

ACHETER

Un détecteur de photons uniques

Dr. Mike Hodges, Laser Components GmbH

Les technologies de comptage de photon unique sont devenues un outil fiable et polyvalent pour les chercheurs et les ingénieurs dans la détection des signaux lumineux extrêmement faibles et à très haute cadence. Petit tour d'horizon des principales solutions disponibles sur le marché.

Les détecteurs de photons uniques sont utilisés dans les applications où les détecteurs classiques ne peuvent plus distinguer la différence entre signal et bruit. Dans ce domaine, les applications les plus importantes sont les systèmes LIDAR, la cryptographie quantique, la spectroscopie, l'analyse de l'ADN, la mesure des particules, la microscopie de fluorescence ou la détection de molécule unique.

L'expression « détection de photons uniques » donne une bonne idée de l'ordre de grandeur de l'intensité des signaux impliqués dans ce régime. Le nombre de photons par seconde qui correspond à une puissance optique quelconque est calculé selon la formule suivante :

$$N(\lambda) = 5,03 \cdot 10^{15} \cdot \lambda \cdot P$$

où P correspond à la puissance optique exprimée en watts et λ à la longueur d'onde en nanomètres. Par conséquent, nous voyons que 1 fW de puissance optique à une longueur d'onde de 405 nm correspond à environ 2000 photons par seconde (figure 1).

Même si les domaines d'application susmentionnés sont très différents, ils partagent une caractéristique commune : le besoin d'un détecteur de photon unique à haute efficacité et à très faible bruit, étant entendu que détecter chaque photon impose d'avoir un taux de comptage élevé

(principalement régi par la capacité du dispositif à revenir rapidement à son état d'équilibre sans donner naissance à des échos de détection, ou *afterpulses* en anglais). Plusieurs technologies de détection particulièrement adaptées à cet effet sont présentées ci-dessous.

Photomultiplicateur (PMT)

Le tube photomultiplicateur (PMT) est une variante du tube à vide. Le PMT utilise l'effet photoélectrique et la multiplication issue d'une section secondaire munie d'un multiplicateur d'électrons pour transformer un photon incident unique en signal électrique. Le processus de multiplication correspond à un effet d'avalanche dont le résultat est l'impulsion électrique mesurable à l'anode de l'électromultiplicateur. Toutefois, pour que ce processus réussisse, les PMT doivent utiliser une tension très élevée (1 à 3 kV) (figure 2).

Pour la détection de photons uniques, le PMT peut fonctionner dans ce qu'on appelle le mode Geiger. Dans ce cas, la restriction implique que le courant transitoire très élevé qui accompagne chaque émission de photons doit de nouveau retourner à zéro (pendant ce qu'on appelle le « temps mort ») avant que le détecteur ne soit prêt à détecter le photon suivant.



small components
MASSIVE IMPACT



noxtherobot.com

We Manufacture
IR Detectors

- (x)InGaAs Photodiodes
- PbS & PbSe Detectors
- Pyroelectric Detectors



ID Quantique et les nouvelles applications des technologies quantiques

La physique quantique permet maintenant de relever certains des plus grands défis dans les domaines de la santé, de l'ingénierie et des technologies de l'information, tout en proposant des applications innovantes dans des domaines aussi divers que les normes métrologiques ou l'imagerie biologique : les détecteurs à photons uniques peuvent être utilisés pour construire un réflectomètre optique à domaine temporel. L'adaptation du système OTDR à la mesure souhaitée par l'utilisateur, ainsi qu'un choix approprié du détecteur, se traduira par des performances nettement supérieures à celles que l'on peut obtenir avec les OTDR du commerce. Les détecteurs à photon unique sont aussi une bonne solution pour la détection de signaux de faible intensité dans les systèmes de communication en espace libre avec une précision de synchronisation extrême (jusqu'à 50 ps). Ils aident ainsi à distinguer les signaux synchrones du bruit, qui a un temps d'arrivée aléatoire.



Découvrez davantage ces applications en visitant www.idquantique.com et venez y découvrir notre grand choix de détecteurs et d'électronique avec les meilleures performances du marché.

- Détecteurs supraconducteurs avec système refroidissement à 0.8K pour les longueurs d'onde infrarouge: efficacité de détection de 80%.
- Détecteurs de photons InGaAs/InP à très bas bruit pour les longueurs d'onde infrarouge
- Electronique de comptage rapide : 100Mevents/s et haute résolution (20ps)

CONTACT

ID QUANTIQUE
www.idquantique.com - info@idquantique.com
 +41 22 301 83 71

Différents matériaux de cathode ayant des propriétés spectrales variées sont utilisés selon la gamme spectrale spécifique. Tandis qu'à l'origine ces matériaux étaient les plus sensibles dans le spectre UV et bleu, le PMT présente désormais un rendement en IR considérablement amélioré. Le PMT possède aussi une large surface de détection (diamètre jusqu'à 75 mm), même s'il doit aussi être refroidi afin de réduire le niveau de bruit. Le PMT est extrêmement sensible aux champs magnétiques extérieurs et tend aussi à présenter un *afterpulsing* – un effet de réplique issu de l'impulsion électrique de sortie qui ne correspond pas au signal (optique) d'entrée.

Photodiodes à avalanche pour la détection de photon unique (SPAD)

Les photodiodes à avalanche utilisent l'effet d'avalanche pour générer l'amplification (et ainsi la haute sensibilité) interne. Une forte polarisation de bias est un prérequis pour ce process, élargissant la zone d'absorption dans l'APD et ainsi permettant une production suffisante de paires électrons-trous. Ces électrons (ou trous) primaires sont attirés par la haute tension dans la zone d'avalanche, où ils génèrent des électrons (ou trous) secondaires par impacts ionisants et provoquent ainsi l'effet d'avalanche recherché (figure 3).

Les APD classiques fonctionnent en dessous de la tension de claquage (*breakdown voltage* ou V_{br}). Les SPADs (*single photon avalanche diode*) ont été spécifiquement développés pour être opérés avec une tension de polarisation inverse

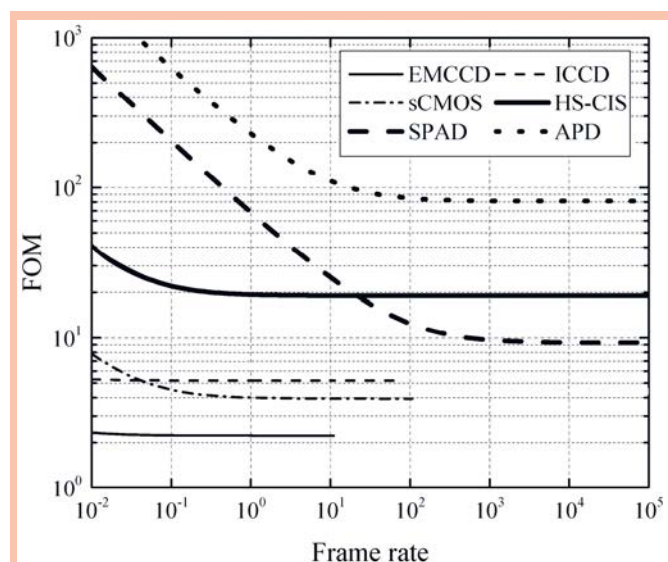


Figure 1. Nombre minimum de photons incidents sur un pixel requis pour avoir un rapport signal-sur-bruit RSB = 1 en fonction de la fréquence d'images pour plusieurs capteurs typiques de la littérature. Le facteur de mérite (FOM) le plus faible indique une meilleure performance en faible luminosité. APD: photodiode à avalanche ; EM : multiplication d'électrons ; HS-CIS : capteur d'image CMOS haute vitesse ; SPAD : APD à un seul photon ; sCMOS : CMOS scientifique ; ICCD : CCD intensifié. Crédit : *Sensors* 16, 1294 (2016) ; <https://doi.org/10.3390/s16081294>

supérieure à la tension de claquage. Ce type de fonctionnement est aussi appelé communément « mode Geiger » (par opposition aux APDs « classiques » fonctionnant en « mode linéaire ») et permet l'obtention de gains d'amplification supérieurs à 100 (là où un APD linéaire sera utilisé à des gains de l'ordre de 10 ou 20).

On définit typiquement la surtension $V_r > V_{br}$ telle que $V_r = V_{br} + V_{overs}$, cette dernière étant la tension dite de surcharge ou surtension. Un circuit électrique adapté, dit de *quenching*, doit être employé afin d'arrêter l'avalanche d'électrons, permettant ainsi d'abaisser rapidement la tension de polarisation à une valeur V_d (tension de chute). Dans le cas de figure le plus simple, ceci est réalisé par l'utilisation d'une résistance placée en série avec l'APD (*passive quenching*) – la baisse de tension à l'intérieur de la résistance fait que la SPAD retourne à l'état de blocage. Cependant, cela entraîne des temps morts considérables limitant ainsi le taux de détection [1]. Par conséquent, la plupart des modules SPAD disponibles sur le marché utilisent des composants électroniques d'extinction actifs qui sont conçus pour baisser la tension de polarisation inverse dès que la tension de claquage a été détectée. Ainsi, il est possible d'atteindre un temps mort de l'ordre de 45 ns et un taux

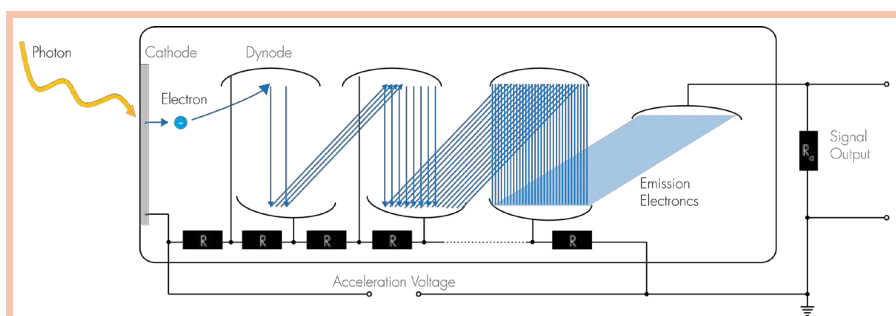


Figure 2. Principe de fonctionnement d'un PMT.

de comptage supérieur à 20 MHz. Enfin, les nouveaux modules SPAD sont munis d'un refroidissement thermoélectrique leur permettant ainsi d'atteindre de très faibles taux de comptage de l'ordre de 10 c/s.

De par ce mode de fonctionnement, un SPAD est à même de détecter un unique photon. Dans certaines bandes spectrales, comme le proche-IR (700–1550 nm) la seule option proposée il y a encore quelques dizaines d'années étaient les photomultiplicateurs, possédant une faible efficacité quantique et un bruit important sur cette bande de longueurs d'ondes. Les SPADs sont devenus depuis un élément incontournable dans les technologies de détection NIR, mais également sur la bande plus « classique » de visible grâce aux avancées majeures en termes de développement de nouvelles structures à semi-conducteurs.

Variantes et tendances actuelles

Même si la plupart des développements technologiques SPAD sont à base de silicium, il existe une demande croissante pour les détecteurs de photons uniques sensibles au rayonnement infrarouge. Les SPAD InGaAs sont plus adaptées à des longueurs d'onde > 1000 nm qui atteignent une efficacité de détection jusqu'à 20 %. Toutefois, il faut noter que le taux de coups sombres (ou *dark count*) et la probabilité d'un effet *afterpulsing* pour ce type d'APD sont considérablement plus élevés que pour les Si-SPAD.

Notons que les « photodiodes à avalanche multipixels » ont été récemment développées selon la technologie CMOS utilisant aussi le mode de fonctionnement Geiger. Aussi connus comme « photomultiplicateurs silicium », ces détecteurs sont réputés

TPS
Source à photons

PIXEA
Laser picoseconde

LYNXEA
Compteur de photons corrélés en temps

SPD_OEM
Compteur de photons OEM

LE LEADER FRANÇAIS DE L'INSTRUMENTATION QUANTIQUE

- **METROLOGIE QUANTIQUE**
 - Mesure de coïncidence
 - Caractérisation de source à photons
- **CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE**
 - Distribution quantique de clés avec des photons uniques (QKD)
- **CAPTEUR QUANTIQUE**
 - OTDR Quantique
 - Geiger-mode LIDAR

CONTACTEZ NOUS | support@aureatechnology.com
www.aureatechnology.com
AUREA Technology - Besançon - France

MODULES À COMPTAGE DE PHOTON UNIQUE			
MARQUE	PRODUIT	INFOS	CONTACT
Aurea Technology	Compteurs de photon VIS/IR	www.aureatechnology.com	Jérôme Prieur : 03 81 25 29 83 jerome.prieur@aureatechnology.com
Excelitas	Détecteur de photon VIS/NIR	www.excelitas.com	Farice Moudarres : 01 64 86 27 89 farice.moudarres@htds.fr
Hamamatsu Photonics	Détecteurs de photon VIS	www.hamamatsu.com	Xavier de La Borderie : 01 69 53 71 00 xdelaborderie@hamamatsu.fr
ID Quantique	Compteurs / détecteur / analyse de photon VIS/IR	www.idquantique.com	Michael Desert : +41 22 301 83 71 michael.desert@idquantique.com
Laser Components	Détecteurs de photon UV/VIS/IR	www.lasercomponents.com	José Bretes : 01 39 59 52 25 j.bretes@lasercomponents.fr
MPD	Détecteurs de photon VIS/IR	www.micro-photon-devices.com	Céline Sentout : 05 57 10 92 82 sentout@laser2000.fr
PicoQuant	Compteurs / détecteur de photon UV/VIS	www.picoquant.com	Sylvain Martin : 01 69 41 04 05 sylvain.martin@optonlaser.com
Thorlabs	Détecteur de photon UV/VIS/NIR	www.thorlabs.com	Quentin Bollé : 09 70 44 48 44 qbollee@thorlabs.com
Photon Spot	Détecteur de photon VIS/IR	www.photonspot.com	phone : + 1 626 228-2610 sales@photonspot.com
Single Quantum	Détecteur de photon VIS/IR	www.singlequantum.com	phone : +1-858-481-4400 sales@qdu.com

revendeurs / grossistes
 analyse / comptage / time-tagging
 fabricant de détecteurs de photon unique



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



HTDS
Hi-Tech Detection Systems

OPTOÉLECTRONIQUE

DES SOLUTIONS ET UN SERVICE SUR MESURE POUR PETITES À TRÈS GRANDES SÉRIES - PRODUITS STANDARDS - SOLUTIONS SPÉCIFIQUES

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
Pyro détecteurs / Thermopiles / Imageurs thermiques
Photodiodes PIN et APD / Si, InGaAs / Barettes, quad
SPCM, CPM, Compteurs de photons
Modules SiPM Lynx



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

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

pour leur forme compacte, leur coût relativement bas, une tension d'alimentation faible, une large gamme de détection ainsi qu'une bonne résolution temporelle. Toutefois, il reste encore des aspects problématiques concernant ces barrettes ; par exemple, le fait que le taux de coups sombres est supérieur de plusieurs ordres de grandeur aux SPAD classiques. Celles-ci présentent également un rendement quantique plus faible aux plus grandes longueurs d'onde.

De même, citons l'apparition récente des systèmes PMT-APD hybrides – un photon incident sur un matériau de photocathode libère un électron qui migre ensuite à travers une diode APD au lieu d'être amplifié dans la section électromultiplicateur d'un PMT classique. Le principal avantage de cette approche est la faible présence des effets *afterpulsing*, avec plusieurs bénéfices supplémentaires comme la large surface active (dans la gamme des mm) et une bonne résolution temporelle. Le désavantage est constitué par des conditions délicates de manipulation de ces systèmes (> 8000 V pour la photocathode), la gamme spectrale limitée et le besoin de composants électroniques à très faible bruit en aval du détecteur lui-même pour garantir de faibles taux de comptage.

Enfin, la R&D est également très active sur les détecteurs supraconducteurs de photons uniques (SSPD),

qui atteignent désormais 85 % de rendement. Le principe ? La photodétection est assurée par un nanofil supraconducteur placé dans une cavité optique. Les travaux actuels portent notamment sur la possibilité de rendre ces détecteurs insensibles à la polarisation de la lumière, ou celle d'augmenter leur température de fonctionnement (qui est aujourd'hui de 4 K).

L'efficacité de détection : la clé du succès

Pour comparer les différents types de détecteurs, les caractéristiques pertinentes de performance incluent le taux de coups sombres, la probabilité d'un effet *afterpulsing* et le temps mort. Toutefois, le paramètre le plus important parmi les différents domaines d'application est l'efficacité de détection. L'efficacité quantique (EQ) nettement plus élevée pour les SPAD sur un large domaine spectral à partir de 400 nm et jusque dans la gamme IR est une des principales raisons pour lesquelles les SPAD sont souvent choisis au lieu des PMT. L'EQ (100 %) est définie comme le rapport entre électrons (primaires) émis et photons absorbés :

$$EQ = \frac{R_0 \cdot 1240}{\lambda} \cdot 100\%$$

où R_0 représente la sensibilité spectrale en A/W et λ la longueur d'onde en nm. L'EQ mesure l'efficacité totale de la structure APD en tant que telle, tandis

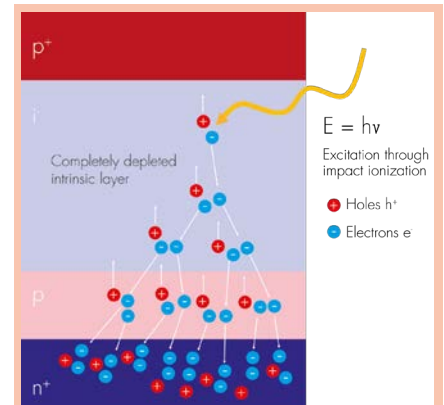


Figure 3. Principe de fonctionnement d'une photodiode à avalanche (APD) : un photon incident génère une paire électron-trou. L'électron est accéléré vers la région de multiplication générant d'autres paires électrons-trous (effet d'avalanche).

que l'efficacité du module entier est aussi influencée par celle des composants électroniques qui le composent. C'est la raison pour laquelle les fiches techniques des modules SPAD mentionnent généralement l'efficacité de détection de photon (P_d) – c'est-à-dire, la probabilité qu'un photon incident se transforme en impulsion électrique à la sortie du module.

Pour la conception d'une SPAD, il est important de comprendre qu'à la fois l'efficacité de détection et le taux de comptage dépendent de la tension de polarisation appliquée à l'APD. Comme discuté ci-dessus, l'APD fonctionne en mode Geiger, donc au-dessus de la tension de claquage ($V_{op} > V_{br}$).

... when every photon counts



visible and infrared single-photon counters

single-photon counting and timing SPAD cameras

picosecond delays and QRN generators

fast-gated single-photon counters



MICRONORA

SALON INTERNATIONAL DES MICROTECHNIQUES



Précision / Miniaturisation
Intégration de fonctions complexes



25 - 28 sept. 2018
Besançon - France

Aéronautique, Luxe
Médical, Automobile
Télécommunications,
Armement, Nucléaire...

De la R&D à la sous-traitance
jusqu'aux
technologies de production



Badge gratuit Mot de passe : PUB26
www.micronora.com



VISITEZ



Figure 4. Photos de produits disponibles sur le marché (module COUNT de Laser Components, et module OEM de comptage de photons proche infrarouge d'Aurea Technology).



La différence entre V_{op} et V_{op} indique la surtension et elle est choisie pour optimiser des paramètres spécifiques tels que l'efficacité de détection. Toutefois, l'optimisation est seulement possible lorsque l'APD au cœur de chaque module est de qualité adéquate, avec un EQ maximal et un facteur K minimal (le rapport entre le coefficient d'ionisation des trous et des électrons) pour que le taux de comptage d'obscurité reste aussi bas que possible [2].

Tandis que les SPADs ont traditionnellement été le dispositif préféré pour les applications dans la gamme de longueurs d'onde rouge et NIR, les PMT se trouvaient généralement dominants dans les applications du spectre allant du bleu aux UV grâce à leur EQ plus élevée. L'évolution récente de la technologie SPAD démontre que cette distinction est de moins en moins justifiable. De bons exemples sont les SPAD des séries COUNT de Laser Components (figure 4).

Remerciements

L'auteur souhaite remercier P. Baudoz (Observatoire de Paris) et O. Alibart (Université de Nice Sophia Antipolis) pour leur relecture critique et leurs suggestions.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] Stipcevic, M.; Skenderovic, H.; Gracin, D.: Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range, *Optics Express* **18**, 17448-17459 (2010)
- [2] Webb, P.P. et al.: Properties of Avalanche Photodiodes, *RCA Review* **35**, 234-278 (1974)
- [3] Sandercock, J.R., TBC