

ACHETER

Une photodiode à avalanche (APD)



Christian MERRY, Laser Components, c.merry@lasercomponents.fr

Les photodiodes à avalanche (APDs) se distinguent des photodiodes PIN par le fait que les photons entrants déclenchent en interne une avalanche de charges. La condition préalable à ce phénomène est l'application d'une tension de polarisation inverse visant à élargir la couche d'absorption « A ». Dans les photodiodes conventionnelles, les photons entrants créent des paires électron-trou, également appelées porteurs de charges, qui fournissent un photo-courant mesurable. La puissance des photons entrants a été transformée en énergie électrique.

Dans ce domaine, les APDs ont fait un grand pas en avant. Le potentiel de bias est beaucoup plus élevé que dans les photodiodes normales. Dans l'APD, les porteurs de charge libérés par la lumière sont accélérés par le champ électrique de telle sorte qu'ils produisent d'autres paires électron-trou par ionisation d'impact. Si la tension de polarisation inverse est inférieure à la tension de claquage, l'avalanche s'atténue et se résorbe en raison des pertes par frottement. À ce stade un seul photon a généré des centaines, voire des milliers d'électrons. Au-dessus de la tension de claquage, l'accélération des porteurs de charge est suffisamment élevée pour maintenir l'effet d'avalanche. Un seul photon peut être suffisant pour générer un courant constant qui peut être mesuré par un équipement électronique externe.

Le courant généré est calculé comme suit :

$$I = R_0 \cdot M \cdot P_s$$

où R_0 (A/W) est la sensibilité spectrale de l'APD, M est le gain interne et P_s (watt) la puissance lumineuse incidente. Le gain de l'APD dépend de la tension de polarisation inverse appliquée (voir *figure 1*).

Choisir « la bonne » photodiode APD

Les APDs sont généralement recommandées pour les applications à très larges bandes passantes ou lorsqu'un gain interne est nécessaire pour surmonter le bruit de l'amplificateur secondaire. Les éléments suivants doivent être pris en compte lors d'une sélection.

Bande spectrale de fonctionnement

Les Si-APD sont disponibles dans la gamme de 260 à 1100 nm, les versions germanium entre 800 nm et 1600 nm et les modèles InGaAs entre 900 nm et 1700 nm. Par rapport aux APDs germanium, les APDs InGaAs présentent des caractéristiques de bruit nettement inférieures, une bande passante supérieure relativement à la zone active et des avantages dus à la réponse spectrale étendue à 1700 nm. En revanche, l'inconvénient est que les APDs InGaAs sont plus chères que les APD Ge. Le germanium est donc principalement recommandé pour les applications sensibles aux coûts ou dans les systèmes exposés aux interférences électromagnétiques et dans lesquels le bruit de l'amplificateur secondaire est nettement plus élevé.

Surfaces de détection

Il est évident que les APD de petites tailles sont plus économiques que les détecteurs de plus grandes dimensions, plus de puces pouvant être fabriquées par wafer. Par conséquent, la taille de surface active minimale requise pour réaliser la structure optique doit d'abord être déterminée. Parfois, il peut être plus avantageux d'utiliser une APD un peu plus grande, plutôt qu'une optique spéciale pour la mise au point sur un petit spot, qui peut s'avérer plus coûteuse que le supplément nécessaire pour une APD de plus grande taille.

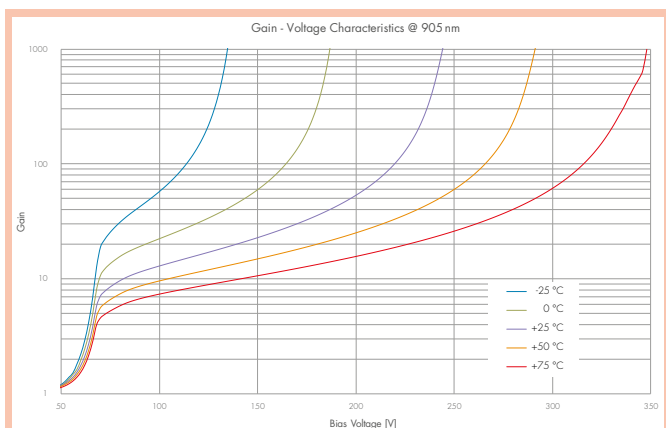


Figure 1. Gain de l'APD en fonction de la tension de polarisation inverse appliquée.

SAR Reach-Through Structure

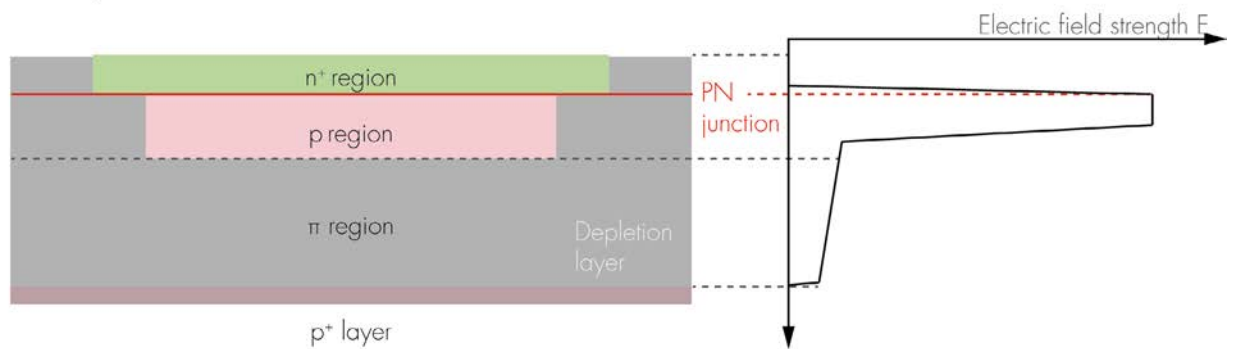


Figure 2. La structure d'une photodiode *reach-through* Si APDs, la concentration et le profil du champ électrique.

Bande passante et bruit

Pour comparer l'efficacité d'une APD avec une diode PIN, il ne suffit pas de comparer simplement le bruit des détecteurs. Le rapport signal/bruit (SNR) de l'ensemble du système est crucial. Pour les diodes PIN, le préamplificateur correspondant doit toujours être pris en compte. Ses caractéristiques de bruit dépendent, entre autres, de la fréquence. Comparée à une diode PIN, une APD s'avère plus performante lorsqu'elle permet d'augmenter substantiellement le niveau du signal du système sans en augmenter significativement le bruit global. Ainsi, les APDs sont préférables partout où de faibles intensités lumineuses doivent être détectées à des fréquences moyennes ou élevées. Le gain interne optimal est sélectionné lorsque le bruit du détecteur est approximativement égal au bruit d'entrée de l'amplificateur secondaire (ou résistance de charge), de sorte que l'APD n'affecte pas le bruit du système. Le bruit augmente avec la largeur de bande passante du système pour les diodes PIN comme pour les APD. Il est donc important de réduire la bande passante autant que possible.

Les différentes familles d'APDs

Silicium

Le silicium offre la gamme d'APD la plus étendue. En fonction du processus de fabrication, différents paramètres offrent des avantages spécifiques selon les différentes applications. Le *tableau 1* donne un aperçu des spécifications les plus importantes.

Reach-through Si APDs (Si RTAPDs)

La conception de base d'une photodiode à avalanche *reach-through* consiste en une zone étroite de champ élevé où la multiplication a lieu, associée à une zone de champ faible beaucoup plus large dans laquelle le rayonnement entrant est absorbé. Le design, la concentration d'impuretés et les profils des champs électriques sont illustrés à la *figure 2*.

Le principal avantage de la conception *reach-through* est qu'il est possible de réaliser une APD avec une zone



**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE
AU SERVICE DE L'INNOVATION**



HTDS
Hi-Tech Detection Systems



OPTO ÉLECTRONIQUE

SOLUTIONS SPÉCIFIQUES / PRODUITS STANDARDS /
SERVICE SUR MESURE / POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

EMETTEURS UV-VIS-IR
LEDs et Power LEDs / Sources lumineuses à LED ou Xénon
Diodes lasers / Lampes flash Xénon / Corps noirs miniatures

DÉTECTEURS UV-VIS-IR
Pyrodecteurs / Thermopiles / Imageurs thermiques
Photodiodes PIN et APD / Si, InGaAs / Barettes, quad
SPCM, CPM, Compteurs de photons

APPLICATIONS : INDUSTRIELLES, AÉRONAUTIQUES, GRAND PUBLIC, MÉDICALES, SCIENTIFIQUE, DÉFENSE, AUTOMOBILE

Société HTDS - info@htds.fr - www.htds.fr - Tel : +33 (0)1 64 86 28 28

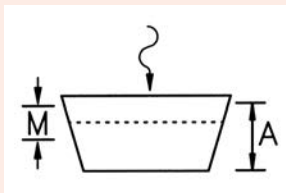
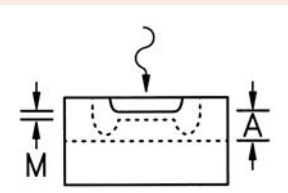
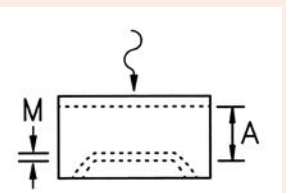
TYPE D'APD SILICIUM	BORDS BISEAUTÉS	EPITAXIALE	REACH THROUGH
Structure			
Région d'absorption	étendue	étroite	moyenne à étendue
Région de multiplication	large	étroite	moyenne à étendue
Dimension caractéristique (diamètre)	jusqu'à 16 mm	jusqu'à 5 mm	jusqu'à 5 mm
Gain	50 à 1000	1 à 100	15 à 300
Puissance de bruit	très bon ($k = 0,0015$)	bon ($k = 0,03$)	bon à très bon ($k = 0,02$ à $0,002$)
Tension de fonctionnement	500 à 2000 V	80 à 300 V	150 à 500 V
Temps de montée	lent	rapide	rapide
Capacité	faible	élevée	faible
Sensibilité dans le bleu (400 nm)	bonne	médiocre	médiocre
Sensibilité dans le rouge (650 nm)	bonne	bonne	bonne
Sensibilité dans le proche IR (905 nm)	très bonne	bonne	très bonne

Tableau 1. Vue d'ensemble des différentes structures de Si APD et de leurs caractéristiques.

d'absorption modérément large – par exemple jusqu'à plusieurs centaines de microns – qui fonctionne de manière parfaitement satisfaisante à une tension de polarisation de quelques centaines de volts, alors que le même composant sans cette zone étroite de champ élevé nécessiterait une tension beaucoup plus élevée qui, pour une APD avec une zone active épaisse, serait bien supérieure à 1000 volts. En revanche, l'un des principaux inconvénients de la conception est que (souvent) l'APD ne peut pas fonctionner à de faibles gains, puisque la diode ne fonctionnera pas à des

tensions inférieures à la tension *reach-through*, et le gain à ce point est généralement supérieur à 1, et souvent aussi élevé que 10 ou plus.

Récepteurs APD / hybrides

Le gain de l'APD est augmenté jusqu'à ce que le SNR soit limité par le bruit d'émission. Les performances de l'ensemble du système de détection dépendent toutefois en grande partie du circuit électronique.

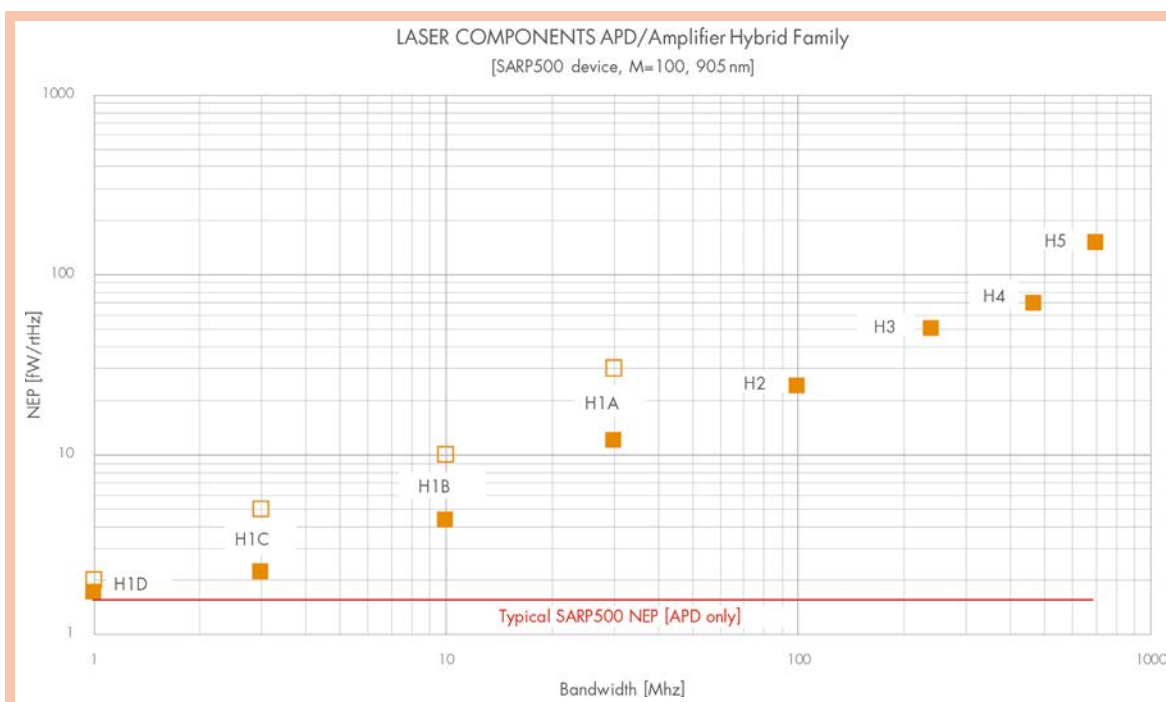


Figure 3. Les compromis de largeur de bande de bruit associés aux récepteurs APDs/ amplificateurs de Laser Components.

Il est important de réduire la capacité vue par l'amplificateur afin de réduire le bruit global de la combinaison détecteur/amplificateur. Pour résoudre ces problèmes, un détecteur/amplificateur hybride regroupe tous les composants à proximité immédiate sur un substrat céramique à faible capacité. Cela réduit la capacité de dispersion, réduisant ainsi le bruit et fournissant la meilleure bande passante pour l'application donnée, et permet d'obtenir un module très compact.

Il est important d'analyser les besoins réels en bande passante de son application afin de choisir le dispositif le plus approprié et de minimiser la puissance équivalente au bruit (NEP) associée.

La figure 3 montre les compromis de largeur de bande de bruit associés aux récepteurs APDs/amplificateurs de Laser Components. Le bruit est indiqué en tant que puissance équivalente au bruit (NEP) qui est une valeur en watts équivalente à la densité de bruit du système. C'est une bonne indication du niveau de puissance optique minimale détectable du récepteur.

APDs en mode Geiger

Les APD conventionnelles fonctionnent en dessous de la tension de claquage, mais si la tension de polarisation inverse est trop faible, les pertes (par friction/collision) dans le matériau semi-conducteur font que l'effet d'avalanche est trop fortement amorti. Les APD peuvent également fonctionner au-dessus de leur tension de claquage (mode Geiger) et sont alors spécialement conçues pour favoriser l'effet avalanche. Avec une amplification interne allant jusqu'à 10^8 , ces photodiodes sont capables de détecter des événements à photons uniques – d'où le terme de diodes avalanche à photon unique (SPAD, *single-photon avalanche diode*). Ce mode de fonctionnement entraîne cependant des courants élevés à l'intérieur du SPAD, qui doivent être correctement contrôlés si l'appareil ne doit pas rester conducteur ou simplement pour ne pas être endommagé. Dans le cas le plus simple, cette correction est obtenue par l'utilisation d'une résistance en série (*passive quenching*) – la chute de tension à travers la résistance est responsable du retour du SPAD à son état de blocage, mais cela conduit à des temps morts très élevés et donc des taux de détection limités. La plupart des modules SPAD disponibles dans le commerce utilisent donc une électronique conçue pour baisser la polarisation inverse (*active quenching*) dès que le courant de claquage a été détecté. Les temps morts réalisables sont alors de l'ordre de 50 ns et des taux de comptage allant jusqu'à 10 MHz ou plus peuvent être réalisés. De plus, les SPAD modernes sont équipés d'un refroidissement thermoélectrique, ce qui permet d'obtenir des taux de comptage extrêmement bas, de l'ordre de 10 coups/s.

Guide : quelles APDs pour quelles applications ?

Comme mentionné précédemment, les APDs sont utilisées partout où de faibles intensités lumineuses à moyenne ou haute fréquence sont détectées. Faisons un tour d'horizon des applications les plus courantes.

Partageons la passion et la lumière
200 ans d'innovation optique

1819 - 2019

HORIBA Scientific développe des instruments haut de gamme pour la science et l'industrie

Analyse moléculaire et microanalyse

- Spectroscopie Raman et AFM
- Cathodoluminescence
- Fluorescence
- Résonance de Plasmons de Surface par imagerie

Analyse élémentaire

- ICP-OES
- Analyseurs C/S et O/N/H
- Analyseurs XRF et μ XRF
- Analyseurs S dans les produits pétroliers
- Préparation des échantillons

Spectroscopie optique

- Réseaux de diffraction
- Détecteurs
- Spectromètres OEM
- Monochromateurs

Caractérisation de Surfaces et Couches Minces

- Ellipsométrie
- GD-OES
- PP-TOFMS™

Caractérisation des particules

- Diffraction laser
- Diffusion de la lumière
- Potentiel zêta

Sciences criminalistiques

- Sources de lumière
- Logiciel de traitement de l'image
- Bases de données

Télémètres laser / LiDAR

Le champ d'opération le plus fréquent pour les APDs est la télémétrie, soit en espace libre (LIDAR), soit sur fibre optique (OTDR – réflectomètres optiques).

Dans les systèmes télémétriques en espace libre, en fonction du principe de mesure, de la portée et de la résolution ; des diodes laser cw, des diodes laser pulsées ou des lasers à semi-conducteurs se trouvent du côté de l'émetteur. Les diodes laser cw fortement modulables dans le domaine spectral visible permettent, en combinaison avec des APDs Si optimisées dans le rouge, des mesures jusqu'à plus de cent mètres avec une précision de l'ordre du mm. Avec des APDs Si optimisées pour le domaine NIR, en combinaison avec des diodes laser pulsées (PLDs) à 905 nm selon le principe du temps de vol, des distances de plusieurs km peuvent être mesurées. Les APDs InGaAs peuvent détecter des impulsions en toute sécurité oculaire à partir de PLDs à 1550 nm à une distance de plus de 10 km. Les OTDR utilisent des diodes laser à fibre optique couplées à 1300 ou 1550 nm et nécessitent donc des APDs InGaAs.

Récepteurs haute vitesse

En espace libre et en transmission de données par fibre optique, des temps de montée et de descente de 300 ps pour un gain allant jusqu'à 100 font des APDs les composants de choix pour une utilisation dans les récepteurs haute vitesse. Les APDs InGaAs de petites tailles et à faible bruit sont des composants clés pour la construction de récepteurs très

sensibles, permettant le transfert de données sur des distances de 10 - 100 km à 12,5 Gb/s.

Comptage de photons uniques

Des APDs Si spécialement sélectionnées peuvent également être utilisées comme compteurs de photons en mode Geiger (VR > VBR), un seul photoélectron pouvant provoquer une avalanche d'environ 10^8 porteurs de charge. Les applications de ces APDs sont la bioluminescence, la spectroscopie de fluorescence et l'astronomie. Les tubes photomultiplicateurs (PMT) sont également largement utilisés dans ce type d'applications. L'avantage décisif des APDs est leur conception au format petit et compact, leur grande plage de mesure de 400 nm jusqu'au NIR et leur efficacité de détection imbattable jusqu'à 70 %.

OCT - hybrides

Pour les applications médicales telles que la tomographie par cohérence optique (OCT) et la mesure de fluorescence, il est généralement nécessaire d'utiliser un faible NEP. Les progrès réalisés dans l'utilisation de la lumière proche infrarouge en combinaison avec le récepteur APD, cependant, ont ouvert la voie à l'imagerie OCT dans les tissus à forte diffusion. Aujourd'hui, la biopsie optique *in vivo* est l'un des domaines d'application les plus difficiles de l'OCT. La haute résolution, la profondeur de pénétration élevée et son potentiel d'imagerie fonctionnelle attribuent à l'OCT une qualité de biopsie optique qui peut être utilisée pour évaluer la fonction tissulaire et cellulaire ainsi que la morphologie.

MARQUE / DISTRIBUTEUR	PRODUIT	INFOS & CONTACT
AdvancedPhotonix	Photodiodes à avalanche (APD) grande surface	www.advancedphotonix.com
Acal Bfi	Photodiodes à avalanche (APD)	www.acalbfi.com Camille Matagne, Tél. 01 60 79 59 06
Edmund Optics	Photodiodes à avalanche (APD)	www.edmundoptics.com Alexie Liagre, Tél. 08 20 20 75 55
First Sensor	Photodiodes à avalanche (APD)	www.first-sensor.com Christophe de Vorges, Tél. 01 86 95 02 33
GPD Optoelectronics / PRO-lite	Photodiodes à avalanche (APD)	www.pro-lite.fr / www.gpd-ir.com Jerome Castay, Tél. 05 47 48 90 70
Hamamatsu	Photodiodes à avalanche (APD)	www.hamamatsu.com Abdel Betari, Tél. 01 69 53 71 00
Excelitas Technologies / HTDS	Photodiodes à avalanche (APD)	www.htds.fr / www.excelitas.com Jean-Mathieu Bromont, Tél. 07 85 04 19 59
Laser Components	Photodiodes à avalanche (APD)	www.lasercomponents.fr José Bretes, Tél. 01 79 85 86 03
OSI Optoelectronics	Photodiodes à avalanche (APD)	www.osioptoelectronics.com
Thorlabs	Photodiodes à avalanche (APD) InGaAs	www.thorlabs.com