



HAL
open science

Photonique THz : Lumière laser structurée pour l'émission THz & modulation THz pilotée par laser

Adrian Bartolo, Julien Guise, Grégoire Beaudoin, Luc Legratiet, Laurent Couraud, Isabelle Sagnes, Emmanuel Centeno, Fernando Gonzalez-Posada, Jean-Baptiste Rodriguez, Laurent Cerutti, et al.

► To cite this version:

Adrian Bartolo, Julien Guise, Grégoire Beaudoin, Luc Legratiet, Laurent Couraud, et al.. Photonique THz : Lumière laser structurée pour l'émission THz & modulation THz pilotée par laser. Journées Nationales d'Optique Guidée, Jul 2023, Lyon, France. hal-04282859

HAL Id: hal-04282859

<https://hal.umontpellier.fr/hal-04282859>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Photonique THz : Lumière laser structurée pour l'émission THz & modulation THz pilotée par laser

A. Bartolo¹, J. Guise¹, G. Beaudoin², L. Legratiet², L. Couraud², I. Sagnes², E. Centeno³,
F. Gonzalez-Posada¹, J.-B. Rodriguez¹, L. Cerutti¹, T. Taliercio¹, A. Garnache¹ et S. Blin¹

¹*IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France*

²*C2N, CNRS UMR9001, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France*

³*Univ Clermont-Auvergne, CNRS, Aubière, France*

stephane.blin@umontpellier.fr

RESUME

La photonique est un bras de levier incontournable pour le développement des applications THz, grâce à la maturité des composants photoniques et aux fréquences optiques élevées. Nous présenterons ici une source THz pompée par une lumière laser structurée, ainsi qu'un modulateur d'amplitude THz intégré pompé optiquement.

MOTS-CLEFS : *Photonique ; THz ; Source ; Modulateur*

1. INTRODUCTION

L'utilisation des ondes électromagnétiques aux fréquences THz (0,1–30 THz) est en pleine expansion, particulièrement dans les domaines faisant appel à des techniques d'imagerie et/ou de spectroscopie (contrôle industriel, détection de drogues ou d'explosifs, biologie/ médecine). Les télécommunications sont aussi un champ applicatif important, avec le développement des futurs réseaux mobiles (6G, 7G) de fréquences porteuses THz. Le développement des systèmes THz reste cependant limité par la disponibilité de composants performants à l'échelle industrielle, en particulier les sources cohérentes continues à température ambiante. En effet, la montée en fréquence des composants électroniques est difficile au-delà de 100 GHz ou limitée en termes d'accordabilité (diodes Gunn, à effet tunnel résonnant...), et les approches optiques directes comme la réalisation de lasers à cascade quantique [1] restent limitées en deçà de quelques THz. Nous montrerons que la photonique offre un bras de levier permettant de répondre à ces problématiques, en se focalisant sur deux exemples : l'émission THz par photomélangement et la modulation THz pilotée optiquement.

2. EMISSION THZ BASEE SUR UNE SOURCE LASER STRUCTUREE

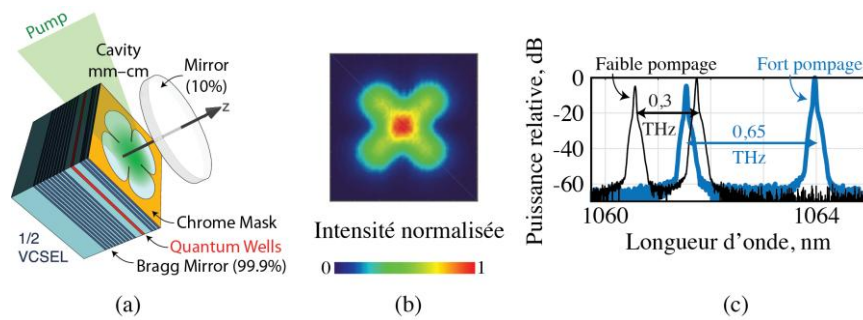


Figure 1 : (a) Schéma du VeCSEL bifrécence avec masque de pertes sélectionnant les modes LG_{00} et LG_{02} . (b) Faisceau mesuré après collimation. (c) Spectre optique à faible pompage (trait noir fin) et fort pompage (trait bleu épais) montrant le fonctionnement bifrécence associé aux deux modes transverses.

L'émission THz par photo-mélange est un compromis intéressant entre les approches électronique et optique car elle permet d'offrir une accordabilité inégalée, un fonctionnement à température ambiante, et elle repose sur une grande maturité technologique. Le principe consiste à exciter un photo-mélangeur (antennes photo-conductrices [2], photodiodes à transport unipolaire (UTC) [3], cristaux non linéaires [4]...) par deux signaux optiques à deux fréquences différentes espacées de la fréquence de battement à générer. La réponse non linéaire du photo-mélangeur permet de générer un signal à cette fréquence de battement. Le rapport d'échelle entre les fréquences visées pour l'émission THz et les fréquences optiques utilisées pour réaliser cette émission THz est typiquement de deux ordres de grandeurs, ainsi une faible accordabilité des fréquences optiques se traduit par une grande accordabilité relative du signal THz, offrant des performances d'accordabilité inégalées attractives pour la spectroscopie. Mais ce rapport d'échelle est délétère pour la cohérence temporelle, car le bruit de fréquence optique est transposé à la fréquence de battement, amenant à une cohérence THz peu attractive. Une solution consiste à réaliser un laser fonctionnement sur deux fréquences simultanées, avec une corrélation forte des contributions du bruit de fréquence, afin que la fréquence de battement soit affranchie des contributions corrélées, permettant ainsi une émission THz cohérente. Le rapport d'échelle se traduit enfin par une faible efficacité énergétique. Pour les applications télécoms, l'approche par photo-mélange est aussi attractive car elle exploite les technologies de modulation électro-optique matures et performantes, permettant une transposition directe du réseau fibré vers le réseau sans fil.

Nous présentons ici une source laser transversalement structurée permettant par photo-mélange une émission THz cohérente, accordable voire puissante pour des applications en télécoms et en spectroscopie. Tel que présenté Fig. 1, nous utilisons un lasers à semi-conducteurs à cavité externe émettant par la surface (VeCSEL) à $1 \mu\text{m}$ afin de bénéficier d'un gain large-bande, de forte puissance, de cohérence (spatiale, temporelle et polarisation) [5]. La cavité plano-concave est constituée du miroir à gain fonctionnalisé et d'un miroir sphérique externe. Le miroir à gain présente un miroir de Bragg de haute réflectivité en face arrière, de multiples puits quantiques pompés optiquement, un filtre passe-bande permettant de confiner la lumière sur les puits et de restreindre le nombre de modes, un masque de pertes en chrome, et un miroir sphérique externe. L'originalité de ce laser est son fonctionnement sur deux modes transverses de Laguerre-Gauss, pouvant coexister dans le milieu à gain à élargissement homogène grâce au faible recouvrement spatial entre le mode Gaussien fondamental LG_{00} et les modes d'ordres supérieurs LG_{0m} présentant un nœud au centre et $2m$ pétales. La sélection des deux seuls modes transverses

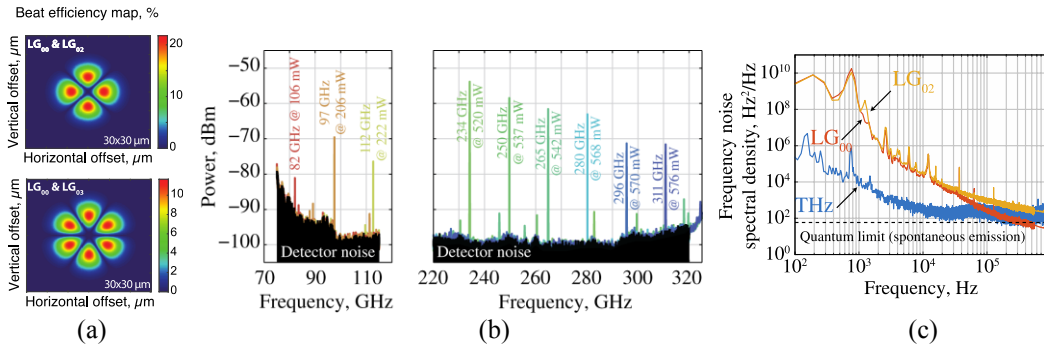


Figure 2 : (a) Carte de la puissance du battement THz dans le plan transverse pour un couple de modes LG_{00} & LG_{02} (en haut) et LG_{00} & LG_{03} (en bas). (b) Spectres THz mesurés à différentes puissances de pompe optique. (c) Bruit de fréquence des modes optiques et du battement THz montrant la réduction du bruit de s'effectue par un filtrage par le gain – pompage à un diamètre adapté aux modes les plus confinés – et par les pertes – masques en chrome de forme adaptée au couple LG_{00} & LG_{0m} choisi. Le laser offre in fine deux modes stables avec une puissance optique maximale totale de 80 mW, de même polarisation linéaire (taux d'extinction 45 dB) [6]. L'accordabilité est assurée par le gradient thermique induit par le pompage optique, amenant à des températures modales différentes, donc des fréquences différentes. Nous avons montré que la différence de fréquence pouvait ainsi être accordée de 0,050 à 0,9 THz en augmentant simplement le pompage optique. Ainsi, la puissance optique de battement augmente avec la fréquence de battement, compensant en partie la perte d'efficacité des photo-mélangeurs avec la montée en fréquence.

L'émission THz a été obtenue à l'aide d'une UTC fibrée positionnée hors axe optique afin de coupler les deux modes équitablement, en accord avec la carte de puissance de battement présentée Fig. 2a [7]. Le signal THz émis a été observé à l'analyseur de spectre électrique grâce à une tête hétérodyne afin de prouver une émission THz cohérente et accordable tel que présenté Fig. 2b. La mesure du bruit de fréquence (optique et THz) présentée Fig. 2c montre une allure usuelle du bruit de fréquence optique dominé par le bruit de pompage aux basses fréquences, bruit grandement corrélé pour les deux modes, permettant ainsi une réduction de 4 ordres de grandeurs pour le bruit de fréquence THz, et prouvant l'intérêt de telles sources bifréquences pour l'émission THz cohérente. La puissance THz obtenue est principalement limitée par l'UTC utilisée, les travaux en cours consistent à exploiter la structuration transverse du faisceau optique afin de combiner de manière cohérente les signaux THz qui pourraient être issus de chacun des spots de la carte de battement présentés Fig. 2a.

3. MODULATEUR THZ INTEGRE POMPE OPTIQUEMENT

La modulation THz est un autre challenge du domaine THz. Nous présentons ici un modulateur d'amplitude intégré dans un guide d'onde WR1.0 (0.75–1.1 THz), piloté optiquement, offrant 10 dB de profondeur de modulation jusqu'à des fréquences de quelques dizaines de MHz. Le principe physique consiste à éclairer un semi-conducteur (InAs) afin de déplacer sa fréquence plasma, et de travailler à des fréquences proches de cette dernière afin que le semiconducteur devienne quasi-métallique sous excitation optique grâce aux porteurs libres générés par absorption tel que proposé en [8]. Ainsi, dans l'obscurité le semiconducteur est relativement transparent pour le faisceau THz, alors qu'il se comporte comme un miroir métallique sous éclairage, permettant une modulation en amplitude de la transmission pilotée par optique. Une photo du modulateur intégré est présentée Fig. 3a, une fine couche d'InAs de 5 μm épitaxiée sur un substrat GaAs

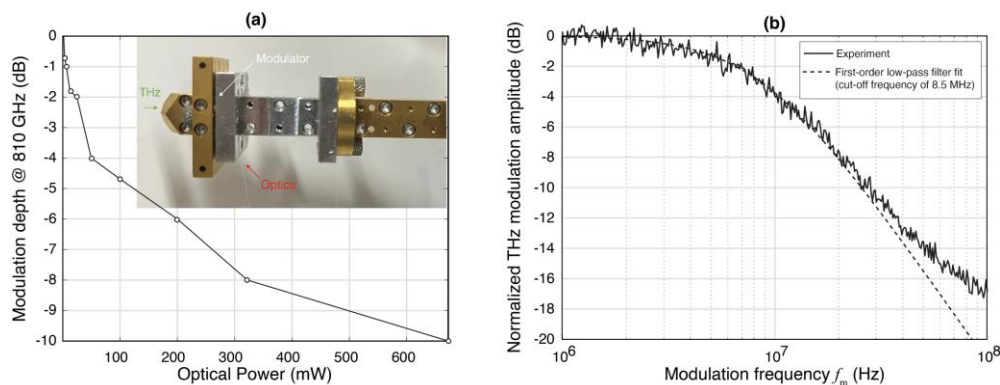


Figure 3 : (a) Profondeur de modulation en fonction de la puissance optique incidente. L'encart montre une photo du prototype intégré dans un guide d'onde 0,75–1,1 THz. (b) Amplitude de la modulation THz en fonction de la fréquence de modulation montrant un comportement passe-bas d'ordre 1.

d'épaisseur 500 μm est prise en sandwich entre un cornet diagonal et un guide d'onde WR1.0. Le guide d'onde est usiné afin d'amener une fibre microlentillée [⁹] permettant une excitation optique du semiconducteur aux longueurs d'ondes télécoms (permis par la bande interdite de l'InAs) ou ici à 1064 nm pour des raisons pratiques. La figure 3a montre l'évolution de la profondeur de modulation avec la puissance optique incidente, une profondeur de 10 dB est permise avec une puissance incidente de 650 mW. Le taux de génération de porteurs dépendant de l'intensité optique, l'intégration du système a pour intérêt de réduire la puissance optique nécessaire, en plus d'offrir des considérations pratiques. La puissance nécessaire pourrait être diminuée en excitant le semi-conducteur avec des photons d'énergie plus proches de la bande interdite. Compte-tenu de la durée de vie des porteurs libres, l'amplitude de la profondeur de modulation décroît avec la fréquence de modulation, et une bande passante de l'ordre de 8,5 MHz est mesurée tel que représenté Fig. 3b. L'utilisation d'un simple modèle de Drude-Lorentz permet d'estimer avec précision la profondeur de modulation et la fréquence de coupure, et nous montrerons que la configuration de ce composant permet aussi une mesure non destructive des densités de porteurs dans l'InAs ainsi que du temps de vie des porteurs.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été supportés par le réseau CNRS RENATECH (miroirs à gain), et les programmes ANR MUSE STAE ANR-16-IDEX-0006, EquipEx EXTRA ANR-11-EQPX-0016, SPATIOTERA ANR-19-CE24. Les auteurs remercient M. Myara (IES, Montpellier / bruit de fréquence) et M. Thual (Foton, Lannion / fibres micro-lentillées).

¹ G. Scalari et al., "Electrically switchable, two-color quantum cascade laser emitting at 1.39 and 2.3 THz," *App. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 14, pp. 141102–141102, 2006

² C. W. Berry et al., "Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes," *Nature Communications*, vol. 4, 2013

³ H. Ito et al., "Photonic generation of continuous THz wave using uni-traveling-carrier photodiode," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 23(12), pp. 4016–4021, 2005

⁴ M. Scheller et al., "Terahertz generation by difference frequency conversion of two single-frequency VECSELS in an external resonance cavity," in *SPIE LASE*, pp. 89660E–89660E, 2014

⁵ A. Laurain et al., "Multiwatt-power highly-coherent compact single-frequency tunable vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser," *Opt. Exp.*, vol. 18(14), pp. 14627–14636, 2010

⁶ R. Paquet et al., "Coherent continuous-wave dual-frequency high-Q external-cavity semiconductor laser for GHz–THz applications," *Optics Letters*, vol. 41, no. 16, pp. 3751–3754, 2016

-
- ⁷ S. Blin et al., “Coherent and tunable THz emission driven by an integrated III–V semiconductor laser,” *IEEE J. Select. Topics in Quant. Electron.*, vol. 23(4), pp. 1–11, 2017
- ⁸ J. Guise et al., “Waveguide-integrated optically-tuned THz modulator,” *IRMMW conference*, 2022
- ⁹ M. Thual et al., “Contribution to research on Micro-Lensed Fibers for Modes Coupling”, *Fiber and Integrated Optics*, vol. 27(6), 2008