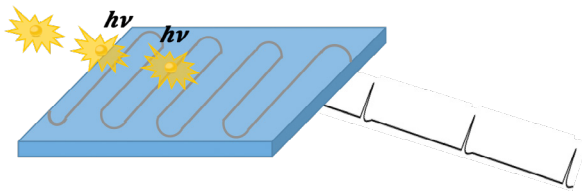


DÉTECTEUR DE PHOTONS SUPRACONDUCTEUR

Christophe COUTEAU*

Laboratoire Lumière, nanomatériaux & nanotechnologies-L2n, Université de Technologie de Troyes-UTT & CNRS UMR7076, Troyes, France
 Département de Physique, Université d'Oxford, Oxford, Royaume-Uni

*christophe.couteau@utt.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202513060>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Un photon est la limite ultime mesurable de la lumière et demande par conséquent des détecteurs spécifiques à photons uniques. L'optique quantique et la photonique quantique sont des sous-domaines spécifiques de la physique qui nécessitent la création, la manipulation et la détection de photons uniques. Nous allons aborder plus spécifiquement la partie détection de photons uniques à base de technologies supraconductrices, et verrons quels sont les paramètres importants et quelles sont les applications qui en découlent.

La mesure d'un photon unique correspond à la mesure d'un flux de lumière inférieur au fW soit plus de 12 ordres de grandeur par rapport à l'émission typique d'un pointeur laser de l'ordre du mW . Sans surprise, les détecteurs 'standards' de lumière ne sont pas en capacité de détecter ce niveau de signal qui sera perdu dans le bruit intrinsèque de tout détecteur de lumière tel qu'une photodiode en silicium ou une thermopile. Il est donc nécessaire de développer des capteurs spécifiques et optimisés pour la détection de très faible niveau de lumière jusqu'à la limite ultime du photon unique (limite ultime dans le sens où un photon est insécable). Nous allons aborder dans cet article un type spécifique de détecteurs à

photons uniques basé sur des technologies nécessitant des matériaux supraconducteurs où nous commencerons par donner le principe de fonctionnement, les paramètres pertinents pour un tel capteur puis nous aborderons les champs d'applications avant de conclure.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

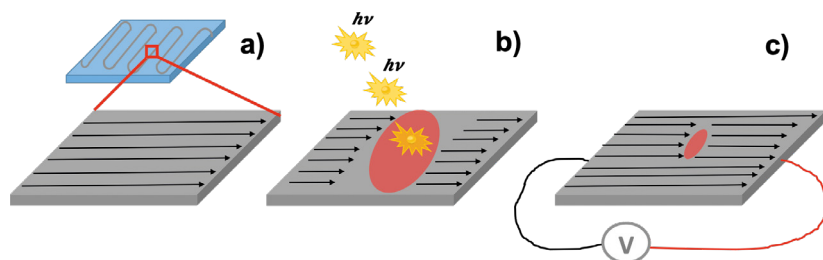
Il existe différents types de technologies de détecteurs à photons uniques notamment à base de matériaux semi-conducteurs tels que des photodiodes à avalanches mais encore les photomultiplicateurs basés sur l'effet photoélectrique. Dans tous les cas, ce transducteur/capteur/détecteur est un appareil de mesure qui va transformer un signal optique (jusqu'au minimum détectable, le photon) en signal électrique qui sera enfin lu et

analysé par un circuit électronique doté d'une interface informatique. Historiquement, les besoins en détection de faibles signaux de lumière étaient en astronomie et notamment dans les domaines proche et moyen infra-rouge. Les détecteurs à base de matériaux supraconducteurs ont alors été développé à base de jonction tunnel supraconductrice ou encore les capteurs à transition de bord (transition edge sensor ou TES en anglais). En 2001, une nouvelle génération de détecteurs de lumière est apparue à base de matériaux supraconducteurs [1]. Le principe de fonctionnement est l'apparition d'un 'point chaud', mesurable électriquement, lorsqu'un photon unique est absorbé par le matériau. Ce détecteur sur lequel se focalise cet article est appelé un détecteur à photon unique à base de nanofil supraconducteur

(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector ou SNSPD en anglais) [2,3]. La Figure 1 présente le principe de fonctionnement de base qui s'appuie sur la supraconductivité qui est un phénomène physique qui se manifeste lorsqu'un matériau conduit l'électricité sans quasiment aucune résistance électrique. La supraconductivité apparaît dans ce type de matériau lorsqu'il est refroidi à de très basses températures (en-dessous de la température critique d'apparition de l'effet supraconducteur). Il est à noter à ce stade que l'un des intérêts majeurs de ce type de détecteur par rapport aux autres capteurs à base de supraconductivité est que les températures cryogéniques nécessaires sont de l'ordre de quelques kelvins et non pas des sub-kelvins qui nécessitent alors de la cryogénie plus complexe et notamment un cryostat à dilution. Ce matériau (typiquement à base de nitrure de niobium NbN ou d'un composé à base de NbN) va voir les électrons de conduction qui le constituent en l'état normal, non-supraconducteur, former des paires d'électrons appelées des "paires de Cooper", qui se déplacent sans résistance ou collisions dans le matériau, donc produisant des courants sans l'effet de résistance ohmique. En revanche, ces paires de Cooper peuvent être 'cassées' par absorption de la lumière et c'est là que cet effet physique peut être utilisé

pour la détection. Dans la plupart des géométries, un SNSPD utilise un nanofilament (voir Figure 1-a) généralement de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres de diamètre et de plusieurs micromètres de long sous forme de méandres pour maximiser la probabilité d'interaction et donc d'absorption avec un photon incident (la question de la 'localisation' spatiale de la lumière et donc d'un photon unique reste un questionnement profond en physique en général). Cette géométrie permet d'augmenter la densité de courant dans le matériau. Lorsqu'un photon arrive sur le nanofilament supraconducteur, il peut être alors absorbé et il va modifier l'état du matériau, provoquant une perturbation locale de l'état supraconducteur. Cette perturbation crée ce qui est appelée une quasi-particule (à savoir un électron ou un trou, sachant que les paires de Cooper sur les 'vraies' particules dans l'état supraconducteur où la norme devient ces paires de Cooper et non des charges libres comme les électrons ou les trous habituellement trouvés dans les matériaux qui ne sont pas dans un état supraconducteur) qui va venir perturber la supraconductivité. Si l'énergie du photon incident est suffisamment grande, localement le matériau peut passer de l'état supraconducteur à l'état normal (non supraconducteur), entraînant une résistance locale (voir ●●●

Figure 1. Principe de fonctionnement d'un détecteur SNSPD. Fig. 1-a : courant supraconducteur sans résistance, Fig 1-b : détection d'un courant entraînant un point chaud avec modification du courant et Fig. 1-c : rétablissement du courant avec application d'une tension.



SpectraVal 1501/1511 Spectroradiomètre VIS-NIR Haute Précision

- Longueurs d'onde : 380-780 nm, 380-1050 nm (VIS-NIR)
- Portable : Autonome (écran) ou PC (USB/Bluetooth)
- Applications : Mesures écrans & projecteurs, Sources Leds, Voyants automobile et aéronautique, Éclairage urbain...
- Atouts : HDR, stockage SD, visée laser



Specbos 2501 Spectroradiomètre UV-VIS-NIR

- Longueurs d'onde : 380-780 nm (standard), 200-1050 nm (UV-VIS-NIR)
- Bande passante : 4 nm / 2 nm (HiRes)
- Modes : Radiance, Éclairement, Analyse couleur, Flux total, Intensité
- Interfaces : USB, Bluetooth, LAN/PoE
- Options : HiRes, Focus, Déclencheur
- Applications : LEDs, Lampes, Voyants automobile et aéronautique, Éclairage urbain, Mesures de sécurité photobiologique



Contact us for more information
Phone: +33 (0) 164532700
Email: info@scientec.fr

SCIENTEC
www.scientec.fr



Figure 1-b). Cette transition de phase génère une impulsion électrique qui est ensuite mesurable. En effet, la région de détection devient résistive et un courant induit est détecté par des électrodes placées à chaque extrémité du nanofilament en méandres. C'est ce signal qui indique qu'un photon a été détecté. Pour éviter que la perturbation persiste trop longtemps et affecte les détections suivantes, le détecteur est souvent réinitialisé par un courant dit de rétablissement (Figure 1-c) pour ensuite revenir à son état initial supraconducteur (Figure 1-a) et être à nouveau prêt à l'emploi. Les SNSPDs les plus courants sont fait à base de matériaux de nitrures de titane (NbN) mais d'autres matériaux sont étudiés/utilisés à base de MgB2, WSi, MoGe ou encore à base de matériaux cuprates avec l'espoir dans ce cas de travailler à des températures au-dessus de 77 K pour utiliser un refroidissement à base d'azote plutôt que d'hélium. Cependant les SNSPDs à base de NbN restent les plus performants pour le moment et sur le marché actuel. De même, il est à garder en tête que la fabrication de tels détecteurs nécessite des moyens de nanofabrication et de dépôt de couches minces importants pour avoir une bonne qualité de dépôts de matériaux et ensuite un détecteur bien fabriqué, très souvent par des techniques de lithographie optique ou électronique, à base d'un faisceau d'électrons de résines photo ou électro-sensibles.

PARAMÈTRES PERTINENTS

Les détecteurs SNSPD se sont rapidement développés en raison de leurs spécifications uniques par rapport aux autres types de détecteur supraconducteurs (tels que les TES par exemple, nécessitant des températures sub-kelvin) ou encore par rapport aux photodiodes à avalanches (Single-Photon Avalanche Diode ou SPAD). Ces paramètres principaux sont : une grande efficacité de détection, donc un rendement de détection très élevé, souvent

supérieur à 90 % pour des photons visibles ou proches infrarouges, cela veut donc dire sur une large gamme spectrale également; un temps de réponse ultra-court, de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant une détection de photons à des fréquences élevées et un faible bruit de fond (darkcount en anglais), ce qui leur permet de détecter un photon unique bien séparé électriquement du bruit électrique existant. Le tableau 1 présente les différents paramètres pertinents pour ces SNSPDs. Il est à noter que parmi les paramètres pertinents de ce tableau, la très bonne efficacité de détection dans les longueurs d'ondes télécom, à savoir dans les gammes autour de 1300 nm et de 1550 nm, est crucial pour la détection de photons uniques à ces longueurs d'ondes qui sont celles des communications actuelles par fibres optiques. Pour des applications notamment en communications quantiques, comme nous le verrons au paragraphe suivant, c'est un paramètre important en particulier lorsque celui-ci est couplé à une gigue temporelle très faible et donc des temps de détection très courts pour des hauts débits, nécessaires en communications optiques en général. On notera également

que le tableau 1 donne les valeurs typiques mais il faut garder en tête que ce domaine fait toujours l'objet d'importantes recherches et que certains détecteurs SNSPD ont démontré qu'ils pouvaient détecter jusqu'à 10 µm ou encore que le taux de coups d'obscurité pouvait être de moins de 1 cps sur une heure de détection. Enfin, on notera également les efforts qui sont déployés pour réaliser des capteurs imageurs SNSPD avec des détecteurs multi-pixels. Il est à noter un paramètre important qui est la possibilité pour un détecteur de mesures plusieurs photons à la fois, d'être en capacité de discriminer la détection de 1, 2, 3 photons ou plus. Aucun détecteur n'est pour le moment en capacité de le faire de façon efficace et l'idée d'une détection multi-pixel avec notamment plusieurs méandres de nanofils entrelacés est de pouvoir effectuer une mesure du nombre de photons en jouant sur les probabilités de détection et avec une information sur l'amplitude du signal électrique généré et détecté par le SNSPD.

La Figure 2 est une photographie de la structure typique en méandres d'un détecteur SNSPD. Sur cet exemple, les dimensions sont de 50 nm pour le diamètre du nanofils à base de NbN, pour une longueur totale de plusieurs

Tableau 1. Principaux paramètres et caractéristiques pertinentes d'un détecteur SNSPD.

PARAMÈTRES PERTINENTS	VALEURS TYPIQUES
Température d'opération	0,5 à 3 K
Gamme spectrale	400 à 2000 nm
Surface de détection	10 × 10 µm ²
Taux de coups d'obscurité (cps)*	~ 100 à 400 cps
Gigue temporelle [†]	40 à 200 ps
Efficacité quantique de détection [‡]	> 90% à 1550 nm
Multi-pixels	4 à 28 nanofils entrelacés
* Taux de coups d'obscurité ou darkcounts en coups/seconde ou cps : bruit détecté intrinsèque du détecteur, sans lumière, dans le 'noir'	
† Gigue temporelle ou time jitter en ps ou ns : largeur typique des impulsions électriques sortantes du détecteur, définissant la résolution temporelle du détecteur	
‡ Efficacité quantique ou quantum efficiency : taux de conversion d'un photon en photo-électron qui se traduit dans le courant de sortie	

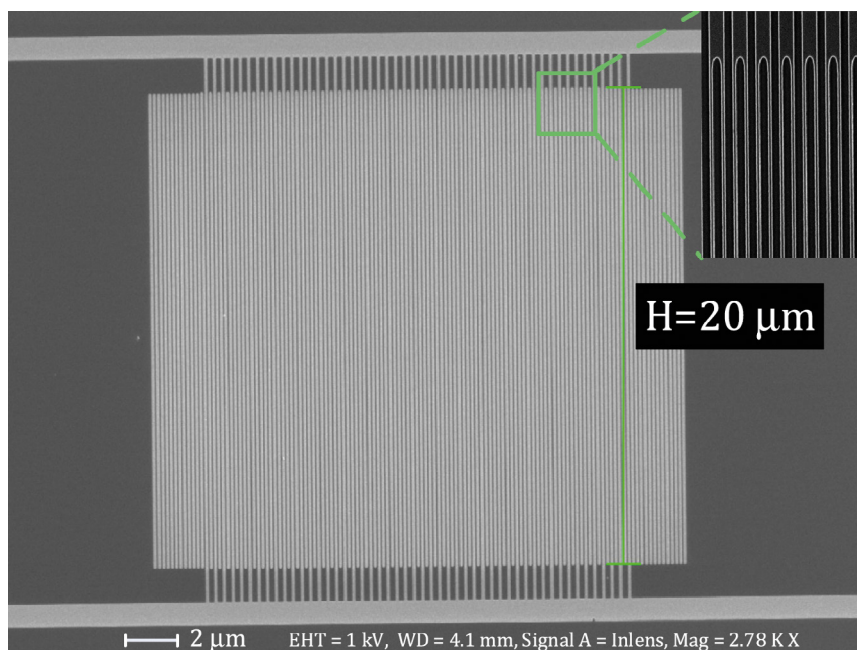


Figure 2. Micrographe obtenu par un microscope électronique de méandres de nanofils de $\text{Mo}_{0,8}\text{Si}_{0,2}$ de largeur 50 nm, de période de 200 nm, sur une zone active de 20 μm par 20 μm (image tirée de [4]).

centaines de nanomètres et un écart typique entre deux méandres de 200 nm. Au passage, on notera que dans ce type de détecteur le facteur de remplissage est important (fill factor en anglais) qui peut être interprété comme le ratio surface de matériau supraconducteur (le nanofil) et surface sans matériau supraconducteur. Les géométries les plus adaptées sont à présent bien maîtrisées dans les SNSPDs sur le marché.

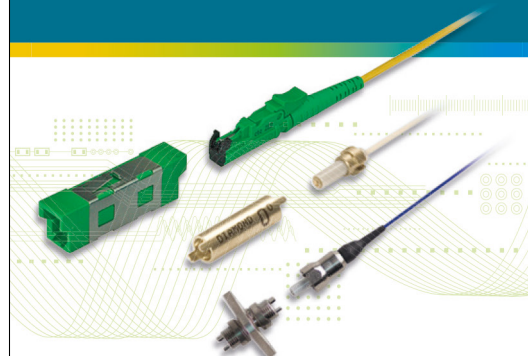
APPLICATIONS

La détection de lumière est un enjeu technologique important en général et la détection de photons uniques l'est en particulier dans le domaine des technologies quantiques en plein essor depuis les 10 dernières années. Les technologies quantiques comprennent 3 grands domaines, à savoir les communications quantiques, la simulation/l'ordinateur quantique et les capteurs quantiques. Le photon de lumière est intrinsèquement un objet quantique résultant de la quantification du champ électromagnétique et est donc central dans le domaine des technologies quantiques.

Dans le cas des communications quantiques, le photon de lumière est utilisé soit pour transporter l'information quantique (tout en maintenant les propriétés quantiques à savoir la superposition et l'intrication quantique) entre des ordinateurs quantiques par exemple et on parle alors d'internet quantique ou de réseaux quantiques, soit pour servir à faire de la cryptographie quantique et utiliser le photon de lumière comme un bit quantique ou qubit (quantum bit en anglais) pour générer des clés cryptographiques et sécuriser les données en théorie de façon inviolable même par un futur ordinateur quantique. Dans le cas de l'ordinateur quantique ou pour effectuer des simulations quantiques (dans ce cas il s'agit de simuler un système quantique que l'on ne connaît pas par un autre système quantique que l'on connaît et que l'on contrôle), il s'agit d'utiliser le photon de lumière comme qubit d'information (le pendant du bit d'information classique) et de générer une grande quantité de photons uniques qui vont interagir dans des circuits optiques pour effectuer des portes logiques quantiques et ●●●

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies

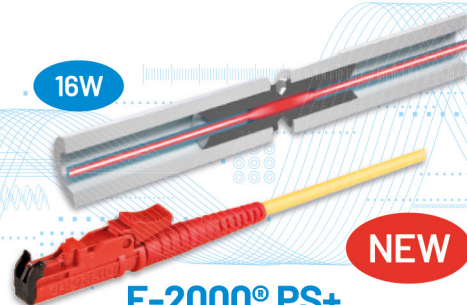


PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables

16W



NEW

E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm

100W



E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30

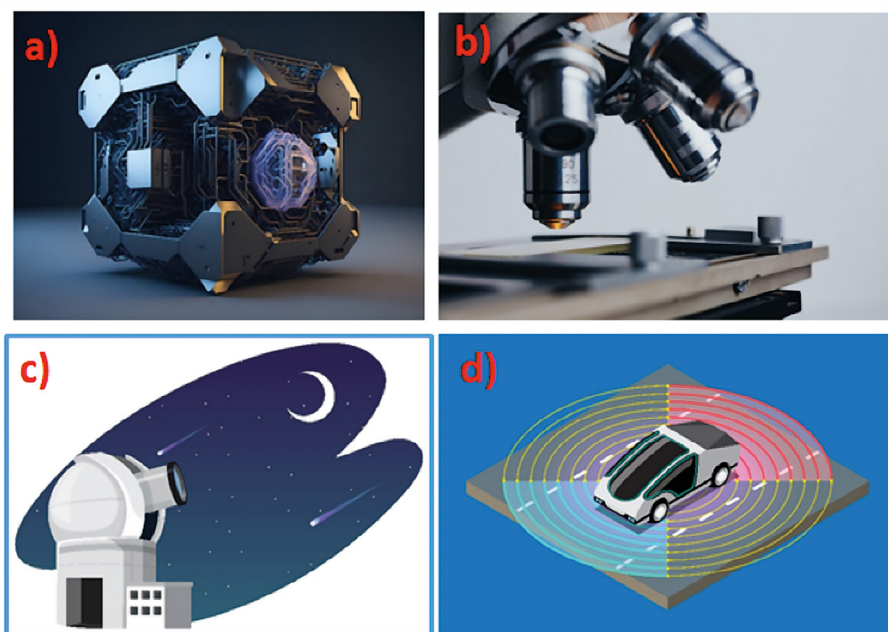


Figure 3. Champs d'applications des détecteurs SNSPD avec a) les technologies quantiques, b) la tomographie cohérente optique, c) la détection infra-rouge pour l'astronomie et d) le LIDAR.

effectuer des calculs quantiques complexes avec l'espoir de résoudre des problèmes calculatoires insolubles ou difficile à résoudre par ailleurs. Enfin, la troisième application est d'utiliser la lumière pour faire des capteurs quantiques. Par définition, un détecteur de photons uniques est déjà un capteur quantique puisqu'il s'agit d'un système qui transforme un photon de lumière en impulsion électrique mesurable et notamment pour les deux applications déjà mentionnées, à savoir les communications quantiques et le calcul quantique. La détection de photons uniques rentre également dans la catégorie des capteurs notamment pour du LIDAR (Light detection and ranging en anglais, télédétection par la lumière en français) ou encore pour faire de la spectroscopie de corrélation diffuse et de la réflectométrie optique temporelle qui dans les deux cas vont servir pour faire de l'imagerie notamment pour la biologie dans des milieux diffusants et en particulier dans des longueurs d'ondes du proche infra-rouge, vers 2 000 nm [5]. En

termes d'applications, on notera également la détection de signaux faibles aux longueurs d'ondes infra-rouges pour l'astronomie, l'astrophysique

et le domaine spatial en général qui, historiquement, a toujours été demandeur de capteurs ultra-sensibles. La figure 3 présente de façon schématique les grands champs d'applications des détecteurs à photons uniques tels que les SNSPDs.

CONCLUSION

Les détecteurs à photons uniques connaissent un développement rapide depuis les dix dernières années et en particulier les détecteurs à base de nanofil supraconducteur des SNSPDs. Les applications pour de tels détecteurs ultra-sensibles sont nombreuses et variées et la technologie et l'ingénierie nécessaire pour de tel produit a fortement évolué et rendu leur utilisation plus versatile malgré le fait qu'ils nécessitent un refroidissement à quelques kelvins pour fonctionner. Les SNSPDs n'ont pas fini de se développer pour aller vers des détecteurs imageurs, pour aller vers des longueurs d'ondes de plus en plus grandes dans le domaine des micro-ondes mais également pour aller vers des détecteurs de plus en plus rapides. ●

RÉFÉRENCES

- [1] G. N. Gol'tsman *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 705 (2001)
- [2] C. M. Natarajan *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 063001 (2012)
- [3] I. E. Zadeh *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 190502 (2021)
- [4] F. Li *et al.*, *Photonics Research* **9**, 389 (2021)
- [5] Robert H. Hadfield *et al.*, *Optica* **10**, 1124 (2023)

Tableau 2. Principaux fournisseurs de détecteurs SNSPD.

Fournisseur (Pays)	Sites Internet
IdQuantique (Suisse)	https://www.idquantique.com/
Pixel Photonics (Allemagne)	https://www.pixelphotonics.com/
Photon Spot (États-Unis)	https://photonspot.com/
Photon Technology SRL (Chine/Italie)	https://www.snspsd.com/
Quantum Opus (États-Unis)	https://www.quantumopus.com/
Quantum Scopes (Suède)	https://www.quantumscopes.com/
SingleQuantum (Pays-Bas)	https://www.singlequantum.com/