

Offre de stage de Master 2
Version française (english version below)

Modélisation, conception et évaluation par simulation d'un récepteur SPAD 3D de pointe opérant à 940 nm pour communications optiques sans fil

Unités de recherche :

- Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV, EA4048) – Université Paris-Saclay (UVSQ).
Adresse : 10-12 avenue de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, France.
- Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL, UMR 5270) – INSA Lyon
Adresse : Bâtiment Irène Joliot-Curie, 1 rue Enrico Fermi, 69100 Villeurbanne, France.

Le stage se déroulera intégralement dans l'un ou l'autre de ces laboratoires.

Durée et date de début du stage : 6 mois, à partir du 1^{er} janvier 2025 (date de démarrage flexible).

Source de financement : Projet ANR CLIPS.

Collaborations Envisagées : Oledcomm (Vélizy), Laboratoires ICube (Strasbourg) et TIMA (Grenoble).

Rémunérations : 600€/mois environ et prise en charge partielle du titre de transport

Après le stage : Thèse possible (financement garanti via le projet CLIPS).

Processus de candidature : Merci d'envoyer vos CV, lettre de motivation, relevés de notes de licence et master, ainsi que vos éventuelles lettres de recommandations aux contacts listés ci-dessous.

Contacts :

- Bastien Béchadergue, Maître de conférences : bastien.bechadergue@uvsq.fr
- Francis Calmon, Professeur : francis.calmon@insa-lyon.fr

1. Contexte et objectifs du stage

1.1. Contexte général et problématique

Les **communications optiques sans fil (OWC)** sont développées depuis plusieurs années en complément des technologies radiofréquences afin de surmonter la croissance rapide des échanges de données sans fil tout en garantissant une meilleure sécurité des communications à grande vitesse. Les premiers produits commerciaux sont désormais disponibles sur le marché pour plusieurs applications, comme les réseaux optiques sans fil locaux (cas d'usage appelé LiFi, en référence au WiFi [HH18]).

Dans le cas du LiFi, plusieurs points d'accès (AP) sont installés au plafond pour assurer une couverture de communication continue à tout équipement utilisateur (UE) se trouvant dans la pièce. Les AP et les UE sont équipés d'émetteurs-récepteurs optiques composés de diodes électroluminescentes (LED) ou de diodes laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) visibles ou infrarouges (IR) pour l'émission, et de **photodiodes PIN (PD) ou de photodiodes à avalanche (APD)** pour la réception.

Malgré les nombreux avantages de ces photorécepteurs (e.g. faible coût, linéarité de réponse), leur niveau de sensibilité associé aux restrictions de puissance en émission du fait des normes d'éclairage ou de sécurité photo-biologique, limitent la couverture des systèmes LiFi actuels à quelques mètres carrés [HH18]. **Ces performances ne peuvent alors être améliorées qu'en optimisant la surface sensible des PD/APD et l'électronique associée, soit donc au détriment de la compacité et de la consommation de l'antenne optique**, dont les modèles les plus avancés comme celui de la Fig. 1 restent trop limités selon ces deux critères, qui représentent les plus fortes barrières à l'entrée pour le déploiement de systèmes LiFi sur des équipements grand public, comme les *smartphones*, tablettes ou ordinateurs.

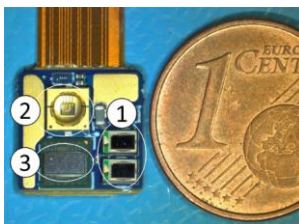


Fig. 1 : Transceiver LiFi intégré à l'état de l'art (① : réseaux de PD, ② : source IR, ③ : électronique associée)

Une autre solution particulièrement prometteuse consiste à utiliser des photorécepteurs plus sensibles comme les photodiodes à avalanche à photon unique (SPAD).

1.2. Solution proposée et limites de l'état de l'art

Une SPAD est une APD polarisée au-dessus de sa tension de claquage de sorte que la détection d'un photon génère un processus d'avalanche étouffé par une circuiterie associée qui permet également une lecture de l'événement sous forme d'impulsion [EC13]. La somme de toutes les impulsions générées au cours d'une certaine durée donne alors une valeur de comptage qui est une estimation du nombre de photons détectés au cours de cette durée. La haute sensibilité et la rapidité des SPAD ainsi que leur compatibilité avec la technologie CMOS (pour le proche infrarouge jusqu'à 1000nm) en font donc **une technologie de détection particulièrement pertinente pour développer des récepteurs ultra-sensibles, ultra-compactes à très faible consommation sous la forme d'un circuit intégré spécifique.**

Quoique bien adaptées aux très faibles niveaux de lumière, **les SPAD souffrent de plusieurs limitations.** Leur efficacité de détection des photons (PDE) est en effet limitée, de sorte que seule une partie des photons incidents conduit à des impulsions. Des avalanches indésirables peuvent également se produire, à un taux quantifié par le *dark count rate* (DCR), en raison de mécanismes de génération non reliés à la lumière (thermique, effet tunnel, défauts). En outre, l'étouffement de chaque avalanche est suivi d'un temps mort pendant lequel la SPAD ne peut pas détecter un nouveau photon incident. L'état de l'art présente des matrices de SPAD avec des assemblages 3D, comme dans [SS22], où des pixels SPAD avec un pas de 2,5µm et une PDE de 21,8% à 940nm sont décrits.

Les matrices de SPAD ont fait l'objet de nombreux travaux pour des applications OWC [EF13]. Il a en effet été démontré qu'en dépit de leur réponse non linéaire et de leur bande passante limitée par le temps mort, les SPAD sont beaucoup plus sensibles que les APD [LZ18] et peuvent être utilisées pour la réception de signaux de type *on-off keying* (OOK), même avec des sources optiques d'intensité réglable [MH23], et jusqu'à des débits de plusieurs Gbps [WM21]. Des modulations plus complexes comme l'*orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) peuvent aussi être utilisées [CH21].

Si l'usage de SPAD dans un contexte OWC fait donc depuis quelques années l'objet d'un nombre croissant de travaux, ces derniers restent très souvent théoriques et les résultats expérimentaux sont encore peu nombreux. Ces derniers reposent par ailleurs très majoritairement sur des composants du commerce qui ne sont pas nécessairement optimisés pour des applications OWC. Par ailleurs, l'évaluation des performances de tels systèmes est souvent bornée à un nombre limité de critères – taux d'erreur binaire (BER) notamment – alors que d'autres paramètres critiques restent fixés. Une étude plus exhaustive devra donc révéler le très fort potentiel des solutions SPAD pour les OWC.

1.3. Objectifs et méthodologie du stage

Afin de démontrer le plein potentiel des SPAD pour les OWC (et notamment le LiFi), le projet CLIPS propose d'adopter l'approche d'optimisation globale (de la technologie au système) suivante :

- **Etape 1 :** Concevoir un récepteur constitué d'un circuit intégré 3D à 940 nm pour bénéficier des avancées technologiques des SPAD 3D sur silicium initialement développées pour les applications telles que la détection de proximité, la reconnaissance faciale etc.
- **Etape 2 :** Intégrer ce récepteur dans un système LiFi complet, dont les performances seront évaluées théoriquement et expérimentalement selon de multiples *key performance indicators* (KPI) et dans des scénarios d'usage nominaux.

Dans ce cadre, les objectifs du stage ici proposé seront les suivants :

- **Objectif 1 – Spécifications du système OWC-SPAD :** Définition des scénarios d'usage et KPI du système OWC avec récepteurs SPAD à 940 nm à modéliser et concevoir.
- **Objectif 2 – Modélisation du système OWC-SPAD :** A partir des spécifications, mise en place d'un outil de simulation MATLAB d'un lien OWC-SPAD à 940nm, dont les spécificités liées aux non-linéarités de la réponse, au bruit et au signal (signal événementiel ...) etc. seront prises en compte.

- **Objectif 3 – Evaluation théorique du système OWC-SPAD** : Utilisation de cet outil de simulation pour l'évaluation des performances des liens modélisés en fonction de différents paramètres (temps mort, surface sensible etc.) et selon différents KPI (BER, débit, couverture etc.)

2. Environnement du stage et profil recherché

2.1. Environnement du stage

La présente offre de stage est proposée conjointement par le **Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV)**, rattaché à l'Université Paris-Saclay (UVSQ), et l'**Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL)**, rattaché à l'INSA Lyon.

Le LISV développe des activités de recherche multidisciplinaires théoriques et expérimentales sur des thèmes allant de la robotique à la mobilité, en passant par les communications optiques sans fil. Sur ce dernier thème, le laboratoire développe depuis près de 15 ans une expertise de pointe, notamment pour des applications LiFi. La société OLEDCOMM, possible partenaire durant ce stage, et qui figure parmi les leaders mondiaux du LiFi, est ainsi issue du LISV. De son côté, l'INL travaille sur les photodétecteurs de type SPAD depuis 2013 et a récemment développé, en collaboration avec le laboratoire ICube, autre possible partenaire durant ce stage, une architecture SPAD et son électronique associée dans la technologie CMOS28FDSOI de STMicroelectronics.

Par ailleurs, le LISV et l'INL travaillent depuis plus de deux ans maintenant à la mise en place d'un **banc de simulation d'une chaîne OWC-SPAD** permettant d'étudier l'influence de divers paramètres des SPAD (taille, nombre, temps mort etc.) sur une variété de KPI de liens de communications OWC (BER et couverture notamment). Cette plateforme pourra donc servir de base aux travaux de ce stage.

Enfin, il est à noter qu'un **financement de thèse de doctorat (36 mois)**, dont le sujet serait dans la continuité de celui de ce stage, est d'ores et déjà sécurisé grâce au projet ANR CLIPS. La personne recrutée pour ce stage pourra donc envisager, en cas de résultats satisfaisants et si elle le souhaite, une poursuite en thèse.

2.2. Profil recherché

Tout.e candidat.e intéressé.e par ce sujet devra préférentiellement avoir suivi un cursus de niveau Master en électronique ou microélectronique au sens large. Des compétences en télécommunications et en simulation avec MATLAB (ou équivalent) seront également un plus. En outre, de solides compétences en matière de communication et de relations interpersonnelles, y compris en matière de collaboration, d'initiative, d'autonomie, d'orientation vers les résultats et de capacité à travailler dans un environnement interdisciplinaire seront appréciées. Un bon niveau d'anglais est indispensable, la connaissance du français est un atout mais pas une exigence.

Bibliographie

- [BB23] B. Béchadegue *et al.*, "[Indoor Optical Wireless Communication Coverage Optimisation Using a SiPM Photoreceiver](#)," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, 2023, pp. 1-6.
- [CH20] C. He *et al.*, "[Optical OFDM and SiPM Receivers](#)," in *2020 IEEE Globecom Workshops*, 2020, pp. 1-6.
- [DI22] D. Issartel *et al.*, "[Architecture optimization of SPAD integrated in 28 nm FD-SOI CMOS technology to reduce the DCR](#)" *Solid-State Electronics*, vol. 191, p. 108297, April 2022.
- [EA21] E. Aguenounon *et al.*, "[Design and Characterization of an Asynchronous Fixed Priority Tree Arbiter for SPAD Array Readout](#)," *Sensors*, vol. 21, no. 12, pp. 3949, June 2021.
- [EC13] E. Charbon *et al.*, "[SPAD-Based Sensors](#)," in *TOF Range-Imaging Cameras*, F. Remondino, and D. Stoppa, Eds., New-York, NY, USA: Springer, 2013, ch. 2, pp. 11–38.
- [EF13] E. Fisher *et al.*, "[A Reconfigurable Single-Photon-Counting Integrating Receiver for Optical Communications](#)," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 7, pp. 1638-1650, July 2013.
- [HH18] H. Haas *et al.*, "[What is LiFi?](#)" *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, March 2016.
- [LZ18] L. Zhang *et al.*, "[A Comparison of APD- and SPAD-Based Receivers for Visible Light Communications](#)," *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 2435-2442, June 2018.

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

- [MD23] M. Dolatpoor Lakeh *et al.*, "Integration of an Ultra-Fast Active Quenching Circuit with a Monolithic 3D SPAD Pixel in a 28 nm FD-SOI CMOS Technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, to be published.
- [MH23] M. Hijazi *et al.*, "[Highly Sensitive SPAD-Based Receiver for Dimming Control in LiFi Networks](#)," *Sensors*, vol. 23, no. 10, pp. 4673, May 2023.
- [MM19] M. Mohammadi Merah *et al.*, "[Experimental Multi-User Visible Light Communication Attocell Using Multiband Carrierless Amplitude and Phase Modulation](#)," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 12742-12754, Jan. 2019.
- [SS22] S. Shimada *et al.*, "[A SPAD Depth Sensor Robust Against Ambient Light: The Importance of Pixel Scaling and Demonstration of a 2.5 \$\mu\$ m Pixel with 21.8% PDE at 940nm](#)," in *68th IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2022.
- [TT18] T. Turko *et al.*, "[An Asynchronous Fixed Priority Arbiter for High throughput Time Correlated Single Photon Counting Systems](#)," in *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2018, pp 765-768.
- [WM21] W. Matthews *et al.*, "[A 3.45 Gigabits/s SiPM-Based OOK VLC Receiver](#)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 487-490, May 2021.

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Master's Internship Offer

Version française ci-dessus

a mis en forme : Anglais (États-Unis)

Modeling, design, and evaluation by simulation of a state-of-the-art 3D SPAD receiver operating at 940 nm for optical wireless communications

Research Units:

- Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV EA4048) – Université Paris-Saclay (UVSQ).
Address: 10-12 avenue de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, France.
- Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL UMR 5270) – INSA Lyon.
Address: Building Irène Joliot-Curie, 1 rue Enrico Fermi, 69100 Villeurbanne, France.

The internship will be fully conducted in one of these laboratories.

Duration and starting date: 6 months from January 1, 2025 (flexible start date).

Funding source: ANR CLIPS project.

Envisioned collaborations: Oledcomm (Vélizy), ICube (Strasbourg) and TIMA (Grenoble) laboratories.

Remuneration: Approximately €600/month and partial reimbursement of transport costs.

After the internship: Potential for a PhD (guaranteed funding via the CLIPS project).

Application process: Please send your CV, cover letter, bachelor's and master's transcripts, and any recommendation letters to the contacts listed below.

Contacts:

- Bastien Béchadergue, Associate Professor: bastien.bechadergue@uvsq.fr
- Francis Calmon, Professor: francis.calmon@insa-lyon.fr

1. Context and Objectives of the Internship

1.1. General Context and Problematic

Optical wireless communications (OWC) have been developed for several years as a complement to radio frequency technologies, in order to overcome the rapid growth in wireless data exchanges while guaranteeing greater security for high-speed communications. The first commercial products are now available on the market for several applications, such as local optical wireless networks (a use case known as LiFi, in reference to WiFi [HH18]).

In the case of LiFi, several access points (APs) are installed on the ceiling to provide continuous communication coverage to any user equipment (UE) in the room. APs and UEs are equipped with optical transceivers consisting of visible or infrared (IR) light-emitting diodes (LEDs) or vertical-cavity surface-emitting laser diodes (VCSELs) for transmission, and **PIN photodiodes (PDs) or avalanche photodiodes (APDs)** for reception.

Despite the many advantages of these photoreceivers (e.g. low cost, linear response), their low level of sensitivity combined with restrictions on transmit power due to lighting or photo-biological safety standards, limit the coverage of current LiFi systems to a few square meters [HH18]. **Thus, these performances can only be improved by optimizing the sensitive surface of the PD/APDs and the associated electronics, i.e. at the expense of the compactness and power consumption of the optical antenna.** However, the most advanced optical antennas, such as the one shown in Fig. 1, remain currently too limited according to these two criteria, which are the highest barriers to entry for the deployment of LiFi systems on mass-market equipment, such as smartphones, tablets or computers.

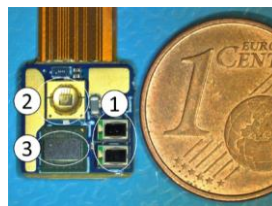


Fig. 1 : State-of-the-art integrated LiFi transceiver, with ①: PD array, ②: IR source, ③: associated electronics.

Another particularly promising solution is to use more sensitive photoreceivers such as single-photon avalanche photodiodes (SPADs).

1.2. Proposed Solution and State-of-the-Art Limitations

A SPAD is an APD biased above its breakdown voltage so that the detection of a photon generates an avalanche process quenched by associated circuitry that also enables the event to be read out as a pulse [EC13]. The sum of all the pulses generated over a given duration then gives a count value, which is an estimate of the number of photons detected over that duration. The high sensitivity and speed of SPADs, and their compatibility with CMOS technology (for the near-IR up to 1000nm), make them **a particularly relevant detection technology for developing ultra-sensitive, ultra-compact, ultra-low-power receivers in the form of a specific integrated circuit (IC).**

Although well suited to very low light levels, **SPADs suffer from several limitations.** Their photon detection efficiency (PDE) is limited, so that only a fraction of the incident photons results in pulses. Unwanted avalanches can also occur, at a rate quantified by the dark count rate (DCR), due to thermal generation mechanisms not related to the light (thermal, tunneling, defects). In addition, the quenching of each avalanche is followed by a dead time during which the SPAD cannot detect a new incident photon. State of the art has already demonstrated SPAD arrays as in [SS22], where SPAD pixels with a pitch of 2.5 μ m and a PDE of 21.8% at 940nm are described.

SPAD arrays have been the subject of many works for OWC applications [EF13]. It has indeed been demonstrated that, despite their non-linear response and bandwidth limited by dead time, SPADs are much more sensitive than APDs [LZ18] and can be used to receive on-off keying (OOK) signals, even with dimmable optical sources [MH23], and up to data rates of several Gbps [WM21]. More complex modulations such as orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) can also be used [CH21].

However, although the use of SPAD in an OWC context has been the subject of a growing number of studies in recent years, these are still very often theoretical, and experimental results are still few and far between. Moreover, most of these are based on off-the-shelf components that are not necessarily optimized for OWC applications. Finally, the performance evaluation of such systems is often restricted to a limited number of criteria - such as bit error rate (BER) - while other critical parameters remain fixed. A more exhaustive study should therefore reveal the very high potential of SPADs for OWC.

1.3. Objectives and Methodology of the Internship

To demonstrate the full potential of SPADs for OWC (notably LiFi), the CLIPS project proposes a global optimization approach (from technology to system) as follows:

- **Step 1:** Design a 3D integrated circuit receiver at 940 nm to take advantage of the technological advancements of 3D SPADs on silicon, initially developed for applications such as proximity detection and facial recognition.
- **Step 2:** Integrate this receiver into a complete LiFi system, whose performance will be evaluated both theoretically and experimentally using multiple key performance indicators (KPIs) in nominal usage scenarios.

Within this framework, the objectives of the proposed internship are as follows:

- **Objective 1 – Specifications for the OWC-SPAD system:** Define the usage scenarios and KPIs for the OWC system with 940 nm SPAD receivers to be modeled and designed.
- **Objective 2 – Modeling the OWC-SPAD system:** Based on the specifications, develop a MATLAB simulation tool for an OWC-SPAD link at 940nm, taking into account the specificities related to non-linear response, noise, and event-driven signals, among other factors.
- **Objective 3 – Theoretical evaluation of the OWC-SPAD system:** Use this simulation tool to evaluate the performance of the modeled links based on different parameters (dead time, sensitive surface, etc.) and according to various KPIs (BER, throughput, coverage, etc.).

2. Internship Environment and Desired Profile

2.1. Internship Environment

This internship offer is jointly proposed by the **Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV)**, affiliated with the Université Paris-Saclay (UVSQ), and the **Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL)**, affiliated with INSA Lyon.

The LISV develops multidisciplinary theoretical and experimental research activities on topics ranging from robotics to mobility, and optical wireless communications. In the latter field, the laboratory has developed cutting-edge expertise over the past 15 years, particularly for LiFi applications. The company OLEDCOMM, a potential partner during this internship and one of the world leaders in LiFi, originated from the LISV.

For its part, the INL has been working on SPAD-type photodetectors since 2013 and has recently developed, in collaboration with the ICube laboratory, another potential partner during this internship, a high-performance SPAD architecture and associated electronics in STMicroelectronics' CMOS28FDSOI technology.

Moreover, the LISV and INL have been working together for more than two years on setting up a simulation platform for an OWC-SPAD communication chain, allowing the study of the impact of various SPAD parameters (size, number, dead time, etc.) on a variety of KPIs for OWC communication links (notably BER and coverage). This platform will therefore serve as a foundation for the work of this internship.

Finally, it is worth noting that funding for a 36-month PhD, which would continue the work of this internship, is already secured thanks to the ANR CLIPS project. The person recruited for this internship may thus consider, upon satisfactory results and if they wish, pursuing a PhD.

2.3. Desired Profile

Candidates interested in this subject should preferably follow a Master's degree in electronics or microelectronics in the broadest sense. Skills in telecommunications and simulation with MATLAB (or equivalent) will also be a plus. In addition, strong communication and interpersonal skills, including collaboration, initiative, autonomy, results orientation and the ability to work in an interdisciplinary environment will be appreciated. A good level of English is essential; knowledge of French is an asset but not a requirement.

Bibliography

- [BB23] B. Béchadegue *et al.*, "Indoor Optical Wireless Communication Coverage Optimisation Using a SiPM Photoreceiver," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, 2023, pp. 1-6.
- [CH20] C. He *et al.*, "Optical OFDM and SiPM Receivers," in *2020 IEEE Globecom Workshops*, 2020, pp. 1-6.
- [DI22] D. Issartel *et al.*, "Architecture optimization of SPAD integrated in 28 nm FD-SOI CMOS technology to reduce the DCR" *Solid-State Electronics*, vol. 191, p. 108297, April 2022.
- [EA21] E. Aguenounon *et al.*, "Design and Characterization of an Asynchronous Fixed Priority Tree Arbiter for SPAD Array Readout," *Sensors*, vol. 21, no. 12, pp. 3949, June 2021.
- [EC13] E. Charbon *et al.*, "SPAD-Based Sensors," in *TOF Range-Imaging Cameras*, F. Remondino, and D. Stoppa, Eds., New-York, NY, USA: Springer, 2013, ch. 2, pp. 11-38.
- [EF13] E. Fisher *et al.*, "A Reconfigurable Single-Photon-Counting Integrating Receiver for Optical Communications," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 7, pp. 1638-1650, July 2013.
- [HH18] H. Haas *et al.*, "What is LiFi?," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, March 2016.
- [LZ18] L. Zhang *et al.*, "A Comparison of APD- and SPAD-Based Receivers for Visible Light Communications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 2435-2442, June 2018.
- [MD23] M. Dolatpoor Lakeh *et al.*, "Integration of an Ultra-Fast Active Quenching Circuit with a Monolithic 3D SPAD Pixel in a 28 nm FD-SOI CMOS Technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, to be published.
- [MH23] M. Hijazi *et al.*, "Highly Sensitive SPAD-Based Receiver for Dimming Control in LiFi Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 10, pp. 4673, May 2023.
- [MM19] M. Mohammadi Merah *et al.*, "Experimental Multi-User Visible Light Communication Attocell Using Multiband Carrierless Amplitude and Phase Modulation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 12742-12754, Jan. 2019.

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié

[SS22] S. Shimada *et al.*, "[A SPAD Depth Sensor Robust Against Ambient Light: The Importance of Pixel Scaling and Demonstration of a 2.5 \$\mu\$ m Pixel with 21.8% PDE at 940nm](#)," in *68th IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2022.

[TT18] T. Turko *et al.*, "[An Asynchronous Fixed Priority Arbiter for High throughput Time Correlated Single Photon Counting Systems](#)," in *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2018, pp 765-768.

[WM21] W. Matthews *et al.*, "[A 3.45 Gigabits/s SiPM-Based OOK VLC Receiver](#)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 487-490, May 2021.

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Code de champ modifié