

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Livre blanc : activités du CNRC en matière de photodétection dans l'infrarouge à courte longueur d'onde

Walker, Alex; Pitts, Oliver; Flueraru, Costel; Boucherif, Aberrahim; Springthorpe, Anthony; Loghmany, Alireza; Therrien, Patrick; Salahuddin, Mohammad

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40003541>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=02320446-5d44-44dd-a32e-cc32539e5913>;

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=02320446-5d44-44dd-a32e-cc32539e5913>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

Livre blanc : Activités du CNRC en matière de photodétection dans l'infrarouge à courte longueur d'onde

Non-sensible

Numéro de rapport NRC-QN-AEP-056-F

12 mai 2025

Alex Walker, Oliver Pitts, Costel Fluerau

Contacts du CFPC: Abderrahim Boucherif, Anthony Springthorpe, Alireza Loghmany

Contacts d'affaires: Patrick Therrien, Mohammad Salahuddin



NR16-486/2025F-PDF
ISBN 978-0-660-78277-5

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représentée par le Conseil national de recherches du Canada, (2025).

Table des matières

Contexte	4
Technologie	4
Applications et avantages par rapport aux technologies existantes	8
<i>Imagerie en SWIR</i>	8
<i>Conceptions personnalisées</i>	9
Exemples de spécifications technologiques	9
Prototypage et fabrication.....	10
Détails de l'opportunité	11
Bibliographie.....	12

Livre blanc : Activités du CNRC en matière de photodétection dans l'infrarouge à courte longueur d'onde

Contexte

Les semi-conducteurs composés III-V sont les émetteurs de lumière et photodétecteurs à semi-conducteurs les plus performants. Ils constituent l'épine dorsale des technologies laser et de détection sur lesquelles reposent les télécommunications par fibre optique. De plus, pour les applications d'imagerie de pointe, des réseaux de photodétecteurs à plan focal (FPA) de grande surface peuvent être fabriqués dans l'infrarouge à courte longueur d'onde (SWIR : plage de 1,0 à 1,7 μm). Ces technologies de détection sont basées sur la plateforme de phosphure d'indium (InP), incluant l'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs) comme matériau absorbant les photons, et sont considérées les meilleurs matériaux pour ces longueurs d'onde.

Le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et le Centre de fabrication pour la photonique du Canada (CFPC) ont développé des capacités étendues en matière de conception, d'épitaxie, de fabrication et de test de structures de lasers et de détecteurs. Nous collaborons avec d'autres institutions, au Canada et à l'étranger, pour développer davantage ces technologies afin d'obtenir des performances de pointe et d'étendre nos capacités au-delà du SWIR.

Technologie

Les technologies de photodétecteurs du CNRC sont basées sur l'épitaxie de InP/InGaAs, développées à l'aide de réacteurs de dépôt chimique en phase vapeur organométallique (MOCVD). Elles permettent de produire des matériaux de haute qualité sur plusieurs plaquettes (2, 3, 4, 6 pouces) à chaque cycle de croissance. Un aspect clé de cette technologie est la haute qualité des matériaux, illustrée par un signal de photoluminescence puissant, mais également très uniforme, en termes de longueur d'onde (à gauche) et d'amplitude relative de photoluminescence (à droite) (figure 1a).

Un procédé avancé de diffusion du Zn a été développé à l'aide des réacteurs MOCVD du CFPC pour produire des régions de type p extrêmement uniformes, de haute qualité et reproductibles dans l'InP. Ce procédé constitue la base de pixels de photodétecteurs dont les dimensions peuvent atteindre 0,4 μm . Par exemple, la figure 1b illustre la diffusion du Zn dans l'InP, où la

grande région brillante près de la surface est de l'InP diffusé par le Zn et ciblant une profondeur particulière. Ce procédé de diffusion du zinc, combiné à l'InGaAs de haute qualité et au procédé de fabrication de semi-conducteurs à faible bruit dans le CFPC, a permis de produire des pixels extrêmement fiables et performants, jusqu'à un pas de 10 μm . Ces pixels présentent des performances extrêmement uniformes, avec une densité de courant d'obscurité $< 2 \text{ nA/cm}^2$ à température ambiante [1] et un rendement $> 99 \%$. Ceci est illustré par des mesures moyennes sur 44 800 pixels répartis sur toute la surface d'une plaquette (figure 1c). Le dépôt d'un revêtement antireflet optimisé au dos de la plaquette polie permet d'obtenir un rendement quantique $> 80 \%$, ce qui se traduit par une sensibilité $> 1 \text{ A/W}$ à 1 550 nm. De plus, des structures de test sur la plaquette révèlent les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires, essentielles aux performances du photodétecteur, avec des valeurs atteignant 80 μm [2]. Ces propriétés témoignent de la très haute qualité du matériau InGaAs du CNRC. Ces paramètres ne sont pas souvent rapportés dans la littérature et présentent un comportement très stable en fonction de la température entre 0 et 100 $^{\circ}\text{C}$ [3]. Un avantage significatif de cette étape de diffusion du Zn réside dans le développement de la technologie des photodiodes à avalanche (APD), qui a démontré une forte sensibilité aux conditions de diffusion en termes de température du réacteur, de concentration en Zn et de suppression de phosphine [4].

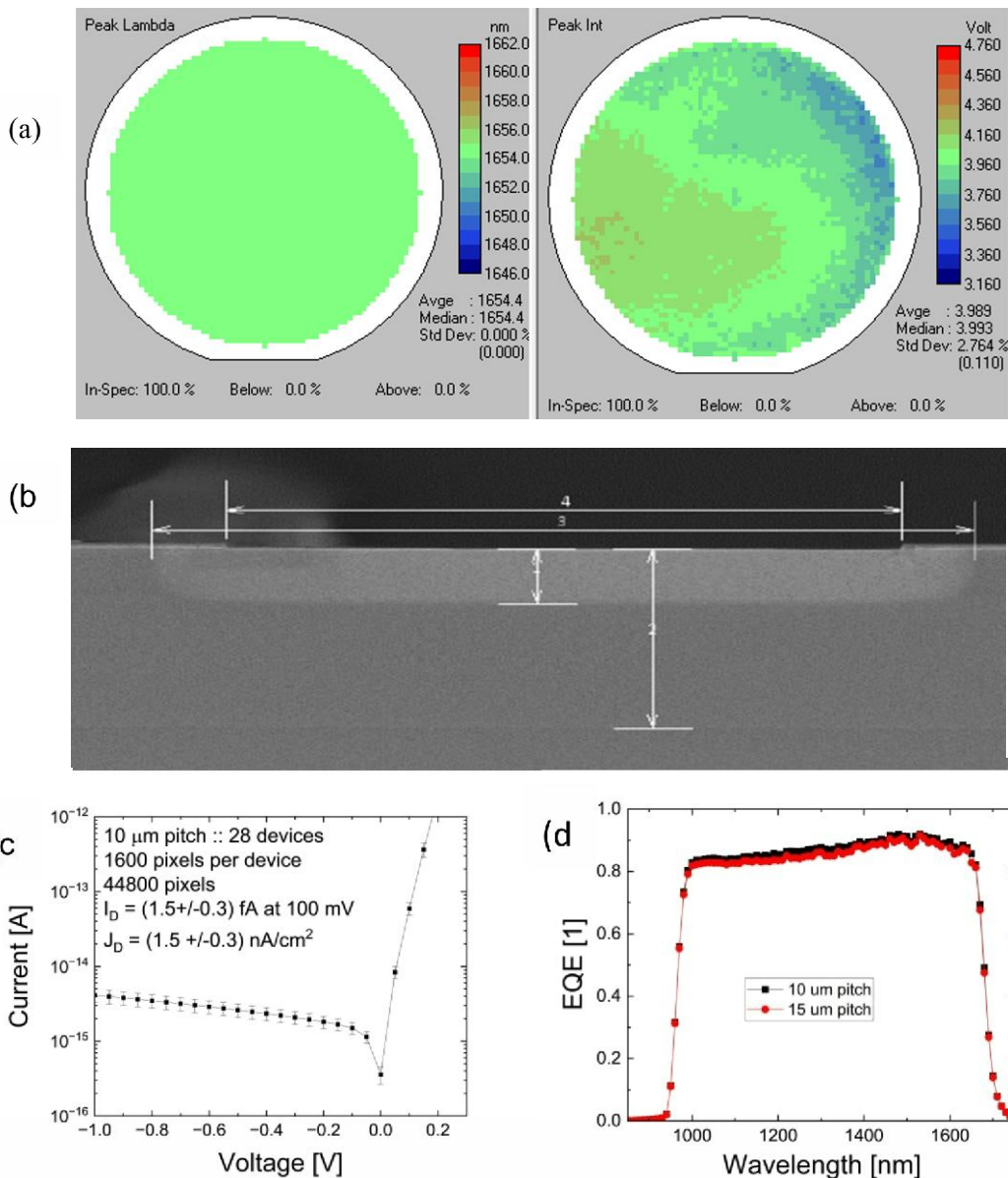


Figure 1. a) Cartes de la longueur d'onde de photoluminescence et de l'intensité relative d'une plaquette d'InP/InGaAs soulignant sa grande uniformité et sa qualité, b) image de microscopie électronique à balayage d'une section transversale d'un dispositif InP/InGaAs mettant en évidence le processus de diffusion du Zn, c) données courant-tension correspondant à 44 800 pixels à température ambiante, et d) mesures d'efficacité quantique externe de dispositifs à pas

Le NRC a également développé un processus de croissance de zone sélective pour mouler adéquatement le profil de diffusion du Zn dans la structure épitaxiale, ce qui évite la rupture des bords du dispositif [6]. Une découverte récente a montré d'excellents taux de comptage

d'obscurité et des résultats de probabilité de photodétecteur pour les APD fonctionnant en mode Geiger [7].

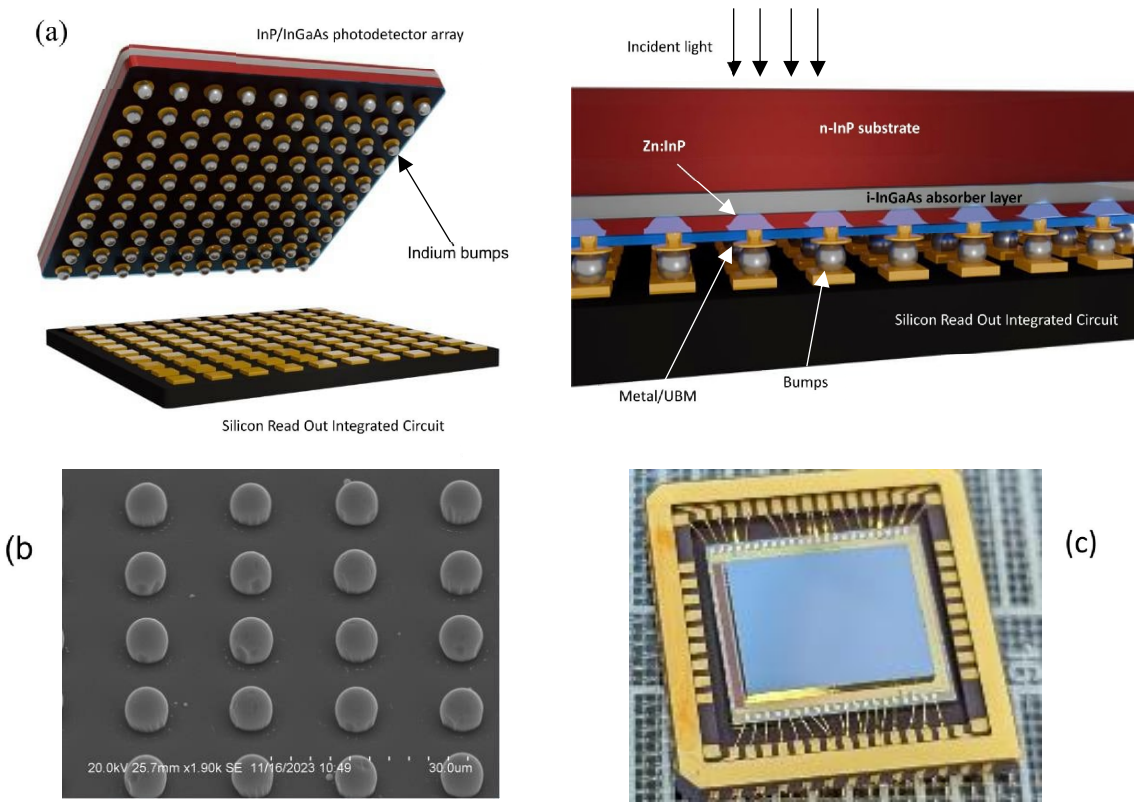
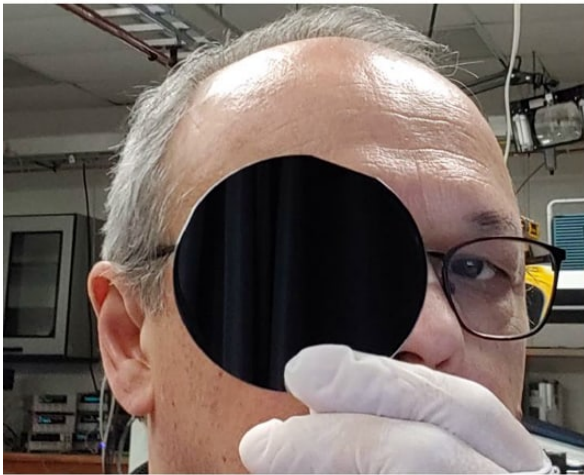


Figure 2. a) Schéma du processus d'assemblage de puce retournée, b) bosses d'indium après refusion avant l'assemblage de la puce retournée, c) FPA 640x512 fabriqué avec une couche antireflet et relié par fils à un support.

Le CNRC a mené des recherches approfondies sur la technologie des bosses d'indium (indium-chip) pour connecter des millions de pixels d'un réseau de photodétecteurs InP/InGaAs (PDA) à un circuit intégré de lecture (ROIC) correspondant. La figure 2a illustre le schéma de ce procédé d'assemblage de bosses d'indium, où la lumière est incidente sur la face arrière du substrat InP dopé n (transparent aux longueurs d'onde supérieures à 920 nm). Cela nécessite des bosses d'indium de haute qualité sur chaque pixel, dont la taille et la hauteur précises doivent être telles que chaque pixel ait une forte probabilité d'obtenir une connectivité à faible résistance, sans court-circuit avec les pixels voisins. La figure 2b illustre ce comportement uniforme pour un pas de 15 μm . Enfin, le FPA assemblé est ensuite soudé par fil sur un support, comme illustré à la figure 2c, où la surface supérieure du substrat InP est recouverte d'une

couche antireflet approprié pour limiter la réflectivité dans la gamme de longueurs d'onde étudiée.

Visible image



SWIR image



Figure 3. Image visible comparée à l'image SWIR mettant en évidence la transparence d'une tranche de silicium.

En collaboration avec l'Institut national d'optique du Québec, le CNRC a développé une technologie FPA avec un pas de 15 μm , comme le FPA de 0,3 mégapixel (MP) présenté à la figure 2c. Nous étudions actuellement un FPA d'une résolution de 1 MP, également avec un pas de 15 μm . Cette initiative a permis de générer des images SWIR de haute qualité, comme celle de la figure 3, qui met en évidence la transparence d'une plaquette de silicium. L'inspection des circuits intégrés, notamment des panneaux photovoltaïques, constitue un bon domaine d'application de l'imagerie SWIR.

Applications et avantages par rapport aux technologies existantes

Imagerie en SWIR

Les FPA fonctionnant en SWIR sont capables de produire des images de haute qualité présentant une forte ressemblance avec les caractéristiques généralement observées dans le domaine des longueurs d'onde visibles. L'imagerie en SWIR présente des avantages considérables, notamment la vision nocturne et la surveillance, la vision à travers le brouillard pour la conduite autonome, la vision à travers la fumée pour la surveillance et le contrôle des feux de forêt, la vision à travers divers plastiques pour le tri, le contrôle qualité de la production alimentaire (par exemple, la détection de contaminants dans les aliments comme le riz, les

grains de café, etc., ou l'identification de défauts dans les produits comme les meurtrissures ou la pourriture des légumes/fruits), la télémétrie laser sans danger pour les yeux, l'imagerie scientifique, l'inspection des circuits intégrés en silicium et des panneaux photovoltaïques, et même la vérification de la provenance d'œuvres d'art importantes par l'analyse de plusieurs couches de peintures.

Deux formats FPA spécifiques sont en cours de développement au CNRC : 640 x 512 et 1 280 x 1 024. Le premier offre une opérabilité supérieure à 99 % et un faible bruit de lecture global, tandis que le second est en cours de développement. Cependant, nous pouvons adapter n'importe quel format en fonction des configurations ROIC fait sur commande. Les facteurs de remplissage des pixels sont de 100 % grâce à l'éclairage arrière du réseau de détecteurs. De plus, pour les applications haut de gamme, le CNRC a déjà développé des capacités de retrait du substrat InP après assemblage du FPA afin d'augmenter significativement la sensibilité du détecteur aux longueurs d'onde visibles.

Conceptions personnalisées

Des configurations de photodétecteurs InGaAs/InP personnalisées sont disponibles avec une densité de courant d'obscurité inférieure à 2 nA/cm² à température ambiante, jusqu'à un pas de pixel de 10 µm, et une efficacité quantique supérieure à 80 % grâce à une couche antireflet. En principe, le CNRC est capable de concevoir des pixels jusqu'à 1 µm ; cependant, aucun circuit de lecture n'est actuellement commercialisé pour un pas de pixel inférieur à 10 µm. La technologie du CNRC se distingue par la qualité et le traitement épitaxiaux haut de gamme des semi-conducteurs dans le CFPC, complétés par des années d'expérience en conception, modélisation et caractérisation de photodétecteurs. Enfin, des couches épitaxiales personnalisées, adaptées à la taille des réseaux de photodétecteurs, peuvent être conçues, fabriquées et testées pour répondre aux exigences du client. Nous étudions activement de nouveaux matériaux (par exemple, des alliages à base de GaSb pour la détection SWIR étendue, ou des conceptions épitaxiales à base de boîtes quantiques InAs pour la détection SWIR étendue à adaptation de réseau couplée à des nanostructures plasmoniques).

Exemples de spécifications technologiques

Tableau 1. Spécifications de performances typiques des PDA p-i-n du CNRC. Certaines personnalisations sont possibles concernant les spécifications, notamment le pas de pixel, le format de matrice, etc.

<i>Spécification</i>	<i>Unité</i>	<i>p-i-n PDA</i>
<i>Pas de pixel</i>	<i>[μm]</i>	<i>10, 15</i>
<i>Format du PDA</i>	<i>N/A</i>	<i>640x512, 1280x1024</i>
<i>Courant d'obscurité</i>	<i>[nA/cm^2]</i>	<i><3 @ 100 mV (300K)</i>
<i>Responsivité</i>	<i>A/W</i>	<i>>1 @ 1.55 μm</i>
<i>Étendue spectrale</i>	<i>[μm]</i>	<i>0.9-1.7</i>

Prototypage et fabrication

Le CFPC du CNRC est la seule fonderie d'Amérique du Nord spécialisée dans l'optoélectronique à semi-conducteurs III-V. Située à Ottawa, en Ontario, au Canada, elle offre une gamme de services de fabrication allant du prototypage à la production en série. Dotée des outils et équipements les plus récents pour le traitement des dispositifs photoniques et des circuits intégrés photoniques, elle offre une gamme de services de fonderie :

- Croissance épitaxiale MOCVD
- Épitaxie par jets moléculaires (MBE)
- Épitaxie par jets chimiques (CBE)
- Dépôt en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)
- Lithographie par projection et par faisceau d'électrons, métallisation, gravure plasma et traitement final

Le CNRC offre également les services complémentaires suivants :

- Conception et modélisation :
 - Conception de masques pour composants sur mesure tels que réseaux linéaires, réseaux bidimensionnels, dispositifs uniques, dispositifs à quadrants, etc.
 - Conception assistée par ordinateur (CAO) de composants optoélectroniques à semi-conducteurs pour optimisation basée sur des modèles de matériaux calibrés pour InP, InGaAsP, GaAs, AlGaAs, GaN, etc.
- Tests et caractérisation :

-
- Mesures électriques à l'aide de l'analyseur de paramètres de semi-conducteurs Keysight B1500A avec résolution fA, profilage de tension capacitive, IV pulsée/dynamique, etc.
 - Sondeur Summit Cascade pour des cartographies de plaquettes fiables et automatisées afin d'assurer l'uniformité et les statistiques des produits finis
 - Caractérisation optoélectronique basée sur le SWIR et les longueurs d'onde SWIR étendues (LED, lasers, éclairage large bande avec monochromateur)
 - Possibilité d'éclairage arrière adapté aux technologies FPA
 - Conception, fabrication et caractérisation de filtres optiques

Le portefeuille de brevets et de propriété intellectuelle du CNRC pour les technologies de photodétecteurs démontre sa capacité à innover et à développer des capacités SWIR de pointe. Le CFPC fabrique également depuis plusieurs années des technologies de photodiodes à avalanche à photons uniques, parallèlement aux technologies de détecteurs p-i-n.

Pour les entreprises intéressées par le développement de technologies optoélectroniques avancées, le modèle « pure play » du CFPC permet aux clients de conserver leur propriété intellectuelle de conception tout en exploitant une boîte à outils de propriété intellectuelle liée aux procédés, capable de prendre en charge les blocs de procédés hautement fiables et performants nécessaires à une conception de pointe, notamment les lasers à hétérostructures enterrées (BHET) et les lasers DFB à croissance multiple, les lasers à modulation d'électro-absorption (EML), les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) et les puces de gain, ainsi que les interconnexions et guides d'ondes nécessaires à la fabrication de circuits intégrés photoniques. Le CFPC dispose d'une équipe d'experts commerciaux qui travaillent en étroite collaboration avec les clients tout au long du processus de fabrication des dispositifs afin de développer des solutions personnalisées répondant à leurs besoins et exigences spécifiques.

Détails de l'opportunité

Licence disponible

Brevets en instance :

- A. W. Walker, "Semiconductor devices with graded interface regions," US 2023/0395735 A1, Dec. 7, 2023
- A. W. Walker, P. Waldron, "Short range infrared imaging systems," US 2023/0099143 A1, Mar. 30, 2023

Bibliographie

- [1] A. W. Walker, O. J. Pitts, C. Storey, P. Waldron, C. Flueraru. "Minority carrier diffusion in InGaAs/InP P-i-N heterojunctions for photodetector arrays," *Optical and Quantum Electronics*, 52:96, 2020.
- [2] A. W. Walker, M. W. Denhoff. "Heavy and light hole minority carrier transport properties in low-doped n-InGaAs lattice matched to InP," *Applied Physics Letters*, 111, 162107, 2017.
- [3] A. W. Walker, O. J. Pitts, C. Storey, P. Waldron, C. Flueraru. "Doping and temperature dependence of minority carrier diffusion lengths in InGaAs/InP photodiodes," *Proc. From IEEE Sensors*, Montreal, QC, Canada, Oct 27-30, 2019.
- [4] O. J. Pitts, M. Hisko, W. Benyon, S. Raymond, A. J. SpringThorpe. "Optimization of MOCVD-diffused p-InP for planar avalanche photodiodes," *Journal of Crystal Growth*, 393, 85-88, 2014.
- [5] O.J. Pitts, M. Hisko, W. Benyon, G. Bonneville, C. Storey, A.J. SpringThorpe. "Planar avalanche photodiodes with edge breakdown suppression using a novel area growth based process," *Journal of Crystal Growth*, 470, 149-153, 2017.
- [6] A. W. Walker, S. Moisa, A. J. SpringThorpe, O. J. Pitts. "Zn diffusion depth effect on photoresponse uniformity in InP/InGaAs avalanche photodiodes," *Optical and Quantum Electronics*, 54, 572, 2022.
- [7] E. Kizilkan, U. Karaca, V. Pešić, M.-J. Lee, C. Bruschini, A. J. SpringThorpe, A. W. Walker, C. Flueraru, O. J. Pitts, Edoardo Charbon. "Guard-ring-free InGaAs/InP single-photon avalanche diode based on a novel one-step Zn-diffusion technique," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 28, 5, 9300209, 2022.