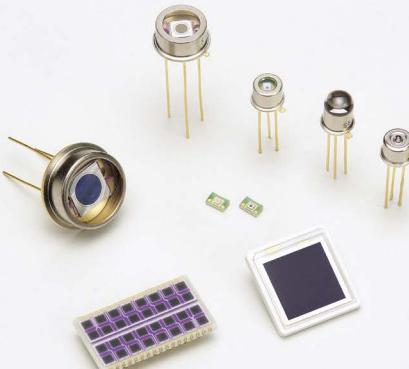


Si APD



目次

1. 動作原理

p02

2. 特性

p02

- 2-1 暗電流
- 2-2 増倍率一逆電圧特性
- 2-3 ノイズ特性
- 2-4 分光感度特性
- 2-5 応答特性
- 2-6 クロストーク

3. 使い方

p06

- 3-1 周辺回路との接続
- 3-2 APDモジュール

4. 応用例

p08

- 4-1 光波距離計
- 4-2 障害物検知
- 4-3 リモートセンシング
- 4-4 LiDAR (Light Detection and Ranging)

APD（アバランシェ・フォトダイオード）は、逆電圧を印加することにより光电流が増倍される高速・高感度のフォトダイオードです。アバランシェ増倍と呼ばれる内部増倍機能により、高い受光感度を実現し微弱な信号の測定が可能です。信号を増倍することによりノイズの影響を低減でき、PINフォトダイオードに比べ高いS/Nが得られ、優れた直線性をもっています。

当社は、独自の技術を生かし、用途に合わせてさまざまなタイプのSi APDを用意しています。また、カスタムデザインにも幅広く対応しています。当社のSi APDは、以下の特長をもっています。

- 高感度
- 高速応答
- 高信頼性
- 個別仕様でセレクト納入が可能

◆ Si APD (一般計測用)

タイプ	特長	用途
短波長 タイプ	低バイアス動作 低端子間容量	紫外～可視域の感度を向上させたタイプ ● 微弱光検出 ● 分析機器
近赤外 タイプ	低バイアス動作	低バイアス電圧で動作 ● 積算光伝送 ● 光ファイバ通信 ● 分析機器
	低温度係数	バイアス電圧の温度係数が低く、増倍率の調整が容易 ● 積算光伝送 ● 光ファイバ通信
	800 nm帯	800 nm帯の感度を向上させたタイプ ($\lambda_p=840$ nm) ● 積算光伝送 ● 光ファイバ通信 ● 分析機器
	900 nm帯	900 nm帯の感度を向上させたタイプ ($\lambda_p=860$ nm) ● 積算光伝送 ● 光ファイバ通信 ● 分析機器
	900 nm帯	900 nm帯の感度を向上させたタイプ ($\lambda_p=940$ nm) ● 積算光伝送 ● 分析機器 ● YAGレーザ光検出
電子冷却型	高S/N	● 微弱光検出

◆ Si APD (LiDAR用)

タイプ	特長	用途
700 nm帯	暗電流低減、動作温度拡大を実現し、700 nm帯の感度を向上させたタイプ	● LiDAR
800 nm帯	暗電流低減、動作温度拡大を実現し、800 nm帯の感度を向上させたタイプ	● 光波距離計
900 nm帯	暗電流低減、動作温度拡大を実現し、900 nm帯の感度を向上させたタイプ	

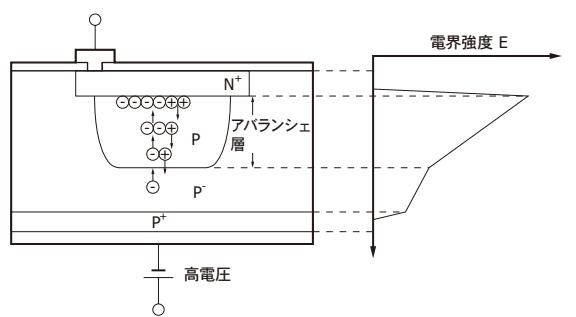
1. 動作原理

APDの光電流の発生機構は、通常のフォトダイオードと同じです。フォトダイオードに、バンドギャップ以上のエネルギーをもつ光が入射すると、その光エネルギーにより電子-正孔対が発生します。このとき入射フォトン数に対して発生した電子-正孔対の割合を量子効率 QE (単位: %)と定義します。APDの内部でキャリアが発生する機構はフォトダイオードと変わりませんが、APDは発生したキャリアを増倍する機能をもっている点がフォトダイオードと異なります。

PN接合に逆電圧を印加すると、空乏層内部で発生した電子-正孔対のうち、電子はN⁺側に、正孔はP⁺側にそれぞれ電界によってドリフトします。このときのキャリアのドリフト速度は電界が高くなるほど速くなりますが、ある電界に達すると結晶格子との散乱頻度が増して、ある一定の速度に飽和するようになります。さらに電界が高くなると結晶格子との衝突を免れたキャリアは非常に大きなエネルギーをもつようになります。そして、このキャリアが結晶格子と衝突すると新たな電子-正孔対を発生させる現象が起こります。この現象をイオン化と呼びます。この電子-正孔対が新たに電子-正孔対を発生させるというように、イオン化は連鎖的に発生します。これがアバランシェ増倍といわれる現象です。

1つのキャリアが単位距離を走行するときに発生する電子-正孔対の数をイオン化率と呼び、電子のイオン化率 (α)と正孔のイオン化率 (β)が定義されます。このイオン化率は、増倍機構を決定する重要なパラメータです。Siの場合、電子のイオン化率が正孔のイオン化率よりも大きく ($\alpha > \beta$)、電子が増倍に寄与する割合が高くなります。このため当社のAPDでは、入射光により発生した電子-正孔対のうち、電子がアバランシェ層に入りやすい構造を採用しています。なお、入射光の波長によってキャリアが発生する深さは異なります。当社は、検出する波長に合わせて、異なる構造のAPDを用意しています。

[図1-1] アバランシェ増倍の模式図 (近赤外タイプ)

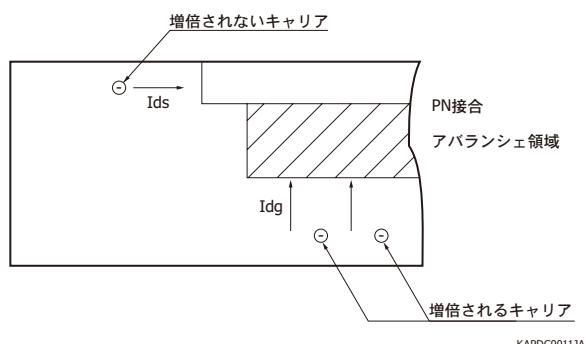


2. 特性

2-1 暗電流

APDの暗電流は、PN接合・酸化膜界面を流れる表面リーキ電流 (Ids)と基板内部の発生電流 (Idg)とに分かれます [図2-1]。

[図2-1] APDの暗電流



表面リーキ電流はアバランシェ領域を通過しないため増倍されませんが、発生電流はアバランシェ領域を通過するため増倍されます。このため、トータルの暗電流 (ID)は式 (2-1) のようになります。

$$ID = Ids + M Idg \quad \dots \dots \dots (2-1)$$

M: 増倍率

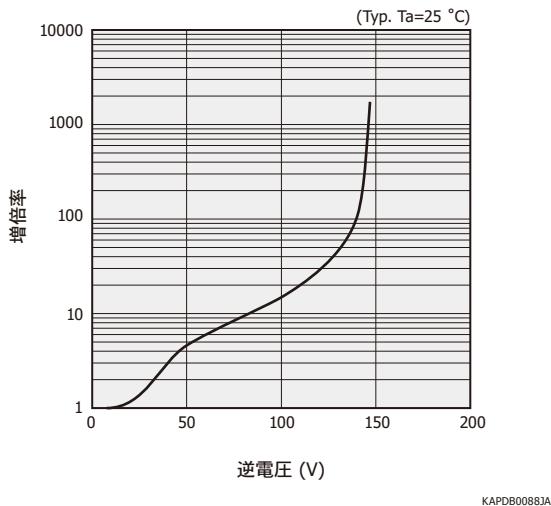
増倍される暗電流成分であるIdgがノイズ特性に大きく影響します。

2-2 増倍率-逆電圧特性

APDの増倍率は、イオン化率によって決まります。イオン化率は、空乏層にかかる電界強度に強く依存します。通常の使用範囲では、APDの増倍率は逆電圧が高くなるほど大きくなります。逆電圧をさらに高くすると、APDと回路を含めた直列抵抗成分による電圧降下のためAPDのPN接合の逆電圧が低下し、増倍率が減少する現象が現れます。

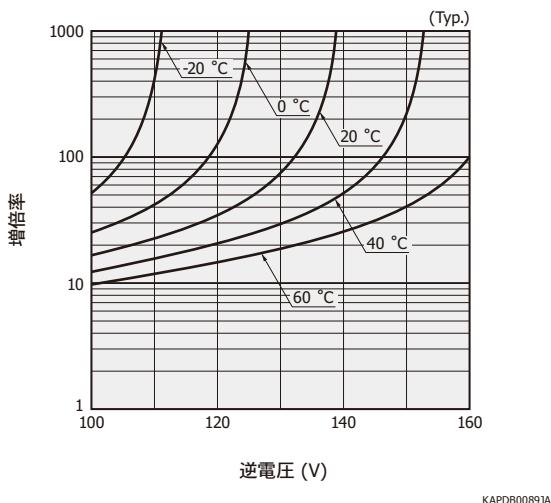
PN接合に適切な逆電圧を印加すると、空乏層内の電界が上がりアバランシェ増倍が起ります。増倍率は逆電圧の印加とともに増加し、APDはブレークダウンに至ります。図2-2に当社製Si APD S12023-05の増倍率と逆電圧の関係を示します。

[図2-2] 増倍率-逆電圧 (S12023-05)



APDの増倍率には温度特性があります。温度が上がると、結晶の格子振動が激しくなり、加速されたキャリアのエネルギーが十分に大きくならないうちに結晶と衝突する確率が大きくなり、イオン化が起こりにくくなります。このため温度が上昇すると、特定の逆電圧における増倍率が小さくなります。一定の出力を得ようとする場合には、温度により逆電圧を変化させるか、素子の温度を一定に保つ必要があります。

[図2-3] 増倍率の温度特性 (S12023-05)



APDを降伏電圧付近で使用すると、出力光電流が入射光量に比例しない現象が現れます。これは、光電流の増加に従い、素子内の直列抵抗と負荷抵抗を流れる電流により電圧降下が起こり、アバランシェ層にかかる電圧が減少するためです。

2 - 3 ノイズ特性

APDの増倍率は、逆電圧が一定であれば個々のキャリアの増倍率の平均値になります。個々のキャリアのイオ

ン化率は均一ではなく、統計的な揺らぎをもちます。そのため、増倍過程において過剰雑音と呼ばれる増倍ノイズが加わります。APDのショットノイズ (I_{in}) は、PINフォトダイオードのショットノイズよりも大きくなり、式(2-2)で表されます。

$$I_{in}^2 = 2q (I_L + I_{dg}) B M^2 F + 2q I_{ds} B \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

q : 1電子当たりの電荷量

I_L : $M=1$ のときの光電流

I_{dg} : 基板内部の発生電流(増倍される暗電流成分)

B : 帯域幅

M : 増倍率

F : 過剰雑音係数

I_{ds} : 表面リーケ電流(増倍されない暗電流成分)

電子のイオン化率 (α) と正孔のイオン化率 (β) の比をイオン化率比 [$k (= \beta/\alpha)$] と呼びます。過剰雑音係数 (F) は k を用いて、式(2-3)で表されます。

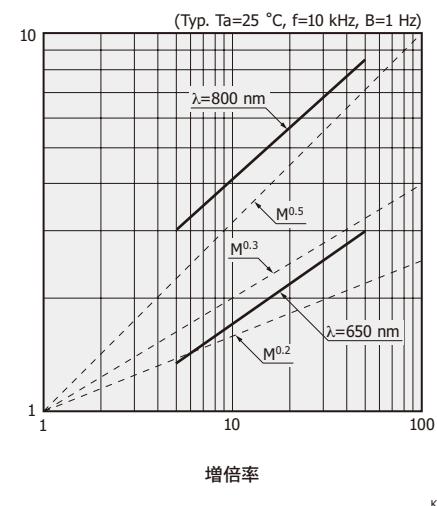
$$F = M k + (2 - \frac{1}{M}) (1 - k) \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

式(2-3)は、電子がアバランシェ層に注入される場合の過剰雑音係数を表していますが、正孔がアバランシェ層に注入される場合には k を $1/k$ で置き換えた形になります。

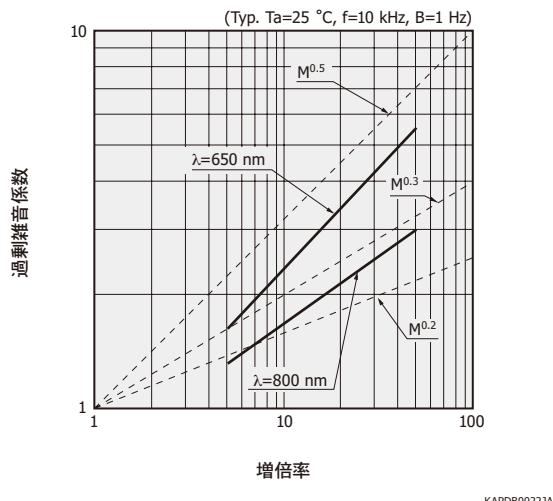
「2-4 分光感度特性」で示すように、増倍率には波長依存性があります。このため、過剰雑音も波長依存性をもち、APDの種類により短波長で低ノイズのものや長波長で低ノイズのものがあります。図2-4に過剰雑音特性を示します。

[図2-4] 過剰雑音係数-増倍率

(a) 短波長タイプ (低バイアス動作)



(b) 近赤外タイプ (低バイアス動作)



過剰雑音係数 (F) は、近似的に $F=M^x$ と表す場合があります (x : 過剰雑音指数)。これは、ショットノイズの式を $In^2=2q IL B M^{2+x}$ という形で表せるためです。

このようにAPDでは、増倍に伴うノイズが発生し、増倍率を大きくすると過剰雑音が増加します。一方、信号も増倍率に依存して大きくなり、S/Nが最大となる増倍率が存在します。APDのS/Nは、式 (2-4) で表されます。

$$S/N = \frac{IL^2 M^2}{2q (IL + Idg) B M^2 F + 2q B Ids + \frac{4k T B}{RL}} \quad \dots \dots \dots (2-4)$$

$2q (IL + Idg) B M^2 F + 2q B Ids$: ショットノイズの2乗

$\frac{4k T B}{RL}$: 热雑音の2乗

k : ボルツマン定数

T : 絶対温度

RL : 負荷抵抗

APDの雑音等価電力 (NEP: Noise Equivalent Power) は式 (2-5) で表されます。

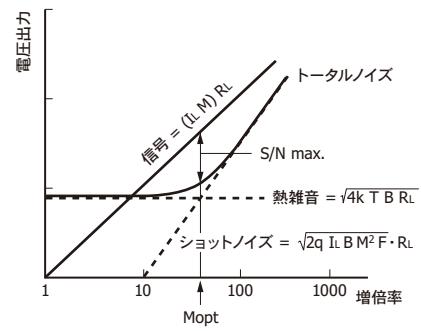
$$NEP = In/(M S) \quad \dots \dots \dots (2-5)$$

M : 増倍率

S : 受光感度 [A/W]

PINフォトダイオードでは、負荷抵抗の熱雑音を下げるために負荷抵抗を大きくすると応答速度が遅くなります。このため負荷抵抗の熱雑音を小さくすることができず、最低受信レベルが負荷抵抗の熱雑音で支配される場合が多くなります。APDでは、ショットノイズが負荷抵抗の熱雑音と同じ程度になるまでは、トータルのノイズを上げずに信号を増倍することができるため、高速応答を保ちながらS/Nを改善することができます。この様子を図2-5に示します。式 (2-4) の Idg は IL に比べ一般的に非常に小さい上、 Ids は増倍されないため、図2-5のショットノイズは $In=\sqrt{2q IL B M^2 F}$ で近似しています。

[図2-5] APDのノイズ特性



KAPDB0033JC

このときの最適な増倍率 (M_{opt}) は、式 (2-4) を最大にする条件より求められ、 Idg を無視できるとすると式 (2-6) で表されます。

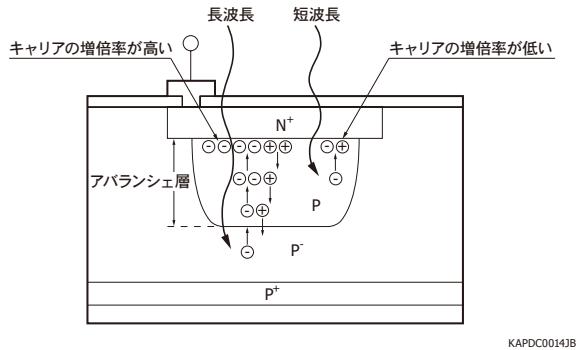
$$M_{opt} = \left[\frac{4k T}{q (IL + Idg) \times RL} \right]^{\frac{1}{2+x}} \quad \dots \dots \dots (2-6)$$

2-4 分光感度特性

APDの分光感度特性は、逆電圧が印加されていない状態では、通常のフォトダイオードと変わりません。しかし逆電圧を印加すると、分光感度特性のグラフの形状が変化します。

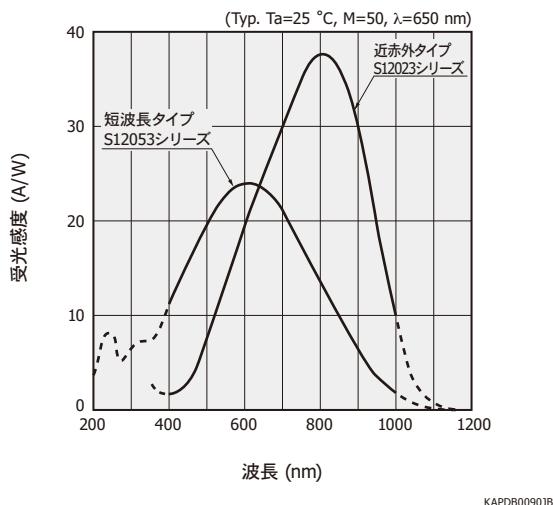
光がSi中に到達する深さは波長により異なります。短い波長の光が到達する深さは浅く、キャリアの発生は表面に近い部分で起こります。これに対し長い波長の光では、深い位置でもキャリアの発生が起こります。アバランシェ増倍は、キャリアがPN接合近傍の高電界の部分を通過する際に発生します。Siでは、電子のイオン化率が高いため、アバランシェ層に電子が注入されると効率のよい増倍を実現することができます。たとえば図2-6のタイプのAPDの場合、アバランシェ層は表面側のPN接合領域にあります。このタイプのAPDは、アバランシェ層よりも深くまで到達するような長波長の光が入射した場合に良好な増倍特性が実現できます。なお、APDの構造により、短波長・長波長のいずれが効率よく増倍されるかが異なります。

[図2-6] 断面構造(近赤外タイプ)

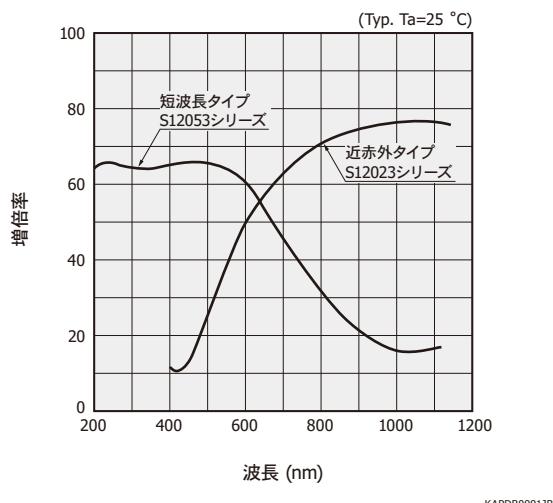


短波長タイプSi APDと近赤外タイプSi APDの分光感度特性、増倍率の波長依存性を以下に示します。

[図2-7] 分光感度特性



[図2-8] 増倍率-波長



2-5 応答特性

フォトダイオードの応答速度を決める要因には、CR時定数、空乏層内のキャリアの走行時間(ドリフト時間)、増倍にかかる時間(増倍時間)、空乏層外からのキャリアの拡散電流による時間遅れがあります。

CR時定数により決められる遮断周波数 $f_c(CR)$ は、式(2-7)で求められます。

$$f_c(CR) = \frac{1}{2\pi C_t R_L} \quad \dots \dots \dots (2-7)$$

C_t : 端子間容量
 R_L : 負荷抵抗

フォトダイオードを高速化するためには、端子間容量を小さくする必要があります。そのためには、受光面積を小さくし空乏層を広くすることが必要です。遮断周波数 $f_c(CR)$ と上昇時間 t_r との関係は、式(2-8)で表されます。

$$t_r = \frac{0.35}{f_c(CR)} \quad \dots \dots \dots (2-8)$$

空乏層を広くした場合、ドリフト時間が無視できなくなります。空乏層を走行する速度(ドリフト速度)は、電界強度が 10^4 V/cm位から飽和し、そのときのドリフト速度は約 10^7 cm/sになります。アバランシェ層まで移動したキャリアによりイオン化が起こり電子-正孔対が発生しますが、正孔は電子とは逆の方向へ移動するため、APDの場合のドリフト時間はPINフォトダイオードよりも長くなります。ドリフト時間を t_{rd} とすると、ドリフト時間から決められる遮断周波数 $f_c(t_{rd})$ は式(2-9)で表されます。

$$f_c(t_{rd}) = \frac{0.44}{t_{rd}} \quad \dots \dots \dots (2-9)$$

容量を下げるために空乏層を広くすると、ドリフト時間が長くなるため、CR時定数から決められる遮断周波数 $f_c(CR)$ と走行時間で決められる遮断周波数 $f_c(t_{rd})$ の両方を考慮する必要があります。

アバランシェ層を通過するキャリアは、結晶格子と衝突を繰り返しながら進みます。そのためアバランシェ層の単位距離を通過するのに要する時間は、アバランシェ層外の単位距離を通過する時間より長くかかります。アバランシェ層を通過する時間は、増倍率が高いほど長くかかります。数百倍の増倍率で使用する場合、増倍時間が問題になることがあります。

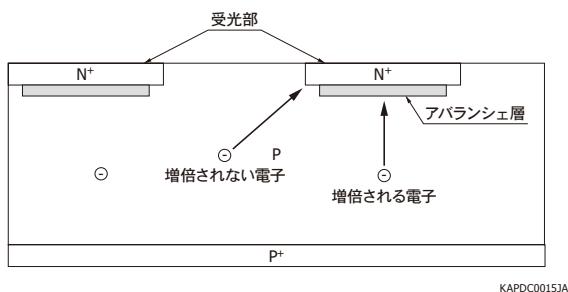
空乏層外からのキャリアの拡散電流による時間遅れは、数 μ sオーダーとなることがあります。これは、入射光がSi中へ到達する深さに対して、空乏層が十分に広がっていない場合に顕著に現れます。高速応答を実現するためには、使用波長を考慮して、空乏層を十分広げられる逆電圧を印加する必要があります。

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

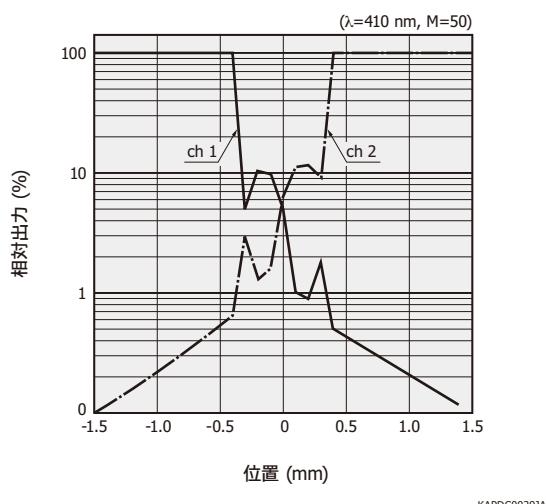
2 - 6 クロストーク

多素子タイプSi APDでは、クロストークが発生します。APDは、受光面下にアバランシェ層をもつため、受光面内に入射した光に対しては良好な増倍作用をもちますが、受光面外で発生したキャリアはアバランシェ層を通過しないため、信号が増倍されず小さいという特徴があります。そのためAPDアレイは、フォトダイオードアレイに比べ、クロストークが少なくなります。

[図2-9] 内部構造(多素子タイプ)



[図2-10] クロストーク
(S8550-02, 素子間ギャップ: 0.7 mm, 代表例)



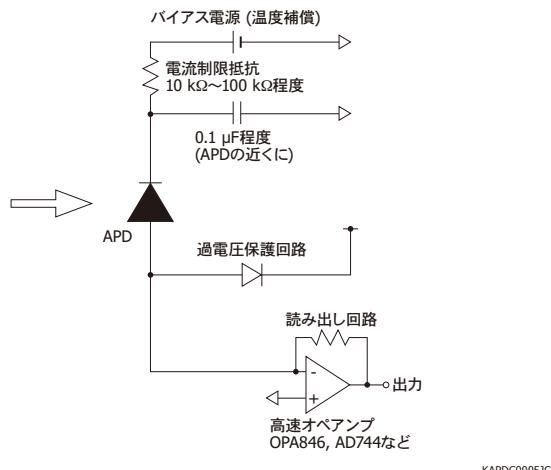
3. 使い方

3 - 1 周辺回路との接続

APDは、高い逆電圧の印加を必要とする以外は、通常のPINフォトダイオードと同様に扱うことができます。しかし、高電圧を印加する必要があることや、周囲温度により増倍率が変化することなど、使用する際に注意が必要な点があります。

- ① APDの消費電力は、入射光量 × 感度 ($M=1$) × 増倍率 × 逆電圧となり、PINフォトダイオードに比べ消費電力が非常に大きくなります。そのため、APDとバイアス電源の間に保護抵抗を付加した上で、電流制限回路を組み込むといった対策が必要です。ただし、出力電流が大きい場合、保護抵抗における電圧降下が大きくなりAPDの逆電圧が低下します。この場合、保護抵抗の値を下げる必要があります。
- ② 通常、低ノイズの読み出し回路は、過大電圧に対して初段部の損傷を招く恐れがあります。この対策として、過大電圧の入力を電源電圧に逃がす保護回路を接続してください。
- ③ APDの増倍率は温度により変化するため、広い温度範囲で使用するためには、温度変化に合わせて逆電圧を制御する温度補償方式を用いるか、APDの温度を一定に保つ温度制御方式を用いるなどの対策が必要です。温度補償方式は、APDの近くに温度センサを配置し、APDの温度係数に合うように逆電圧を変化させる方式です。温度制御方式は、電子冷却素子などを用いてAPDの温度を一定に制御する方式です。
- ④ 微弱な信号光を検出する場合、背景光がAPDに入射すると、そのショットノイズのためにS/Nが低くなる場合があります。このような場合は、光学フィルタを使用する、レーザの変調度を向上させる、視野角を制御するなど、背景光の影響を低減する必要があります。

[図3-1] 接続例



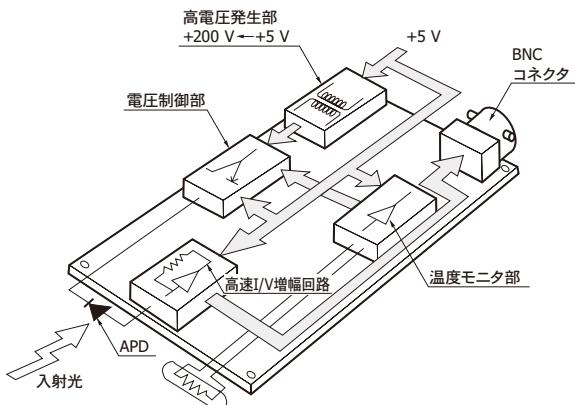
3 - 2 APDモジュール

APDモジュールは、APDを用いた高速・高感度な光検出器です。APD・低ノイズI/V増幅回路・バイアス電源をコンパクトな外形にまとめており、低電圧直流電源を接続するだけで、PINフォトダイオードに比べて数十倍も高S/Nの光検出が可能になります。APDモジュールを用いることによって、APDを使用した高性能なシステムの評価および製作が容易になります。

APDモジュール C12702シリーズのブロック図を図3-2に示します。周辺回路は、「3-1 周辺回路との接続」で取り上げている注意点が考慮されているため、精度の高い測光が可能となります。

APDモジュールの詳細については、「APDモジュール」技術資料を参照してください。

[図3-2] ブロック図 (C12702シリーズ)

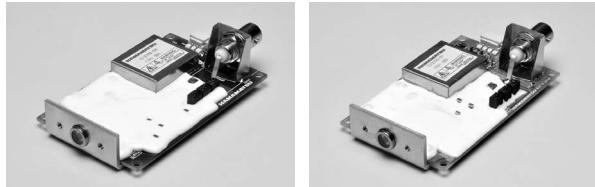


[表3-1] 浜松ホトニクスのAPDモジュール

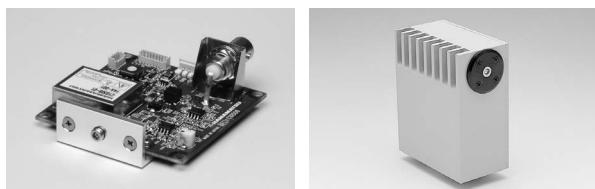
種類	特長
標準タイプ	近赤外タイプ・短波長タイプのAPDを内蔵、FC/SMAファイバアダプタも用意
高感度タイプ	低照度光検出用の高ゲインタイプ
高安定タイプ	デジタル温度補償タイプの高安定APDモジュール
高速タイプ	広帯域周波数(～1 GHz)において使用可能

[図3-3] APDモジュール

(a) 標準タイプ C12702シリーズ (b) 高感度タイプ C12703シリーズ



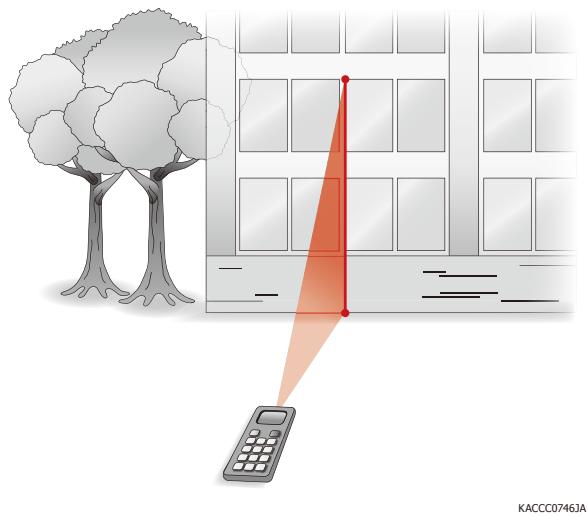
(c) 高安定タイプ C10508-01 (d) 高速タイプ C5658



4. 應用例

4-1 光波距離計

レーザ光を対象物に照射して、反射してくるまでの時間、または光の位相差をAPDが検出することで対象物との距離を計測できます。



4-2 障害物検知

APDは無人ロボットなどにおける障害物検知に利用することができます。また、特定エリアにおける人の動きの検知も行うことができます。



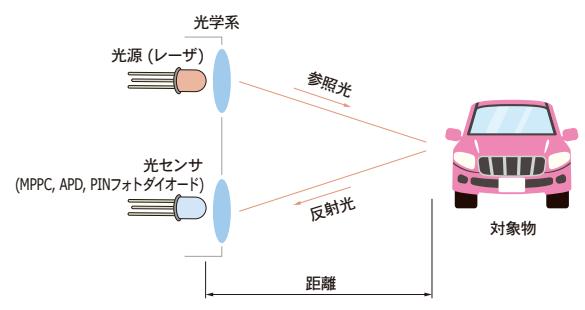
4-3 リモートセンシング

レーザを照射して物体からの反射光や散乱光をAPDが検出することにより、地表の状態、大気中の粒子、雲の測定が可能です。



4-4 LiDAR (Light Detection and Ranging)

対象物にレーザ光を照射し、その反射光を光センサでとらえて距離を測定します。自動車の自動運転化に向けた取り組みが進む近年、LiDARは高度運転支援システム（ADAS: Advanced Driver Assistance System）、無人搬送車（AGV: Automatic Guided Vehicle）などに利用されています。



本資料の記載内容は、令和3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

筑波営業所 〒305-0817 つくば市研究学園5-12-10 (研究学園スクウェアビル7階)

TEL (029) 848-5080 FAX (029) 855-1135

東京営業所 〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-8-21 (虎ノ門33森ビル5階)

TEL (03) 3436-0491 FAX (03) 3433-6997

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