

CNRC-NRC

Technologie de laser à points quantiques

●●● Contact

Personne-ressource (aspect technique)

Zhenguo Lu

613-993-1268, zhenguo.lu@nrc-cnrc.gc.ca

Personne-ressource (aspect commercial)

Patrick Therrien

519-675-8742, patrick.therrien@nrc-cnrc.gc.ca



Conseil national de
recherches Canada

National Research
Council Canada

Canada

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le Conseil national de recherches du Canada, 2024

Papier : numéro de catalogue NR16-433/2024F,
978-0-660-69356-9

PDF : numéro de catalogue NR16-433/2024F-PDF,
978-0-660-69355-2

Une version HTML de ce produit est disponible sur le site web du CNRC.
Also available in English.

01/2024

Contexte

Le laser à semi-conducteurs est l'appareil utilitaire de l'industrie des télécommunications et de la communication de données, utilisé comme source lumineuse pour la transmission de données par fibre optique. Ces lasers sont traditionnellement basés sur des matériaux à base de phosphure d'indium (InP) et utilisent en particulier des puits quantiques (QW) comme milieu actif. En 1982, des prédictions ont été faites sur l'amélioration de la performance des lasers à points quantiques par rapport à leurs équivalents à base de QW¹, avec des promesses de seuils plus bas, de dépendance à la température et de sensibilité à la rétro-réflexion. Cela a conduit à des études à long terme sur la façon de créer de telles structures à points quantiques (QD), sur la façon de les mettre en œuvre dans des lasers et sur la comparaison de leurs performances par rapport à celles des lasers QW.

Depuis le milieu des années 1990, le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) s'est engagé de manière importante dans le développement de points et de tirets quantiques sur des substrats de GaAs et d'InP. Notamment, les applications dans la gamme de longueurs d'onde de 1,55 μm ont stimulé la croissance de points quantiques InAs autoassemblés sur la plate-forme InP. Ces points quantiques ont été utilisés pour démontrer des lasers offrant des avantages en matière de performance dans les applications de communication de données à grande vitesse par rapport aux lasers QW.

Description de la technologie

Nos lasers QD sont basés sur les lasers à semi-conducteurs InP conventionnels, qui sont omniprésents dans les secteurs des télécommunications optiques et des communications de données. Mais dans les nôtres, la section active de puits quantiques a été remplacée par des points quantiques (voir figure 1). Cette approche signifie que la fabrication du laser peut être effectuée en utilisant toutes les techniques de traitement InP standard auxquelles le CNRC a accès, y compris la fabrication de réseaux et la création d'hétérostructures enfouies.

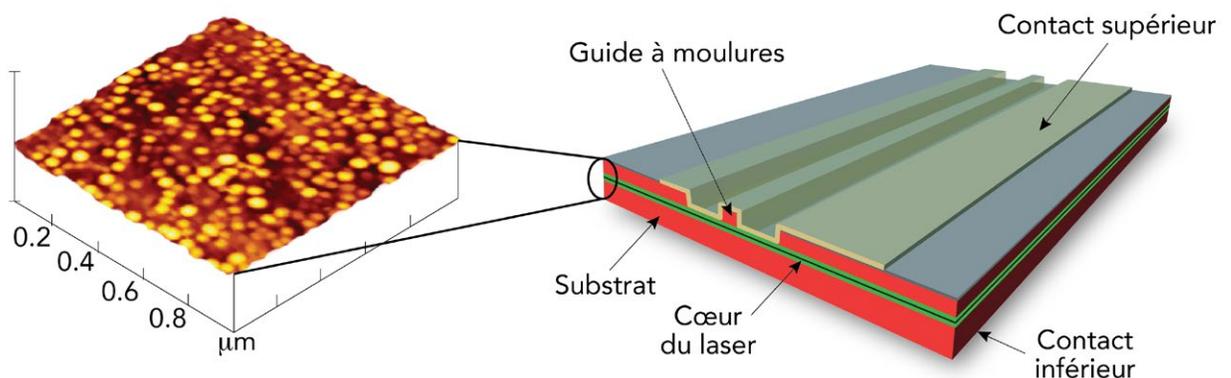


Figure 1 Schéma d'un laser QD avec une coupe montrant les points quantiques typiques utilisés dans le cœur du laser.

Les points quantiques d'InAs croissent à l'aide d'un processus de croissance autoassemblé de Stranski-Krastanov qui a été optimisé pour permettre un contrôle précis de la longueur d'onde d'émission de chaque couche QD et pour minimiser l'élargissement². Le caractère physiquement distinct de chaque émetteur QD crée un matériel actif élargi inhomogène qui réduit l'interaction entre les QD individuels par le biais de la distribution des porteurs de charge. Pour certaines applications, cette propriété a permis d'obtenir des performances laser supérieures à celles obtenues avec les matériaux actifs QW. Ces applications comprennent les communications de données haute vitesse (y compris les schémas de modulation cohérente) et la radio par fibre (RoF).

Applications et avantages (par rapport aux technologies existantes/commercialisées)

Communications cohérentes

La demande en communications de données à grande vitesse continue de croître, ce qui nécessite le développement de schémas de modulation plus complexes pour augmenter la vitesse et l'efficacité spectrale tout en réduisant les coûts. Les sources optiques utilisées pour générer et transporter les signaux sont donc très sollicitées. L'utilisation de schémas de modulation cohérents et avancés à efficacité spectrale élevée, comme la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) à ordres multiples pour plusieurs canaux de longueur d'onde simultanés ou la création d'un supercanal, nécessite de nombreuses longueurs d'onde d'émission laser. Chaque canal de longueur d'onde doit présenter à la fois un faible bruit d'intensité relative (RIN) et une largeur de ligne étroite (faible bruit de phase). La combinaison de plusieurs lasers individuels n'est pas pratique pour un grand nombre de canaux et n'est pas réalisable lorsqu'un espacement à mode fixe et une relation de phase bien définie sont nécessaires entre les lignes de lasage. Une approche préférée consiste à utiliser des peignes de fréquence laser pour fournir une source de lignes de lasage étroites régulièrement espacées avec des relations de phase bien définies entre les lignes. Toutefois, les sources conventionnelles de peignes de fréquence sont généralement complexes à contrôler, encombrantes, énergivores et coûteuses, ce qui rend leur déploiement peu intéressant. L'utilisation de lasers QD peut résoudre ces problèmes.

Le blocage de mode d'un laser à semi-conducteurs est un moyen intéressant de produire un peigne de fréquences, mais il nécessite généralement des dispositifs à sections multiples et un contrôle très précis des conditions de fonctionnement afin de maintenir le peigne de haute qualité requis pour des applications de communication cohérente. Les propriétés uniques du matériau actif à points quantiques permettent à ces lasers de bloquer facilement le mode en utilisant une cavité laser Fabry-Perot à une section très simple et facile à contrôler³. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des absorbeurs saturables distincts ou des contacts électriques multiples, et la gamme des conditions de fonctionnement (par exemple, le courant d'attaque, la température) dans lesquelles le blocage de modes approprié se produit est vaste. Tous les modes sont mutuellement bloqués en phase, ce qui les rend idéaux pour une communication cohérente.

Le fonctionnement du laser crée de nombreuses lignes de lasage, par exemple 56 à un espacement de mode de 28,4 GHz, comme le montre l'image « c » de la figure 2. Chacune de ces lignes présente un RIN et une largeur de ligne faibles et vérifiés⁴, ce qui les rend idéales pour la communication de données sur fibre optique à des longueurs d'onde d'environ 1,55 μm . Nous avons démontré des débits de données allant jusqu'à 220 Gbps pour une ligne individuelle en utilisant la double polarisation 16 QAM à un taux de modulation de base de 28 GHz. Cela fournit un débit de données cumulé de 12,5 Tbps pour l'ensemble du spectre de lasage et a été démontré à la fois pour la connexion différentielle (« back-to-back » ou B2B) et sur 100 km de fibre monomode standard (SSMF). Cette découverte met en lumière la viabilité des lasers QD en tant que source optique à faible coût pour les réseaux à grande échelle.^{5,6}

La figure 2 montre le schéma et la mise en œuvre réelle d'un laser QD à modes bloqués qui a été bloqué sur un réseau de fréquence fixe de 25 GHz.

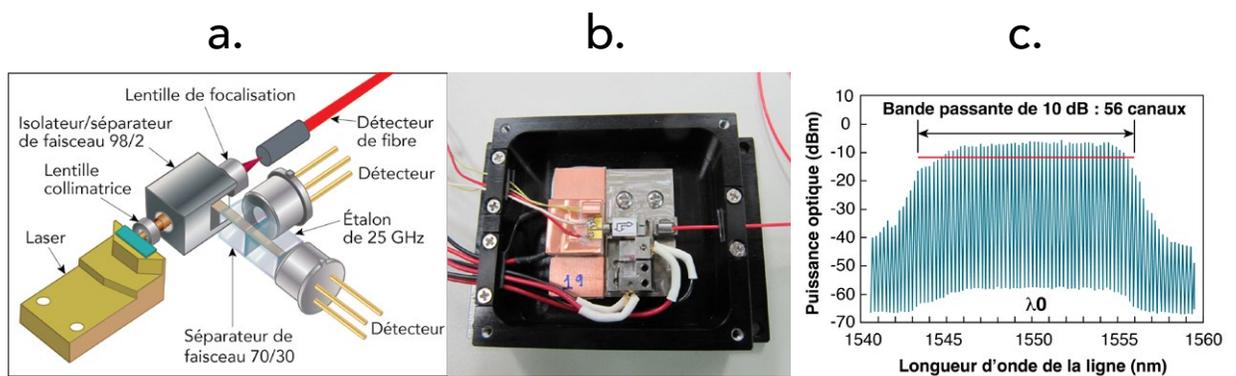


Figure 2 Schéma de conception optique (« a ») et sous-ensemble de fibre amorce (« b ») d'un laser QD bloqué sur une grille de longueur d'onde fixe (« c ») Spectre de lasage typique d'un laser QD

Radio par fibre (RoF)

La demande de connectivité sans fil à haute vitesse et à large bande avec fiabilité et une faible latence est à l'origine des communications sans fil 5G et au-delà, avec des scénarios d'utilisation qui spécifient des services haute vitesse à large bande avec des débits de données de pointe de dizaines de Gbps. Pour obtenir ces services ultra haute vitesse large bande et à faible latence, les fréquences porteuses élevées dans les bandes d'ondes millimétriques (mmW) (30 GHz à 300 GHz) sont d'un grand intérêt. Toutefois, la génération de signaux mmW à l'aide de méthodes électroniques classiques devient de plus en plus difficile à mesure que la fréquence augmente, et la transmission de ces signaux sur de longues distances constitue un véritable défi. Par conséquent, dans le domaine optique, les solutions photoniques à ondes millimétriques par fibre (mmWoF) à large bande, simples, efficaces et rentables sont considérées comme des solutions viables pour la génération, le traitement, le contrôle et la distribution de signaux mmW en vue d'une application dans les réseaux d'accès sans fil à large bande. La génération de signaux mmW peut être abordée à l'aide de techniques optiques fondées sur le battement hétérodyne de 2 signaux optiques, espacés à la fréquence mmW voulue, où les données numériques ou analogiques sont encodées sur l'un ou l'autre des signaux optiques, ou sur les 2.

Nous avons abordé la génération photonique de signaux mmW à l'aide de 2 approches rendues possibles par l'utilisation de la technologie laser QD.

1. Laser QD à peigne

Pour créer une fréquence porteuse mmW de grande pureté, les 2 signaux optiques utilisés pour générer le signal de battement doivent avoir la même intensité et une relation de phase bien définie. Ces caractéristiques se retrouvent dans un laser à modes bloqués tel que le dispositif QD décrit dans la section Communications cohérentes ci-dessus. Comme il s'agit d'un laser à modes bloqués, il existe une relation de phase bien définie entre les différentes lignes de lasage, ce qui signifie que le battement de 2 lignes individuelles produit une tonalité pure avec une largeur de ligne de l'ordre de seulement 5 kHz. En choisissant une paire de lignes appropriée, il est possible de générer un signal de battement mmW allant de dizaines de GHz au THz.

Ce schéma peut être utilisé pour générer la source optique d'un réseau mmWoF où l'une ou l'autre des lignes laser ou les 2 lignes sont modulées pour transporter les données. Nous avons fait la démonstration d'une livraison de signaux sans fil RF hétérodyne optique RoF de 16 Gbps à 25 GHz avec un total de 25 km de liaison par fibre et une liaison sans fil de 2 m.^{7,8}

2. Laser à rétroaction répartie (DFB) à double longueur d'onde QD

Une approche courante pour générer le signal de battement mmW consiste à utiliser 2 lasers distincts fonctionnant sur 2 longueurs d'onde différentes. L'inconvénient de cette approche est que, sans système de contrôle complexe, les 2 lasers peuvent dériver l'un par rapport à l'autre, introduisant du bruit dans le signal mmW généré. Pour résoudre ce problème, nous générons les 2 longueurs d'onde dans une seule cavité laser, ce qui minimise la dérive relative entre les 2 lignes de lasage et est rendu possible par l'utilisation du milieu actif QD. Il en résulte une puissance optique élevée par mode et une grande pureté spectrale avec une faible intensité relative et un faible bruit de phase. Il est important de souligner que le dispositif est comparativement simple et compact. Par conséquent, le laser QD à double longueur d'onde présente l'avantage de réduire la complexité et le coût du système, ce qui montre qu'il est possible d'offrir une solution simple et peu coûteuse pour les systèmes mmWoF hétérodynes optiques 5G.

Le laser à double longueur d'onde est une structure InP DFB à hétérostructure enfouie (BHET) bloquée p-n utilisant du matériau actif QD. Une nouvelle couche de réseau de diffraction a périodique synthétisée a été conçue pour fournir la rétroaction répartie de manière à ce que 2 modes longitudinaux émettent un rayon laser simultanément. Une attention particulière a été accordée à l'obtention d'un gain au seuil presque identique pour les 2 modes voulus. Des exemples de spectres de lasage sont présentés dans la figure 3, qui montre 2 séparations de longueur d'onde différentes, 47 GHz et 230 GHz.

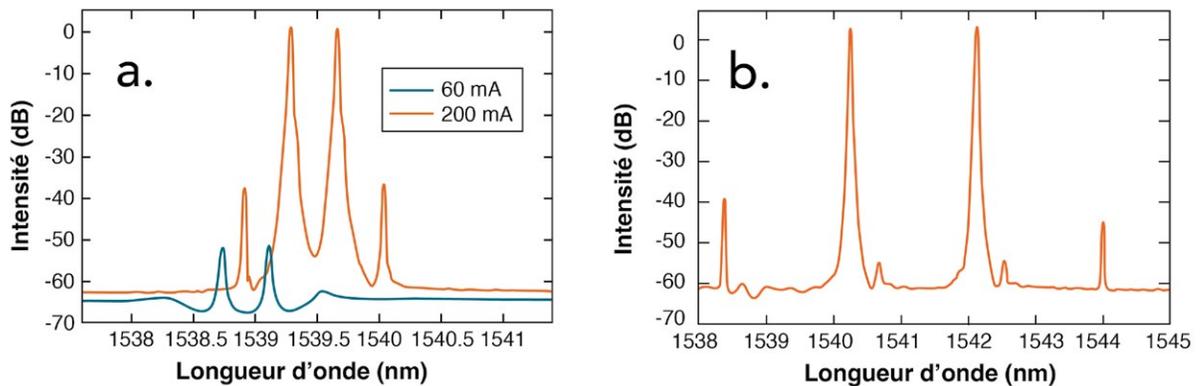


Figure 3 Spectres de lasage DFB à double longueur d’onde avec un espacement de mode de 47 GHz (image « a ») et de 230 GHz (image « b »)

En utilisant le laser QD à double longueur d’onde avec un espacement de mode de 47 GHz, nous avons démontré la génération de signaux mmW multi-Gbps à large bande en temps réel et la transmission sans fil dans la bande de fréquence de 47 GHz sur la base d’une liaison frontale radio analogique sur fibre (ARoF). Un mode laser a été codé à l’aide de signaux de données en bande de base à modulation d’amplitude en quadrature multiniveau (M-QAM) de 6 GBd (16-/32-/64-QAM); l’autre mode de lasage a été utilisé comme oscillateur optique local pour la conversion ascendante optique-hétérodyne à distance vers une fréquence porteuse mmW de 47,2 GHz. Par conséquent, des signaux de données modulés en bande de base optiques avec une capacité de données allant jusqu’à 36 Gbps (6 GBd × 64-QAM) ont été transmis par connexion différentielle (B2B) et sur 50 km de fibre SSMF avant que la fréquence porteuse mmW ne soit synthétisée optiquement à distance pour la transmission et la détection de données sans fil en espace libre au-dessus d’un vide de 9 mètres.⁹

Autres applications potentielles et avantages des matériaux actifs QD

Il existe de nombreuses autres applications potentielles dans lesquelles les matériaux actifs QD pourraient présenter des avantages par rapport aux matériaux QW traditionnels.

- Les peignes de fréquence ont été utilisés pour la détection spectroscopique et la métrologie.
- L’important gain dans la bande passante élargie de manière inhomogène et accessible avec les QD les rend idéaux pour les applications d’amplification.
- Les prévisions d’une faible sensibilité à la rétro réflexion pourraient réduire les besoins en isolateurs optiques.
- La nature discrète des QD signifie qu’ils présentent une résistance améliorée aux rayonnements, un avantage possible pour une utilisation dans des applications spatiales.

Exemples de spécifications typiques pour les lasers QD

Spécification	Unité	Laser à peigne cohérent	Laser DFB à double longueur d'onde ⁷
Seuil (courant)	mA	40	70
Puissance à 300 mA	mW	32	21
Espacement de mode	GHz	25 (portée 10–100)	47,2 (+/-1)
Bande passante 6 dB	nm	12	
RIN monomode	dB/Hz	-132	-158
Largeur de ligne optique monomode	MHz	0,6 à 1,5	0,015
Plage de températures de fonctionnement	°C	15 à 85	15 à 85

Prototypage et fabrication

Le Centre de fabrication pour la photonique du Canada (CFPC) du CNRC est une fonderie non diversifiée InP III-V à la fine pointe de la technologie située à Ottawa, au Canada. Le CCFDP offre une gamme de services de fabrication, depuis le prototypage jusqu'à la fabrication à échelle commerciale. Les installations du CFPC sont dotées des outils et équipements les plus récents pour le traitement des dispositifs photoniques et des circuits intégrés photoniques. Le CFPC offre toute une gamme de services.

• Services de fonderie :

- Croissance épitaxiale (dépôt chimique en phase vapeur à partir de composés organométalliques (procédé MOCVD)
- Épitaxie par faisceau ou jet moléculaire (MBE)
- Épitaxie par faisceau ou jet chimique (CBE)
- Dépôt chimique en phase vapeur activé par plasma (procédé PECVD)
- Lithographie par projection et par faisceau d'électrons, métallisation, gravure au plasma et traitement en aval

• **Conception et modélisation** : Pour les dispositifs et les circuits, afin d'améliorer le rendement et la performance

• **Essais et caractérisation** : Essais pour les dispositifs optiques et électroniques, analyse des surfaces et des matériaux

Le portefeuille de brevets et de processus de propriété intellectuelle (PI) du CNRC pour les technologies QD démontre la capacité du CNRC à innover et à mettre en œuvre les meilleures technologies de leur catégorie et des technologies perturbatrices. Le CFPC fabrique commercialement des lasers QD à 1550 nm depuis plus d'une décennie.

Pour ceux qui souhaitent développer des lasers à points quantiques et d'autres dispositifs optoélectroniques avancés, le CFPC permet aux clients de conserver la PI sur leur conception tout en tirant parti d'une boîte à outils de PI liée au processus capable de prendre en charge les blocs de processus d'une grande fiabilité et à rendement élevé nécessaires pour les conceptions de pointe, y compris les lasers BHET et les lasers DFB à régénérations multiples, les lasers à modulation par électro-absorption (EML), les photodétecteurs à avalanche (APD) et les photodétecteurs à matrices de plan focal (FPA), les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) et les puces à gain, ainsi que les interconnexions et les guides d'ondes nécessaires à la création 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 qui répondent à leurs exigences et besoins particuliers.

Détails sur les occasions d'affaires et commerciales

Licences disponibles

Brevets délivrés

- Zhenguo Lu, Jiaren Liu, Sylvain Raymond, Philip Poole, Pedro Barrios et Daniel Poitras. Guides d'ondes à semi-conducteurs à base de points quantiques. Brevet CA 2627094 (2016-05-17).
- Jiaren Liu, Zhenguo Lu, Sylvain Raymond, Philip Poole, Pedro Barrios et Daniel Poitras. Lasers à verrouillage de mode de point quantique à longueurs d'onde multiples multibandes. Brevet CA 2674959 (2016-12-13).
- Zhenguo Lu, Jiaren Liu, Philip Poole, Chunying Song et Shoude Chang. Rétrecissement stable de la largeur spectrale d'un laser à peigne. Brevets CA 3012924 et CA 3012938 (pas encore délivrés au Canada; délivrés aux États-Unis : 10707647-B2 et 10707648-B28, date de dépôt : 2020-07-20).

Autres demandes de brevet américain

- Mohamed Rahim, Greg Pakulski, Philip Poole et Zhenguo Lu. Réseaux aperiodiques synthétisés et procédé de fabrication. Brevet CA 3140554 (date de dépôt : 2020-04-30).
- Khan Zeb, Zhenguo Lu, Jiaren Liu et Xiupu Zhang. Methods and apparatus for high capacity spectrally efficient MIMO and optical beamforming enabled photonic millimeter-wave over fiber (mmWoF) transceiver systems based on quantum dot multi-wavelength lasers with wavelength division multiplexing and space division multiplexing. Demande de brevet américain (date de dépôt : 2022-07-20).
- Youxin Mao, Zhenguo Lu, Jiaren Liu, Khan Zeb, Guocheng Liu et Philip Poole. Multi-input and multi-output photonics analog-to-digital microwave down-conversion and digital-to-analog up-conversion methods and systems. Demande de brevet américain (date de dépôt : 2023-02-23).

-
- ¹Arakawa, Y., and Sakaki, H. "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current." *Appl. Phys. Lett.* 40, (1982) 939–941. <https://doi.org/10.1063/1.92959>.
- ²Poole, P. J., Kaminska, K., Barrios, P., Lu, Z., and Liu, J. "Growth of InAs/InP-based quantum dots for 1.55 μm laser applications." *J. Cryst. Growth* 311, (2009) 1482–1486. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.129>.
- ³Renaudier, J., Brenot, R., Dagens, B., Lelarge, F., Rousseau, B., Poingt, F., Legouezigou, O., Pommereau, F., Accard, A., Gallion, P., et al. "Phase correlation between longitudinal modes in semiconductor self-pulsating DBR lasers." *Electron. Lett.* 41, (2005) 1007–1008. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.843977>.
- ⁴Lu, Z., et al. "InAs/InP quantum dash semiconductor coherent comb lasers and their applications in optical networks." *J. Light. Technol.* 39(12), (2020): 3751–3760. <https://doi.org/10.1364/OE.441820>.
- ⁵Liu, G., et al. "InAs/InP quantum dot mode-locked laser with an aggregate 12.544 Tbit/s transmission capacity." *Opt. Express* 30(3), (2022): 3205–3214. <https://doi.org/10.1364/OE.441820>.
- ⁶Liu, G., et al. "Monolithic InAs/InP quantum dash mode-locked lasers for millimeter-wave-over-fiber mobile fronthaul systems." *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 29(6), (2023):1900110. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2023.3273539>.
- ⁷Rahim, M., et al. "Monolithic InAs/InP quantum dash dual-wavelength DFB laser with ultra-low noise common cavity modes for millimeter-wave applications." *Opt. Express* 27(24), (2019): 35368–35375. <https://doi.org/10.1364/OE.27.035368>.
- ⁸Zeb, K., et al. "InAs/InP quantum dash buried heterostructure mode-locked laser for high capacity fiber-wireless integrated 5G new radio fronthaul systems." *Opt. Express* 29(11), (2021): 16164–16174. <https://doi.org/10.1364/OE.424504>.
- ⁹Zeb, K., et al. "Broadband optical heterodyne millimeter-wave-over-fiber wireless links based on a quantum dash dual-wavelength DFB laser." *J. Light. Technol.* 40(12), (2022): 3698–3708. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3154652>.

