

$$t_t = 2.2 \times C_t \times R_L \quad \text{..... (3-1)}$$

t_t を速めるためには、 C_t または R_L のいずれかを小さく設計する必要があります。 C_j は受光面積 A におおよそ比例し、空乏層幅 d の2乗根から3乗根に逆比例します。空乏層幅は逆電圧 V_R と基板材料の比抵抗 ρ との積に比例するため次式が成立します。

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

したがって t_t を速めるためには、 A が小さく ρ の大きなフォトダイオードに、逆電圧を印加して使用すればよいことになります。ただし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、入射光がフォトダイオードのPN接合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吸収された場合に発生します。これらのキャリアが拡散するのに要する時間 t_2 は、数 μs 以上の場合があります。

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。また、平均的な電界は $E = V_R/d$ であるため t_3 はおよそ次式で近似されます。

$$t_3 = d / v_d = d^2 / (\mu V_R) \dots\dots\dots (3-3)$$

t_3 を速めるためには、キャリアの走行距離を短くするか、逆電圧を高める必要があります。

以上3要素がフォトダイオードの上昇時間 τ を決定します。上昇時間は次式で近似されます。

$$\tau = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2} \dots\dots\dots (3-4)$$

PINフォトダイオードやAPD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るため高速光信号検出に適しています。

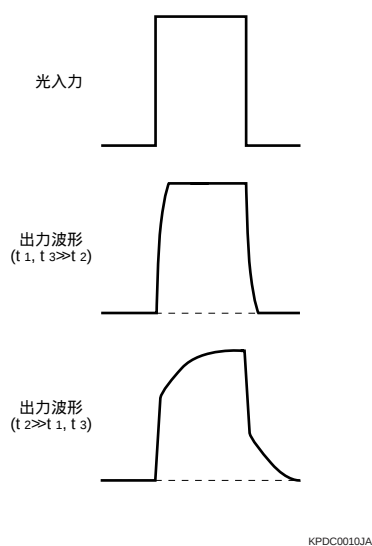
遮断周波数 f_c は、レーザダイオードからの正弦波入力に対する出力が相対的に100 %を維持している出力より3 dB減衰する周波数で、上昇時間 τ とは、

$$\tau = \frac{0.35}{f_c} \dots\dots\dots (3-5)$$

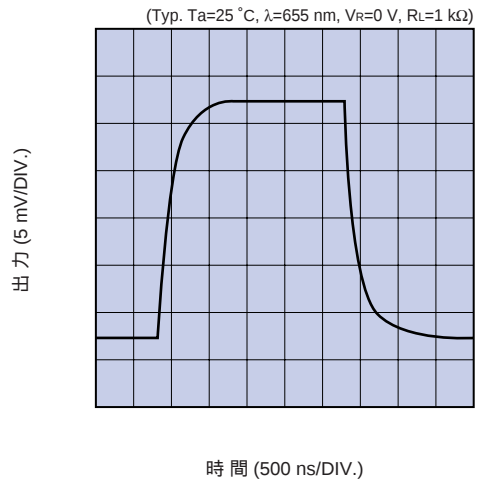
の関係式でおおよそ近似されます。

図3-5 (a) (b) (c)にフォトダイオードの応答波形例と周波数特性例を示します。

図3-5 (a) フォトダイオードの応答波形の例

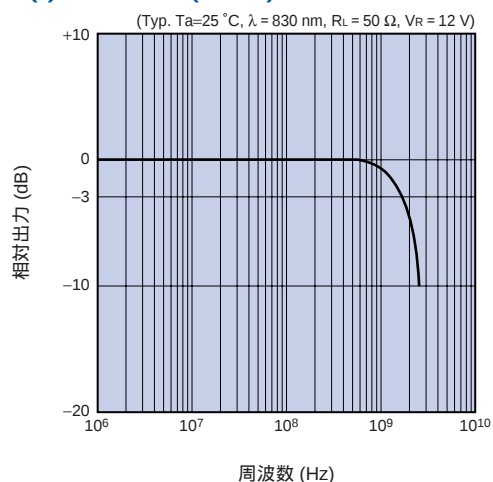


(b) 応答波形 (S2386-18K)



KPDB0010JA

(c) 周波数特性 (S5973)



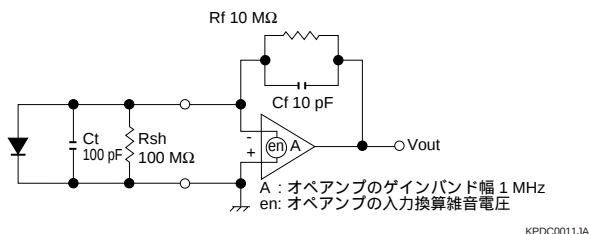
KPDB0011JA

4. プリアンプ付Siフォトダイオード

4-1. 帰還回路

図4-1はオペアンプとフォトダイオードの基本的な接続例です。出力電圧 V_{out} は、直流から低い周波数の範囲では入力電流 I_{sc} の逆相になります。帰還抵抗 R_f は、 I_{sc} と必要な V_{out} とで決まりますが、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 がある場合に回路が高い周波数領域で不安定になるのを防ぐためのものです。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。入射光が放電火花のような場合で光量を積算したい場合は、 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。ただし次の積分周期のため C_f を放電するスイッチが必要です。

図4-1 フォトダイオードの基本接続例



4-2. バイアス電流

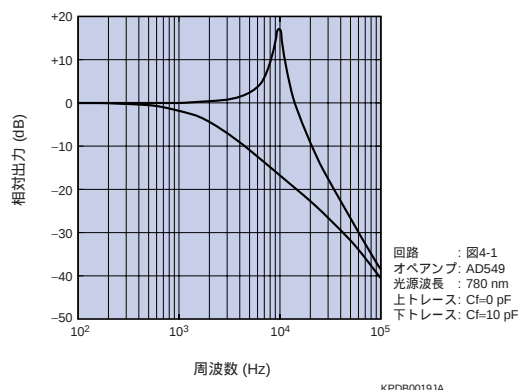
実際のオペアンプの入力抵抗は無限大ではなく、入力端子にはいくらかのバイアス電流が流入、または流出するため、検出電流の大きさによってはこれが誤差になります。バイアス電流はFET入力型オペアンプでは0.1 pA以下のものもありますが、バイポーラ型は数百pA～数百nA程度です。しかし、FET型オペアンプのバイアス電流は、一般に10℃の温度上昇で2倍になりますが、バイポーラ型オペアンプでは逆に減少します。このため、高温仕様の回路を設計する場合、バイポーラ型オペアンプの使用も考慮する必要があります。バイアス電流による誤差電圧は、オフセット電圧と同様にオペアンプのオフセット調整端子に可変抵抗器を接続して微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こともあるため、パターンと部品の配置、ガードやテフロン端子の採用などオペアンプの選択と同様に適切な配慮が必要です。

4-3. ゲインピーキング

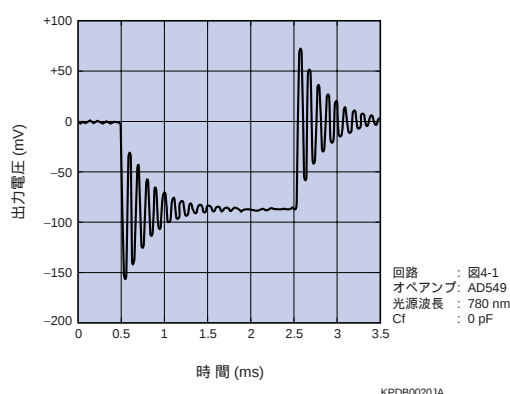
フォトダイオードとオペアンプ回路の高域周波数特性は、 $R_f \times C_f$ の時定数で決まりますが、端子間容量すなわち入力容量が大きい場合には、ゲインピーキング現象が起こることがあります。図4-2はこの場合の周波数特性の例で、高い周波数領域で出力電圧が異常に大きくなり [(a)上トレース参照]、パルス光に対する出力電圧波形に著しいリングングが発生します。[(b)参照] またオペアンプ入力雑音に対して同様のゲインが作用するため、異常に大きな雑音が観測されます。[(c)上トレース参照] これらは高い周波数領域で、オペアンプ入力容量と帰還容量の各リアクタンスが雑音に対して不安定な増幅器を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4-2 ゲインピーキング

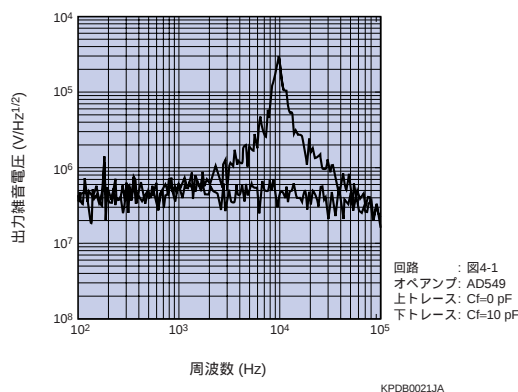
(a) 周波数特性



(b) 光パルス応答



(c) 雑音出力の周波数特性



4-4. 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現象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、帰還素子の相互の関係を最適に選定する必要があります。フォトダイオードについては、「応答速度、周波数特性」の項で述べたように端子間容量 C_t を小さくすることが、この場合でも効果的です。オペアンプは一般的に高速、広帯域特性のものほどゲインピーキングを起こし難くなりますが、内部の位相補償が充分でないと逆に発振する場合があります。帰還素子は抵抗だけでなく先に述べたように帰還容量を並列に接続してゲインピーキングを避けま

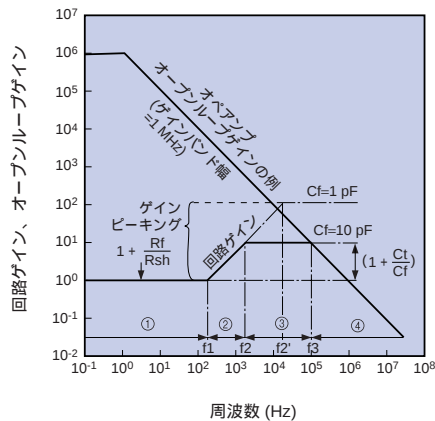
す。以上の対策方法について図4-1の回路を例にとってみると、次のように説明できます。図4-3において低い周波数領域では、オペアンプの回路ゲインは R_{sh} と R_f の抵抗比だけで決まります。

$$\frac{R_{sh} + R_f}{2\pi R_{sh} R_f (C_f + C_t)}$$

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 の平坦な区間になります。そして、通常 6 dB/Oct で減衰するオペアンプのオープンループゲインの曲線に接する周波数 f_3 から の領域につながります。ここで f_1 , f_2 は図4-1の条件ではそれぞれ 160, 1.6 kHz に相当します。 C_f を 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 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 の領域が存在しないということです。この状態のオペアンプ回路のパルス光応答特性はリングング、また周波数特性ではゲインピーキングを生じ、不安定になります。(図4-2参照)

図4-3 ゲインピーキングの図式的求め方



以上のポイントをまとめますと次のようになります。

- (イ) 図4-3の の領域が存在するような f_2 の設定を考えて R_f と C_f を決定します。
- (ロ) 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、利得が1になる周波数 (ゲインバンド幅) が高いオペアンプに変え、 の領域を設定します。以上でリングング・ゲインピーキングは減少あるいは発生しなくなります。しかし、高い周波数領域では、回路ゲインが存在しており、オペアンプの入力雑音や帰還抵抗の雑音が減衰を受けず、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次のような方法を取ります。
- (ハ) C_t の値が小さいフォトダイオードと取り換える。図の例では $(1 + \frac{C_t}{C_f})$ を1に近づけるようにします。

このような手順で通常のリングングやゲインピーキングによる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、たとえば数m以上の同軸ケーブルやコンデンサを接続しますと、オペアンプによっては発振することがあるため容量負荷はできるだけ小さくする必要があります。

5. Si APD

5-1. APDを使うメリット

光半導体素子を使用して微弱な光を検出する場合、光半導体素子の特性のみならず、読み出し回路 (オペアンプなど) の雑音まで含めて、トータルに検討する必要があります。

Siフォトダイオードを検出器として用いる場合、検出器自体の雑音レベルは非常に低く、通常は読み出し回路の雑音により検出限界が決定されています。この傾向は、対象とする信号の周波数が高ければ高いほど顕著となります。これは、高速の読み出し回路は雑音が大きく、系全体の雑音のうち、ほとんどの割合を占めるからです。

そのような場合に、検出素子自身に自己増倍作用があれば検出器から出力される時点で増倍されているため、読み出し回路の雑音の寄与分を等価的に増倍率分の1 ($1/10 \sim 1/100$) にできます。

このように、APDを使うメリットは検出限界が読み出し回路で決定されている場合に、検出限界をAPDの増倍率分だけ低いレベルに引き下げられ、通常フォトダイオードの $1/10 \sim 1/100$ の検出限界に性能を向上できるところにあります。

5-2. APDの雑音特性

APDでは、アバランシェ増倍過程特有の電流の統計的なゆらぎによる過剰雑音が発生します。このため、ショット雑音はPINフォトダイオードに比べて大きくなり、以下の式で表されます。

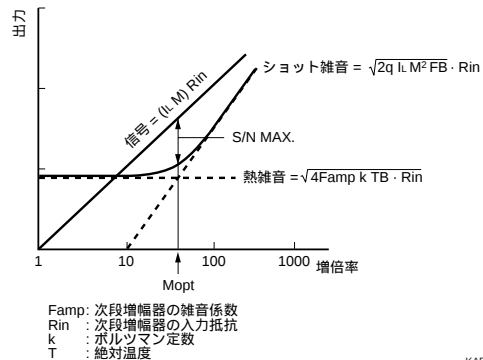
$$i_n = \sqrt{2 q I_L M^2 F B} \dots\dots\dots (5-1)$$

また F は、 M が $10 \sim 100$ 程度においては $F = M^x$ で近似されます。

(F : 過剰雑音係数, M : 増倍率, I_L : $M = 1$ の時の光電流)
(q : 電子電荷, B : 帯域幅, x : 過剰雑音指数)

PINフォトダイオードでは、応答速度の制限により負荷抵抗を大きくできず、回路系全体の雑音が熱雑音で支配されることが多くなります。一方APDでは、APD自身に自己増倍作用があるため、ショット雑音が熱雑音と同じ程度になるまで増倍率を上げることができます。そのため、高速応答を保ちながらS/Nを改善することができます。

図5-1 APDの雑音特性



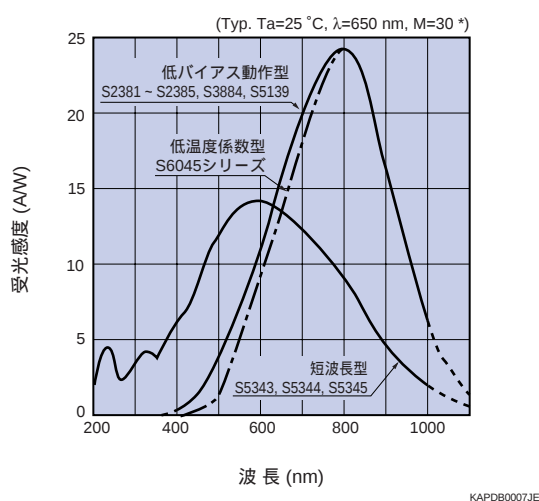
5-3. APDの分光感度特性

APDの分光感度特性は、バイアスが印加されていない状態では一般のフォトダイオードと変わりません。しかしバイアスが印加されると、分光感度曲線の形状が変化してきます。このことは、波長によって増倍率が変化することを意味しています。これは、波長によって光のSiへの侵入深さが変わるため、光吸収領域で効率良く吸収される波長がAPDの構造により異なるためです。そのため、使用条件により、適切なAPDを選択する必要があります。

浜松ホトニクスでは、これに対応するため、近赤外用APDとしてS2381シリーズ、S6045シリーズ、短波長用APDとしてS5343シリーズを用意しています。

図5-2に650 nm、増倍率が30倍のときの分光感度特性例を示します。

図5-2 分光感度特性



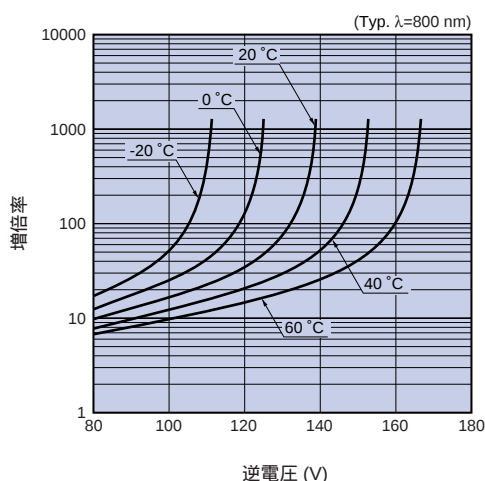
5-4. 増倍率の温度特性

APDの増倍率には温度特性があり、温度が上昇するとある一定バイアスにおける増倍率は小さくなります。そのため一定の出力を得ようとする場合には、温度によりバイアスを変化させるか、APDの温度を一定に保つ必要があります。

S2381シリーズの場合、バイアス電圧の温度係数は、 $M=100$ 程度では降伏電圧の温度係数とほぼ同等の $0.65 \text{ V/ } ^\circ\text{C}$ Typ. になっています。(図5-3参照)

また、温度係数を改善したタイプ ($0.4 \text{ V/ } ^\circ\text{C}$ Typ.)として、S6045シリーズもご用意しています。

図5-3 増倍率の温度特性 (S2381 ~ S2385, S3884, S5139)



5-5. 周辺回路との接続

APDは、高い印加バイアスを必要とすること以外は、一般のフォトダイオードと同様に扱うことができます。しかし、自己増倍作用があることと、高電圧を使用することにより、以下の点に注意する必要があります。

- 1) APDの消費電力 = 信号パワー × 感度 (例: 0.5 A/W at 800 nm) × 増倍率 × バイアス電圧となり、非常に大きな電力を消費します。そのため、保護抵抗をバイアス回路に付加したり、電流制御回路を組み込むなどの対策が必要です。
- 2) 通常、低雑音の読み出し回路は入力インピーダンスが高く、読み出し回路の電源電圧より高い過大電圧に対して、初段部の破壊を招く恐れがあります。対策としては、過大電圧の入力を電源電圧に逃がす保護回路 (ダイオード) を接続します。
- 3) APDの増倍率には温度特性があり、S2381シリーズでは $0.65 \text{ V/ } ^\circ\text{C}$ Typ. となっています。これは、 $M=30$ 程度、 $25 \pm 2 \sim 3$ で使用する場合には問題ありません。しかし、それ以上の増倍率や広い温度範囲で使用する場合には、温度補償 (温度によりバイアス電圧を制御する) または温度制御 (APDの温度を一定に保つ) が必要となります。
- 4) 微弱な信号光を検出する場合、検出限界が背景光によるショット雑音で決定される場合があります。そのため、背景光がAPDに入射すると、ショット雑音によりS/Nが悪くなる場合があります。対策としては、光学フィルタの使用、レーザの変調度の向上、視野角の制限などにより、極力背景光を低減することが必要です。

図5-4 APDの周辺回路例

