



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Mesure de température de composants électroniques par spectrométrie Raman

B. Boudart

bertrand.boudart@unicaen.fr

Avec l'aide de Y. Guhel (MCF HDR) et de nos anciens doctorants F. Berthet et G. Brocero



Normandie Université



Plan

Introduction

Présentation de la spectroscopie Raman (SR)

Exemples d'application

Effet de la température sur les spectres

Technique de mesure de température par SR

Présentation de résultats

Conclusion

Le GREYC en quelques chiffres

- 4 tutelles : Unicaen, ENSICaen, CNRS et Normandie Université
- Plus grand laboratoire normand : environ 200 personnes dont 90 chercheurs ou enseignants-chercheurs
- Domaine des sciences du numérique
- Composé de 7 équipes dont l'équipe électronique



Mon activité de recherche est basée à Cherbourg

Introduction

Les composants électroniques présentent :

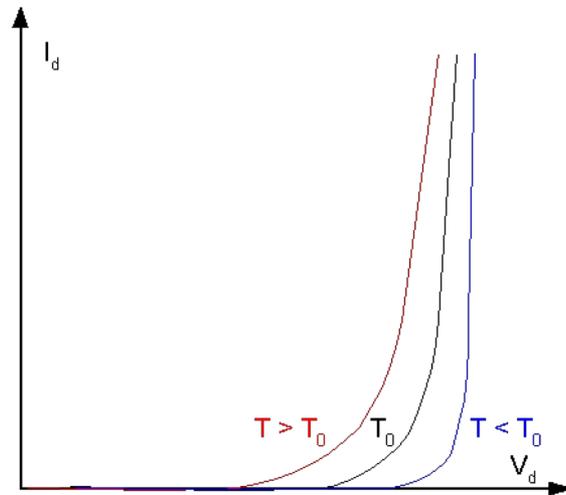
- ↳ Densité de puissance importante
- ↳ Température interne élevée pour certains d'entre eux

La température des composants devient un facteur clé

- ↳ Diminution des performances
- ↳ Accélération du vieillissement

Nécessité d'estimer la température au sein des composants mais comment ?

- Avec des thermocouples ? Dimension ?
- Avec des cristaux liquides ? Précision ?
- Avec des mesures électriques ? Ex à partir d'une diode



Caractéristique d'une diode en direct

$$I = I_s \left(\exp(eV/\eta kT) - 1 \right)$$

I dépend de la température T

On peut enregistrer I(V) à différentes températures imposées : calibration.

En fonctionnement, connaissant I(V) on peut remonter à T.

➔ On obtient une température **moyenne** du composant

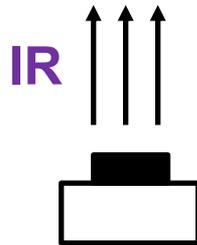
Introduction

Si on veut estimer la température **locale** au sein des composants



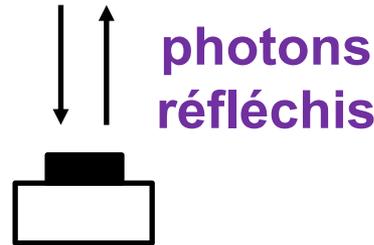
Méthodes optiques

Thermographie IR



- Très utilisée
- Limitée spatialement à $\sim 3 \mu\text{m}$

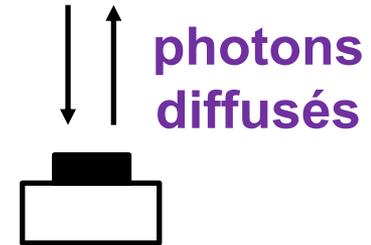
Thermoréflectance



Surtout les métaux !

Limitées spatialement à $\sim 1 \mu\text{m}$

Spectroscopie Raman



Surtout pas les métaux !



Meilleure résolution spatiale

$$\lambda < \lambda_{\text{IR}}$$



Lumière visible voire UV

Spectroscopie Raman : principe

En 1928, C. Raman découvre l'effet « Raman » qui lui a valu le prix Nobel de physique dès 1930.



Il a tout d'abord enregistré le spectre d'une lampe à vapeur de mercure.

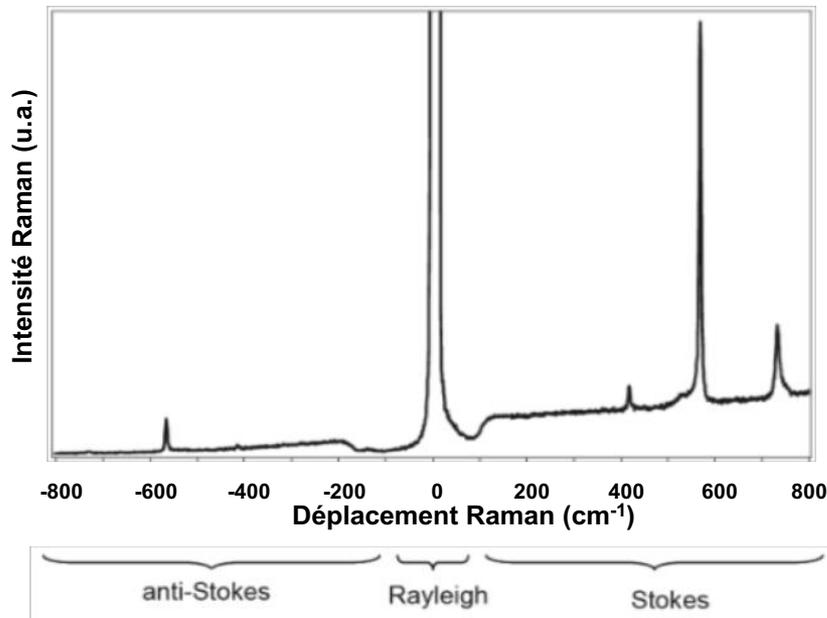
En éclairant du benzène avec cette même lampe il a obtenu un spectre différent mais reproductible.

En changeant le milieu éclairé (toluène), il a obtenu un autre spectre tout aussi reproductible.

La lumière est donc diffusée par le milieu traversé et le spectre obtenu est caractéristique de ce milieu : c'est la diffusion Raman.

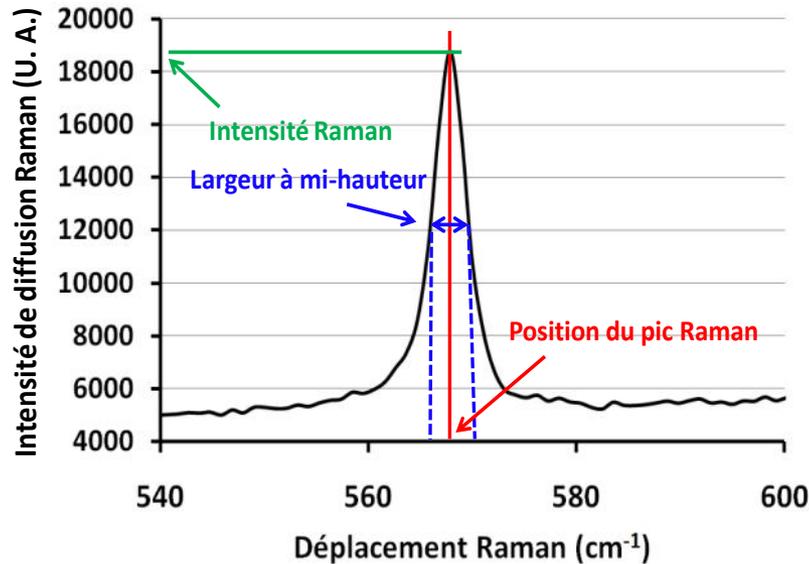
· Indian J. Phys. 2 399-419 (1928)

La diffusion de la lumière par un matériau se fait selon 3 processus :



- La diffusion Rayleigh sans changement de longueur d'onde
Elle sert de référence en énergie.
- La diffusion Stokes (10^{-6} fois plus faible en intensité)
- La diffusion anti-Stokes : il y a une symétrie du spectre par rapport à la Rayleigh mais avec encore moins d'intensité.

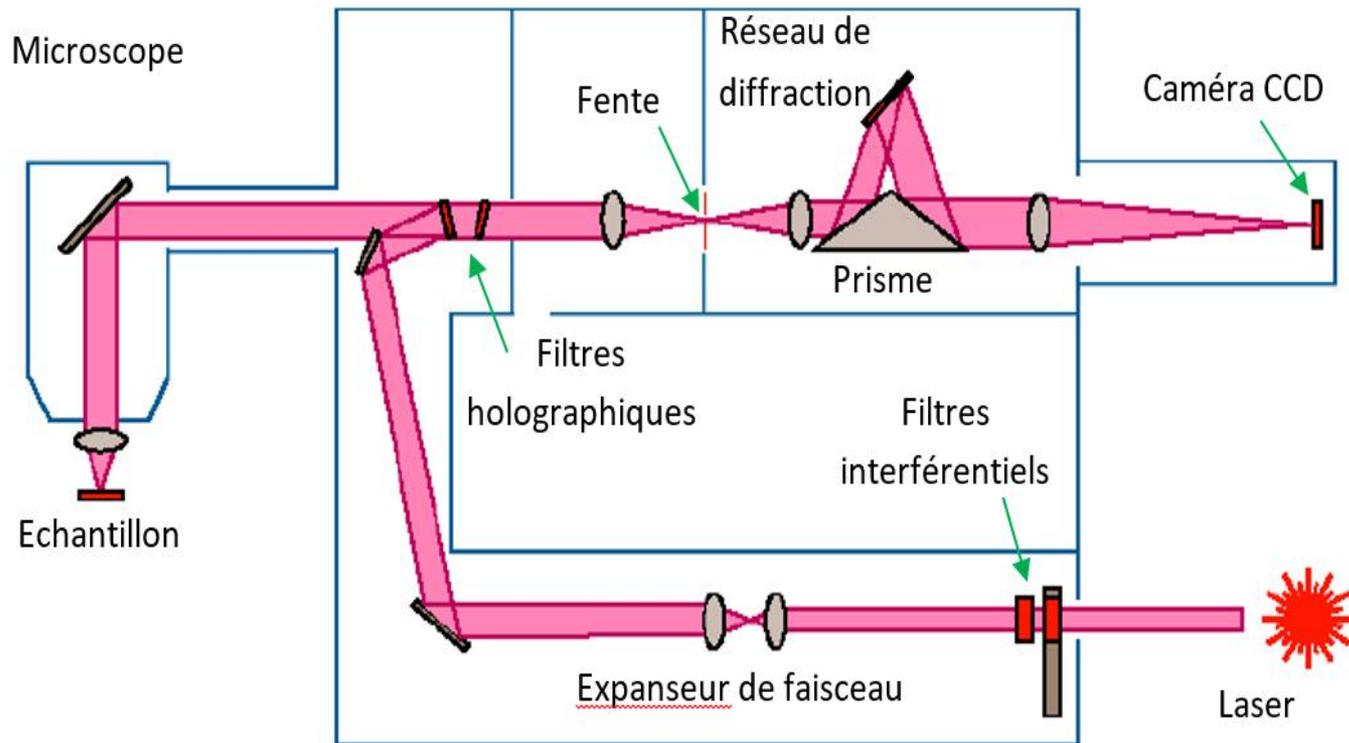
Informations d'un spectre



A une température donnée

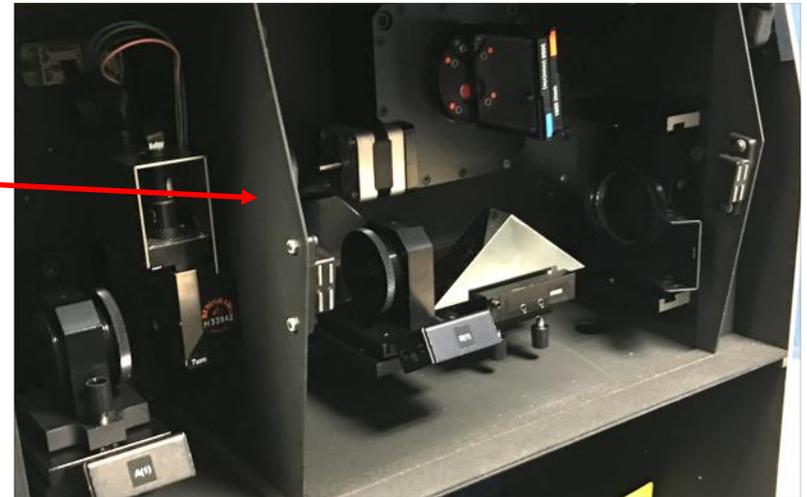
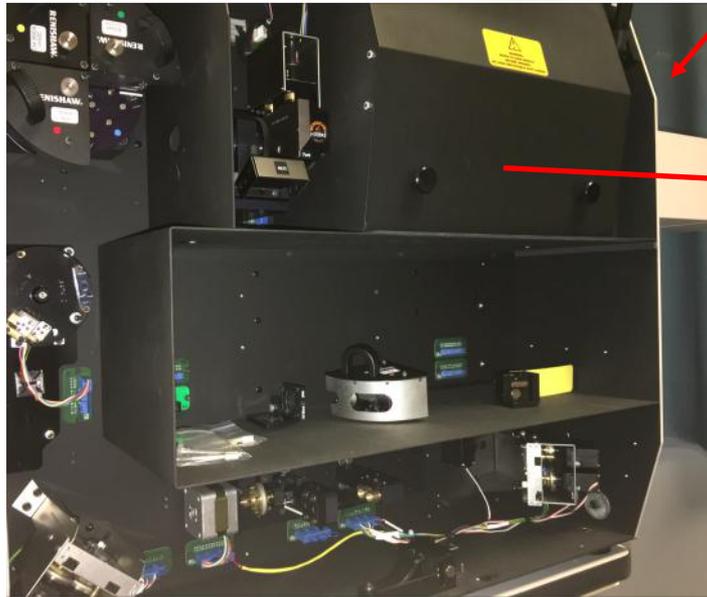
- La position des pics permet d'identifier le matériau caractérisé
- La position des pics dépend de l'état de contrainte du matériau
- La largeur à mi-hauteur des pics permet d'avoir des informations sur la qualité cristalline du matériau étudié
- L'amplitude des pics dépend du matériau mais aussi de la configuration, de la durée d'enregistrement et de la puissance du laser

Le principe



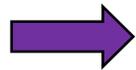
S R : notre instrument

La réalité !



S R : notre instrument

- Lasers : 633, 514 et 325 nm
- Optique dédiée visible ou UV
- Filtres Edge et Notch
- Réseaux 1800 et 3600 traits/mm
- Objectifs : x5, 20, 50, 100 (visible) et x40 (UV)



Résolution spatiale ~ 1 μm

Exemples d'application

Cette technique est très utilisée en :

- Pharmacie
- Domaine du vivant (cellules, micro organismes,...)
- Chimie (liquides, gaz, poudres, polymères,...)
- Physique et microélectronique (matériaux massifs, couches minces, effets de contraintes, implantation ionique, recuit, température, ...)

Avec quelques illustrations :

Si l'exposé vous donne déjà mal à la tête : spectre de l'aspirine

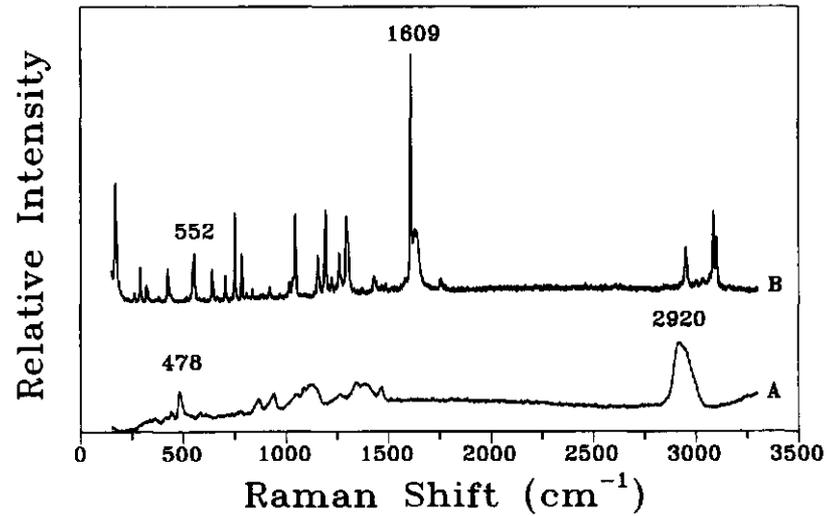
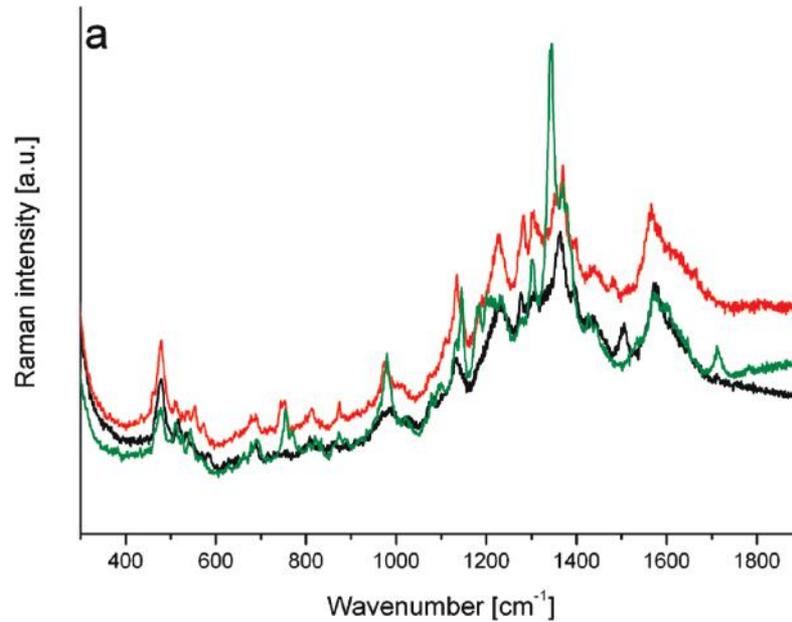


Fig. 1. Raman spectra of tablets from (A) maize starch; (B) pure aspirin. Spectra were excited at 20°C; $\lambda_0 = 488.0 \text{ nm}$; spectral slit width, 1 cm^{-1} .

Christos G. Kontoyannis^{1*} and Malvina Orkoula *Talanta*, Vol. 41, No. 11, pp. 1981–1984, 1994

3 spectres mesurés sur une même cellule de *Legionella pneumophila*



Maria Knauer, Natalia P. Ivleva, Xiangjiang Liu, Reinhard Niessner, and Christoph Haisch*

Anal. Chem. 2010, 82, 2766–2772

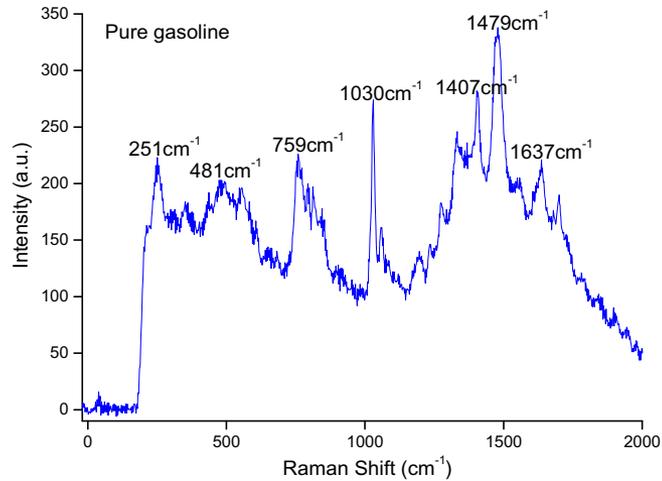


Fig. 3. Raman spectrum of pure gasoline.

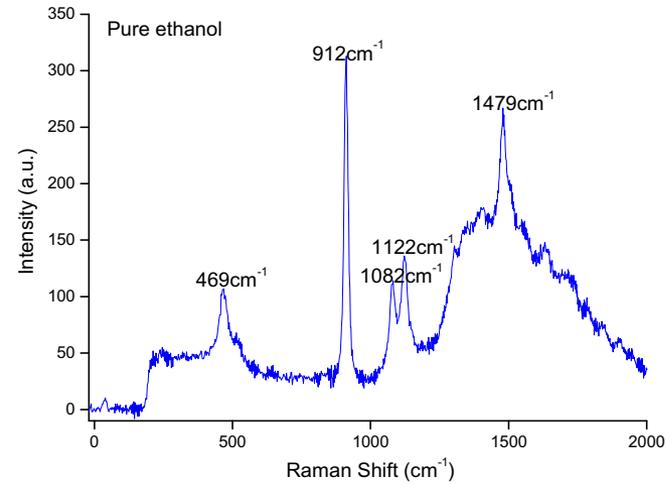
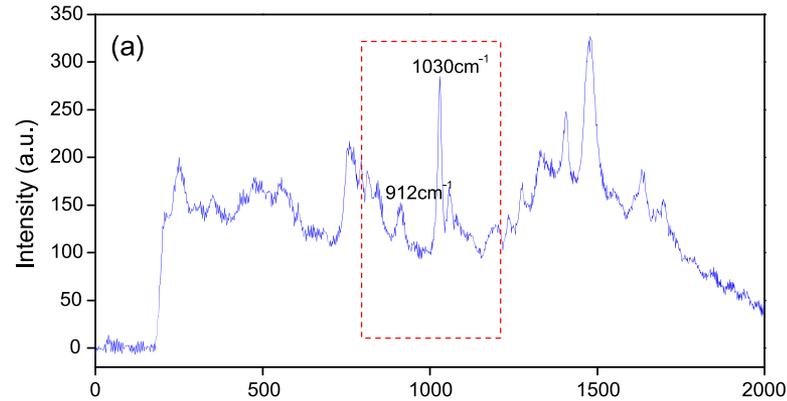


Fig. 4. Raman spectrum of pure ethanol.

Carburant E10



Qing Ye^{a,*}, Qinfeng Xu^a, Yongai Yu^b, Ronghui Qu^a, Zujie Fang^a

Optics Communications 282 (2009) 3785–3788

Domaine des matériaux



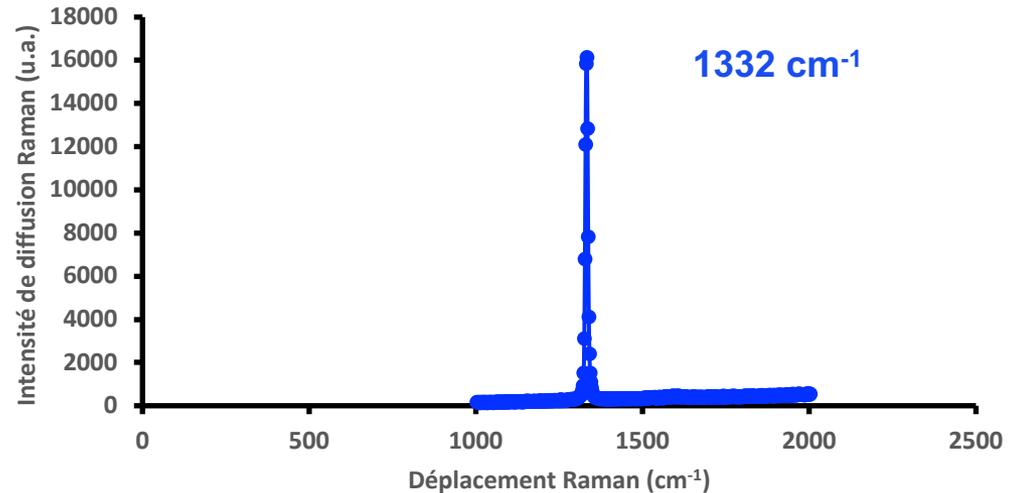
Les diamants que j'ai reçus

Une question fondamentale pour les femmes et pour les hommes :

Les diamants que j'ai offerts

Une analyse rapide et (normalement) non destructive est possible par spectroscopie Raman !

Sont-ils vrais ?



Si vos bijoux donnent ce spectre alors c'est bien sinon...

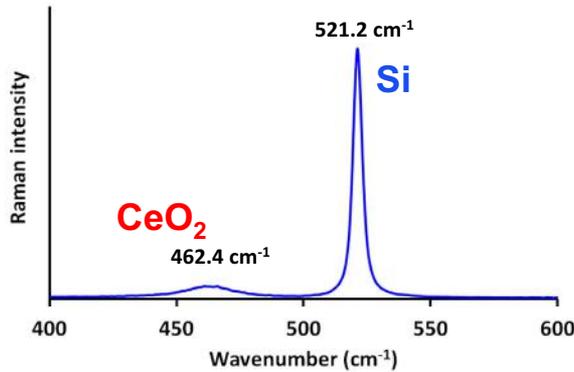


Fig. 2. Raman spectrum of a CeO₂ film grown at 600 °C on a (111) Si substrate.

Y. Guhel*, J. Bernard, B. Boudart
 Microelectronic Engineering 118 (2014) 29–34

Suivi in operando du recuit d'une couche mince de CeO₂ sur Si

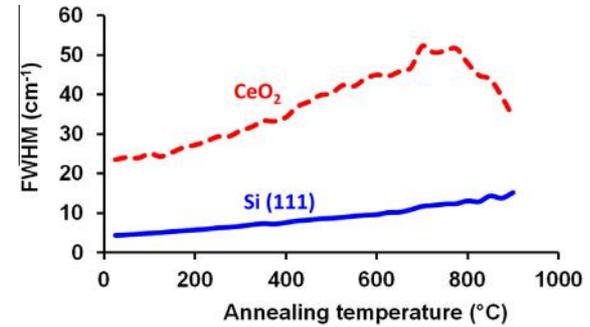


Fig. 5. Evolution of the Raman peaks Full Width at Half Maximum, which are related to the silicon substrate (solid line) and to the CeO₂ layer (dashed line) versus annealing temperature.

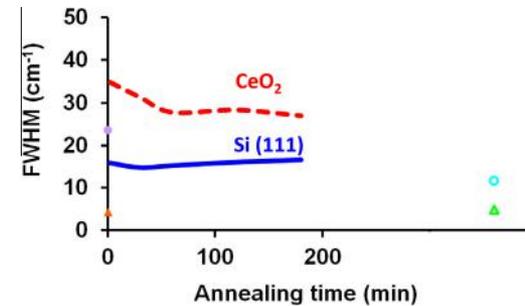


Fig. 7. Evolution of the Raman peaks Full Width at Half Maximum, which are related to the silicon substrate (solid line) and to the CeO₂ layer (dashed line) versus annealing time for an annealing temperature of 900 °C after the rise of the temperature up to 900 °C. The Raman peak FWHM related to the silicon substrate before and after annealing is presented by the symbol ▲ and △, respectively. The Raman peak position related to the CeO₂ layer before and after annealing is presented by the symbol ● and ○, respectively.

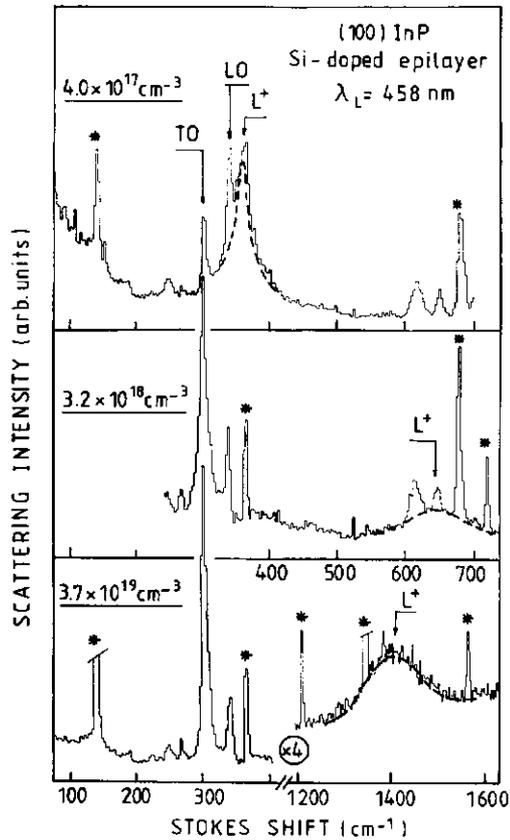


Fig. 1. RS spectra of epitaxial InP layers with different Si concentrations. Asterisks stand for argon emission lines used for the purpose of calibration.

B. Boudart ¹, B. Prévot and C. Schwab

Applied Surface Science 50 (1991) 295–299

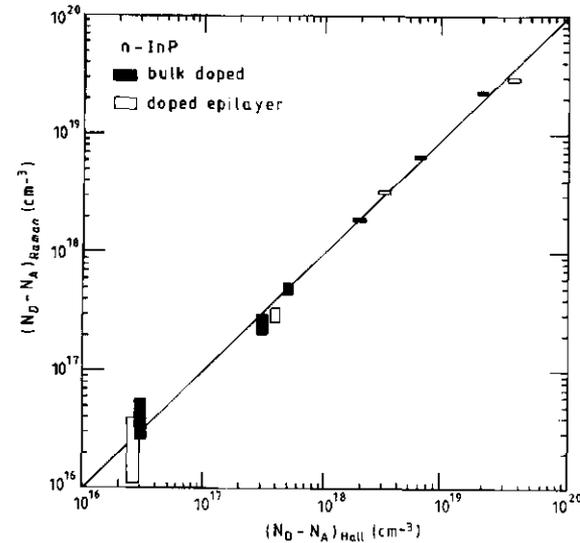
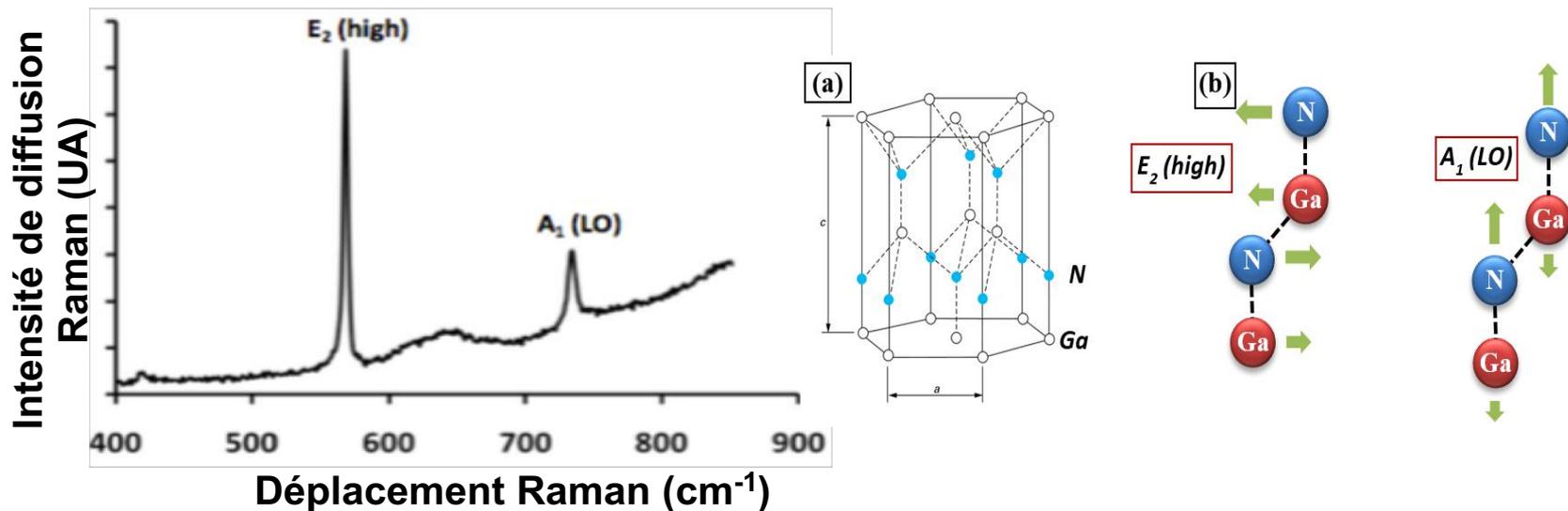


Fig. 3. Diagram of correlation for n-doped InP between carrier concentration values determined either by the classical Hall technique or by the Raman scattering one (Drude theory).

Détermination de la concentration de porteurs libres dans n-InP

On vient de voir quelques spectres d'illustration constitués d'un ensemble de « structures » : **chaque matériau a sa propre signature.**

Un spectre de GaN



On capte la vibration des liaisons

**Noter aussi que LE spectre de GaN n'existe pas !
Cela dépend de la configuration expérimentale.**

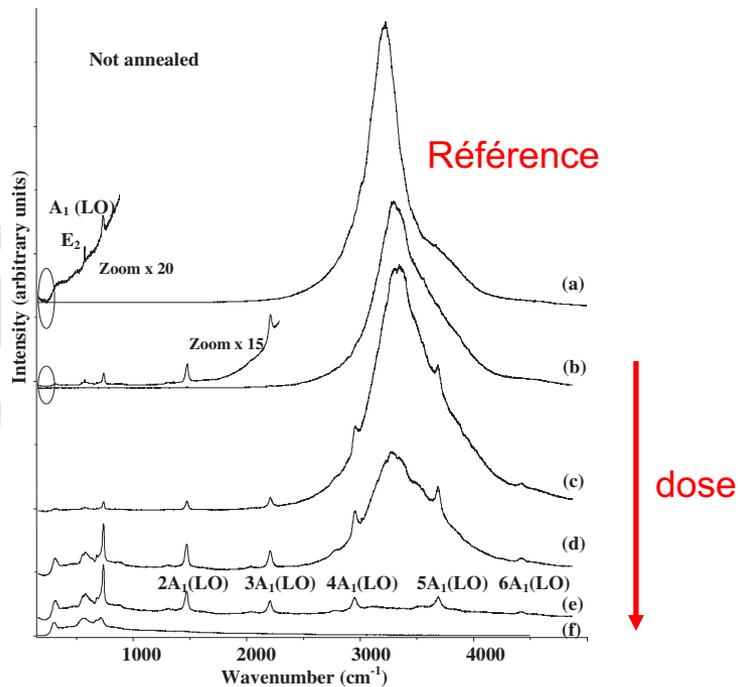


Figure 1. Raman spectra of (a) GaN as reference and samples obtained after 60 keV Mg⁺ ion implantation at doses of (b) 7.5×10^{12} , (c) 1.9×10^{13} , (d) 1×10^{14} , (e) 2×10^{14} and (f) 1×10^{16} cm⁻².

B Boudart¹, Y Guhel², J C Pesant², P Dhamelincourt³ and M A Poisson⁴

J. Phys.: Condens. Matter **16** (2004) S49–S55

Laser UV : photoluminescence et Raman résonnant

Résultats semblables pour l'implantation d'Ar⁺ dans AlGaIn/GaN

J. Phys.: Condens. Matter **17** (2005) 1995–2002

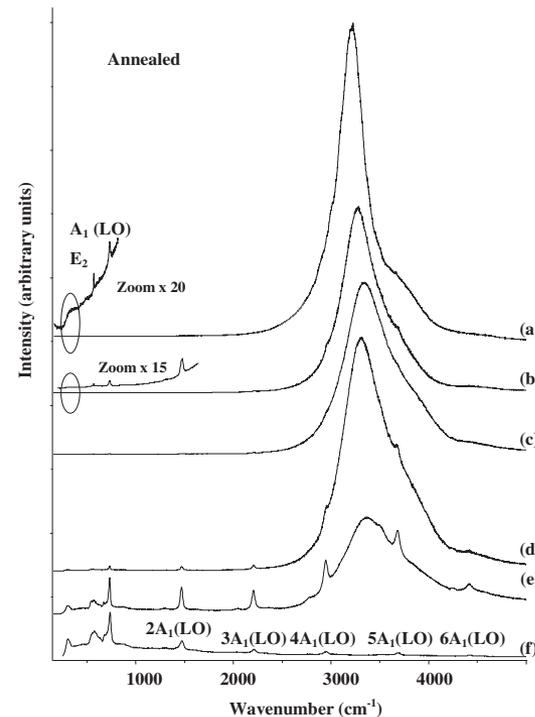
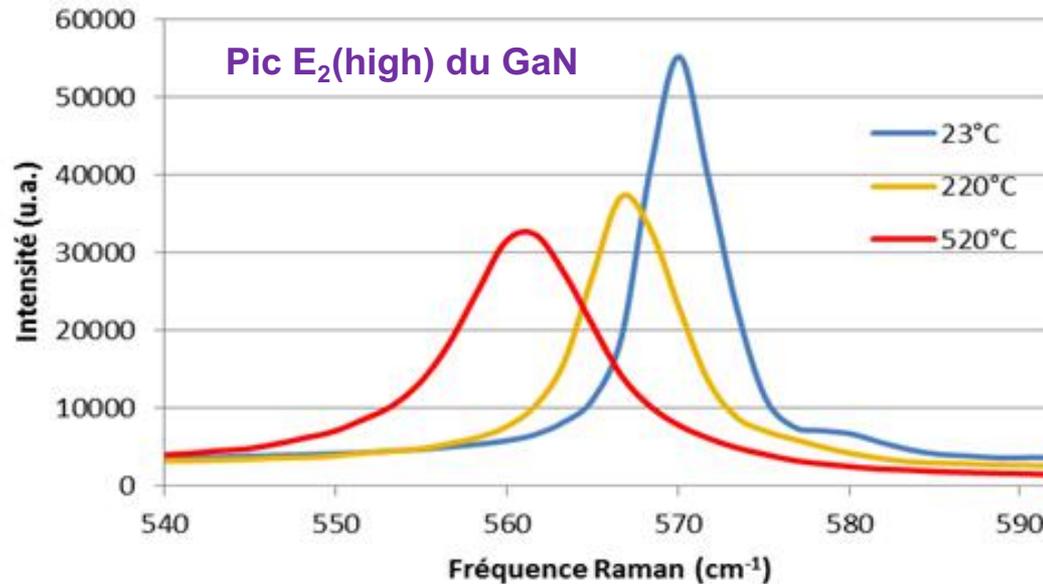


Figure 3. Raman spectra of (a) GaN as reference and samples obtained after 60 keV Mg⁺ ion implantation at doses of (b) 7.5×10^{12} , (c) 1.9×10^{13} , (d) 1×10^{14} , (e) 2×10^{14} and (f) 1×10^{16} cm⁻², and after subsequent annealing at 900 °C for 30 s.

Effet d'implantation ionique de Mg⁺ dans GaN et d'un recuit

Et la température dans tout ça ?



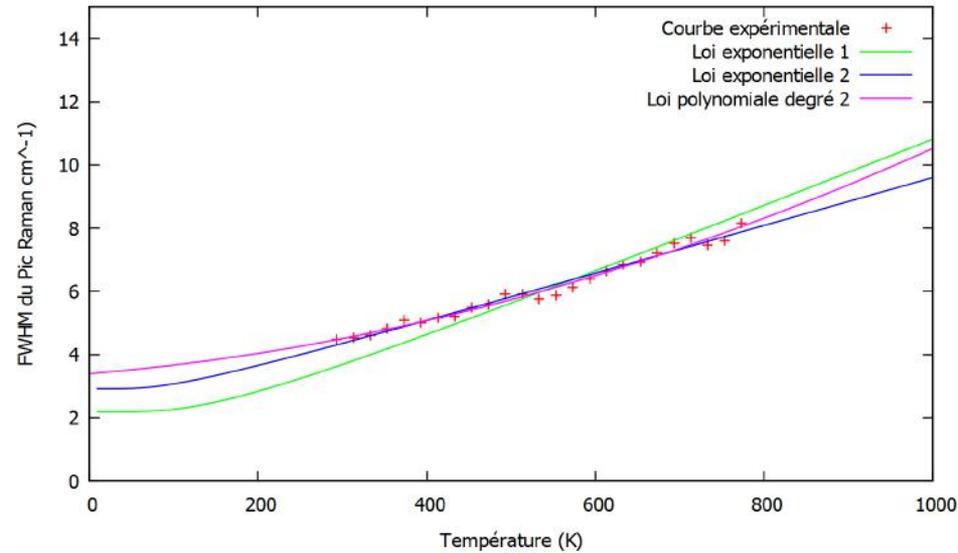
Thèse CIFRE (Thales LAS) de G. Brocero, Normandie Université, juillet 2018

- La position du pic Raman (ω ou ν) diminue avec la température
- La largeur à mi-hauteur du pic Raman (Γ) augmente avec la température
- L'intensité (I) du pic Raman diminue avec la température

Il existe donc 3 façons de déterminer la température

Évolution de Γ

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 \left[1 + \frac{2}{e^{\hbar\omega_0/2k_B T} - 1} \right]$$



Γ ne dépend pas des contraintes

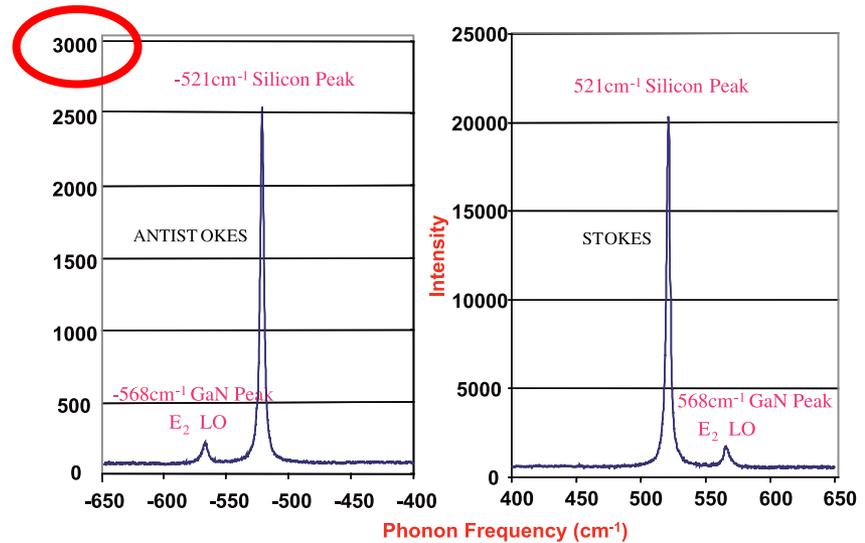


Nécessite une calibration en fonction de la température
Méthode peu utilisée car grande incertitude à « haute »
température : difficile d'évaluer Γ par rapport à la ligne de
base

Évolution de I

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \left(\frac{v_0 + v_v}{v_0 - v_v} \right)^3 e^{-\frac{h v_v}{k_B T}}$$

À T_{amb} !



R.Aubry et al
Eur. Phys. J. Appl. Phys. 30 (2005) 77-82



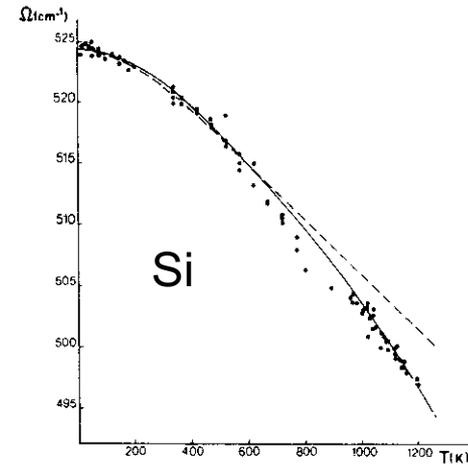
I ne dépend pas des contraintes
Ne nécessite pas de calibration en fonction de la température



I_{AS} faible et diminue fortement quand la température augmente

Évolution de ω

$$\omega(T) = \omega_0 - \frac{A}{e^{B\hbar\omega_0/k_B T} - 1}$$



M. Balkanski et al
Phys. Rev. B 28 (1983) 1928



Très sensible

On ne mesure que la raie Stokes qui est intense



ω dépend des contraintes

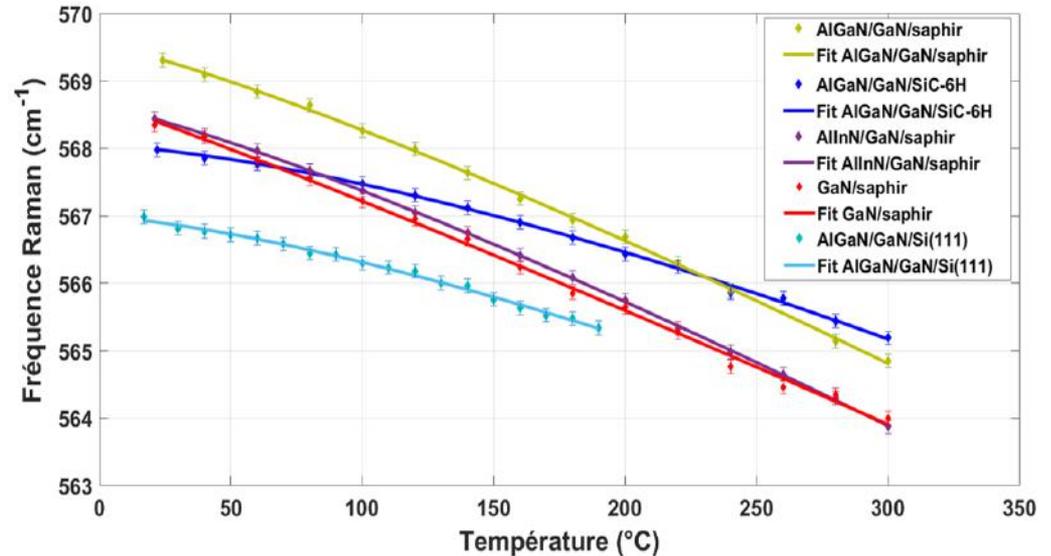
Nécessite une calibration en fonction de la température

C'est cette technique que nous utilisons





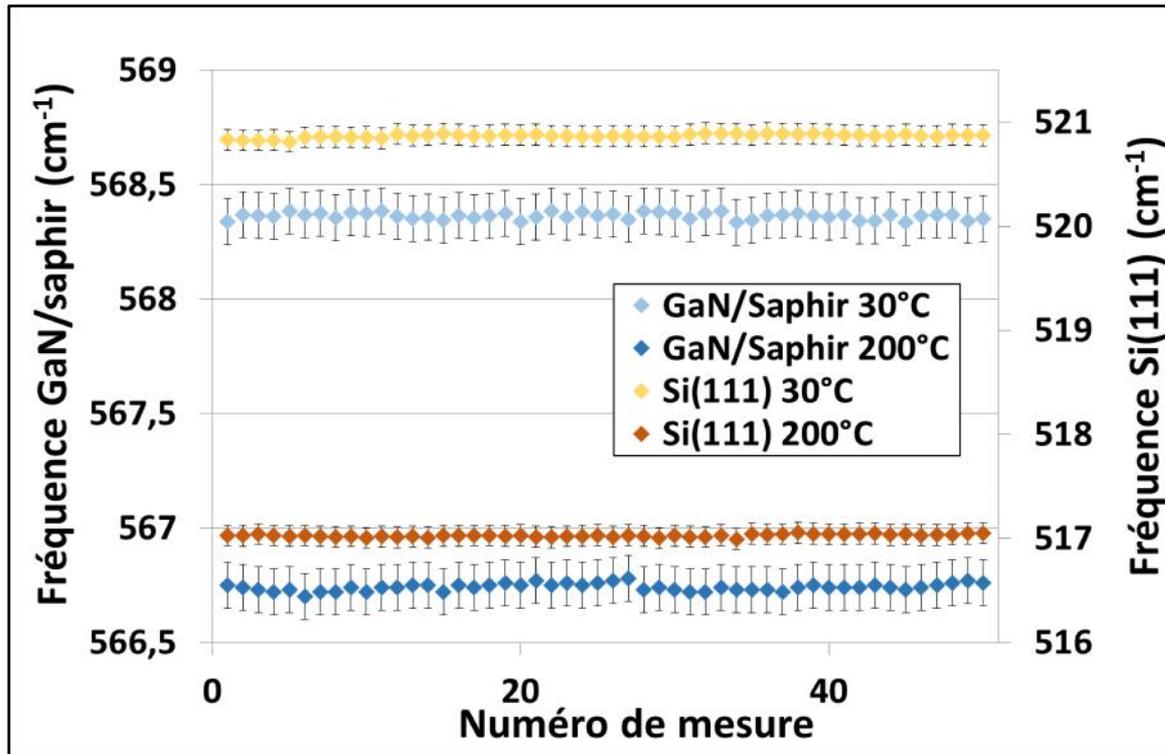
Cellule en température
(LINKAM TS 1500) :



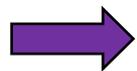
Il n'existe pas de courbe universelle : la courbe dépend du substrat, des matériaux (nature, épaisseur, technique de dépôt,...)

➔ Pour chaque composant à étudier il faut au préalable réaliser cette courbe de calibration sur un composant jumeau.

Évolution de ω

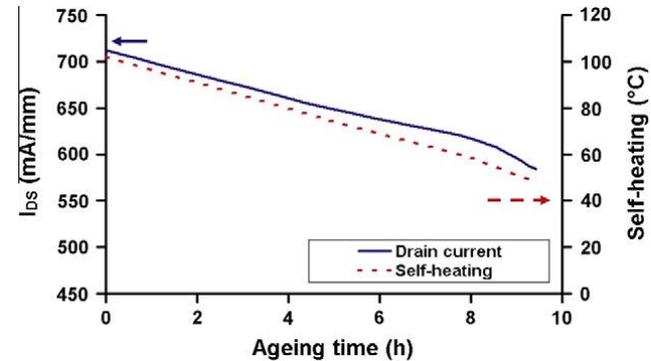
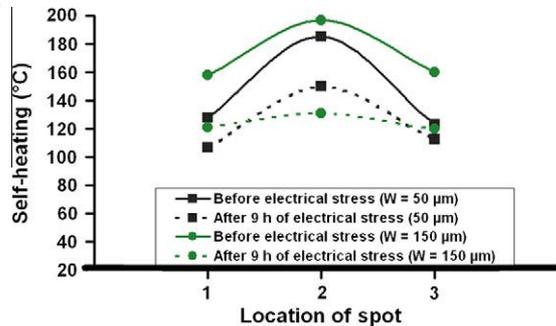
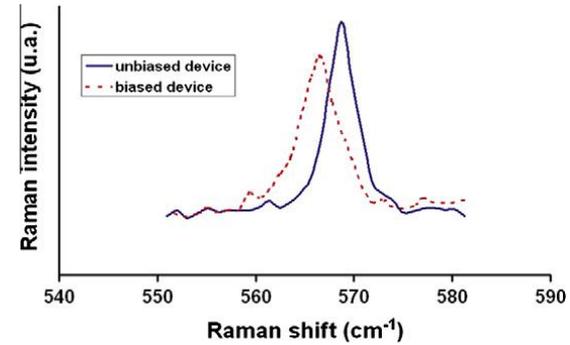
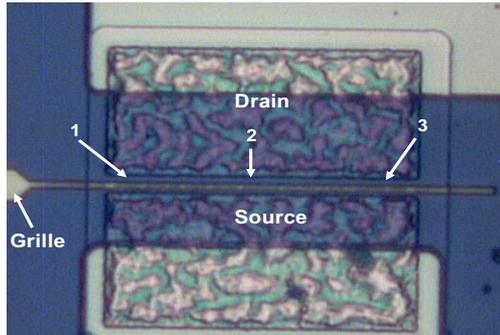


50 mesures de Si et de GaN/saphir à 30 et 200°C



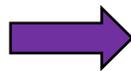
Répétable

Résultats

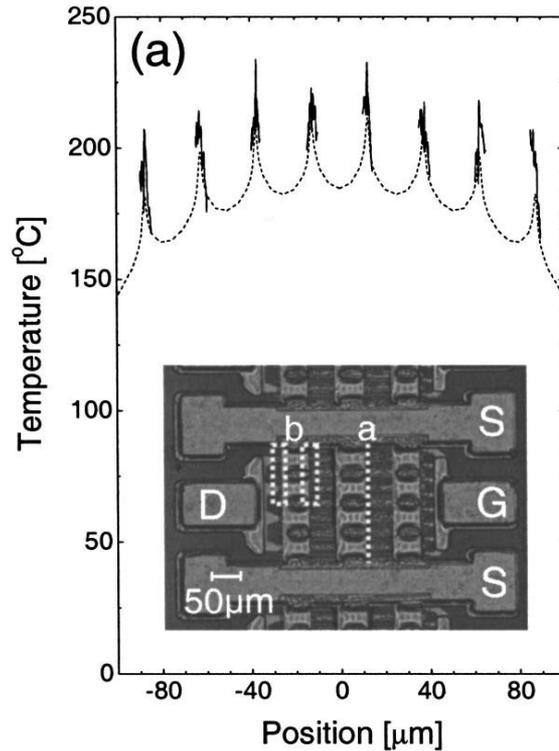


F. Berthet^{a,b,*}, Y. Guhel^a, H. Gualous^a, B. Boudart^a, J.L. Trollet^b, M. Piccione^b, C. Gaquière^c

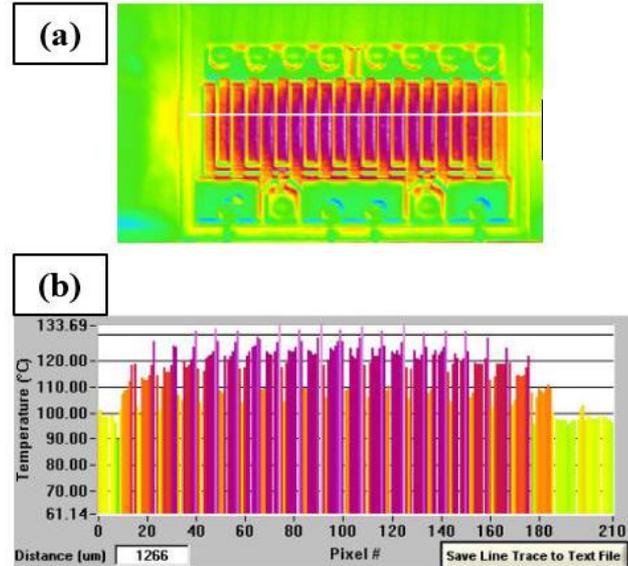
Microelectronics Reliability 51 (2011) 1796–1800



**Inhomogénéité de la température
le long d'un doigt de grille
et dans le temps**

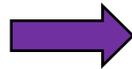


M. Kuball et al
APL 82 (2003) 124



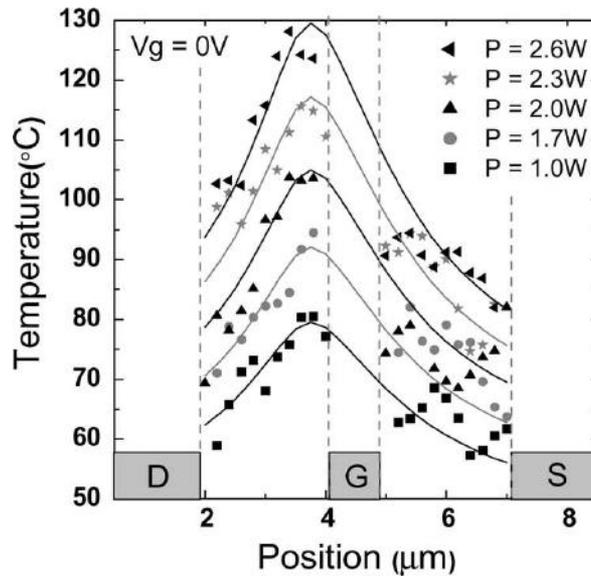
Thèse de G. Brocero, Normandie Université, juillet 2018

**Thermographie IR et profil de température
obtenus chez Thales TRT**

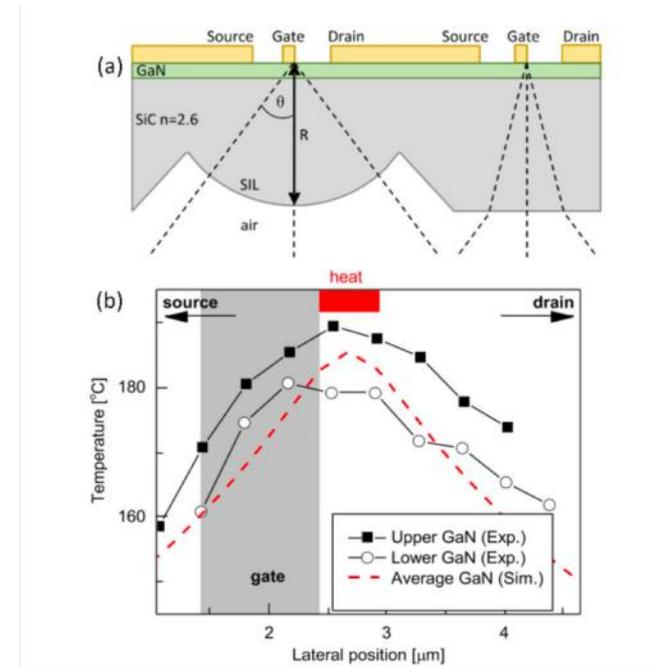


**Inhomogénéité de la température
le long d'un composant multidoigts**

Résultats plus originaux



R. Simms et al
IEEE Trans. On Electron. Dev. 55 (2008) 478



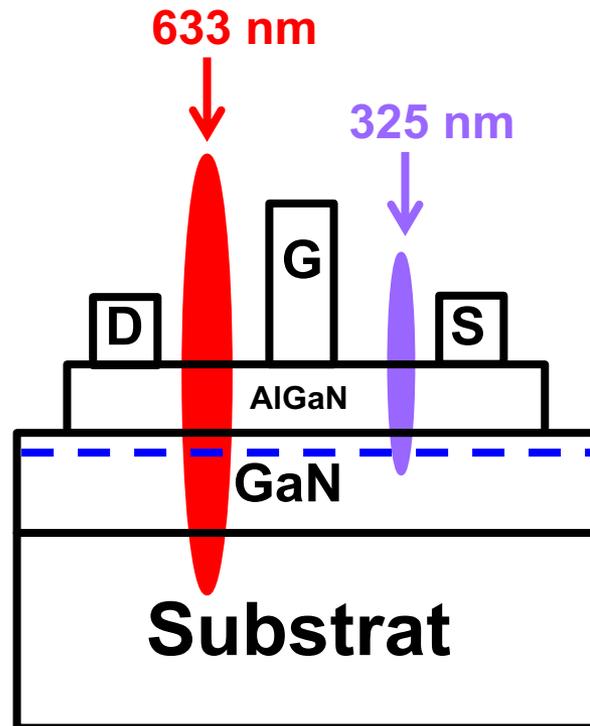
J.W. Pomeroy et al
J Appl Phys. 118 (2015) 4144501-1



Localisation du point chaud par la face avant ou par la face arrière

Choix de la longueur d'onde

Informations obtenues par la spectroscopie Raman **visible** et UV :



➔ Spectroscopie Raman **visible** :

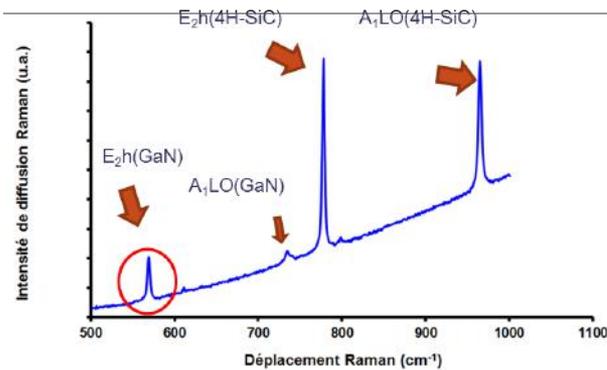
Zone sondée intègre le GaN et le substrat

➔ Spectroscopie Raman UV :

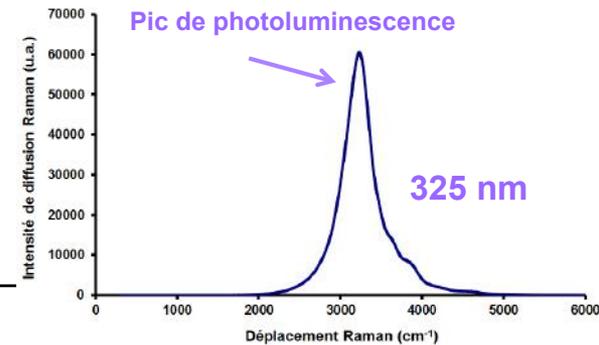
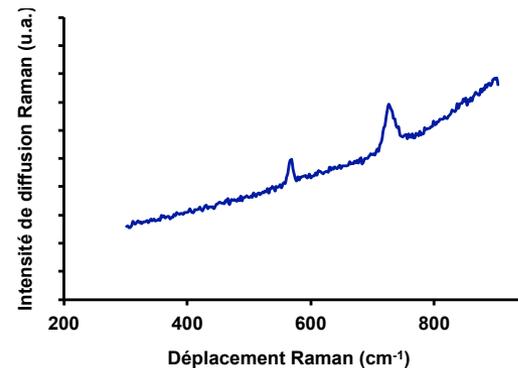
Zone sondée (≈ 50 nm) proche du canal GaN

Choix de la longueur d'onde

Visible



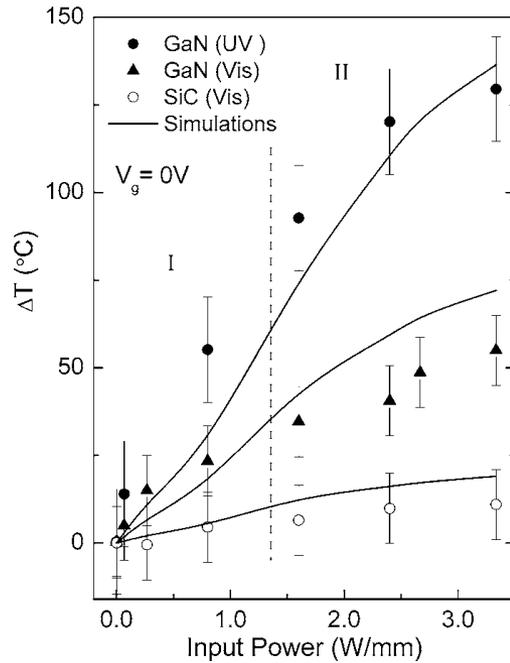
UV



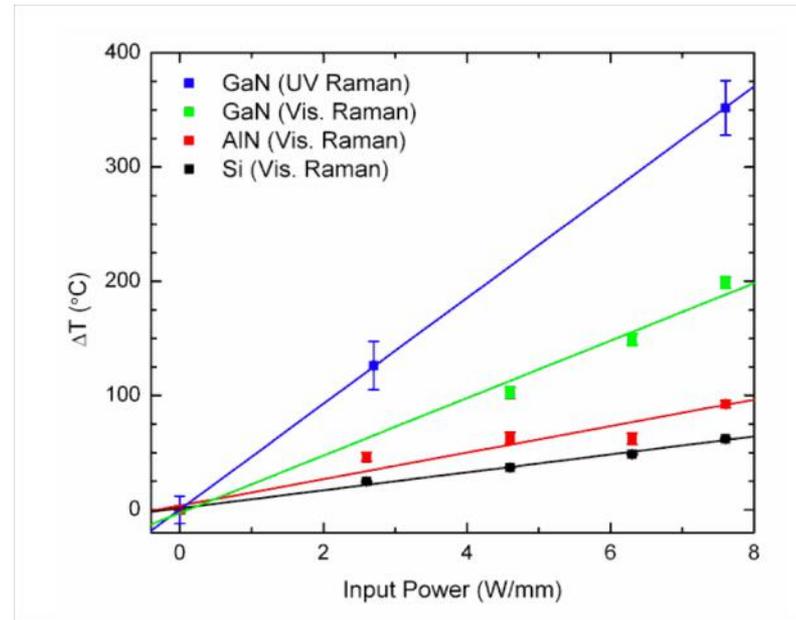
T. Batten et al
JAP 107 (2010) 074502

Possibilité d'avoir la température du GaN
Possibilité d'avoir la température du substrat

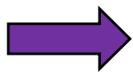
Possibilité d'avoir la température d'une zone proche du canal
Photoluminescence à T_{amb} qui varie avec la t° !



Ahmad et al
APL 100 (2006) 113718



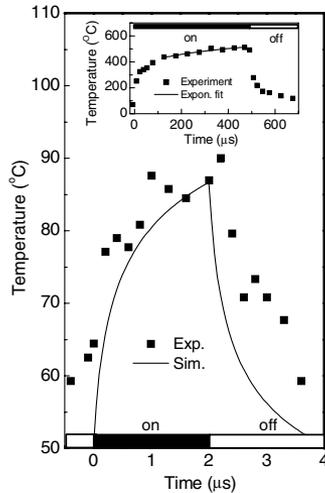
M. Nazari et al
CSIS (2015)



On peut obtenir des informations à différents niveaux de la structure

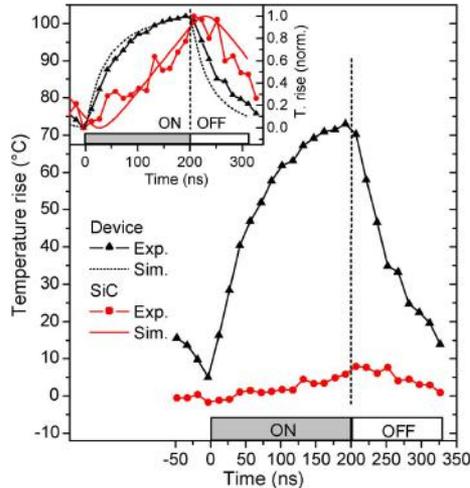
Mesures en transiant

Visible



M. Kuball et al

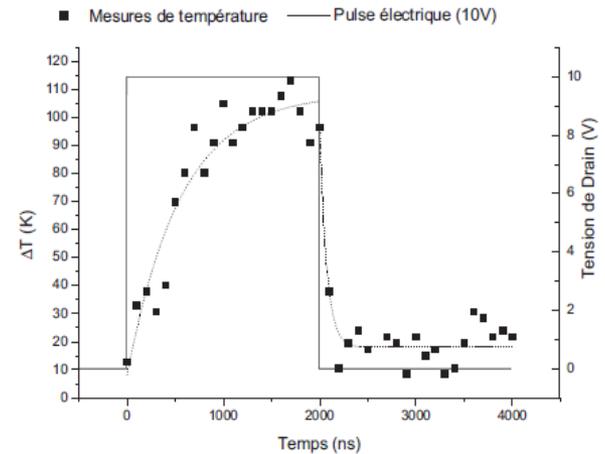
Phys Stat Sol (a) 6 (2007) 214



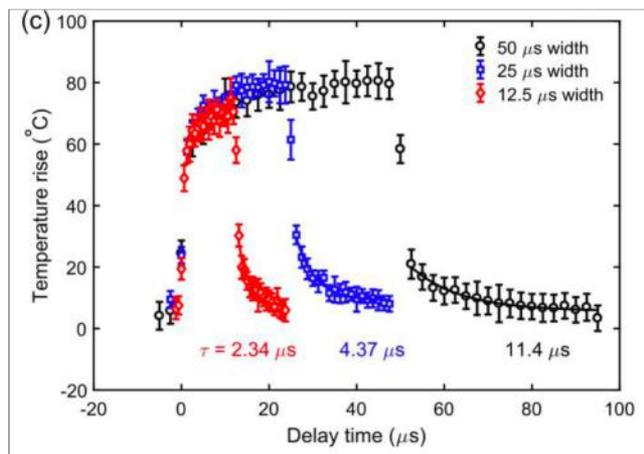
G.J. Riedel et al

IEEE Electron Device Lett 29 (2008) 416

UV



Thèse O. Lancry Lille (2009)



K. Bagnall et al

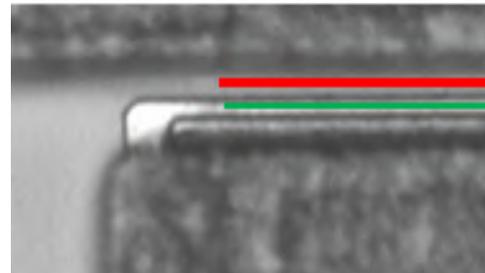
IEEE Trans Electron Devices 64 (2017) 2121

Pulse électrique de 12,5 μs
Pulse optique de 30 ns

Possibilité de mesurer
l'autoéchauffement en régime
impulsionnel

Tout ceci est bien joli MAIS la technologie des composants évolue :

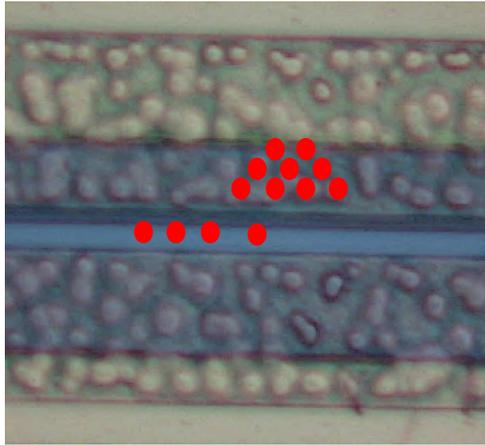
- **Les distances source-drain ont été réduites**
- **Les fabricants utilisent des ponts à air mais aussi des field plate pour étaler le champ électrique**



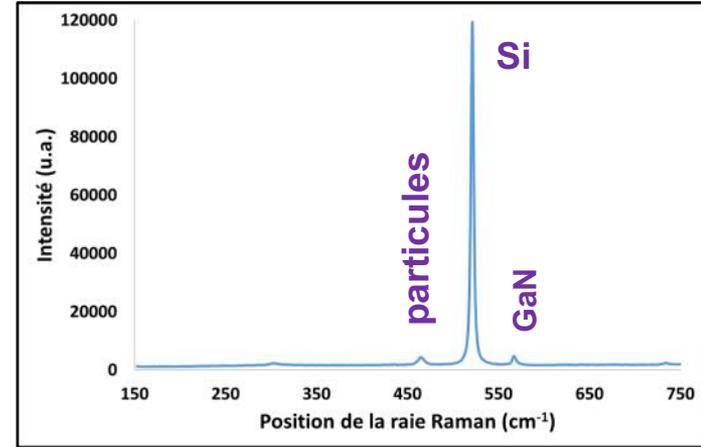
Objectif x 100

Possible mais difficile de pointer la zone GaN
Difficile d'utiliser le système autofocus car zone très petite
Passer par la face arrière n'est pas réaliste (conditions non opérationnelles)

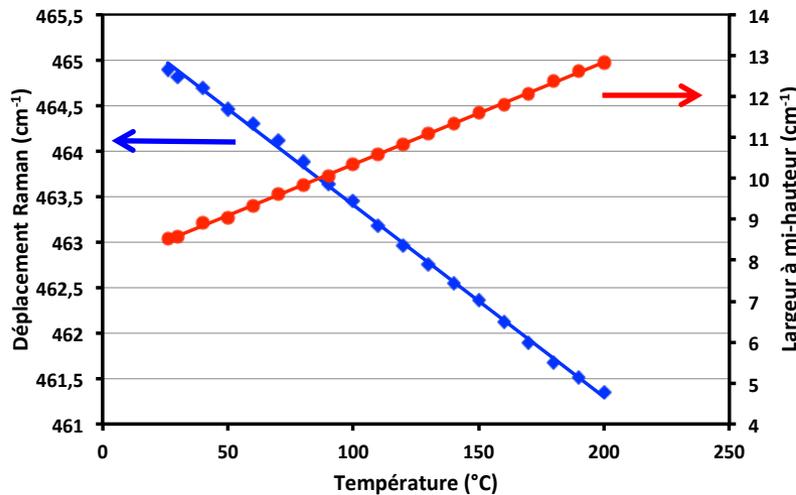
Nouvelle technique



Dépôt de **particules**

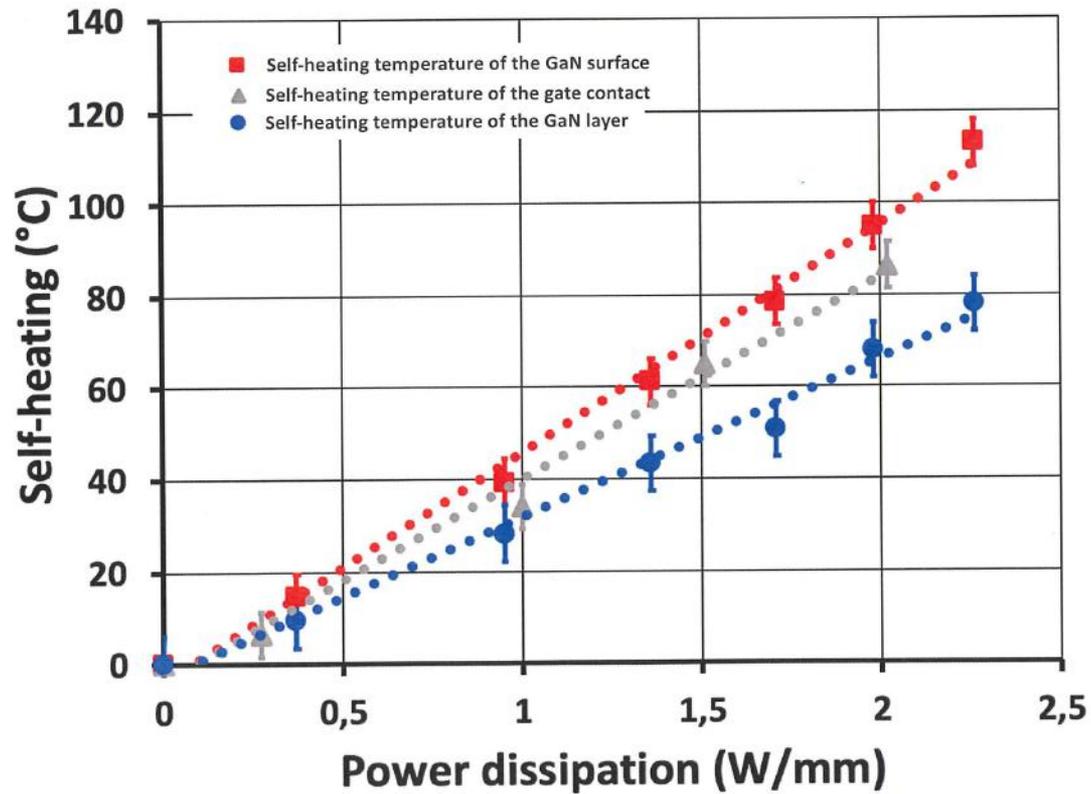


Raies du substrat, du GaN et des particules



Évolution linéaire de ω et Γ de la bande Raman relative aux particules

Résultats



Avantages de cette nouvelle méthode :

- 😊 Les particules se comportent comme des micro-thermomètres.
- 😊 Les mesures ne sont pas influencées par l'évolution de la contrainte du GaN avec la température.
- 😊 Les mesures de température sont possibles sur les transistors avec field plate sur le GaN et sur les métallisations et ce, quel que soit leur état de surface (rugosité).



Avantages d'utiliser la spectroscopie Raman

Mesure de température possible à quelques degrés près en chaque point de la surface (résolution inférieure au μm^2) quel que soit le matériau + en profondeur pouvant aller jusqu'au substrat !



Inconvénients d'utiliser la spectroscopie Raman

Ce n'est pas une manip presse bouton !

Prix de l'équipement

Equipement pour le transient à développer (n'existe pas en catalogue !)

Conclusion

Présentation de la spectroscopie Raman appliquée à la mesure de température de HEMTs GaN

Comme pour beaucoup de techniques le point clé est la calibration

Présentation de premiers résultats originaux avec l'emploi de particules : cumul des avantages de la SR et de la thermoréflexance

Merci de votre attention !