

IMPACT DES EFFETS PIÉZOÉLECTRIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES NANOBELAYS



Etudiant

Aurelien PELISSIER

MI PHYTEM ENS Cachan

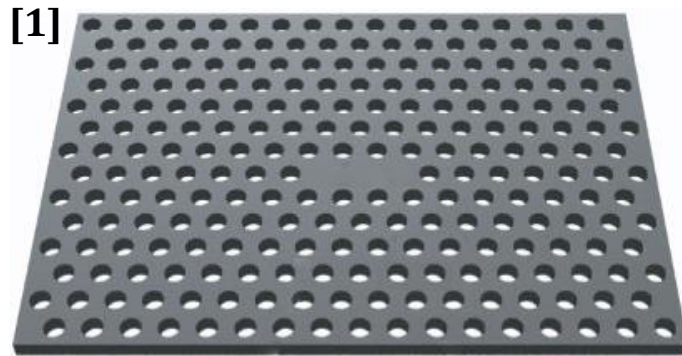
Superviseur

Ian ROUSSEAU

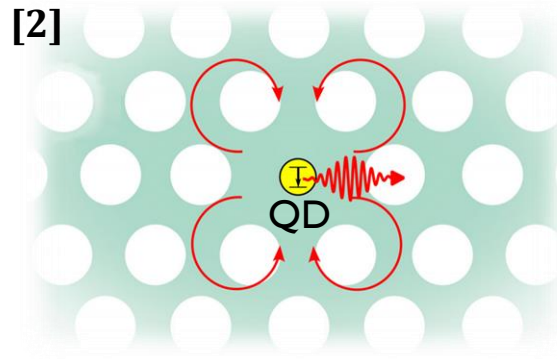
Doctorant au LASPE

Mercredi 24 août 2016

INTRODUCTION

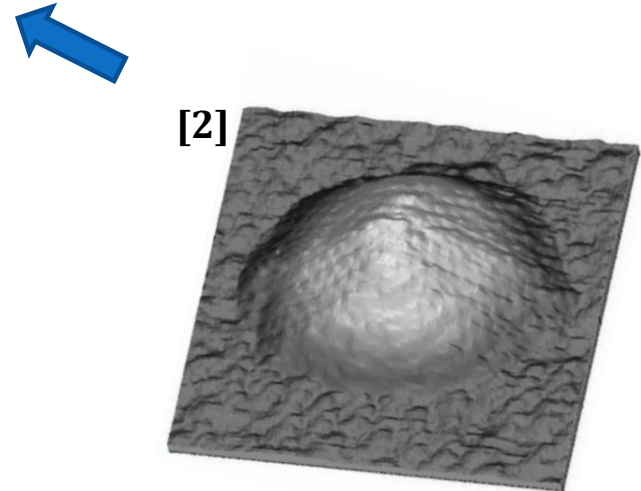


Cavités photoniques



Système électrodynamique
quantique en cavité

- Mesures quantiques non destructives
- Traitement quantique de l'information
- Interactions entre photon et exciton



Hétérostructures quantiques

SOMMAIRE

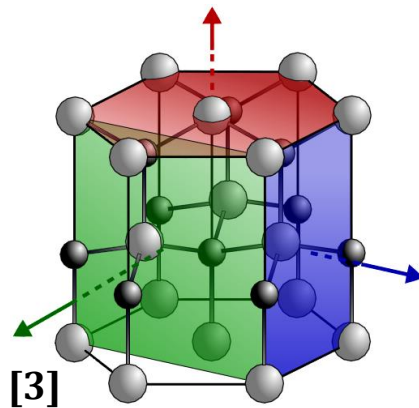
Objectif :

- ✓ Comprendre les déformations dans le nanobeam
- ✓ Ajuster les bandes interdites d'un cristal photonique et d'un puits quantique pour qu'elles correspondent.

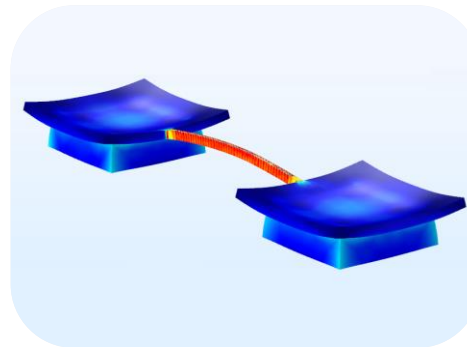
Dans ce travail:

- ✓ Simulations: *COMSOL* et *FDTD Lumerical*
- ✓ Mesures: Spectroscopie Raman et photoluminescence

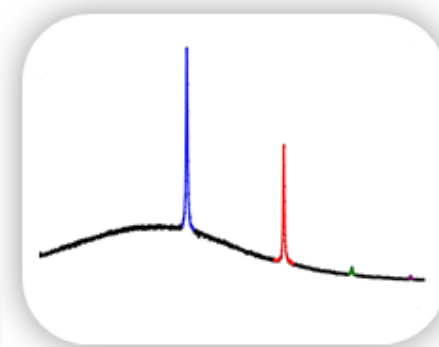
Théorie



Simulation



Mesures



LES NITRURES D'ÉLÉMENT III

Couplage piézoélectrique

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} \times \epsilon_{kl} - \sum_k e_{kij} \times E_k$$

$$D_i = P_i^{spont} + \sum_{k,l} e_{ikl} \times \epsilon_{kl} + \sum_k \epsilon_{ik} \times E_k$$

Contraintes et déformations

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad \underline{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

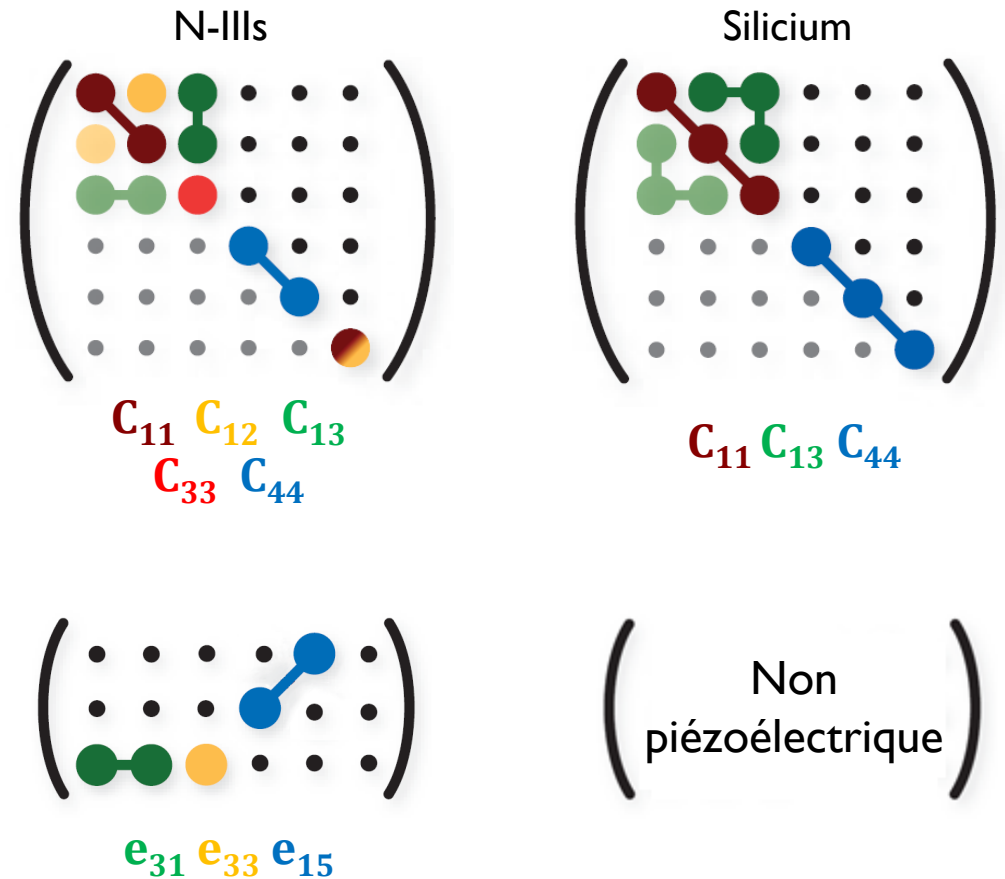
Lors de l'épitaxie

$$\epsilon_{xx} = \frac{a_s - a_c}{a_c}$$

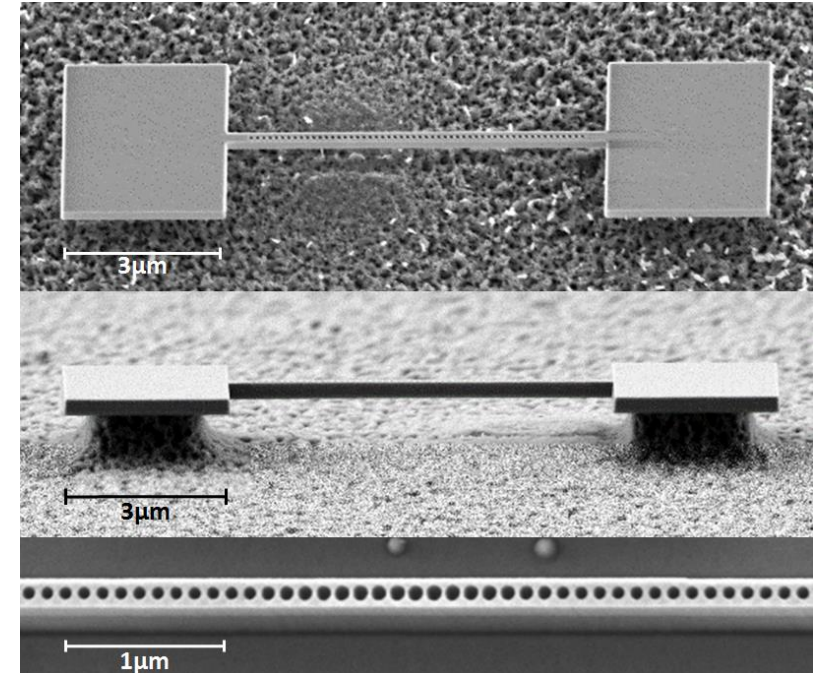
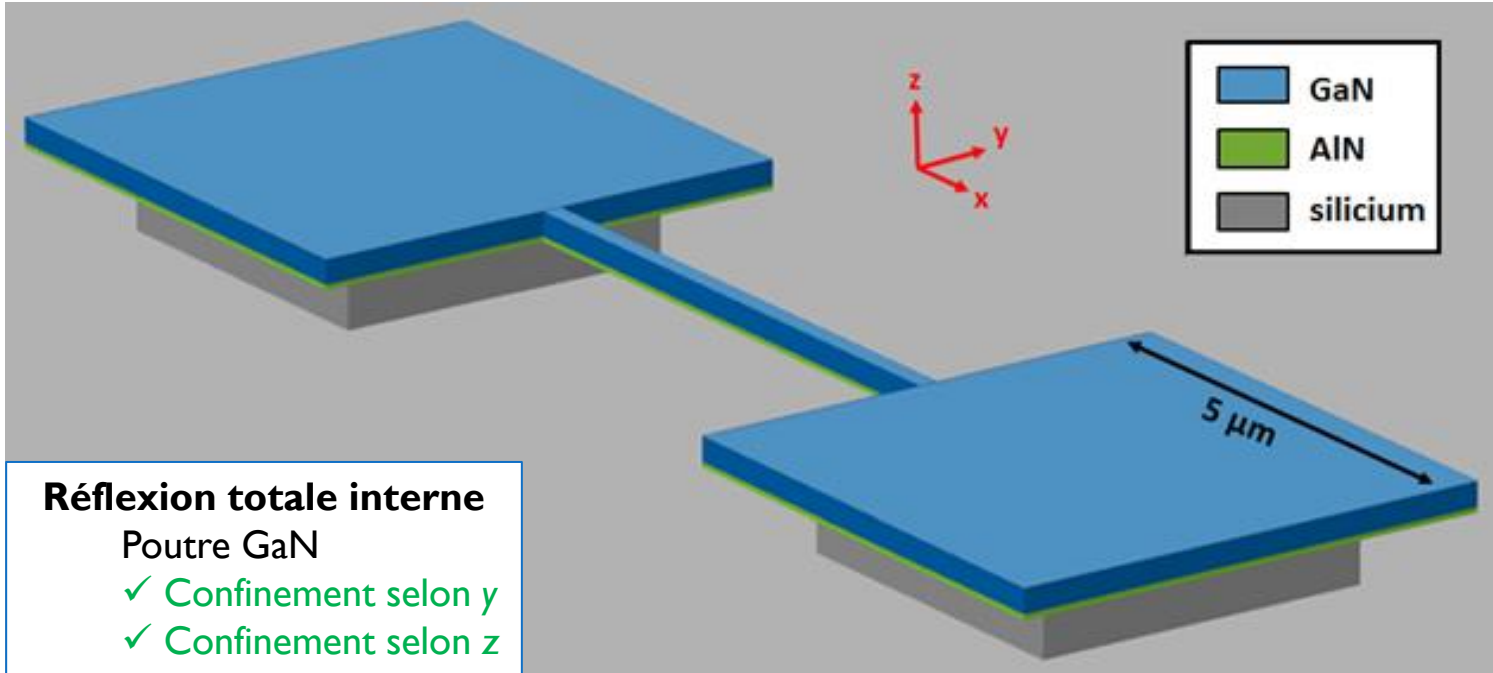
a_s : paramètre de maille du substrat

a_c : paramètre de maille de la couche déposée

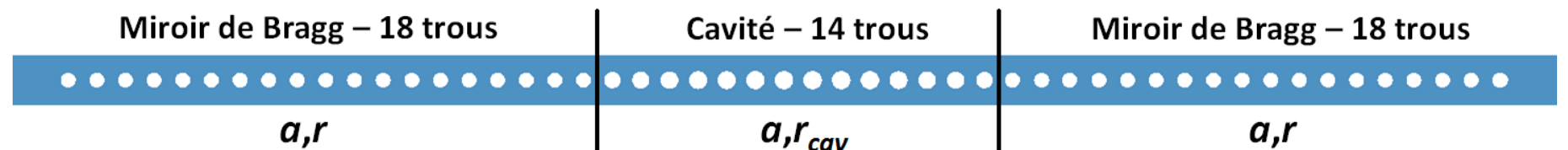
C_{ij} et e_{ij} [4]



NANOBEAM



Cavité photonique
Cristal photonique 1D
✓ Confinement selon x



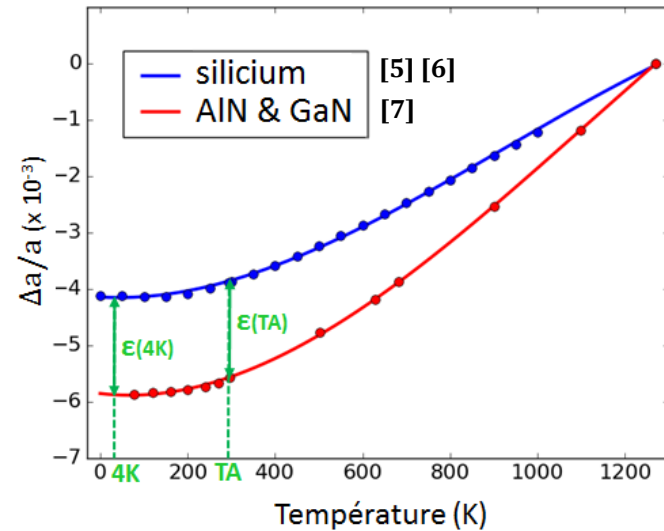
DÉFORMATIONS DANS LE NANOBEAM

Expansion thermique

a_s : paramètre de maille du substrat

a_c : paramètre de maille de la couche déposée

$$\epsilon_{th}(T_f) = \frac{\Delta a_c(T_c \rightarrow T_f)}{a_c(T_c)} - \frac{\Delta a_s(T_c \rightarrow T_f)}{a_s(T_c)}$$



$$\epsilon_{th}(TA) = \epsilon_{th}(4\text{ K}) = 0,17\%$$

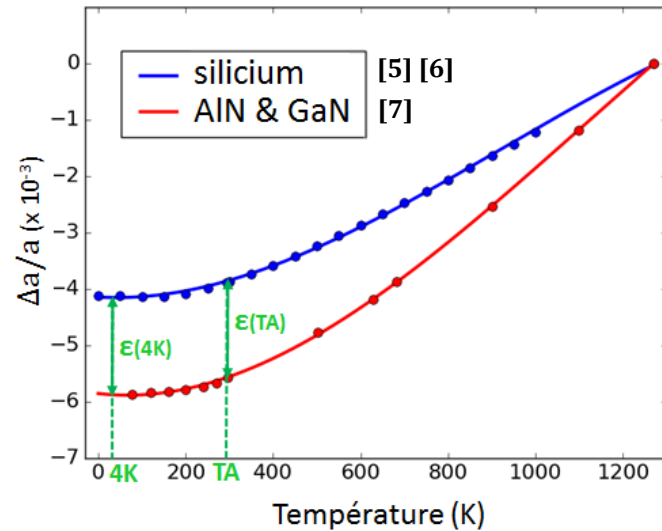
DÉFORMATIONS DANS LE NANOBEAM

Expansion thermique

a_s : paramètre de maille du substrat

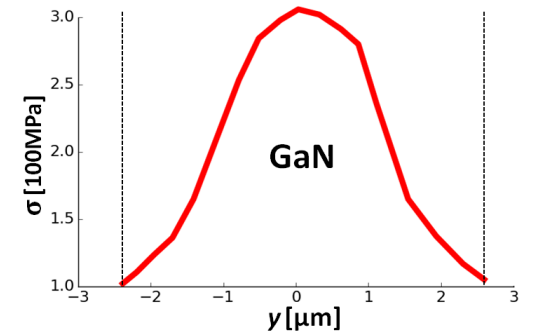
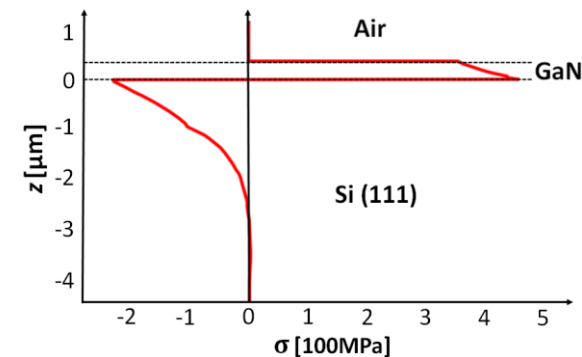
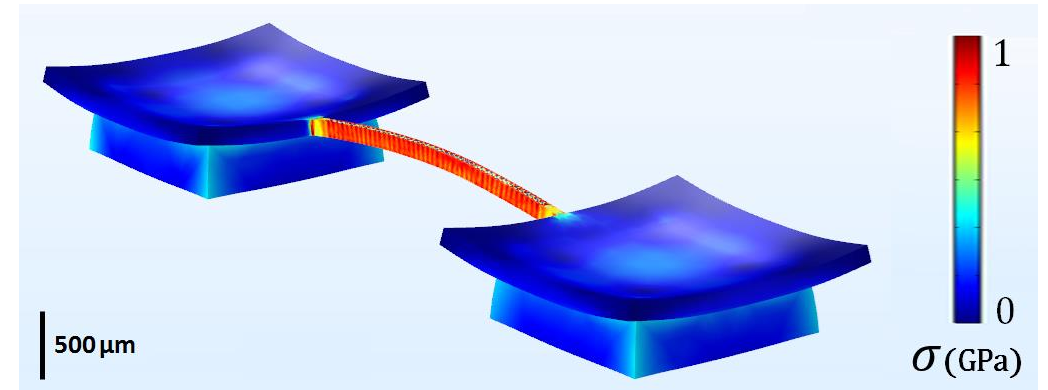
a_c : paramètre de maille de la couche déposée

$$\epsilon_{th}(T_f) = \frac{\Delta a_c(T_c \rightarrow T_f)}{a_c(T_c)} - \frac{\Delta a_s(T_c \rightarrow T_f)}{a_s(T_c)}$$

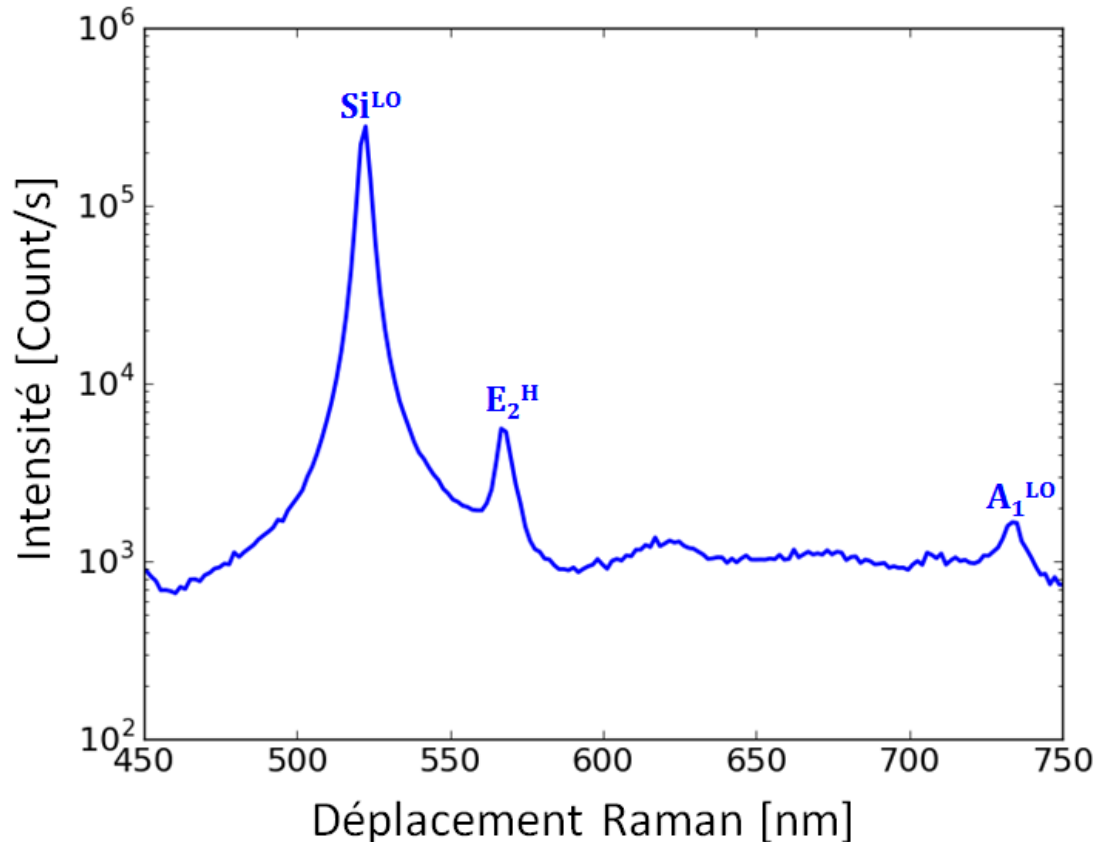


$$\epsilon_{th}(TA) = \epsilon_{th}(4 K) = 0,17 \%$$

Courbure



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN



Spectroscopie micro-Raman

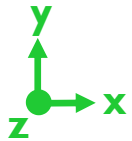
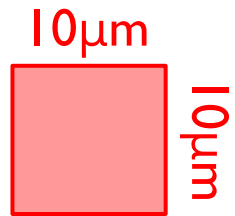
Diffusion inélastique de la lumière

- ✓ Précision de quelques centaines de nm
- ✓ Mesures non destructives
- ✗ Sensible au réchauffement laser

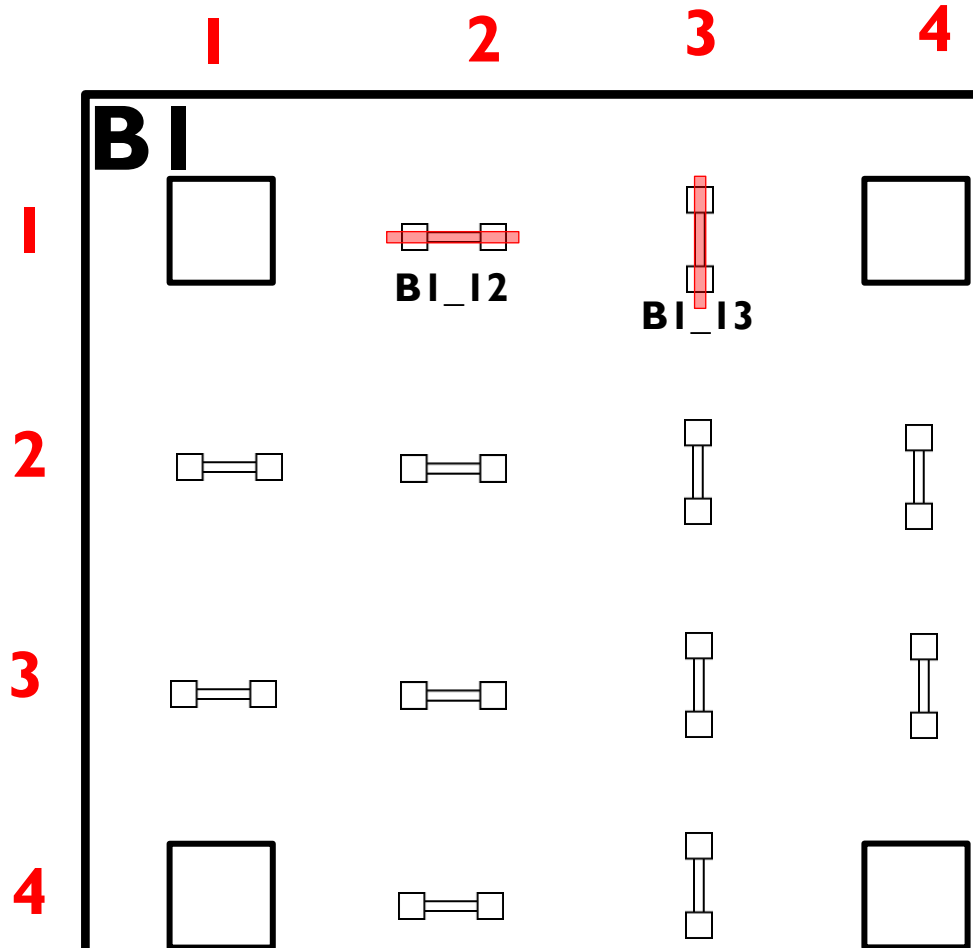
- [8] $\Delta\omega (\text{Si}) = A \cdot \epsilon_{xx}$ pour une déformation biaxiale
- [9] $\Delta\omega (A_1) = a_{A1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{A1} \cdot \epsilon_{zz} + C(n, \epsilon)$
- [9] $\Delta\omega (E_1^{\text{horizontal}}) = a_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E1} \cdot \epsilon_{zz} + c_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$
- [9] $\Delta\omega (E_2^{\text{vertical}}) = a_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E2} \cdot \epsilon_{zz} - c_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$

SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

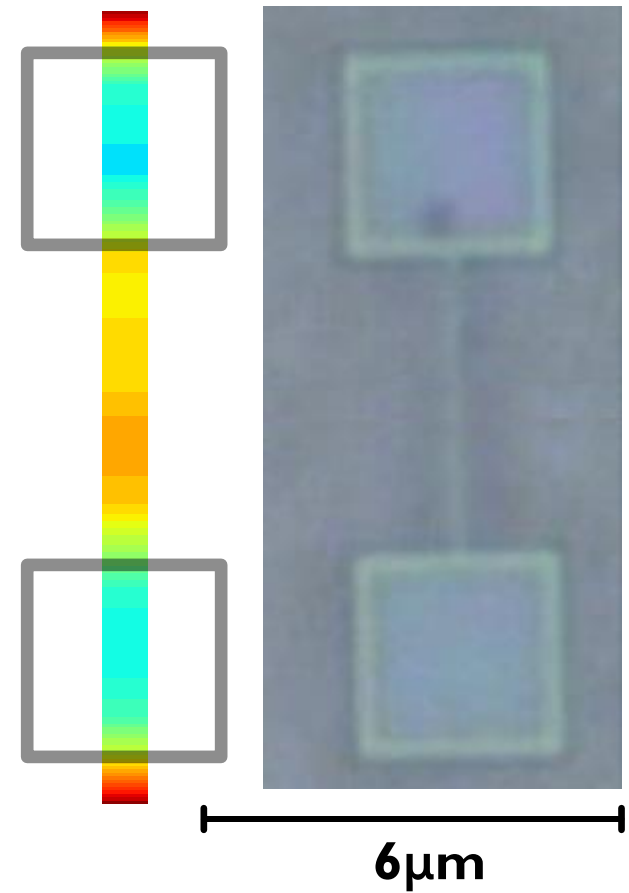
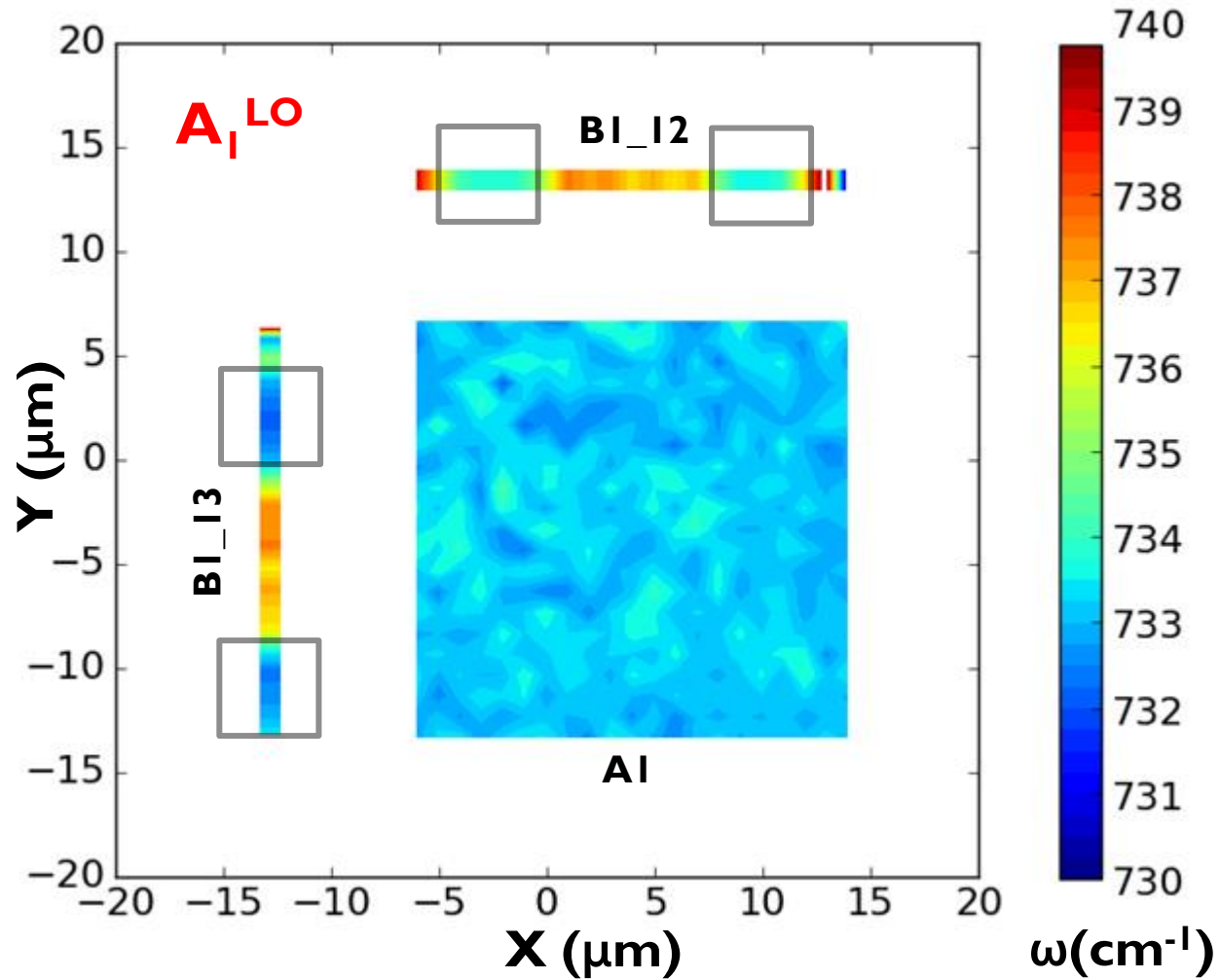
AI



BI



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN



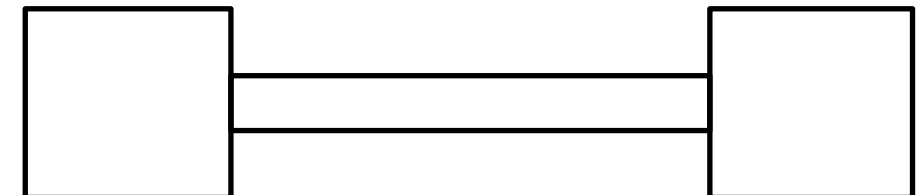
SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

Moyenne des mesures sur $||$ nanobeams verticaux et $||$ horizontaux

Phonon λ	A_1^{LO}	E_2^H	Si^{LO}
$\Delta\omega_\lambda(PAD_V)$ [cm ⁻¹]	$-1,5 \pm 0,5$	$-0,80 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(PAD_H)$ [cm ⁻¹]	$-1,4 \pm 0,5$	$-0,82 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm ⁻¹]	$3,7 \pm 0,5$	$-0,46 \pm 0,5$	$0,45 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm ⁻¹]	$1,8 \pm 0,5$	$-0,98 \pm 0,5$	$0,19 \pm 0,5$

phonon λ	E_2^H	A_1^{LO}
[10] a_λ (cm ⁻¹)	-818	-685
[10] b_λ (cm ⁻¹)	-797	-997
[8] A_{Si} (cm ⁻¹)	-413	

- [8] $\Delta\omega (Si) = A.\epsilon_{xx}$ pour une déformation biaxiale
- [9] $\Delta\omega (A_1) = a_{A1}.\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + b_{A1}.\epsilon_{zz} + C(n,\epsilon)$
- [9] $\Delta\omega (E_1^{horizontal}) = a_{E1}.\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + b_{E1}.\epsilon_{zz} + c_{E1}.\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$
- [9] $\Delta\omega (E_2^{vertical}) = a_{E2}.\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + b_{E2}.\epsilon_{zz} - c_{E2}.\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

Moyenne des mesures sur \parallel nanobeams verticaux et \parallel horizontaux

Phonon λ	A_1^{LO}	E_2^H	Si^{LO}
$\Delta\omega_\lambda(PAD_V)$ [cm^{-1}]	$-1,5 \pm 0,5$	$-0,80 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(PAD_H)$ [cm^{-1}]	$-1,4 \pm 0,5$	$-0,82 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm^{-1}]	$3,7 \pm 0,5$	$-0,46 \pm 0,5$	$0,45 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm^{-1}]	$1,8 \pm 0,5$	$-0,98 \pm 0,5$	$0,19 \pm 0,5$

phonon λ	E_2^H	A_1^{LO}
[10] a_λ (cm^{-1})	-818	-685
[10] b_λ (cm^{-1})	-797	-997
[8] A_{Si} (cm^{-1})	-413	

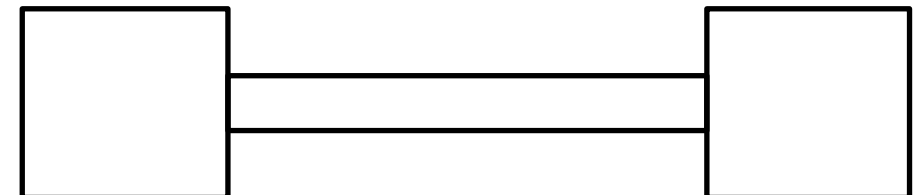
Grosse différence

[8] $\Delta\omega(Si) = A \cdot \epsilon_{xx}$ pour une déformation biaxiale

[9] $\Delta\omega(A_1) = a_{A1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{A1} \cdot \epsilon_{zz} + C(n, \epsilon)$

[9] $\Delta\omega(E_1^{\text{horizontal}}) = a_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E1} \cdot \epsilon_{zz} + c_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$

[9] $\Delta\omega(E_2^{\text{vertical}}) = a_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E2} \cdot \epsilon_{zz} - c_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

Moyenne des mesures sur // nanobeams verticaux et // horizontaux

Phonon λ	A_1^{LO}	E_2^H	Si^{LO}
$\Delta\omega_\lambda(PAD_V)$ [cm ⁻¹]	-1,5 ± 0,5	-0,80 ± 0,5	0,40 ± 0,5
$\Delta\omega_\lambda(PAD_H)$ [cm ⁻¹]	-1,4 ± 0,5	-0,82 ± 0,5	0,40 ± 0,5
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm ⁻¹]	3,7 ± 0,5	-0,46 ± 0,5	0,45 ± 0,5
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm ⁻¹]	1,8 ± 0,5	-0,98 ± 0,5	0,19 ± 0,5

Pas de différence

phonon λ	E_2^H	A_1^{LO}
[10] a_λ (cm ⁻¹)	-818	-685
[10] b_λ (cm ⁻¹)	-797	-997
[8] A_{Si} (cm ⁻¹)	-413	

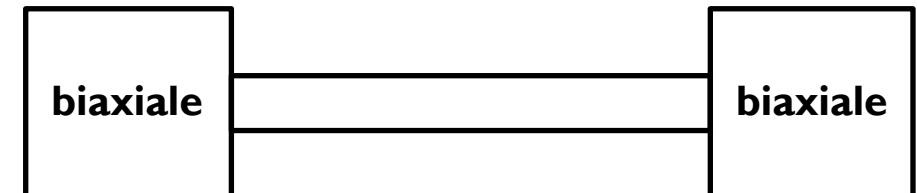
- Contrainte dans les PADs biaxiale

[8] $\Delta\omega(Si) = A \cdot \epsilon_{xx}$ pour une déformation biaxiale

[9] $\Delta\omega(A_1) = a_{A1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{A1} \cdot \epsilon_{zz} + C(n, \epsilon)$

[9] $\Delta\omega(E_1^{\text{horizontal}}) = a_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E1} \cdot \epsilon_{zz} + c_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$

[9] $\Delta\omega(E_2^{\text{vertical}}) = a_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E2} \cdot \epsilon_{zz} - c_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

Moyenne des mesures sur // nanobeams verticaux et // horizontaux

Phonon λ	A_1^{LO}	E_2^H	Si^{LO}
$\Delta\omega_\lambda(PAD_V)$ [cm ⁻¹]	-1,5 ± 0,5	-0,80 ± 0,5	0,40 ± 0,5
$\Delta\omega_\lambda(PAD_H)$ [cm ⁻¹]	-1,4 ± 0,5	-0,82 ± 0,5	0,40 ± 0,5
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm ⁻¹]	3,7 ± 0,5	-0,46 ± 0,5	0,45 ± 0,5
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm ⁻¹]	1,8 ± 0,5	-0,98 ± 0,5	0,19 ± 0,5

Différence claire

phonon λ	E_2^H	A_1^{LO}
[10] a_λ (cm ⁻¹)	-818	-685
[10] b_λ (cm ⁻¹)	-797	-997
[8] A_{Si} (cm ⁻¹)	-413	

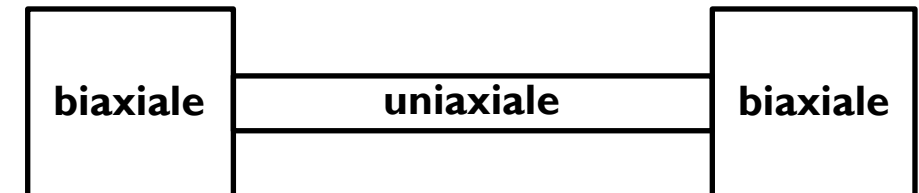
[8] $\Delta\omega$ (Si) = $A \cdot \epsilon_{xx}$ pour une déformation biaxiale

[9] $\Delta\omega$ (A_1) = $a_{A1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{A1} \cdot \epsilon_{zz} + C(n, \epsilon)$

[9] $\Delta\omega$ ($E_1^{\text{horizontal}}$) = $a_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E1} \cdot \epsilon_{zz} + c_{E1} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$

[9] $\Delta\omega$ (E_2^{vertical}) = $a_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_{E2} \cdot \epsilon_{zz} - c_{E2} \cdot (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})$

- Contrainte dans les PADs biaxiale
- Contrainte dans le nanobeam uniaxiale



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

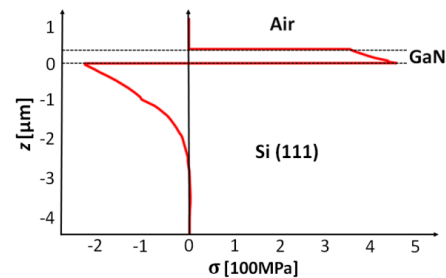
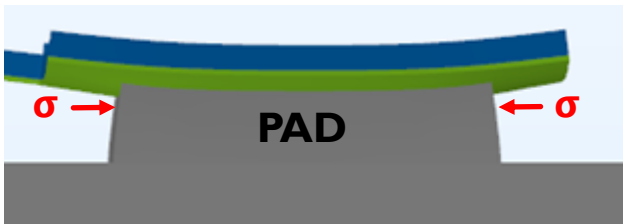
Moyenne des mesures sur // nanobeams verticaux et // horizontaux

Phonon λ	A_1^{LO}	E_2^H	Si^{LO}
$\Delta\omega_\lambda(PAD_V)$ [cm^{-1}]	$-1,5 \pm 0,5$	$-0,80 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(PAD_H)$ [cm^{-1}]	$-1,4 \pm 0,5$	$-0,82 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm^{-1}]	$3,7 \pm 0,5$	$-0,46 \pm 0,5$	$0,45 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm^{-1}]	$1,8 \pm 0,5$	$-0,98 \pm 0,5$	$0,19 \pm 0,5$

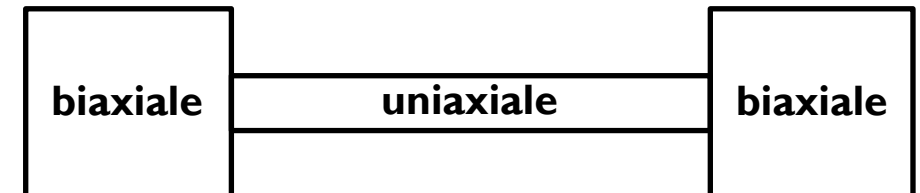
Signe opposé

phonon λ	E_2^H	A_1^{LO}
[10] a_λ (cm^{-1})	-818	-685
[10] b_λ (cm^{-1})	-797	-997
[8] A_{Si} (cm^{-1})	-413	

[8] $\Delta\omega(Si) = A.\epsilon_{xx}$



- Contrainte dans les PADs biaxiale
- Contrainte dans le nanobeam uniaxiale
- Compression sur le silicium



SPECTROSCOPIE MICRO-RAMAN

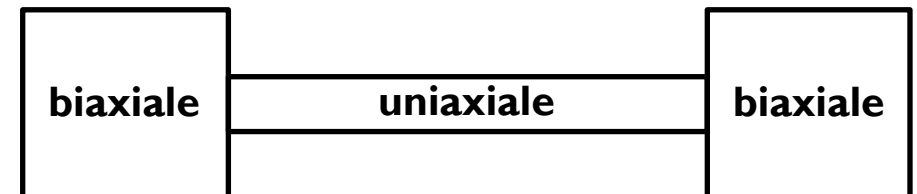
Moyenne des mesures sur $||$ nanobeams verticaux et $||$ horizontaux

Phonon λ	A_1^{LO}	E_2^H	Si^{LO}
$\Delta\omega_\lambda(PAD_V)$ [cm^{-1}]	$-1,5 \pm 0,5$	$-0,80 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(PAD_H)$ [cm^{-1}]	$-1,4 \pm 0,5$	$-0,82 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_V)$ [cm^{-1}]	$3,7 \pm 0,5$	$-0,46 \pm 0,5$	$0,45 \pm 0,5$
$\Delta\omega_\lambda(Beam_H)$ [cm^{-1}]	$1,8 \pm 0,5$	$-0,98 \pm 0,5$	$0,19 \pm 0,5$

phonon λ	E_2^H	A_1^{LO}
[10] a_λ (cm^{-1})	-818	-685
[10] b_λ (cm^{-1})	-797	-997
[8] A_{Si} (cm^{-1})	-413	

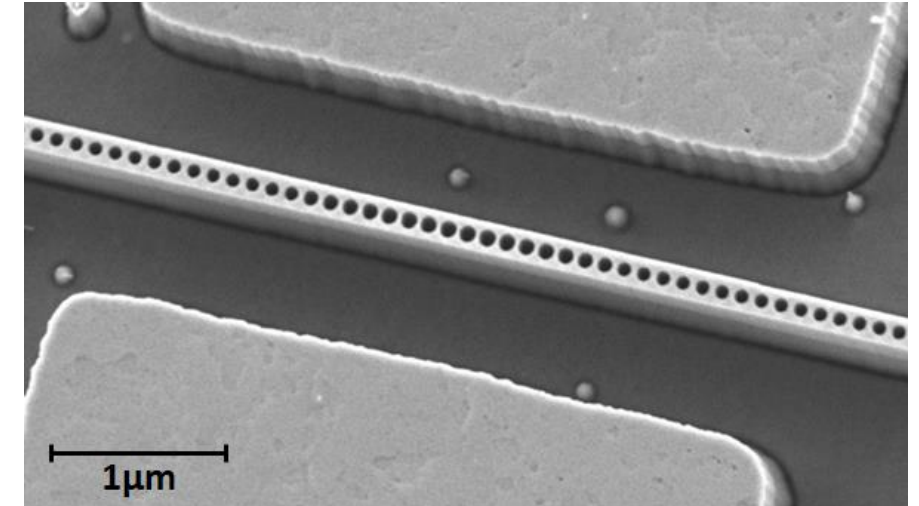
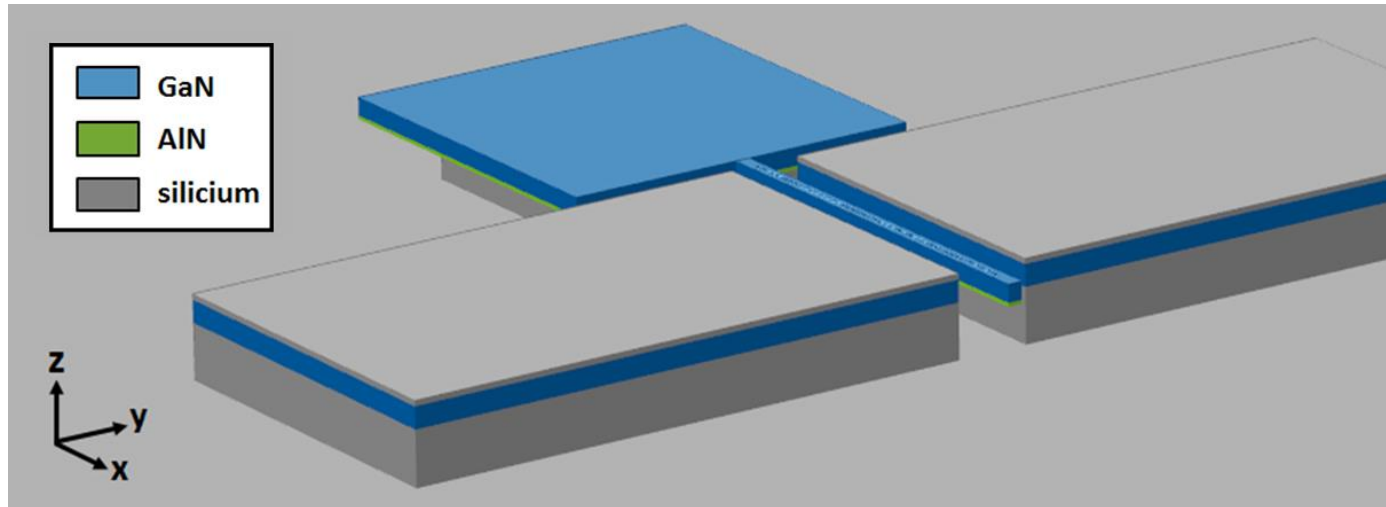
$$\begin{aligned}
 \epsilon_{xx}(Beam) &= 0,18 \pm 0,12 \% & \Leftrightarrow & \sigma_{uniaxiale}(Beam) = 650 \pm 390 \text{ MPa} \\
 \epsilon_{xx}(PAD) &= 0,07 \pm 0,04 \% & \Leftrightarrow & \sigma_{biaxiale}(PAD) = 287 \pm 190 \text{ MPa} \\
 \epsilon_{xx}(Silicium) &= -0,097 \pm 0,12 \% & \Leftrightarrow & \sigma_{biaxiale}(Silicium) = -174 \pm 200 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- Contrainte dans les PADs biaxiale
- Contrainte dans le nanobeam uniaxiale
- Compression sur le silicium



Le modèle des déformations induites par l'expansion thermique est une approche correcte de la réalité

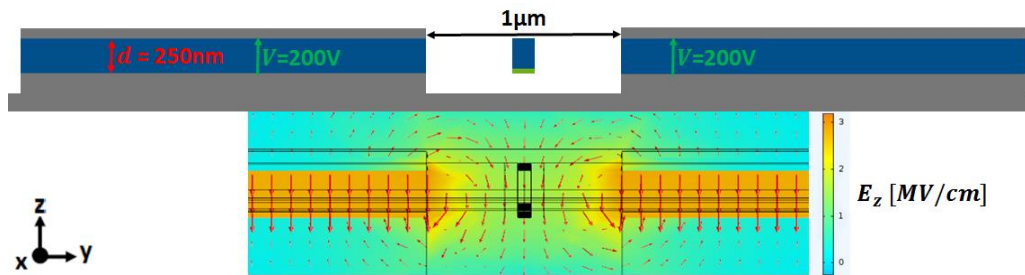
CONCEPTION D'ÉLECTRODES



Nanobeam en porte-à-faux
✓ Se courbe plus facilement

ELECTRODES

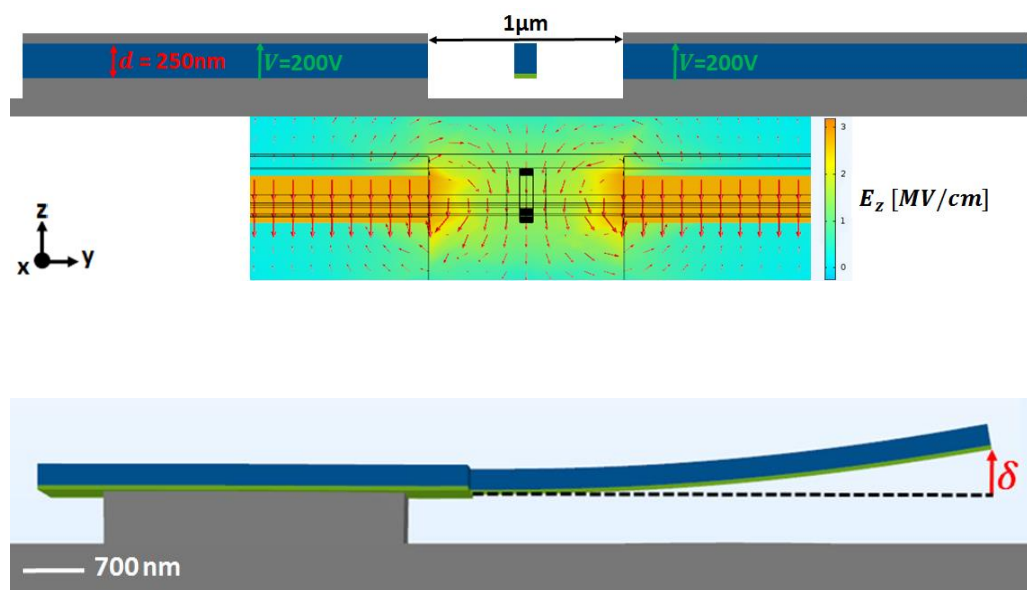
Champ selon z



Pour $V = 200\text{V}$, $\delta = 5\text{nm}$

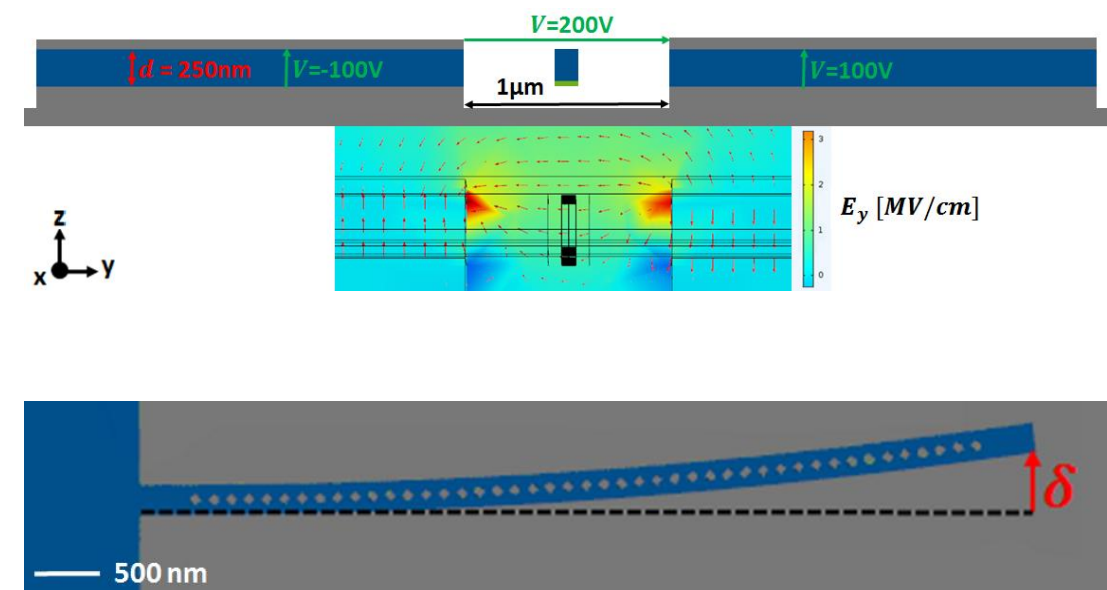
ELECTRODES

Champ selon z



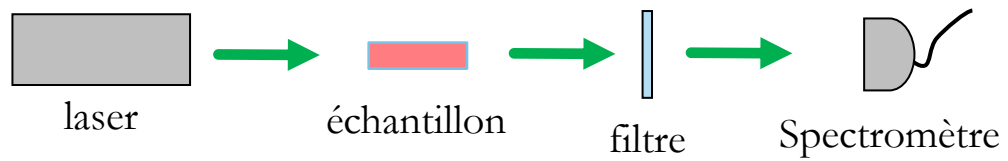
Pour $V = 200\text{V}$, $\delta = 5\text{nm}$

Champ selon y



Pour $V = 200\text{V}$, $\delta = 4\text{nm}$

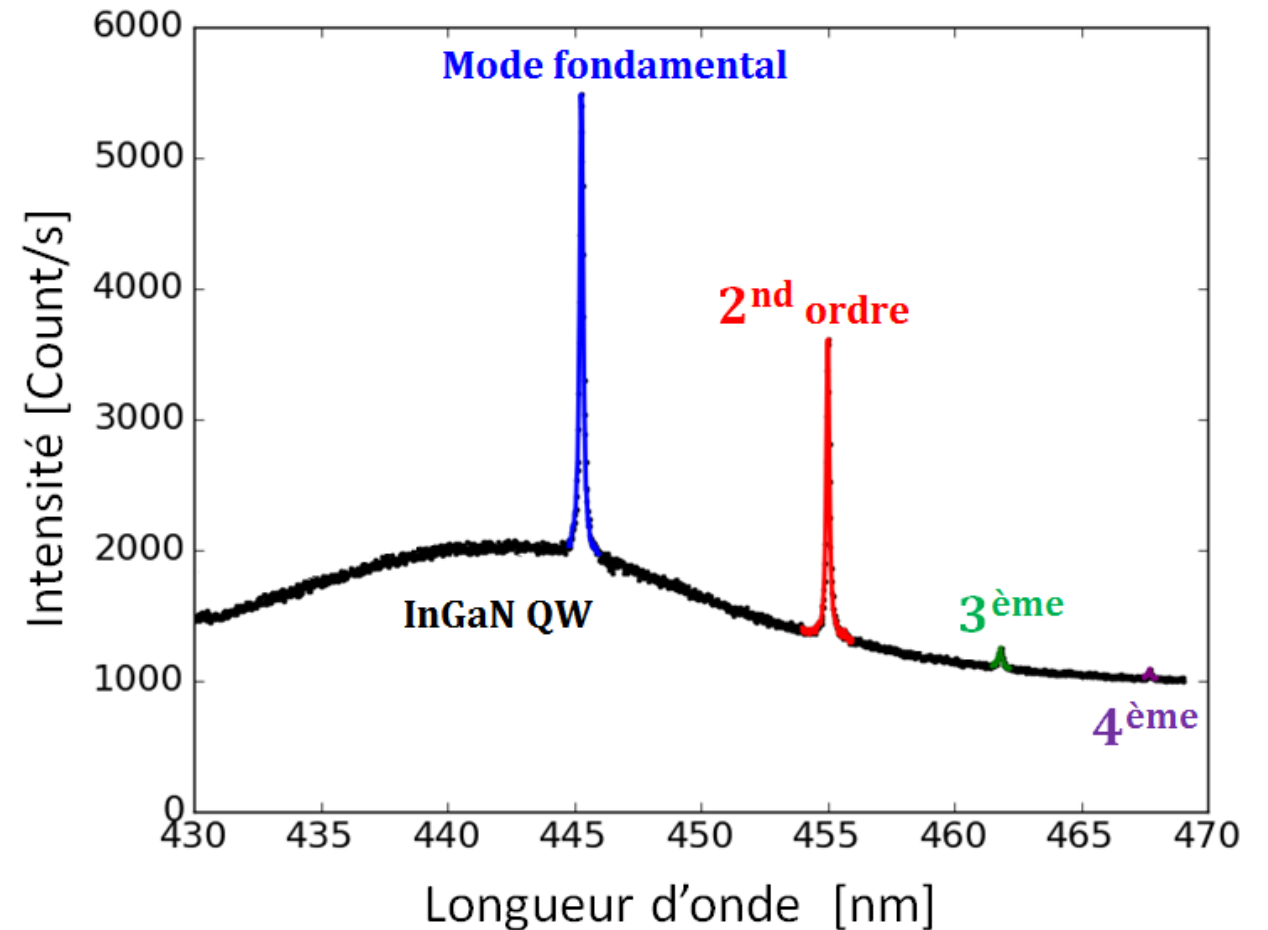
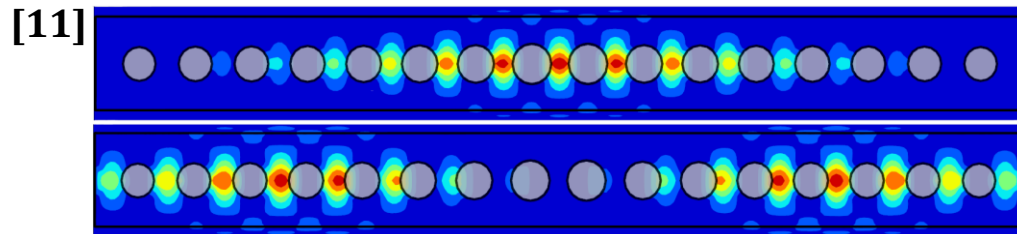
MICRO-PHOTOLUMINESCENCE



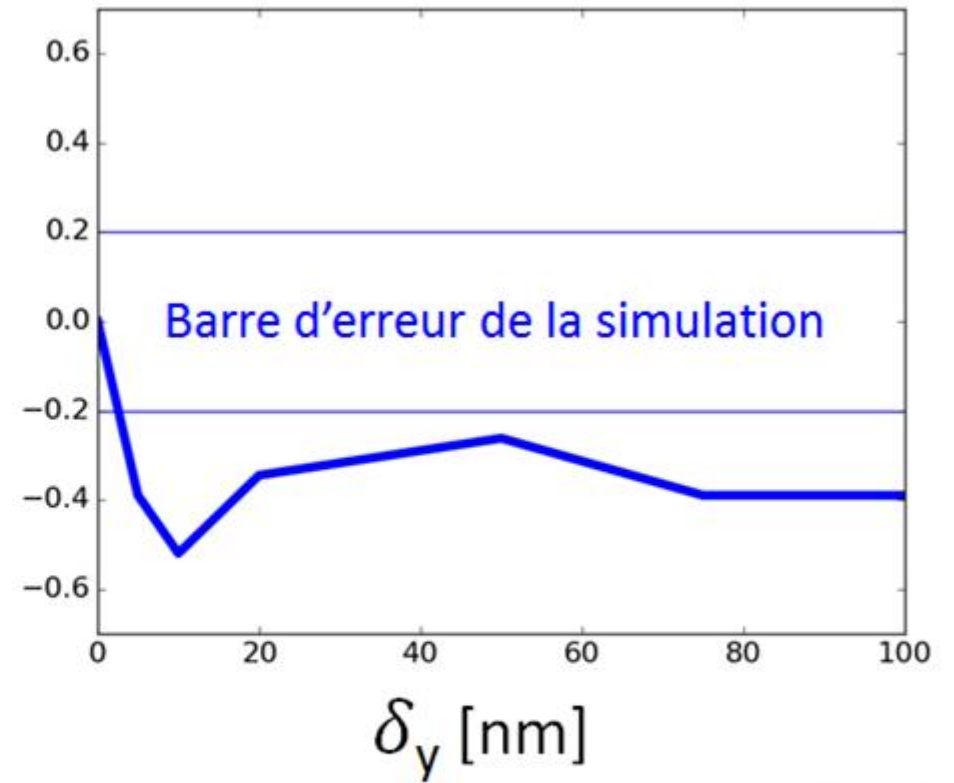
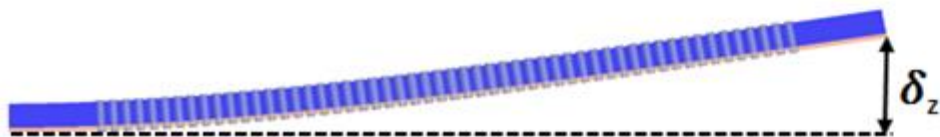
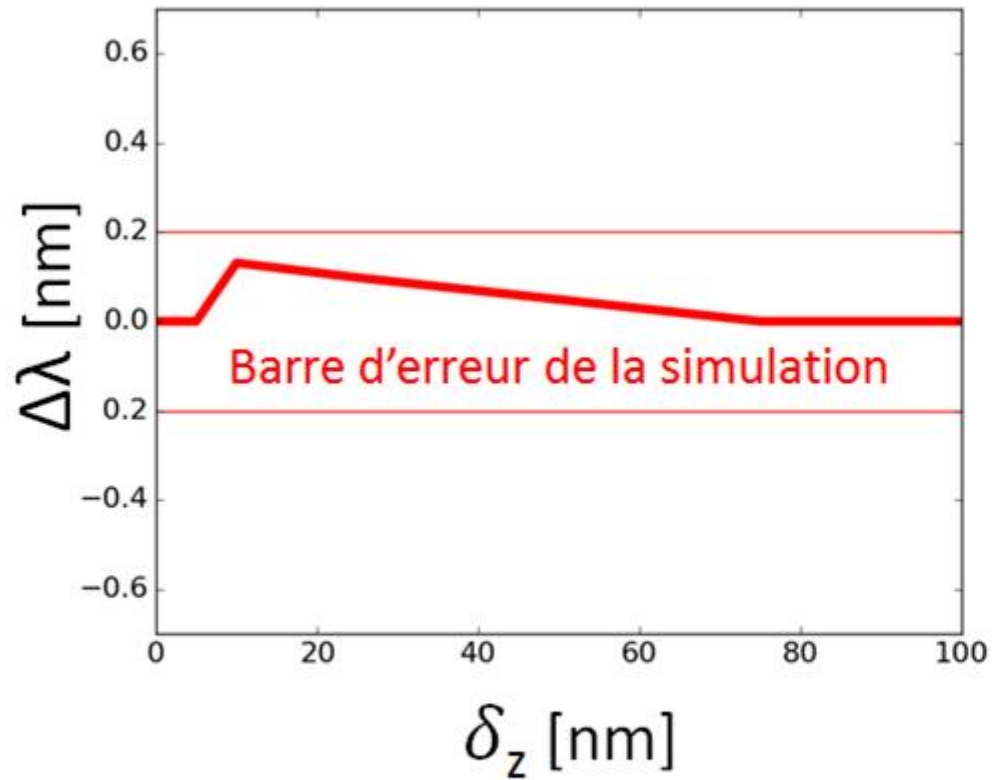
Micro-photoluminescence

Photo-excitation par faisceau laser

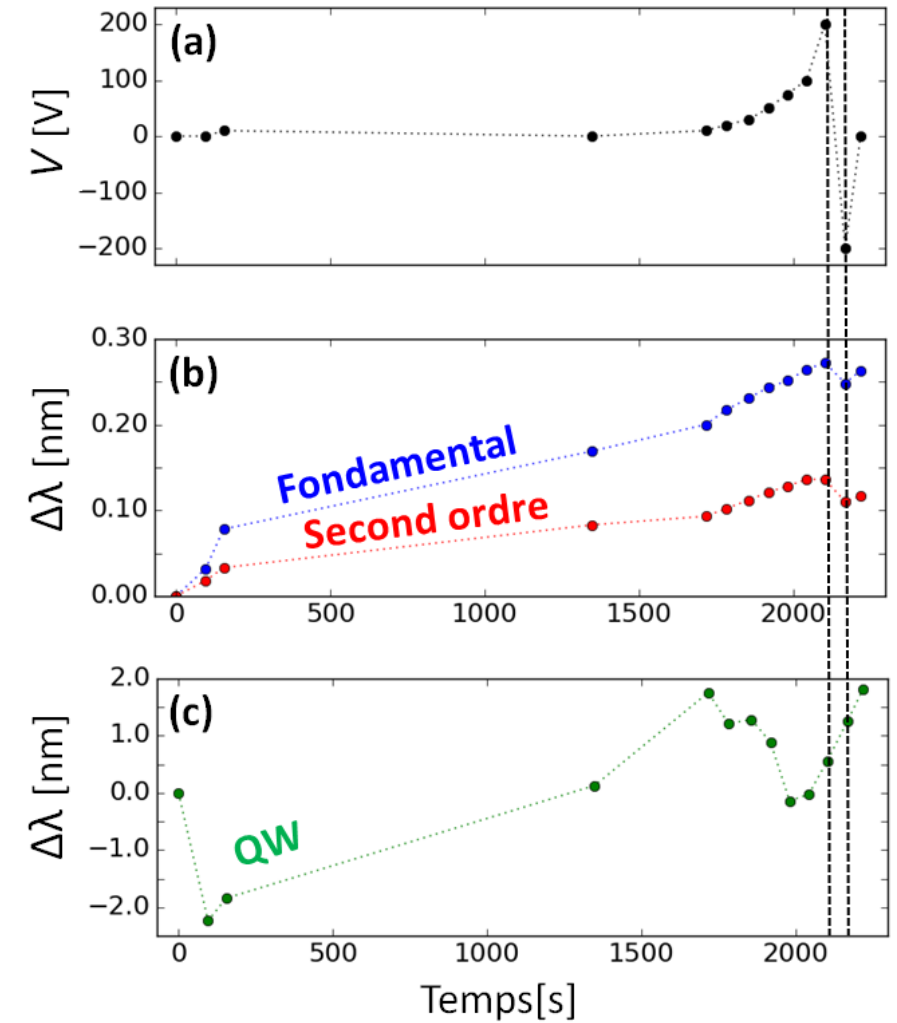
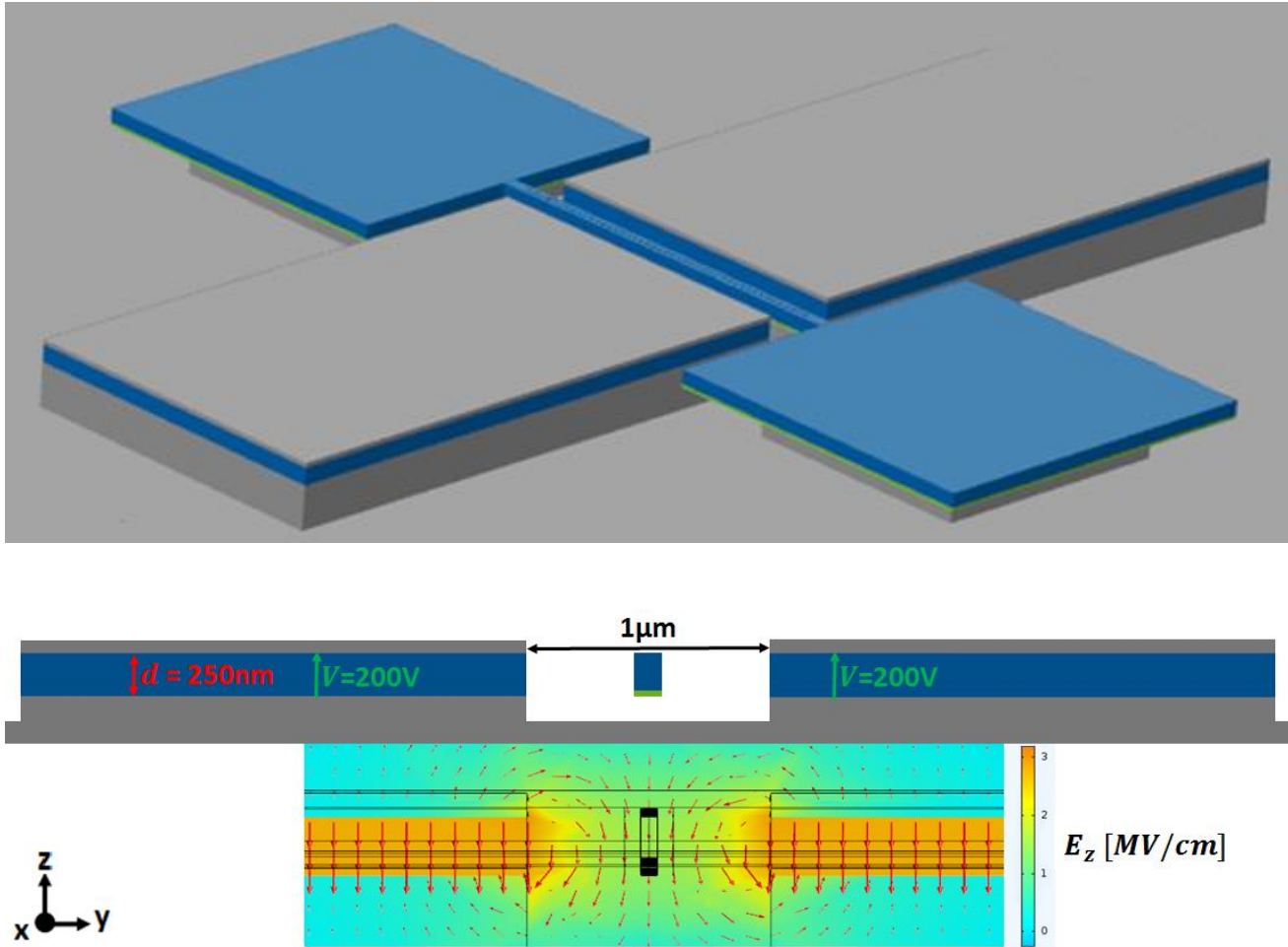
- ✓ Précision de quelques centaines de nm
- ✓ Mesures non destructives
- ✗ Sensible au réchauffement laser



INFLUENCE DE LA COURBURE SUR LE MODE FONDAMENTAL



MESURES



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVE

- ✓ La répartition des contraintes a été prédite sur COMSOL puis vérifié par spectroscopie Raman
- ✓ Des électrodes selon z et y ont été modélisé
- ✓ Une méthode de réglage de la bande interdite photonique selon y a été mise au point

Perspective:

- Travailler avec des puits quantiques de meilleurs qualité
- Fabriquer les nanobeams en porte-à-faux et appliquer la tension selon z et y
- Remplacer le puits quantique par une boîte quantique au centre du nanobeam

[12]



REMERCIEMENTS



Nicolas Grandjean



Raphael Butté



Ian Rousseau



Kanako Shojiki

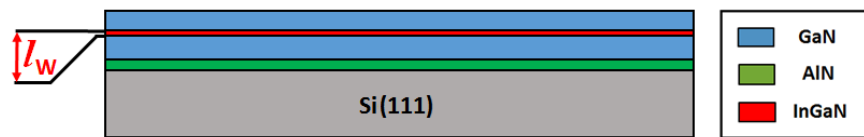
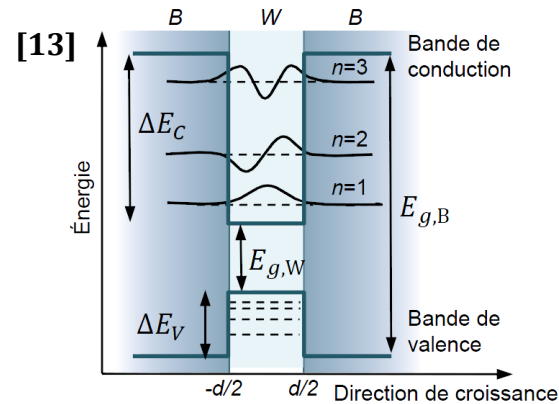
Merci de votre attention

RÉFÉRENCES

- [1] Akahane, Y., Asano, T., Song, B. S., & Noda, S. (2003). High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. *Nature*, 425(6961), 944-947.
- [2] Lodahl, P., Mahmoodian, S., & Stobbe, S. (2015). Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures. *Reviews of Modern Physics*, 87(2), 347.
- [3] G.Rossbach. *High-Density Excitonic Effects in GaN : Mott-Transition and Polariton Lasing*. PhD thesis, EPFL, n.6245, 2014.
- [4] Giorgio Signorello. *Uniaxial Stress Effects in Zincblende and Wurtzite GaAs Nanowires: an Optical Spectroscopy Study*. PhD thesis, Universität Basel, 2014.
- [5] KG Lyon, GL Salinger, CA Swenson, and GK White. Linear thermal expansion measurements on silicon from 6 to 340 K. *Journal of Applied Physics*, 48(3) :865–868, 1977.
- [6] Hiromichi Watanabe, Naofumi Yamada, and Masahiro Okaji. Linear thermal expansion coefficient of silicon from 293 to 1000 K. *International journal of thermophysics*, 25(1) :221–236, 2004.
- [7] Glen A Slack and SF Bartram. Thermal expansion of some diamondlike crystals. *Journal of Applied Physics*, 46(1) :89–98, 1975.
- [8] G Ndong, G Picardi, C Licitra, D Rouchon, J Eymery, and R Ossikovski. Determination of the biaxial stress in strained silicon nano-stripes through polarized oblique incidence raman spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 114(16) :164309, 2013.
- [9] RJ Briggs and AK Ramdas. Piezospectroscopic study of the raman spectrum of cadmium sulfide. *Physical Review B*, 13(12) :5518, 1976.
- [10] F Demangeot, J Frandon, MA Renucci, Olivier Briot, Bernard Gil, and Roger-Louis Aulombard. Raman determination of the phonon deformation potentials in -GaN. *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*, 1 :e23, 1996.
- [11] I.Sanchez. Characterization of the active medium and optical modes of III-nitride based nanobeam photonic cavities. Master's thesis, EPFL, 2016.
- [12] Murray W McCutcheon and Marko Loncar. Design of a silicon nitride photonic crystal nanocavity with a quality factor of one million for coupling to a diamond nanocrystal. *Optics express*, 16(23) :19136–19145, 2008.

CONFINEMENT DES HÉTÉROSTRUCTURES

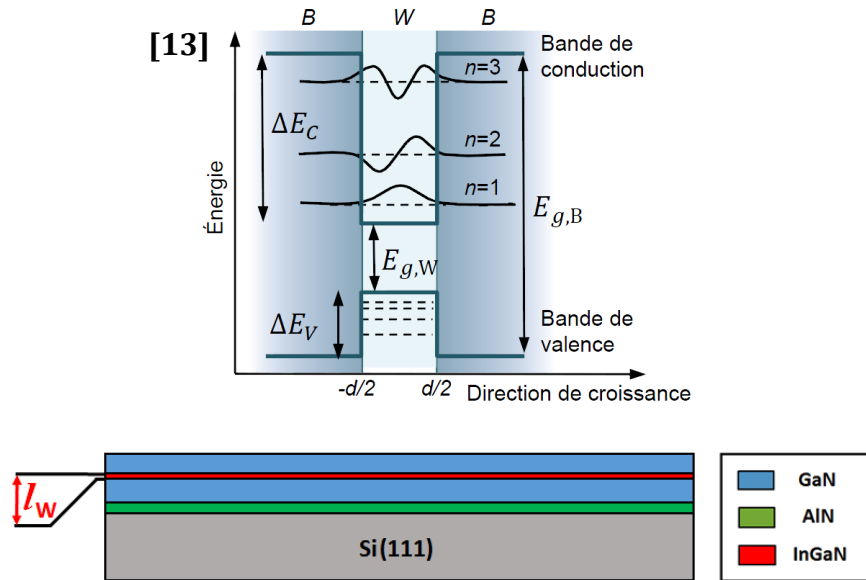
Puits de potentiel



$$\varepsilon_{QW} = \frac{a_{GaN} - a_{InGaN}}{a_{InGaN}} = -1.65\%$$

CONFINEMENT DES HÉTÉROSTRUCTURES

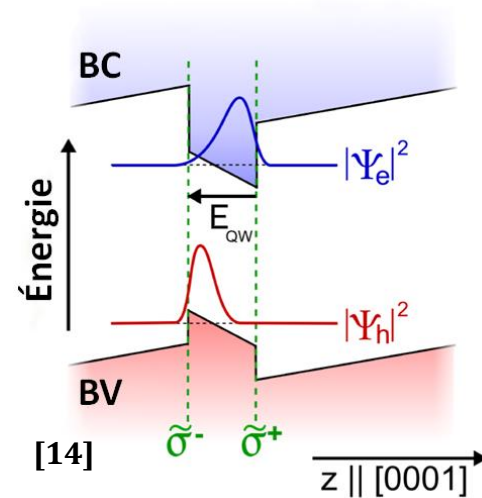
Puits de potentiel



$$\varepsilon_{QW} = \frac{a_{GaN} - a_{InGaN}}{a_{InGaN}} = -1.65\%$$

Effet Stark

$$E_{QW} = \frac{(P_{sp,B} - P_{sp,W})}{\varepsilon_W} + \frac{(P_{pz,B} - P_{pz,W})}{\varepsilon_W} + E_{ext}$$



$$\Delta E = -e \cdot l_W \cdot E_{QW}$$

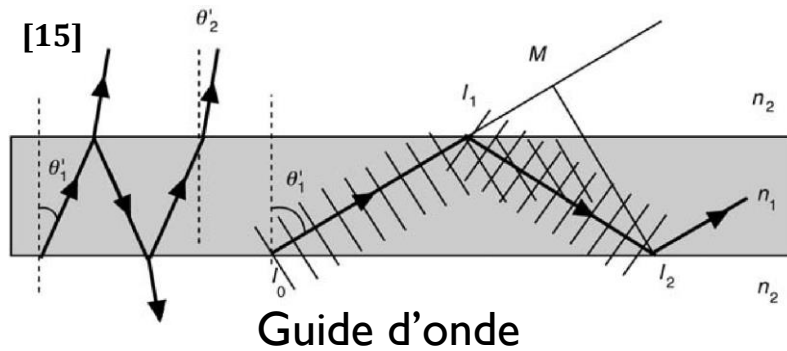
Pour $E_{QW} = 1 \text{ MV/cm}$

$\Delta E = 0.1 \text{ eV}$

$\Delta \lambda = 10 \text{ nm}$ pour l'InGaN

CONFINEMENT PHOTONIQUE

Réflexion totale interne



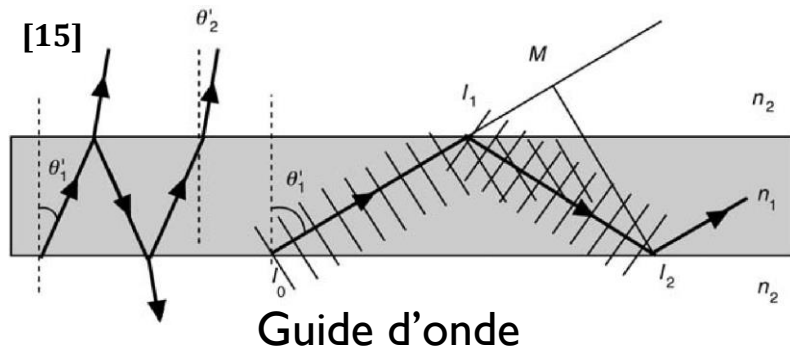
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$

CONFINEMENT PHOTONIQUE

Réflexion totale interne

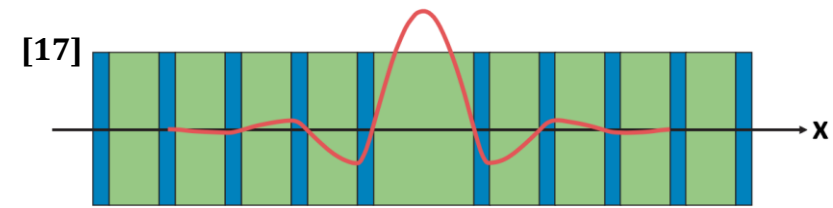
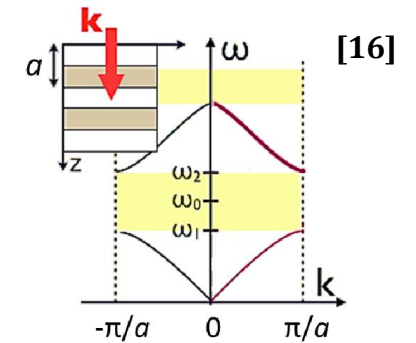
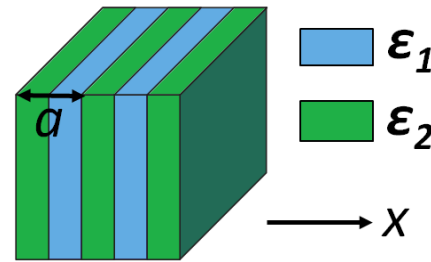


$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$

Cavité photonique



CONSEQUENCES DES DÉFORMATIONS

Sur le puits quantique

$$E_{QW}(\epsilon_{GaN}) = \frac{P_{sp}^{GaN} - P_{sp}^{InGaN}}{\epsilon_r \epsilon_0} + \frac{P_{pz}^{GaN}(\epsilon_{GaN}) - P_{pz}^{InGaN}(\epsilon_{GaN})}{\epsilon_r \epsilon_0} - \frac{P_{pz}^{InGaN}(-1,65\%)}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$P_{pz} = e_{31}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + e_{33} \epsilon_{zz}$$

CONSEQUENCES DES DÉFORMATIONS

Sur le puits quantique

$$E_{QW}(\epsilon_{GaN}) = \frac{P_{sp}^{GaN} - P_{sp}^{InGaN}}{\epsilon_r \epsilon_0} + \boxed{\frac{P_{pz}^{GaN}(\epsilon_{GaN}) - P_{pz}^{InGaN}(\epsilon_{GaN})}{\epsilon_r \epsilon_0}} - \frac{P_{pz}^{InGaN}(-1,65\%)}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$P_{pz} = e_{31}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + e_{33} \epsilon_{zz}$$

Déformations de l'ordre de 0,1% : négligeable

CONSEQUENCES DES DÉFORMATIONS

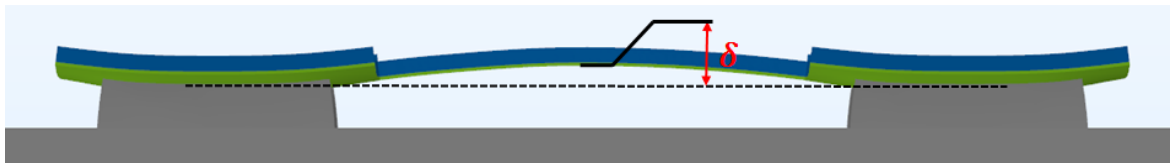
Sur le puits quantique

$$E_{QW}(\epsilon_{GaN}) = \frac{P_{sp}^{GaN} - P_{sp}^{InGaN}}{\epsilon_r \epsilon_0} + \boxed{\frac{P_{pz}^{GaN}(\epsilon_{GaN}) - P_{pz}^{InGaN}(\epsilon_{GaN})}{\epsilon_r \epsilon_0}} - \frac{P_{pz}^{InGaN}(-1,65\%)}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$P_{pz} = e_{31}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + e_{33} \epsilon_{zz}$$

Déformations de l'ordre de 0,1% : négligeable

Sur le cristal photonique



Fleche de $\delta = 5\text{nm}$

Modélisation sur FDTD : pas d'influence

RÉFÉRENCES ANNEXE

- [13] Eli Kapon. Quantum wire lasers. *Proceedings of the IEEE*, 80(3) :398–410, 1992.
- [14] G.Rossbach. *High-Density Excitonic Effects in GaN : Mott-Transition and Polariton Lasing*. PhD thesis, EPFL, n.6245, 2014.
- [15] Emmanuel Rosencher and Borge Vinter. *Optoelectronics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [16] Jana Jágerská. *Dispersion Properties of Photonic Crystals and Silicon Nanostructures Investigated by Fourier-Space Imaging*. PhD thesis, EPFL, n.4956, 2011.
- [17] D.John, G.Steven, N.Joshua, and D.Robert. *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, Princeton, second edition, 2007.