

HI-TEQ

High Performance TeraHertz Quantum Cascade Lasers

ANR P3N 2009-2013

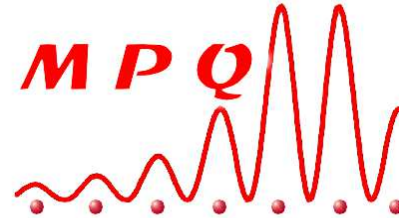
Journées Nationales Nanosciences et
Nanotechnologies 2012

Partenaires (5 + 1 sous-traitant)



laboratoire pierre aigrain
électronique et photonique quantiques

Laboratoire Pierre Aigrain
Ecole Normale Supérieure
Coordinator - S. DHILLON



Laboratoire Matériaux et
Phénomènes quantique
Université Paris 7
Resp. – S. Barbieri



Institut d'Electronique
Fondamental
Université Paris Sud
Resp. – R. Colombelli



Institut d'Electronique, de
Microélectronique, et de
Nanotechnologie (IEMN)
Resp. J-F. Lampin



Resp. O. Parillaud

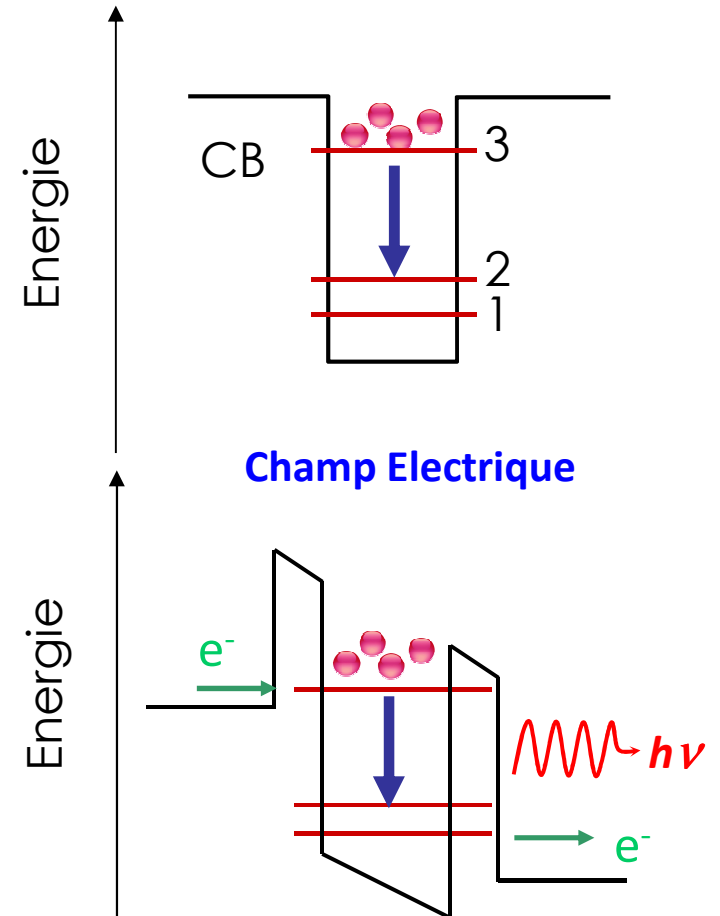


Sous-traitant
University of Leeds, UK
Resp. E. H. Linfield

Lasers à Cascades Quantique

- **Transitions Intersousbandes**

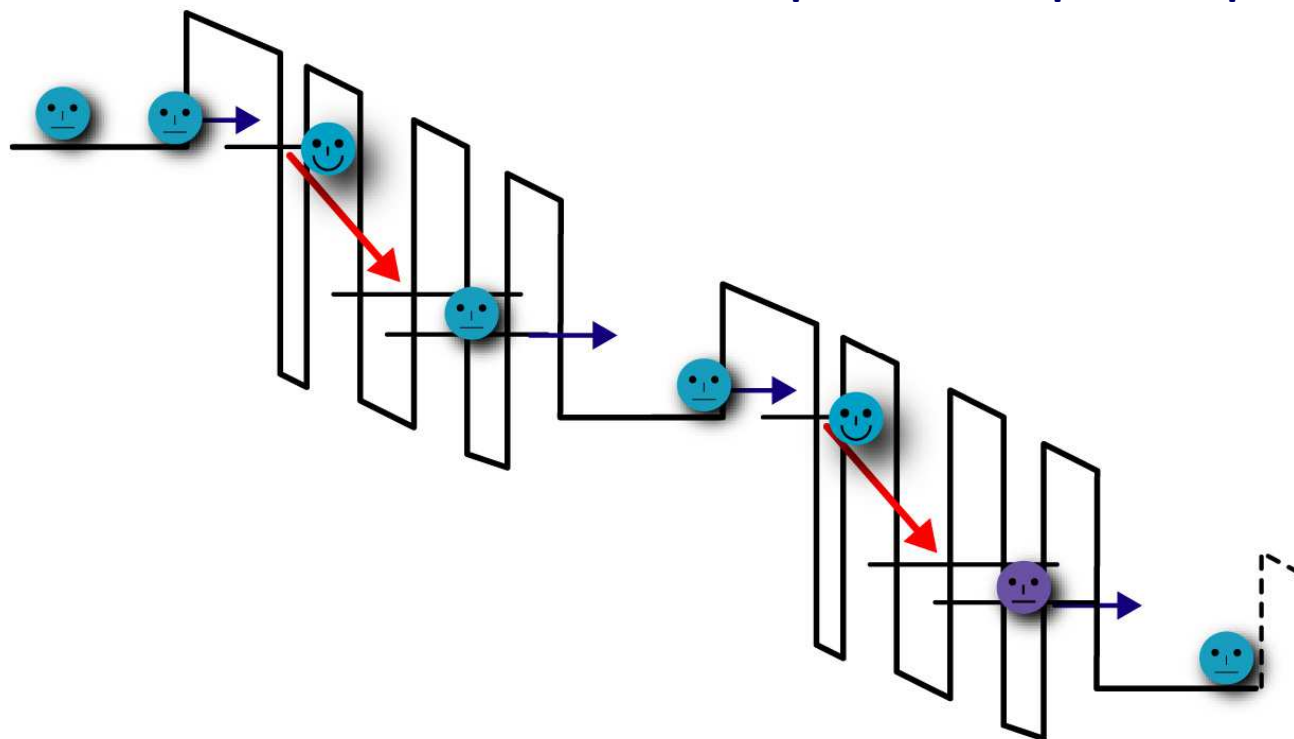
- L'énergie de la transition dépend seulement des épaisseurs des couches atomiques
- Ingénierie de structures de bande
- Unipolaire – un seul type de porteurs (électrons)
- Inversion de population par diffusion



Lasers à Cascades Quantique

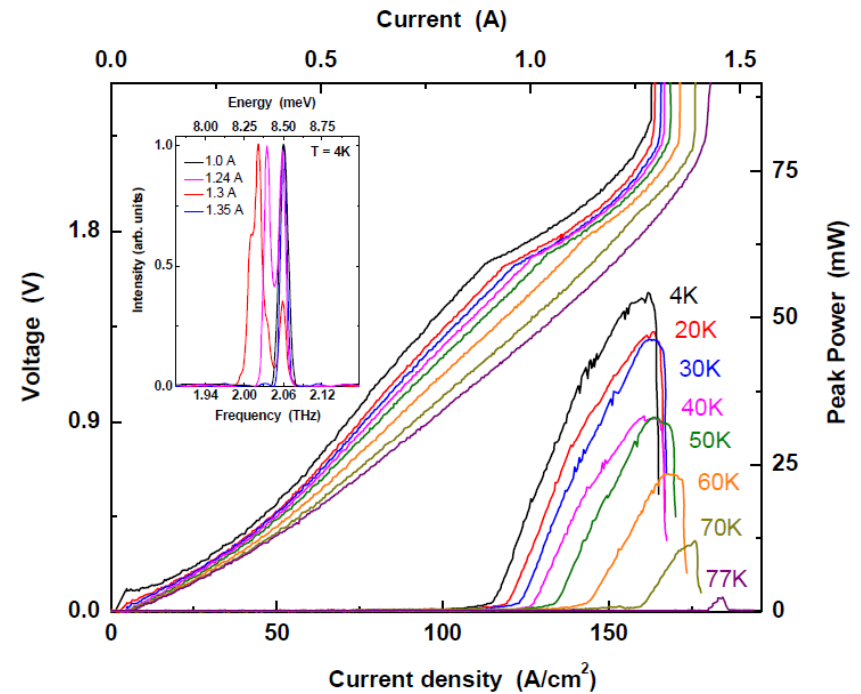
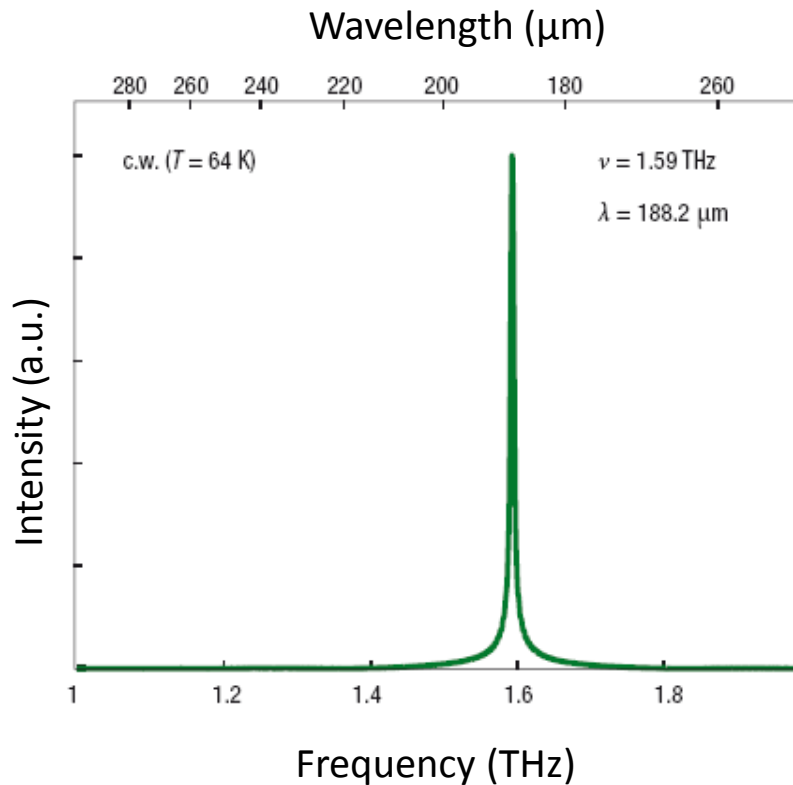
CASCADE :

N périodes = N photons par électron



Depuis 2002 – gamme THz

Lasers à Cascades Quantique THz

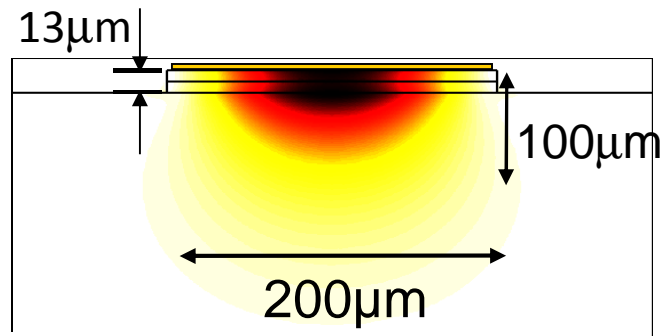


😊 Puissance émise forte, compact, matériaux III-V standards

☹️ Température de fonctionnement, paramètres inconnus, ex. gain, dynamiques et transport

Lasers à Cascades Quantique THz

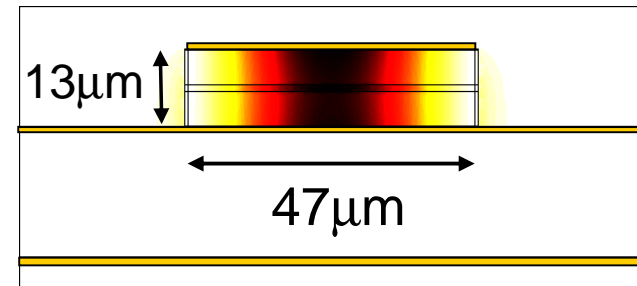
Profil du mode THz – vue de la tranche



Simple plasmon

Dimensions $\leq \lambda$

- + Puissance émise
- + Champ lointain
- Température de fonctionnement

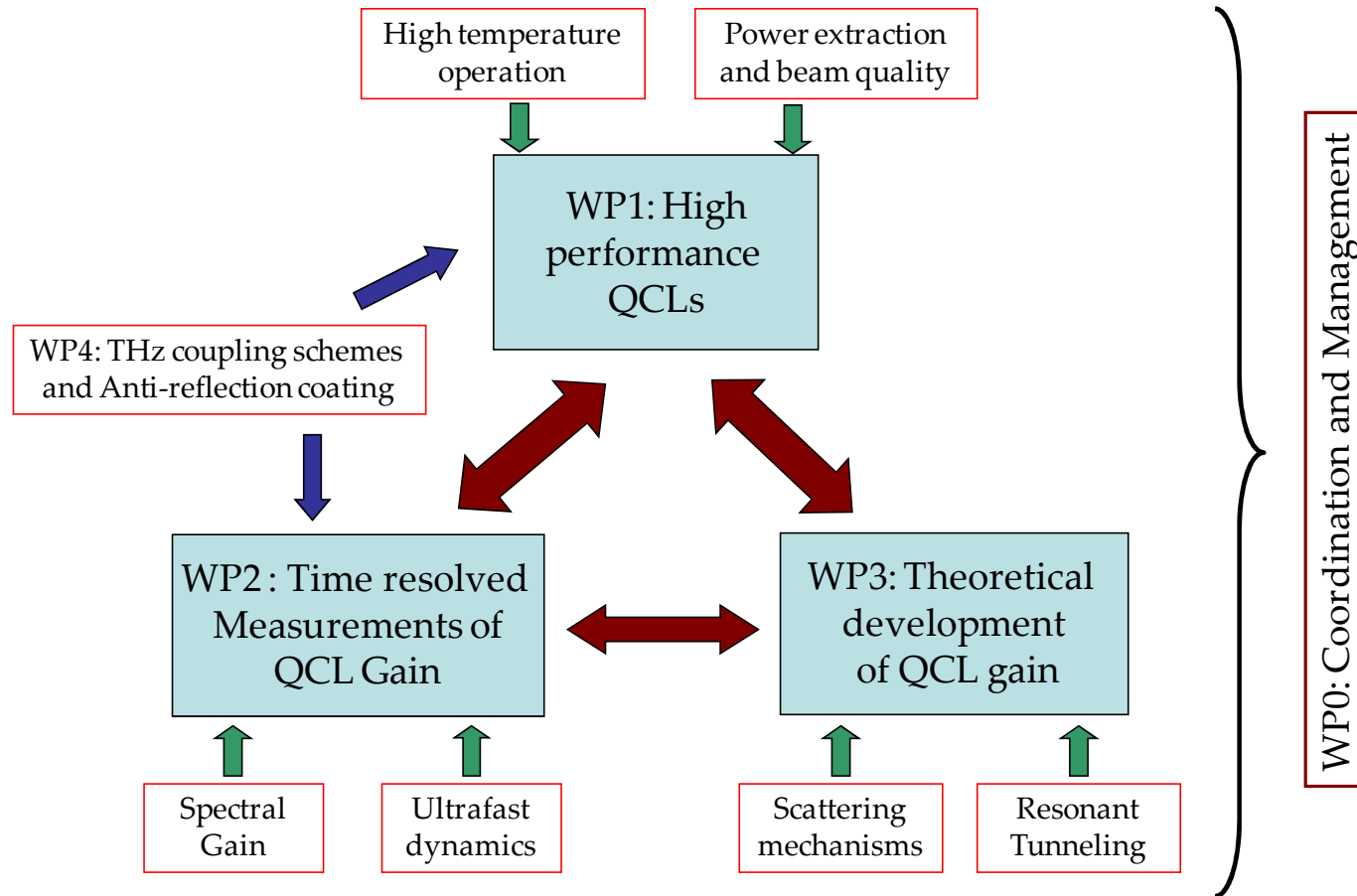


Double métal

Dimensions $\ll \lambda$

- + Bonne température de fonctionnement
- Faible Puissance émise
- Mauvais champ lointain

Organisation

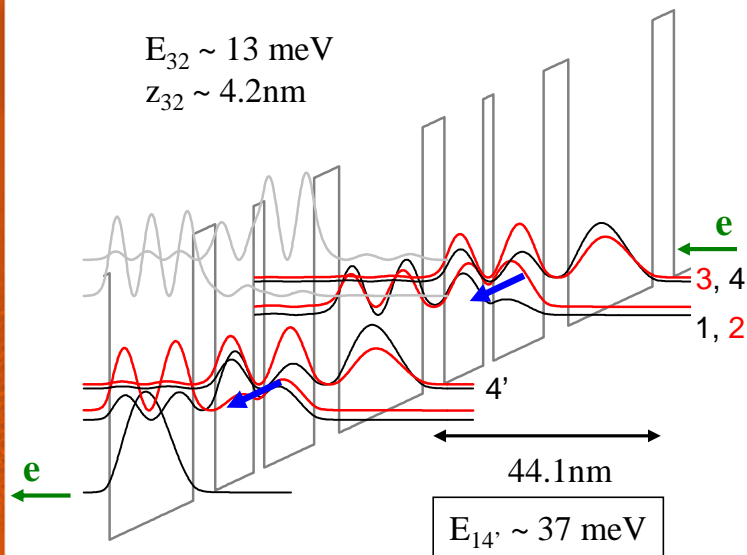




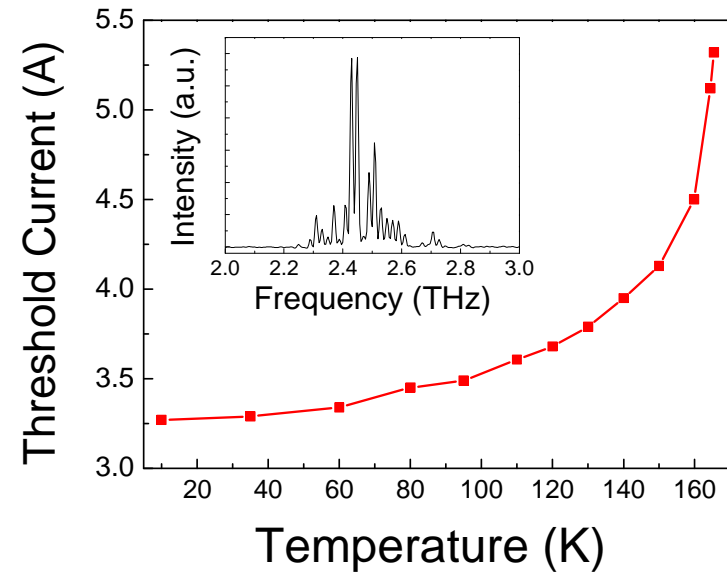
WP1 : Haute Température et Haute Puissance

WP1a : Haute Temperature

Etat de l'art des LCQs



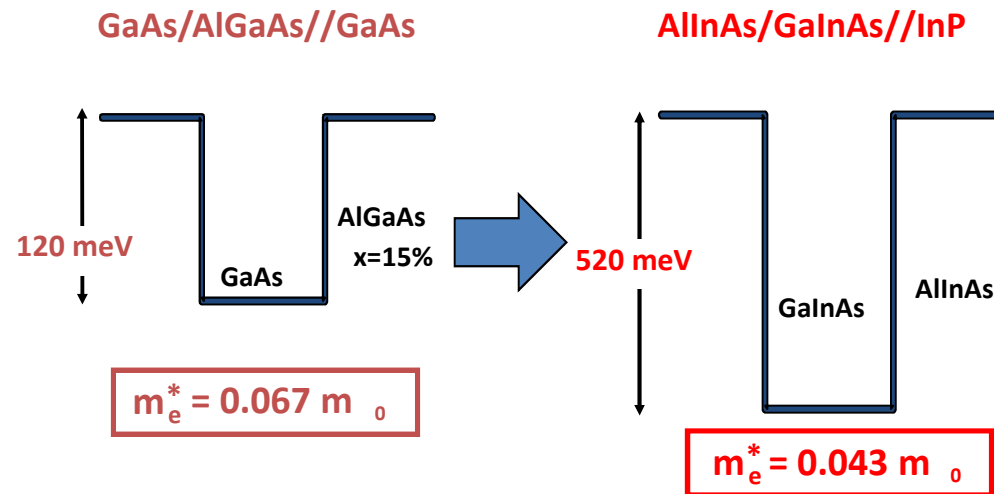
LO phonon depopulation based
bandstructures



Fonctionnement des Lasers jusqu'à
165K à 2.5THz

WP1a : Haute Température

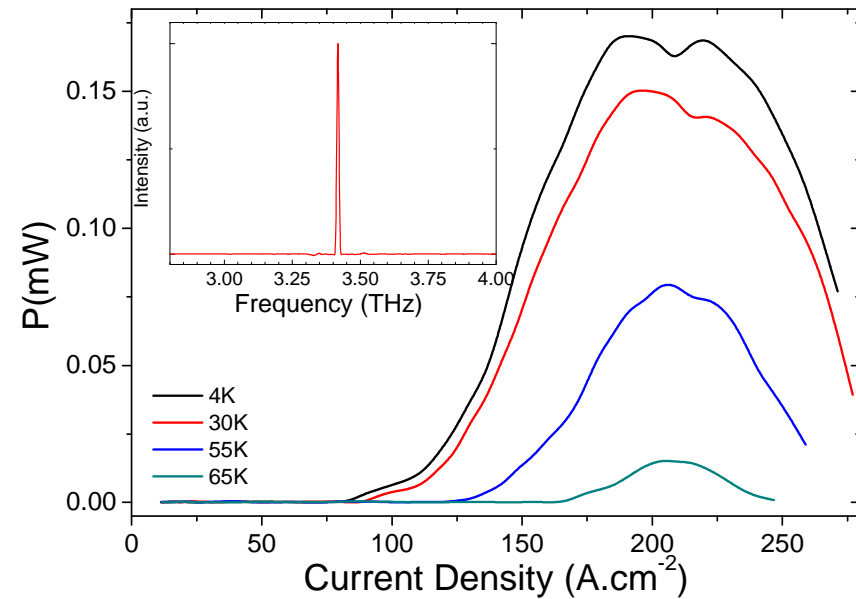
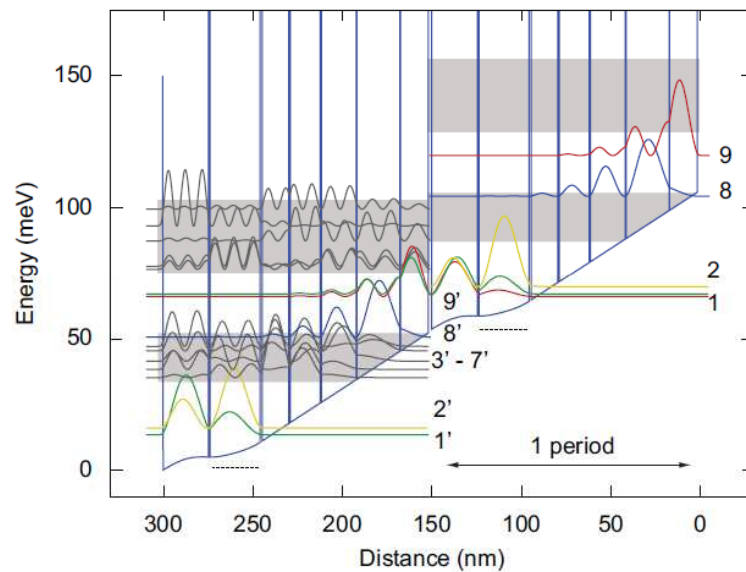
Nouveau matériau: InGaAs/Al(Ga)InAs



Faible masse InGaAs – augmentation du gain

WP1a : Haute Temperature

InGaAs/AlInAs : Nouveaux Lasers réalisés



(Après Fischer *et al*, J. Cryst. Growth **311** (2009))

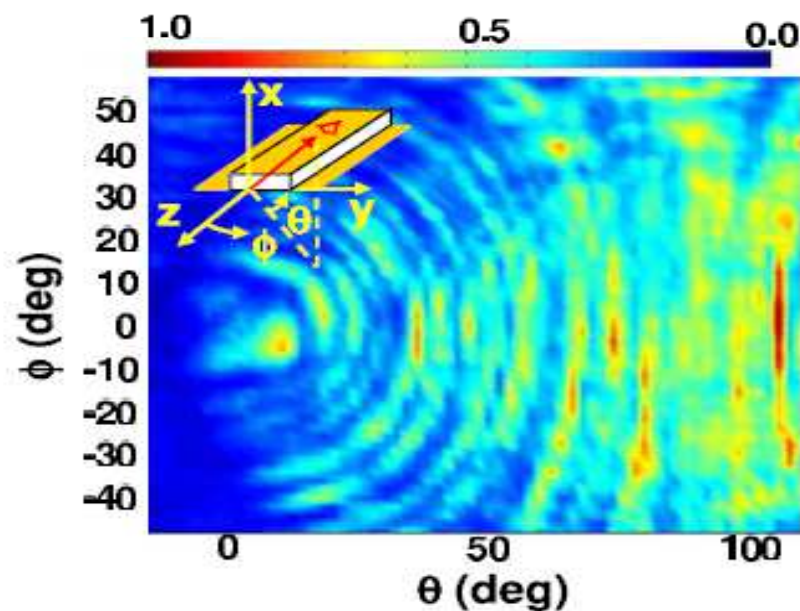
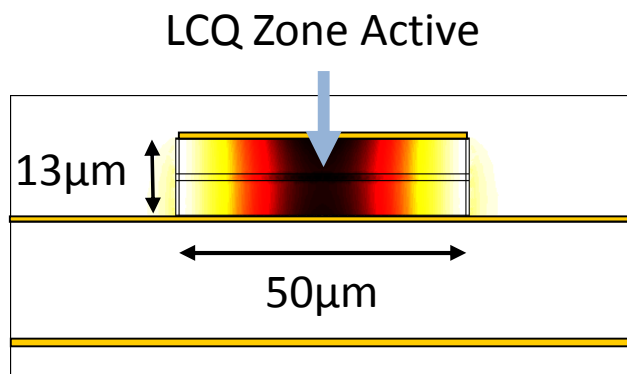
Premier tentative –
Optimisation de croissance

WP1b – Puissance/Profil de Rayonnement THz

But : Améliorer les propriétés optiques des LCQs THz

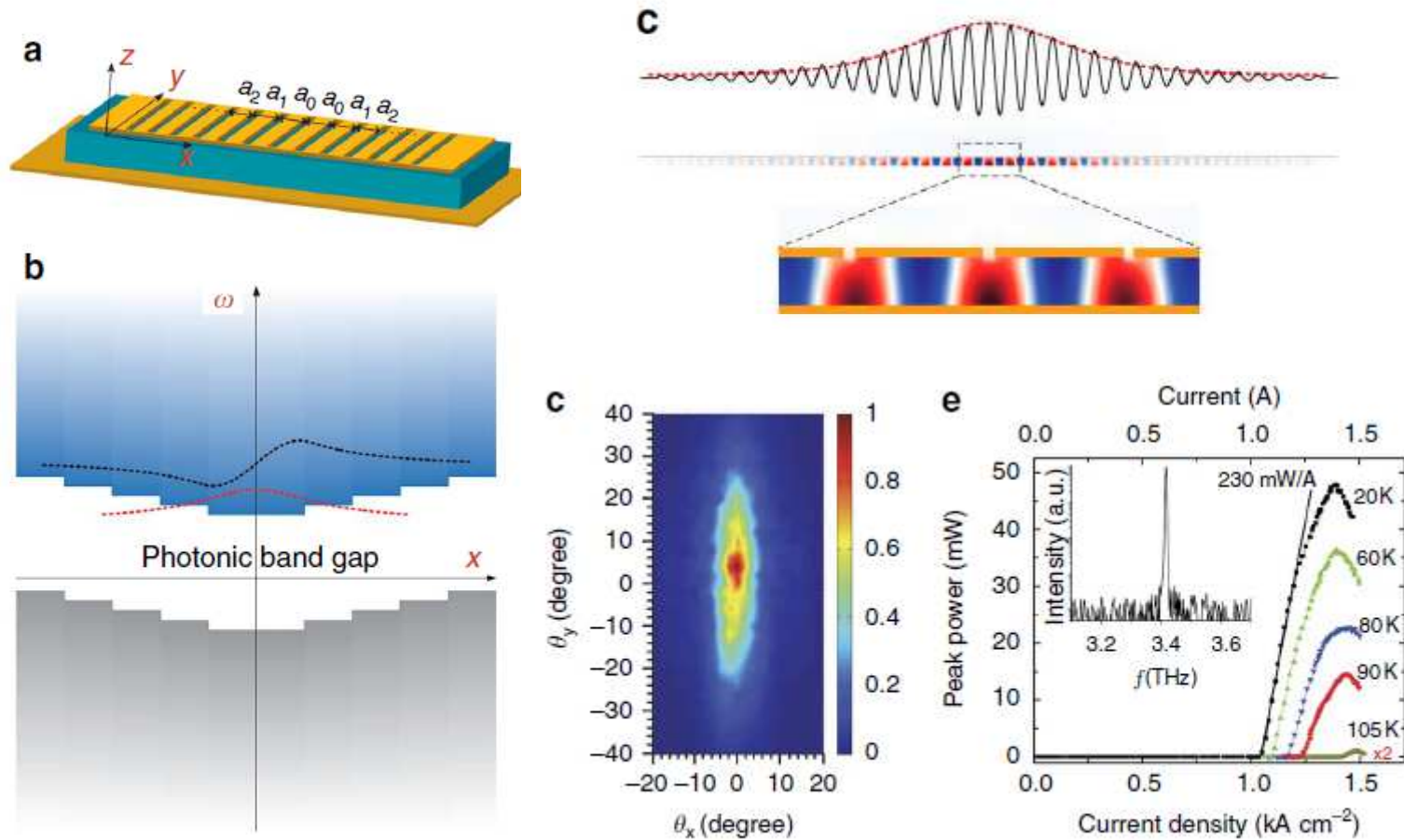
Guide Double métal – confinement excellent

Problèmes : Faible puissance émise + mauvais profil du faisceau



WP1b – Puissance/Profile de Rayonnement THz

Structures Photoniques “Graded” – Forte puissance et bon champ lointain



G. Xu *et al*, *Nature Comm*.

DOI: 10.1038/ncomms1958 (2012).

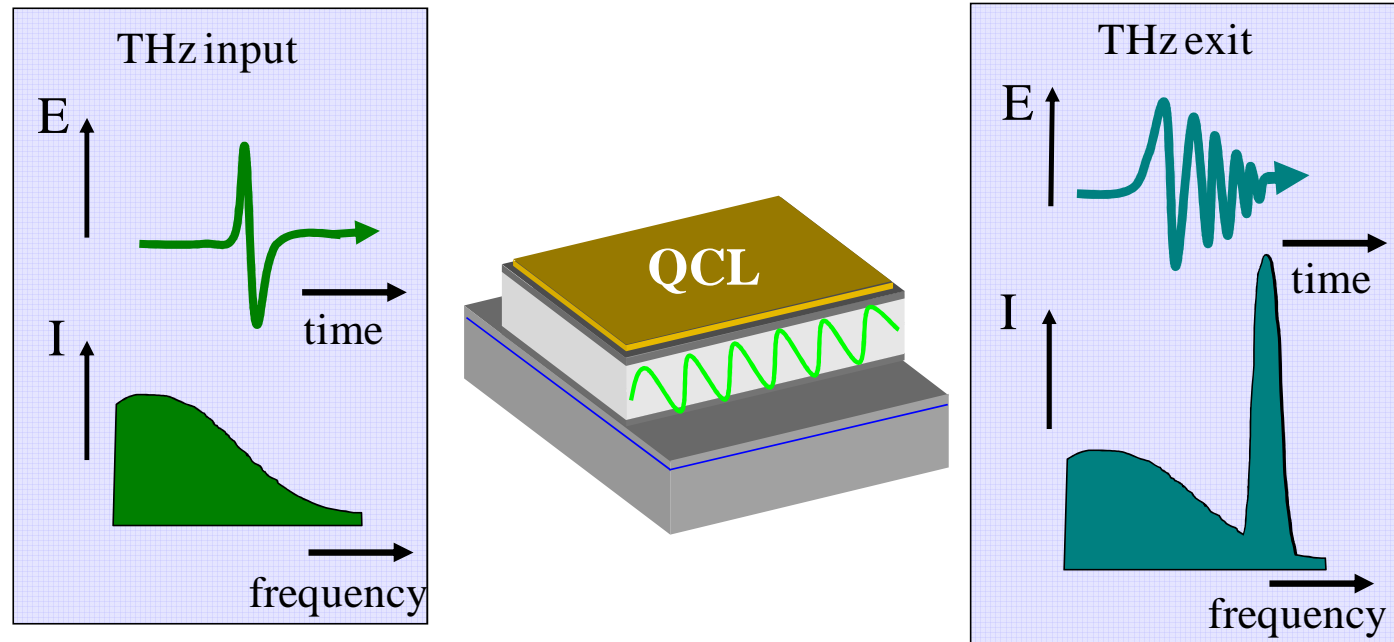


WP2 : Gain et Dynamique

WP2: Gain et Dynamique

*But : Gain Spectral et réponse ultra-rapide avec
le spectroscopie THz résolue en temps*

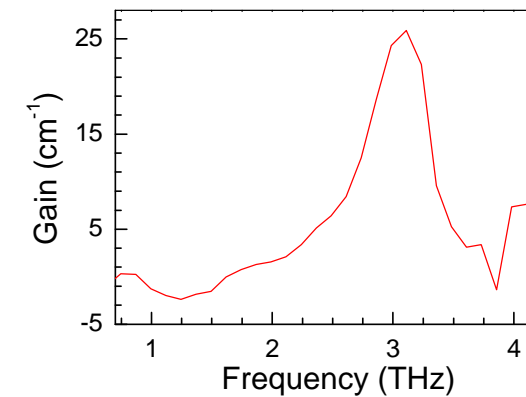
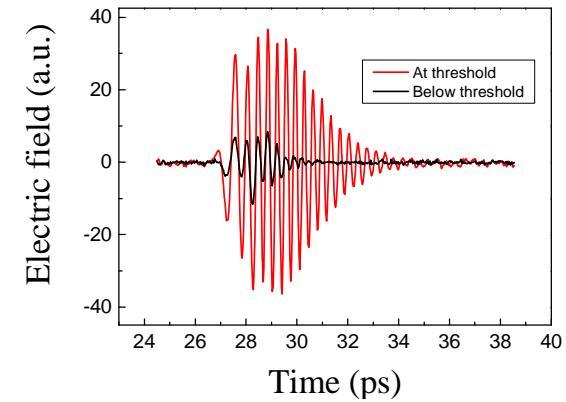
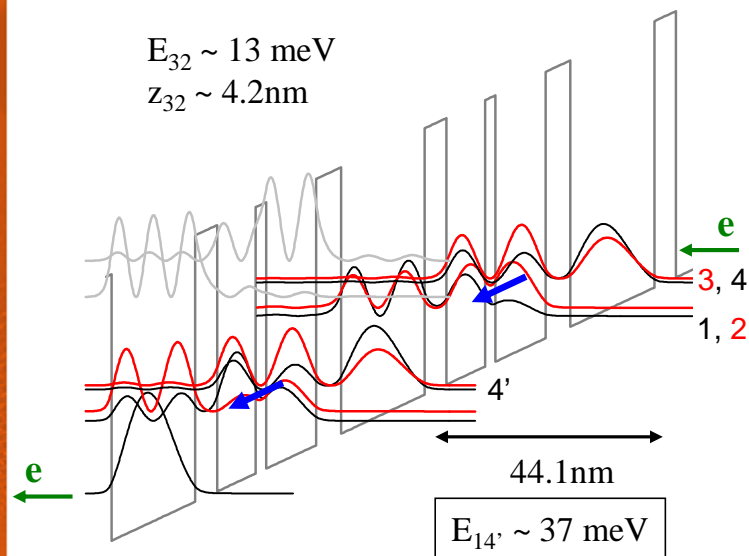
Impulsions THz utilisées pour déterminer le gain spectral



Accès au gain, pertes, structure de bande et dynamique

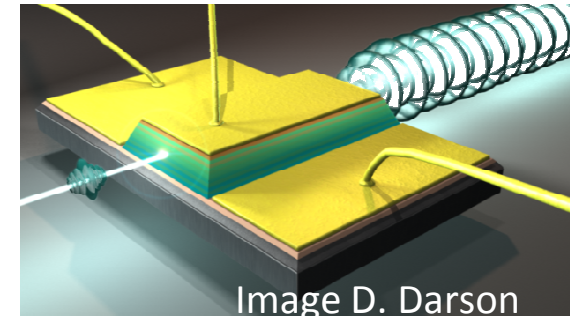
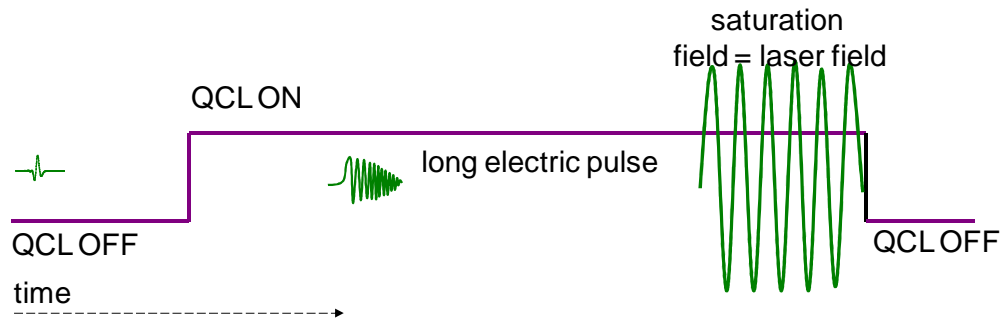
WP2: Gain et Dynamique

Gain Spectral des LCQs à l'état de l'art



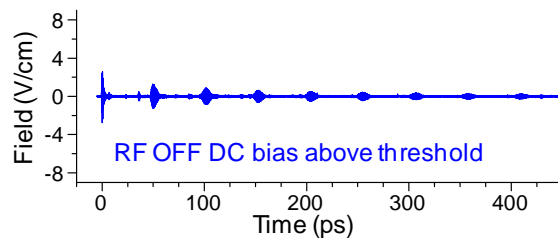
- N. Jukam, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 251108 (2009).
- J. R. Freeman, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 051120 (2010).
- J. R. Freeman et al, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 241108 (2011).

WP2: Gain et Dynamique



Deux conditions :

- **Pulse THz injecté > Emission Spontanée**
- **Commutation de gain synchronisée avec l'impulsion injectée**



Saturation de l'amplification –

“Injection seeding” de LCQs

D. Oustinov,
Nature Comm.

DOI:
1038/ncomms1068
(2010).

WP2: Gain et Dynamique

Injection Seeding Ultra-rapide – Emission LCQ résolue dans le domain temporel

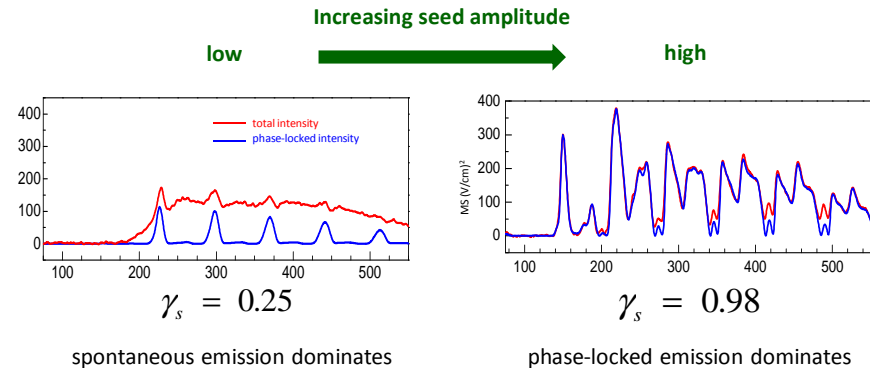
Cohérence ? Niveau de 'seeding'

$$\gamma_s(\tau) = \frac{\langle P_N(t-\tau) \overline{E_N(t)} \rangle}{\sqrt{\langle P_N^2(\tau) \rangle \langle E_N^2(\tau) \rangle}}$$

phase-locked field
total field

$\gamma_s \rightarrow 0$ Emission verrouillée à 0%

$\gamma_s \rightarrow 1$ Emission verrouillée à 100%

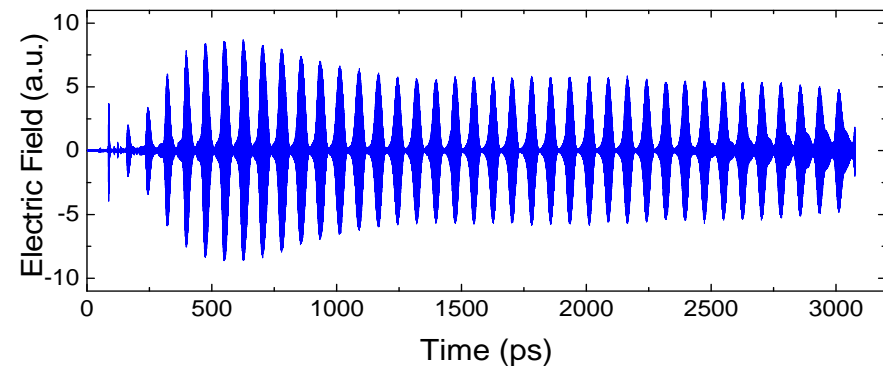


Almost all the QCL field can be phase-locked:
perfect seeding regime!

Maysonnave et al. Opt. Exp. 20, 15 (2012)

Modelocking – Génération d'impulsions THz

- **Modelocked LCQs – THz impulsion intense**
 - Direct Phase imprinting (Maussang et al, Opt. Express **20**, 1662 (2012))
 - Active modelocking (Freeman et al, Appl. Phys. Lett. Accepted for publication)





WP3 : Développements Théoriques

WP3: Développements Théoriques

Modélisation du transport électronique dans les QCLs

Phénomènes physiques principaux:

- Effet tunnel résonant
- Relaxation électronique (émission de phonons optiques, désordre d'alliage, rugosité d'interface...)
- Elargissement des niveaux d'énergie
- Effet de la température (statistique des électrons)
- Emission stimulée



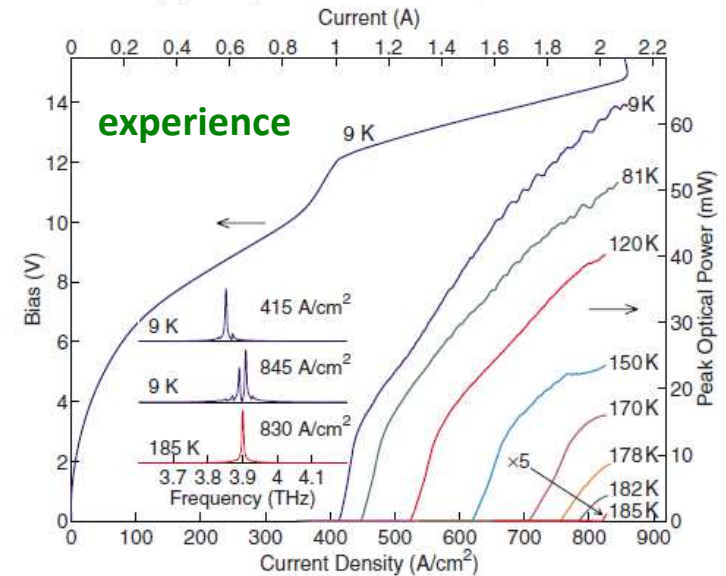
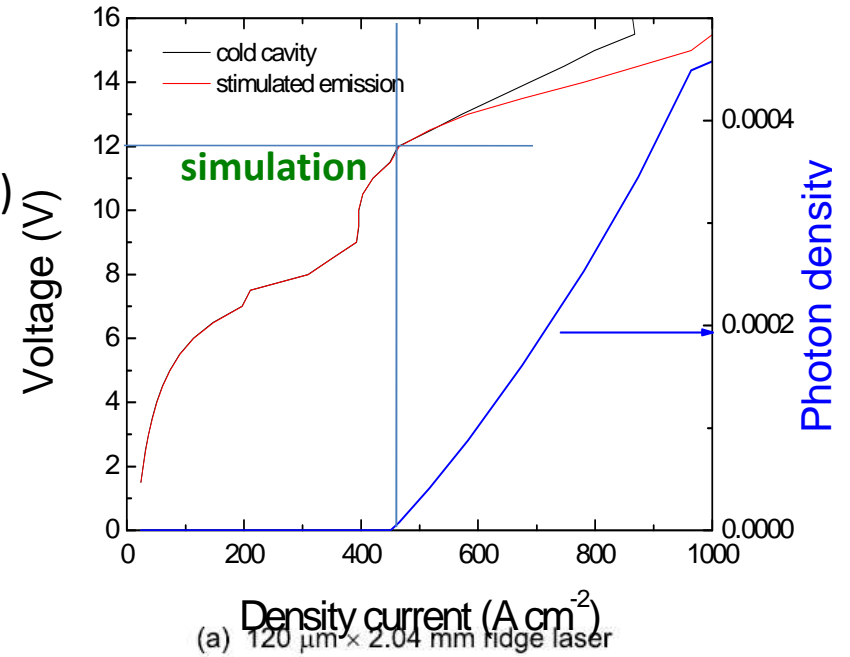
Formalisme de la matrice densité

Utilisé déjà par plusieurs groupes pour modéliser les lasers à cascade quantique (ETH, MIT, NRC)

WP3: Développements Théoriques

- ✓ Temps de relaxation (LO & LA phonon, rugosité d'interface, électron-électron,...)
- ✓ Densités de populations
- ✓ Caractéristiques électriques (V-I)
- ✓ Caractéristiques optiques (L-I)
- ✓ Spectre de gain

Gain spectral

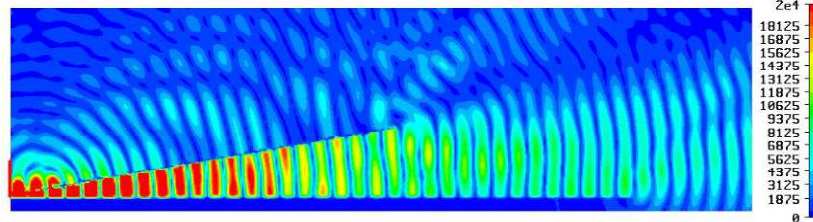
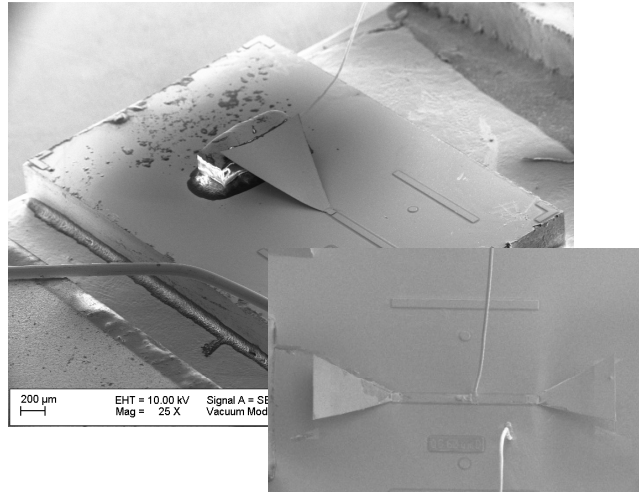




WP4 : Développements Technologiques

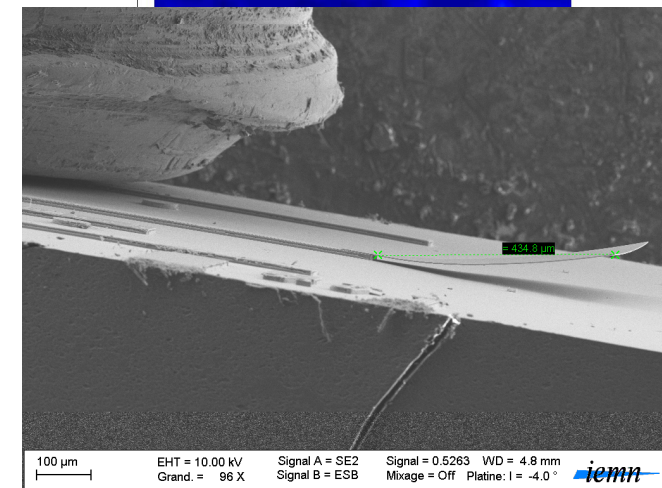
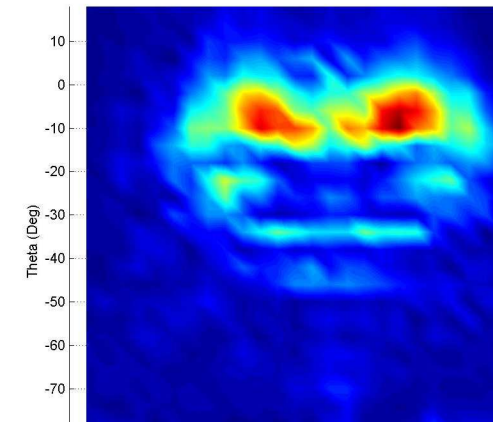
WP4 : Développements Technologiques

Techniques de couplage THz:



Simulations électromagnétique de propagation et profil du mode

- L. Prissette et al, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **21**, 49 (2011).
- E. Peytavit et al, *Electronics Letters* **47**, 453 (2011).
- A. Beck, et al, *C. R. Physique* **11**, 472 (2010).



Epaisseur des couches épitaxiées = 10 μm

Technologie validée (sur couche GaAs standard)

Publications et Conférences

| | | Publications multipartenaires | Publications monopartenaires |
|----------------------|--|---|---|
| International | Revue à comité de lecture | 14 | 6 |
| | Communications (conférence) | 22 invité 17 contributions | 1 contributions |
| France | Communications (conférence) | 4 | |

Conclusions

- (i) Réalisation de LCQs “State-of-the-art” et avec InGaAs/AlInAs**
- (ii) Extraction de puissance et bon profil du faisceau avec les cristaux photoniques et les antennes cornets**
- (iii) Détermination du gain spectral des LCQs. Dynamique du gain par commutation – Injection seeding, coherence et modelocking.**
- (iv) Formalisme de matrices densité pour la simulation de transport et du gain.**
- (v) Développement des couches THz AR, antennes cornets monolithiques sur des couches épitaxiées épaisses**

À Suivre

- **WP1a. Haute temperature**
 - Nouvelles structures (population non-resonante et designs de WP3)
 - Laser InGaAs optimisé avec barrières AlGaInAs
- **WP1b. Extraction de puissance et profil du faisceau**
 - Nouvelles antennes cornets
 - Cristaux photoniques avec des designs améliorés
- **WP2. Dynamique du gain**
 - Couplage des impulsions THz avec des guides DM
 - Evolution du gain aux hautes temperatures
 - Dynamique par des mesures de saturation
- **WP3. Développements Théoriques**
 - Effets de Temperature sur le transport (Monte Carlo)
 - Comparaison avec les expériences (WP1 et WP2)

