

Lasers à cascade quantique dans les applications militaires modernes

Les lasers à cascade quantique ont connu ces dernières années un développement important, sortant des laboratoires pour devenir des produits commerciaux. Leurs caractéristiques très particulières, notamment leur compacité allée à leurs différentes longueurs d'onde d'émission dans le moyen infrarouge, en font un outil de choix pour les applications militaires modernes.

>> **Costel SUBRAN**
Président-Directeur Général
Opton Laser International
costel.subran@optonlaser.com

>> **Michael RADUNSKY**
Product Marketing Manager
Daylight Solutions
mradunski@daylightsolutions.com

>> **Michael HENSON**
Defense Market Business Development
Officer
Daylight Solutions
mhenson@daylightsolutions.com

Technologie des lasers à cascade quantique

Le laser à cascade quantique (abrégé en QCL pour *Quantum Cascade Laser*) est un laser à semi-conducteur pouvant émettre de l'infrarouge moyen à l'infrarouge lointain, dont le principe d'émission par cascade quantique a été initialement proposé par R.F. Kazarino et R.A. Sursis en 1971, mais qui a été réellement mis en œuvre pour la première fois aux Laboratoires Bell en 1994 par Jérôme Faist, Federico Capasso, Deborah Sivco, Carlo Sirtori, Albert Hutchinson, et Alfred Cho. Contrairement aux autres lasers à semi-conducteurs, de type diode laser, dont la radiation électromagnétique provient de la recombinaison d'une paire électron-trou à travers le gap (transition inter-bandes), les QCL sont unipolaires et l'émission laser est obtenue par transition inter-sous-bande d'une structure à confinement quantique, un puits quantique, composée d'une multitude d'hétérostructures à la suite. Ce confinement

quantique est créé à l'intérieur de la structure des sous-bandes d'énergie. Un électron de haute énergie de la bande de conduction « tombe » alors dans le puits quantique, tout d'abord sur la sous-bande supérieure, puis est relaxé en tombant sur la sous-bande inférieure, en émettant un photon d'énergie équivalente à l'énergie entre ces deux sous-bandes. On parle alors d'émission par transition inter-sous-bande.

Les possibilités offertes par l'ingénierie quantique de la structure permettent au QCL d'émettre à des longueurs d'onde où très peu de sources compactes existent. Il s'agit des gammes spectrales du moyen infrarouge (MIR) des plus courtes longueurs d'onde comme 2,75 μm jusqu'à 161 μm (1,9 THz). Les performances actuelles des QCL permettent d'avoir des lasers fonctionnant à température ambiante de 3,5 à 13 μm , les longueurs d'onde longues demandant encore des refroidissements cryogéniques.

Largeur de raie fine, accordabilité, brillance spectrale

La courbe de gain d'un laser à cascade quantique peut être assez large, souvent

supérieure à 500 cm^{-1} . L'utilisation d'un réflecteur DFB (*Distributed Feedback Laser*) ou d'une cavité externe ECqCL™ (*External Cavity quantum cascade Laser*) permet de rétrécir la largeur spectrale jusqu'à des valeurs faibles de l'ordre de 0,00002 cm^{-1} (soit environ 0,5 MHz). Dans les deux architectures, on peut accorder la longueur d'onde soit par variation de la température dans les DFB (quelques cm^{-1}), soit par la rotation d'un réseau de diffraction dans les cavités externes ECqCL™ (plusieurs centaines de cm^{-1}). On obtient ainsi une source laser très fine et largement accordable sur les transitions fines d'absorption dans les gaz.

La deuxième solution a été choisie par Daylight Solutions (*figure 1*). Le chip de gain est monté entre deux lentilles de collimation qui permettent de collimater le faisceau très divergent des QCL. Le réseau de diffraction sélectionne spectralement un intervalle spectral fin et force le chip à émettre une largeur de raie étroite dont la longueur d'onde varie avec la rotation du réseau. La cavité est montée selon un schéma dit double Littrow afin de réduire le déplacement latéral du faisceau pendant le balayage,

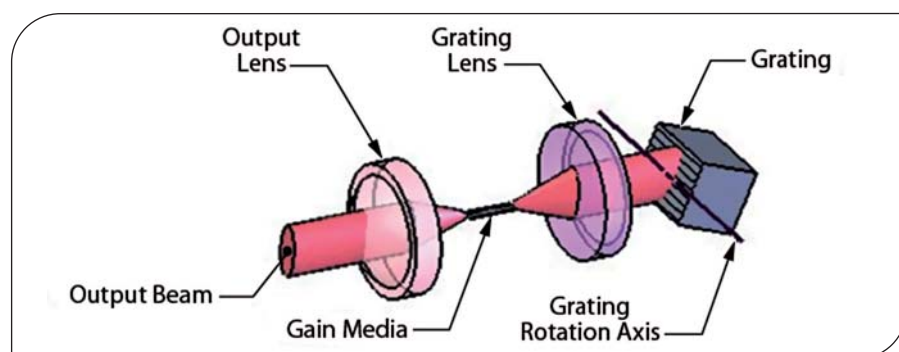


Figure 1. Schéma de la cavité externe Littrow d'un QCL.

schéma également plus efficace que la cavité Littman-Metcalf.

Les longueurs d'onde commercialement disponibles en cavité externe sont indiquées dans la *figure 2*, avec les courbes d'accordabilité et les puissances disponibles.

La majorité des applications dans le MIR (moyen infrarouge, soit une plage spectrale allant de 3 à 20 μm) demandent des courbes d'accordabilité larges, afin de couvrir un large spectre. Les fabricants de chips QCL arrivent à fournir des chips avec des courbes de gain de plus en plus larges, jusqu'à 500 à 600 cm^{-1} (*figure 3*).

Applications militaires

La disponibilité des nouvelles sources laser ECQCL accordables a ouvert la voie à des analyses et diagnostics pour les applications militaires. Cette région spectrale est intéressante pour deux raisons :

- l'atmosphère est transparente à certaines longueurs d'onde MIR (*figure 4*) ;
- un bon nombre de molécules ont des absorptions fondamentales assez fortes, ce qui permet leur détection et identification même en faibles concentrations.

La *figure 5* décrit des espèces identifiables en MIR par les sources laser ECQCL incluant les explosifs, toxines ou agents neurotoxiques. La sensibilité de détection atteint des concentrations extrêmement faibles, de l'ordre du ppt (*parts per trillion*).

Imagerie spectrale et détection des substances

La faible divergence, la forte brillance spectrale, une large accordabilité et l'accès à la quasi-totalité de la bande MIR font de ces nouveaux lasers des sources idéales pour les applications d'imagerie spectrale.

Une des applications clés est la détection à distance des explosifs et des agents neurotoxiques. La majorité des espèces présentent des absorptions dans la région allant de 6 à 10 μm et peuvent être dorénavant détectées avec des spectromètres MIR. Les recherches récentes dans ce domaine ont permis de >>>

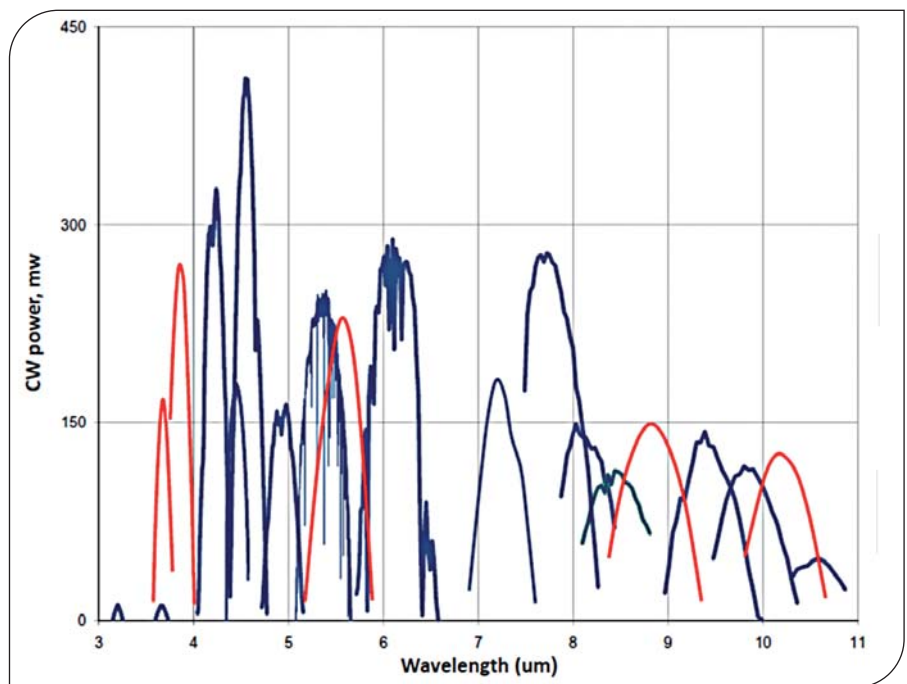


Figure 2. Courbes d'accordabilité des ECQCL™ en régime continu. Les courbes en rouge correspondent aux longueurs d'onde disponibles en 2011.

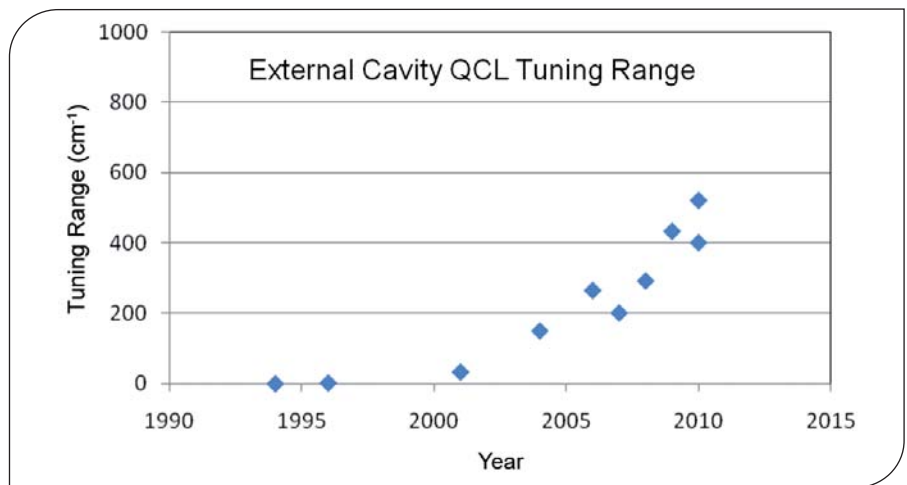


Figure 3. Graphe d'évolution des courbes de gain des QCL depuis 1994.

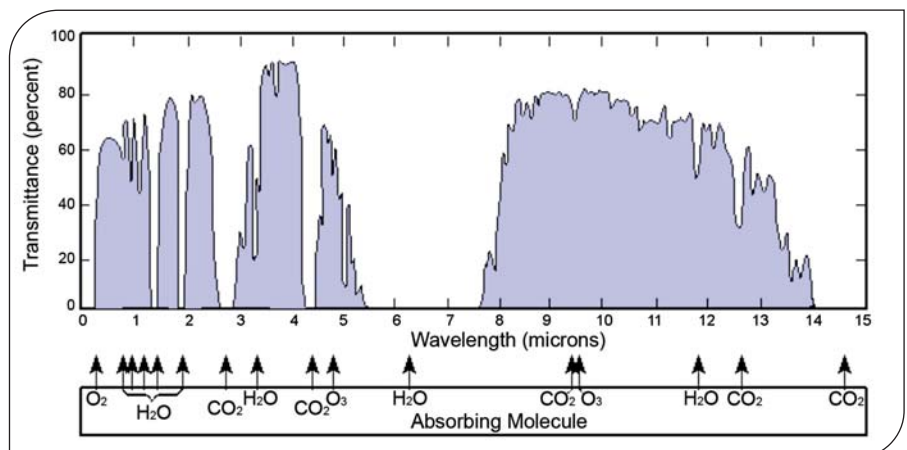


Figure 4. Spectre de transmission de l'atmosphère, du visible à l'infrarouge, avec les principales sources d'absorption.

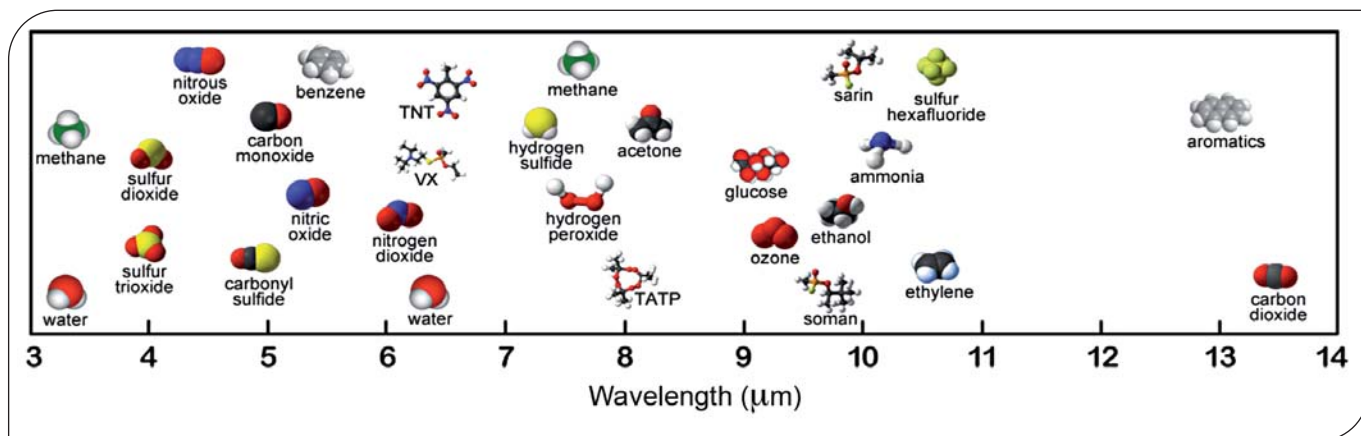


Figure 5. Représentation graphique des absorptions des principales molécules.

détecter et discriminer des quantités d'explosifs de l'ordre du nanogramme sur des distances jusqu'à 50 mètres. Plusieurs techniques ont été mises en œuvre : imagerie thermique, photoacoustique et imagerie multispectrale. L'imagerie thermique exploite le fait que lors de l'absorption de la lumière infrarouge par un composant, celui-ci réémet d'une façon isotropique la plupart de la radiation absorbée sous forme de chaleur, ce qui peut être imagé avec des caméras MIR.

Chaque élément analysé de l'échantillon illuminé avec le laser ECQCL émettra de la chaleur sélectivement pendant le balayage en longueurs d'onde de la source et sera identifié avec la caméra thermique.

La figure 6 est une démonstration de cette technique. Le laser illumine un

échantillon avec quelques traces de saccharine et la détection est assurée avec une caméra (bolomètre). Quand le laser est en résonance sur le pic d'absorption de la saccharine, on observe l'image thermique et les traces sur l'échantillon.

Contre-mesures infrarouges

Des progrès technologiques récents ont permis d'obtenir des QCL à des puissances supérieures à 5 W, à température ambiante. La combinaison de ces puissances et d'un packaging adapté a vu la naissance d'une nouvelle génération d'instruments de contre-mesures infrarouges. Ces lasers « tous solides », qui opèrent dans la fenêtre atmosphérique, sont utilisés par les pointeurs/trackers pour désamorcer le mécanisme de recherche thermique utilisé dans les mis-

siles sol/air. Des essais ont été effectués avec des puissances de plus de 15 W en utilisant des sources multi-QCL, sources qui ont été caractérisées en tests de vol sur hélicoptères.

Illumination, balisage, communication espace libre

Comme les méthodes SWIR (*Short Wave Infra Red*) sont devenues disponibles facilement, le besoin de maintenir un avantage militaire a orienté le développement des sources et détecteurs vers le moyen et lointain infrarouge. L'identification « ami ou ennemi » par l'illumination à ces longueurs d'ondes *via* des sources laser portables est facilitée par l'usage d'un système de balises et détecteurs codés. Ce système de communication et de localisation des personnes sur les champs de bataille et la faible

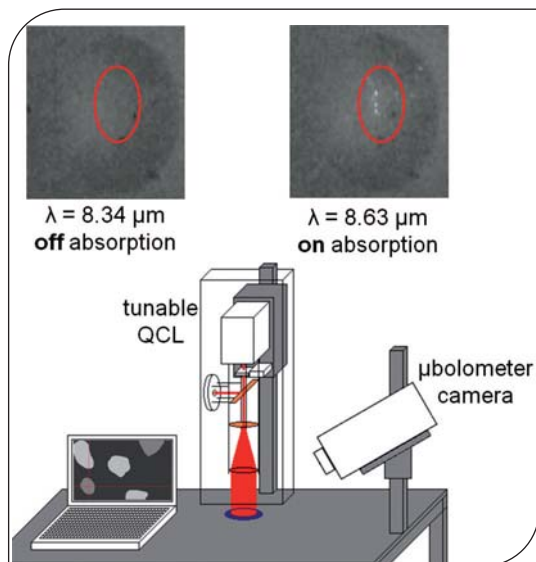


Figure 6. Imagerie thermique.



Figure 7. Ce laser continu MIR « flashlight » à 4,8 μm émettant 1,35 mW, est « visible » sur une cible à 225 m (450 m aller-retour).



Figure 8. Communications en espace libre et sécurisé, indétectables.

consommation d'énergie des semi-conducteurs font de ces sources QCL l'outil moderne pour les communications sécurisées en espace libre.

Pointeurs tactiques et illuminateurs

La technologie ultra-compacte des QCL et leur relative forte puissance offrent la capacité d'équiper les troupes avec des pointeurs MIR et LIR pour des distances comprises entre 200 et 1000 mètres, sans le risque d'être détectés.

Montés sur des fusils, ils sont indétectables par les caméras fonctionnant dans le proche infrarouge ou les intensificateurs de lumière vision de nuit. Ces pointeurs peuvent identifier des cibles, désigner des aires d'atterrissage ou servir tout simplement comme signal de communication (*figure 7*).

Balises de signalisation

Ces balises peuvent avoir un usage militaire ou civil. L'utilisation des balises MIR et LIR par les militaires dans le domaine IFF (*Identification Friend or Foe*, « ami ou ennemi ») est à l'étude. La recherche des pilotes d'avions de chasse abattus et leur sauvetage en utilisant des signaux non détectables est l'une des préoccupations des armées modernes. Les simples pointeurs prototypes de faible puissance ont permis une détection en pleine lumière à plus de 1000 mètres. L'efficacité accrue des QCL et l'amélioration des visualisateurs et des caméras permettront d'obtenir des visibilités de plusieurs dizaines de kilomètres.

Communications en espace libre

Les communications MIR et LIR entre émetteur et récepteur, à la différence des communications RF, sont indétectables, et la probabilité d'interception est quasiment nulle (*figure 8*). Les lasers QCL peuvent être modulés de 100 MHz à 1 GHz, assurant un bon taux de transmission. ■

Les auteurs tiennent à la disposition des lecteurs une bibliographie pour illustrer cet article.

Modulateur Spatial de lumière LCOS



La technologie LCOS* pour un contrôle parfait du front d'onde

- Précision & grande linéarité de la modulation en phase
- Plus de 2π de modulation
- 95% de réflectance & haut rendement de diffraction
- Haute tenue aux flux optiques
- Gamme spectrale de 400 à 1 600 nm
- Version OEM industrielle disponible
- Mode réflectif

* LCOS : Liquid Crystal On Silicon

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

www.hamamatsu.fr
infos@hamamatsu.fr - Tél. +33 1 69 53 71 00