

Caractérisation du dopage de dispositifs de puissance en 4H-SiC par KPFM et spectroscopie μ -Raman

Anaël Sédilot¹, Enora Vuillermet¹, Régis Deturche¹, Elise Usureau¹, Jérémie Béal¹, Nicolas Bercu² et Mihai Lazar¹

¹L2n, Université de Technologie de Troyes, Troyes

²LRN, Université de Reims-Champagne-Ardennes, Reims



I. INTRODUCTION

II. PRESENTATION DES EQUIPEMENTS

III. RESULTATS

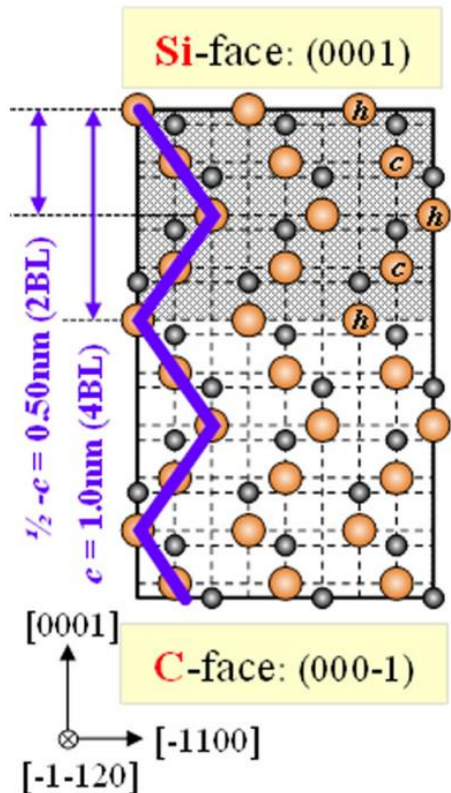
IV. CONCLUSION

I - INTRODUCTION

Dopage du 4H-SiC

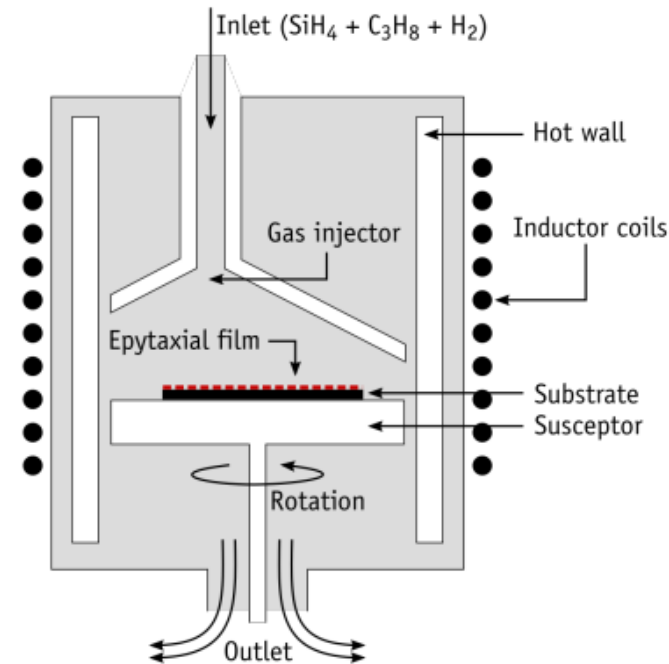
- SiC est un semiconducteur à large bande interdite
- 4H-SiC est la forme cristalllographique la plus commercialisée
- Dopage p et n du SiC → dispositifs électroniques de tout types : MOSFETs, JFETs, diodes....

Cristallographie de 4H-SiC



K. Ashida *et al*, *JVSTB*. 33 (2015)

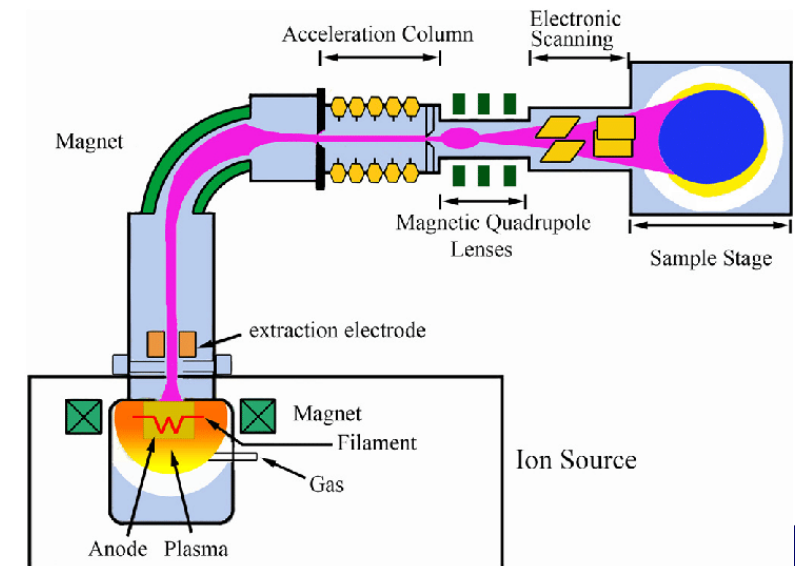
Introduction de dopants pendant la croissance épitaxiale (CVD)



J. Coutinho *et al*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 986 (2011)

Dopage

Dopage localisé par implantation ionique

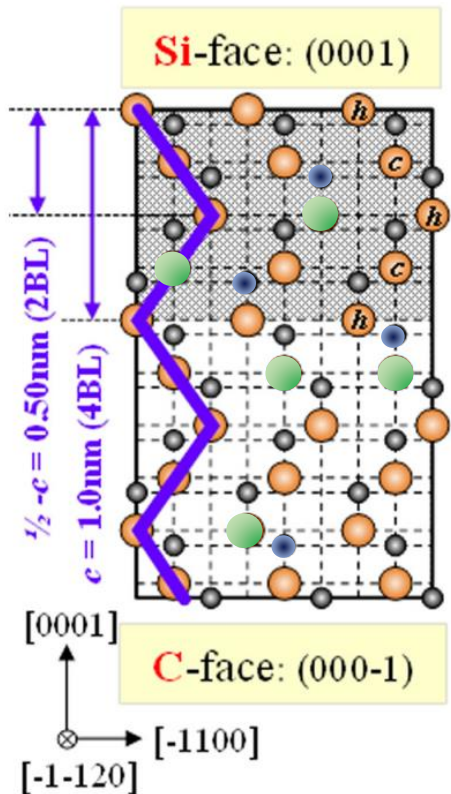


X. Wang *et al*, *Appl. Phys. Rev.* 7 (2020)

Dopage du 4H-SiC

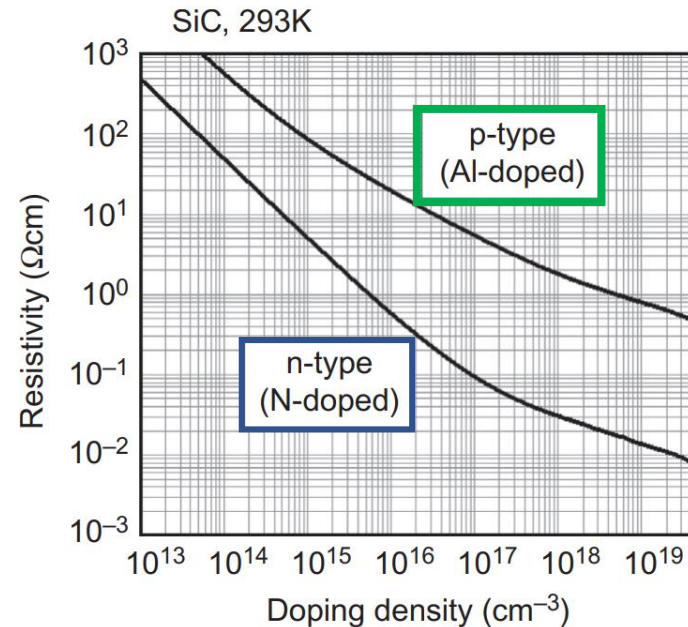
- SiC est un semiconducteur à large bande interdite
- 4H-SiC est la forme cristalllographique la plus commercialisée
- Dopage p et n du SiC → dispositifs électroniques de tout types : MOSFETs, JFETs, diodes....

Cristallographie de 4H-SiC



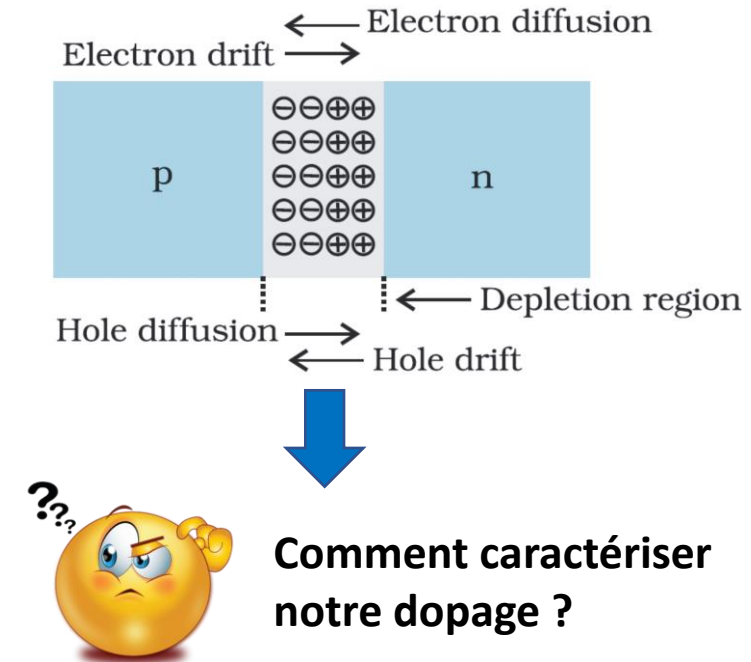
K. Ashida et al, JVSTB. 33 (2015)

Résistivité de 4H-SiC en fonction du dopage



T. Kimoto, SiC materials properties, WDB Semiconductor Power Devices, Woodhead Publishing (2019)

Jonction p-n

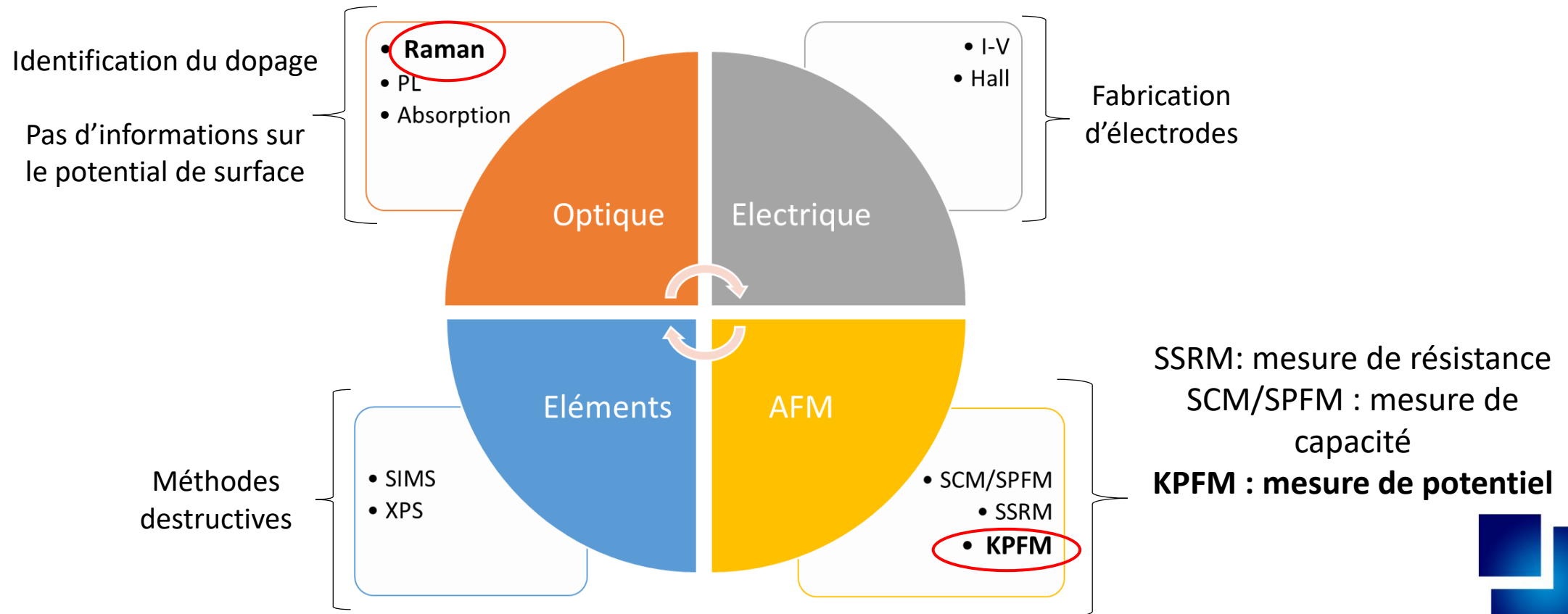


Comment caractériser notre dopage ?

Caractérisation du dopage local en surface

Dans quel but ?

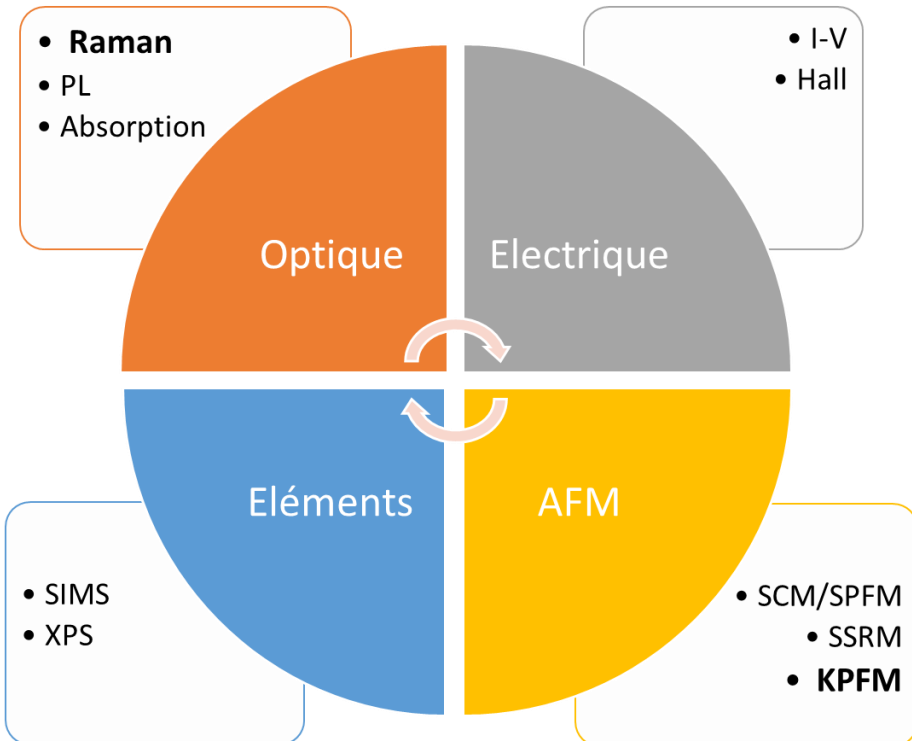
- SiC dopé → pas de différence d'aspect de surface après dopage → localisation des zones dopées
- Vérifier si on a ou non des pics de potentiel → à éviter
- Caractériser les jonctions p-n → zones de déplétion de charges



Caractériser le dopage

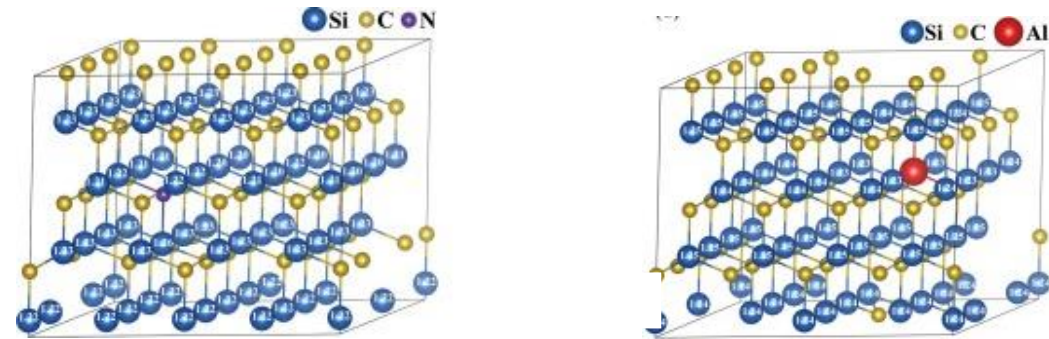
Dans quel but ?

- SiC dopé: pas de différence d'aspect de surface après dopage → localisation des zones dopées
- Vérifier si on a ou non des pics de potentiel → à éviter
- Caractériser les jonctions p-n → zones de déplétion de charges

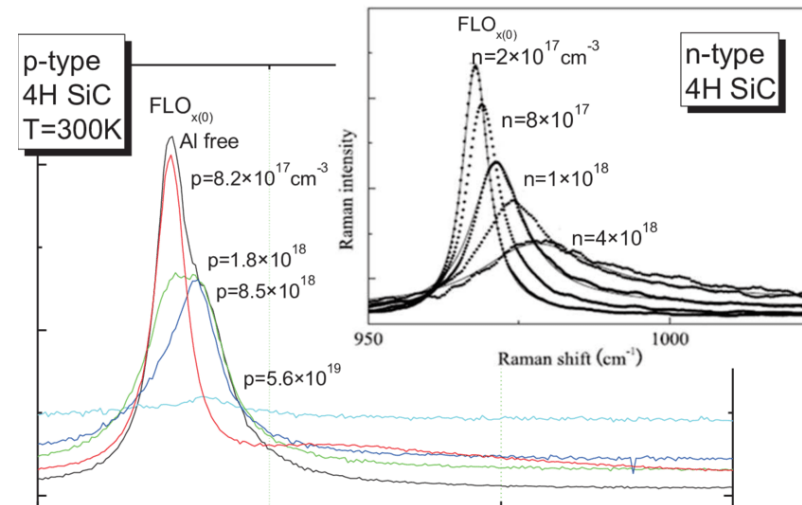


μRaman

Dépendant de la cristallographie du matériau



→ Insertions de N et Al déforment la maille cristalline de 4H-SiC



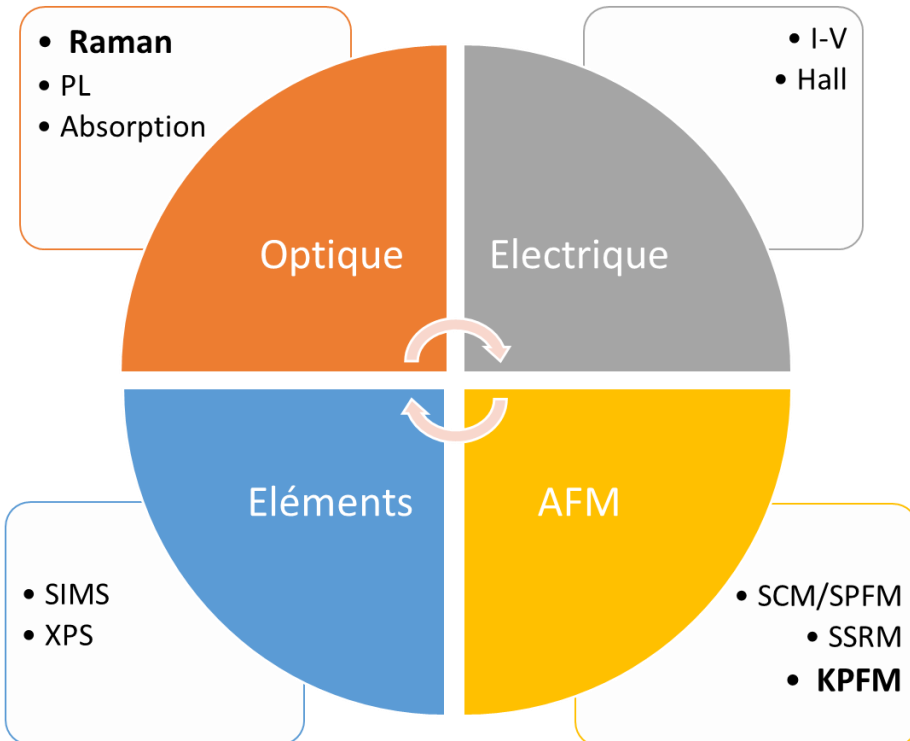
Variations pic Raman FLO de 4H-SiC selon le dopage Al ou N

P. Kwaśnicki, Thèse, Université Montpellier II (2014)

Caractériser le dopage

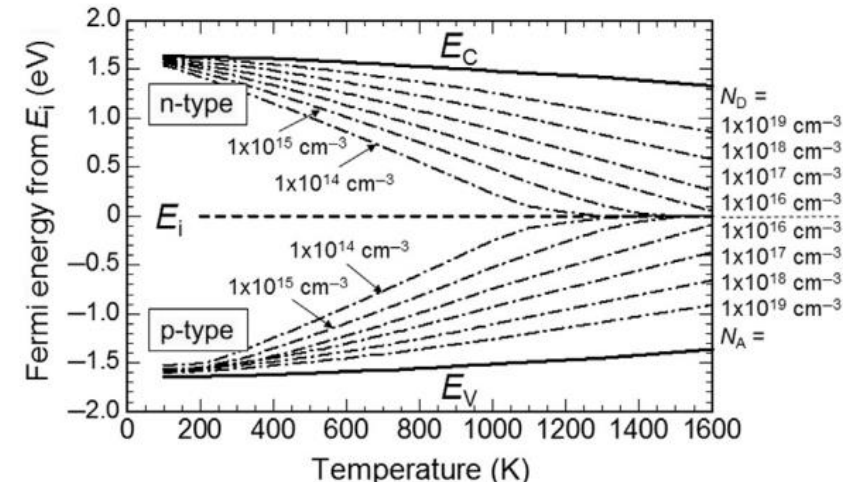
Dans quel but ?

- SiC dopé: pas de différence d'aspect de surface après dopage → localisation des zones dopées
- Vérifier si on a ou non des pics de potentiel → à éviter
- Caractériser les jonctions p-n → zones de déplétion de charges

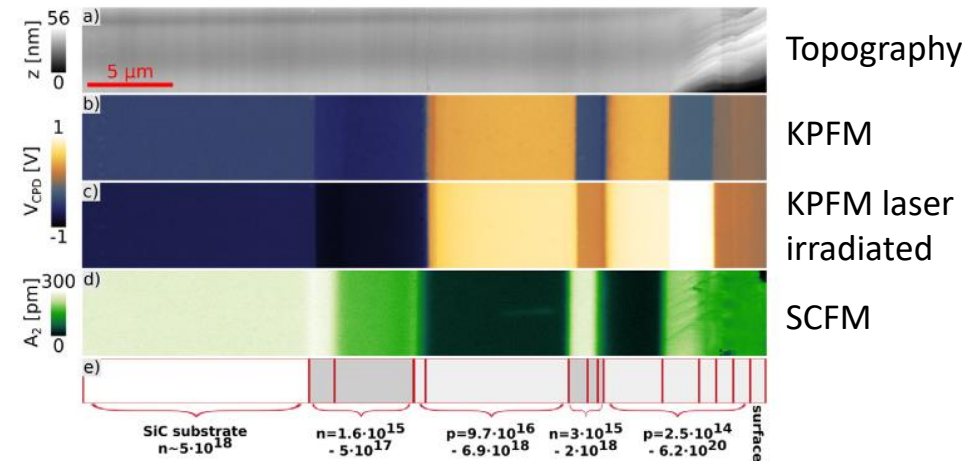


KPFM

Mesure la différence de fonction de travail entre deux matériaux



T. Kimoto, *SiC materials properties, WDB Semiconductor Power Devices*, Woodhead Publishing (2019)



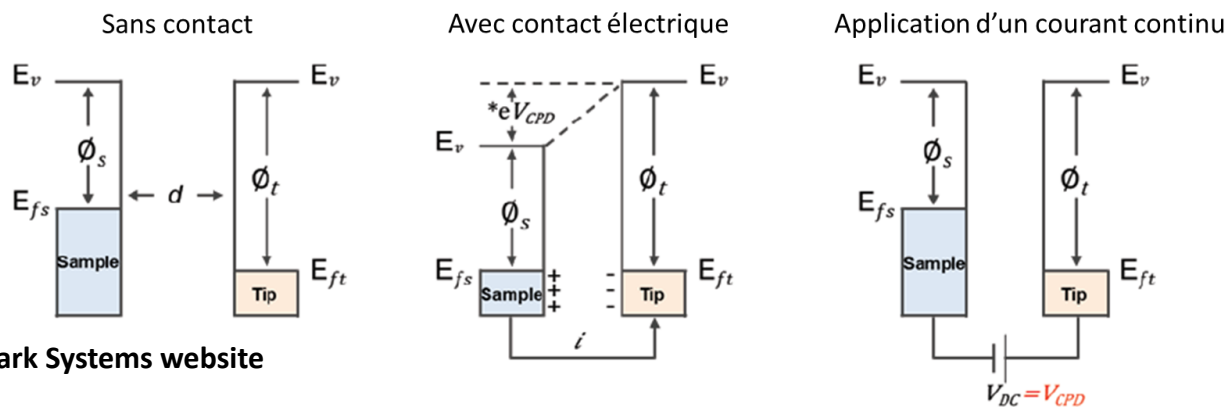
U. Gysin et al, *Microelectronic Engineering*, 160 (2016)

→ Le dopage modifie le niveau de Fermi de 4H-SiC

II - PRINCIPE DES MESURES

Microscopie à sonde Kelvin (KPFM)

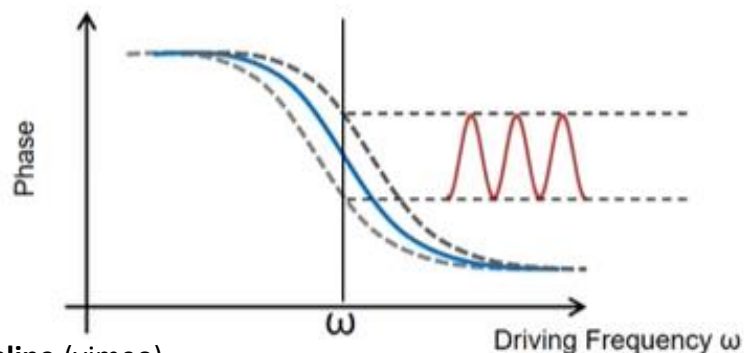
Principe mode FM-KPFM



KPFM, Park Systems website

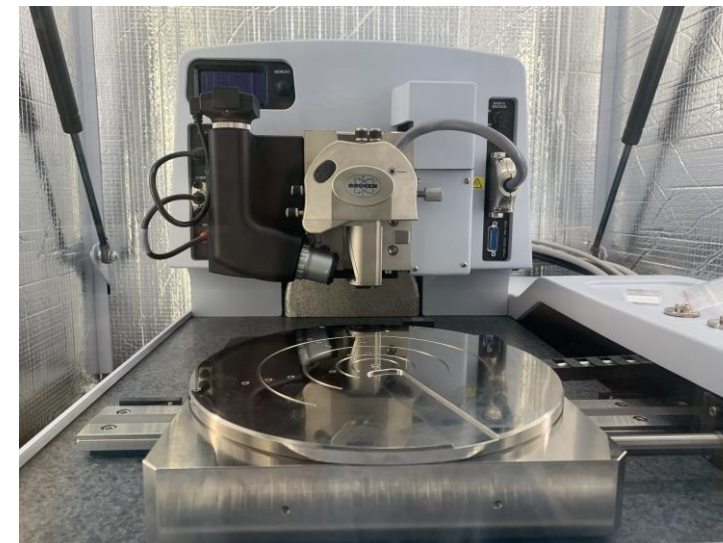
Interférences entre oscillations mécaniques AFM et forces électrostatiques
 → **déphasage** de l'oscillation de la pointe **par rapport à son oscillation d'origine**

Correction du déphasage par application de $V_{DC} = V_{sample} = V_{CPD}$



KPFM, C. Froeck course online (vimeo)

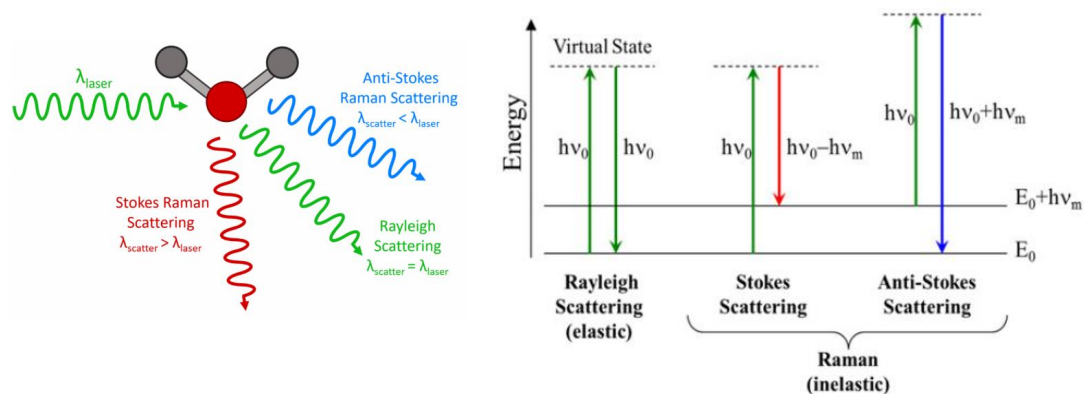
AFM Dimension Icon de Bruker



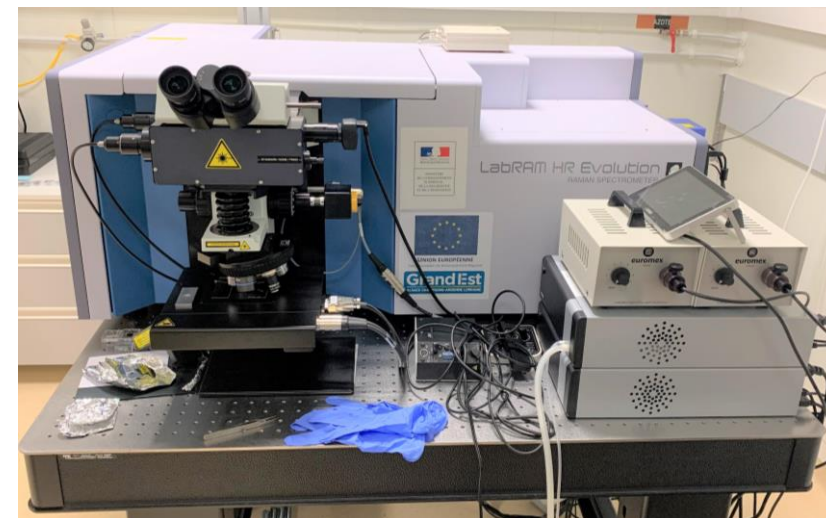
- Peak Force KPFM : fusion de FM-KPFM et Peak Force Tapping
- Fréquence 0,100 Hz
- Lift KPFM 100nm
- Force 4nN
- Pointes SCM PIT V2

Microscopie Raman

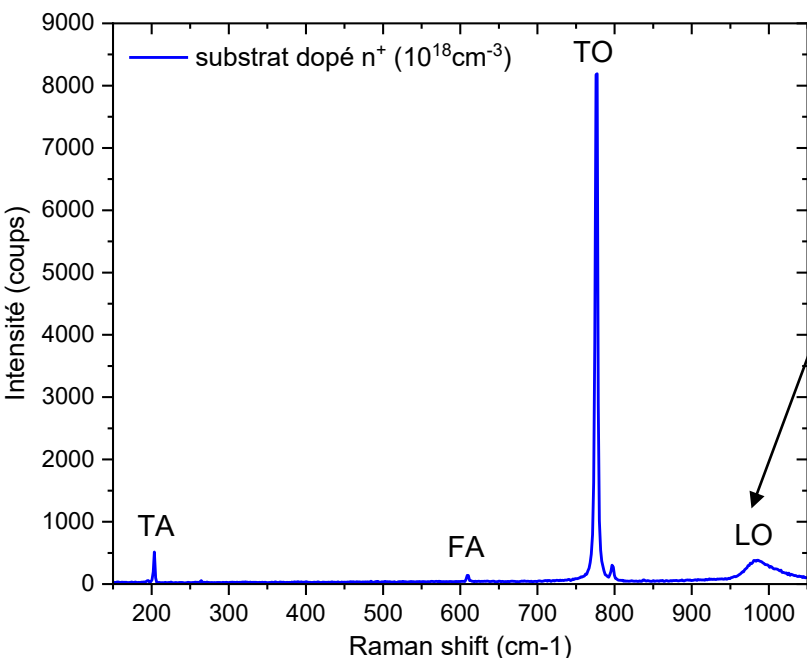
Principe



Raman Labram HR evolution de Horiba



- Objectif x40
- Laser 325nm (qqes μm)
- Grating 1800nm
- Ouverture de l'objectif 100
- Temps d'acquisition/point 10s



Dopage = intensité et FWHM des pics variant

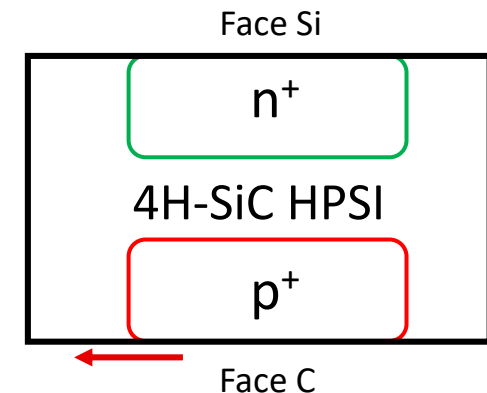
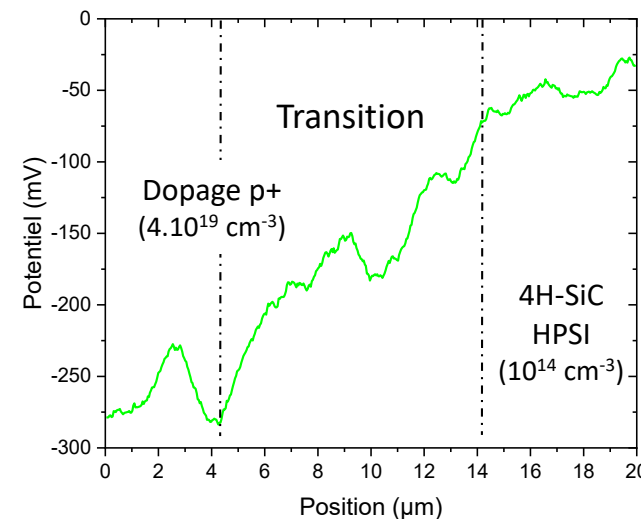
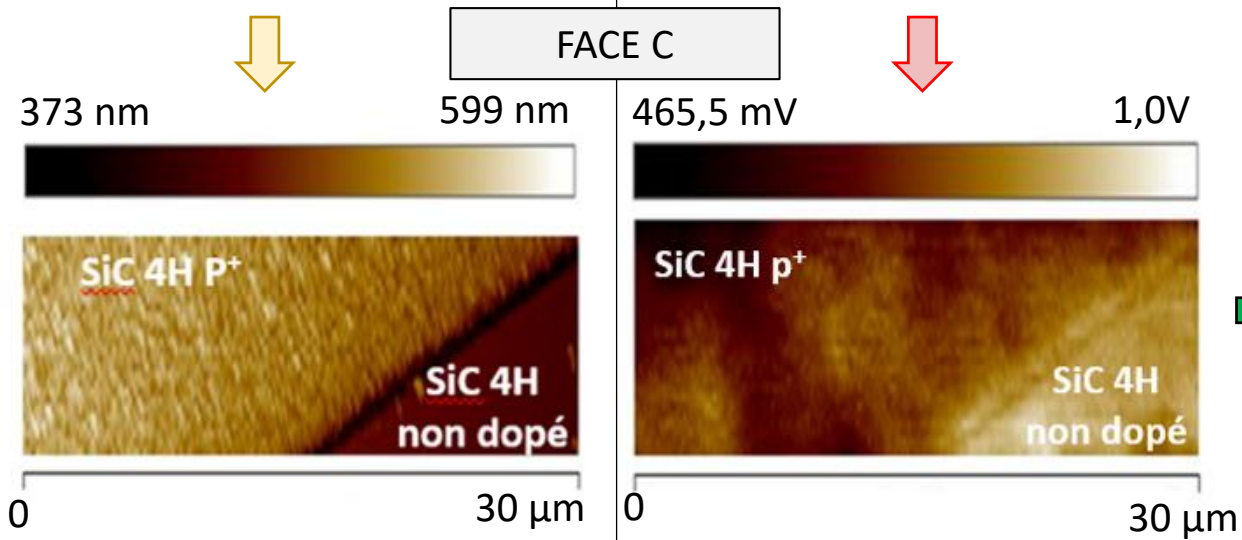
Raman 4H-SiC → on étudie variations du pic LO

III - RESULTATS

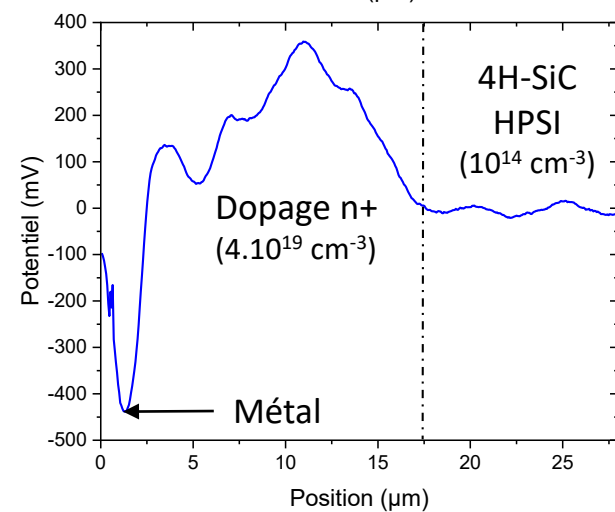
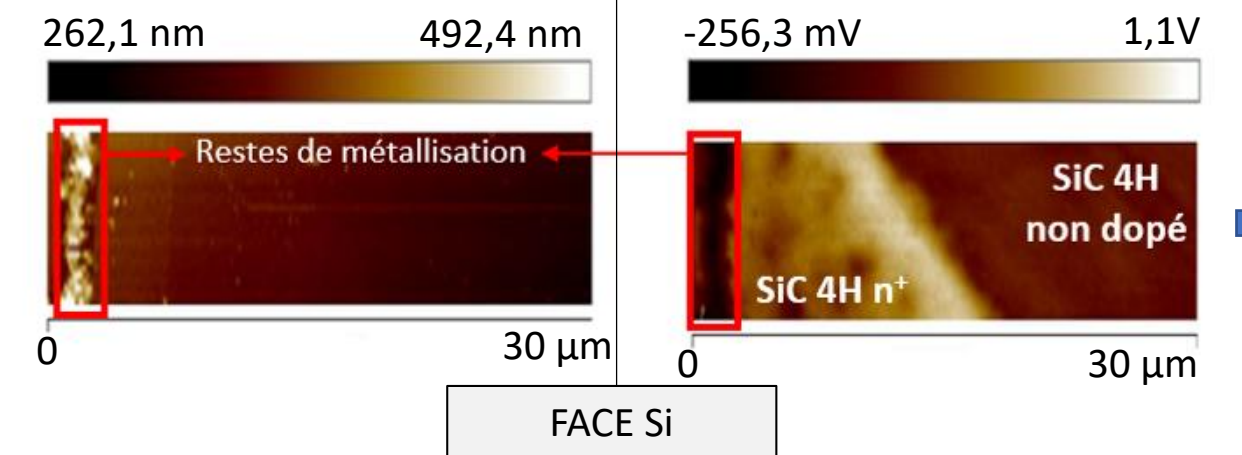
Diode p-n verticale - KPFM

AFM - TOPOGRAPHIE

KPFM- POTENTIEL



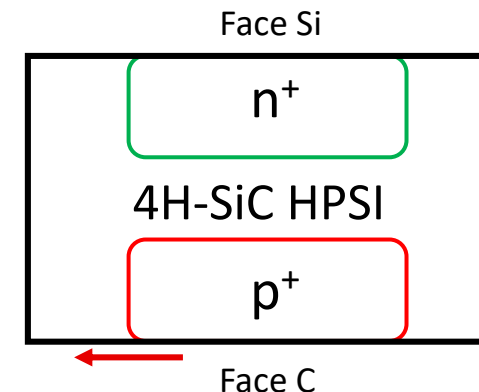
➤ Dopage p⁺ abaisse le potentiel (230mV)



➤ Dopage n⁺ augmente le potentiel (180mV)

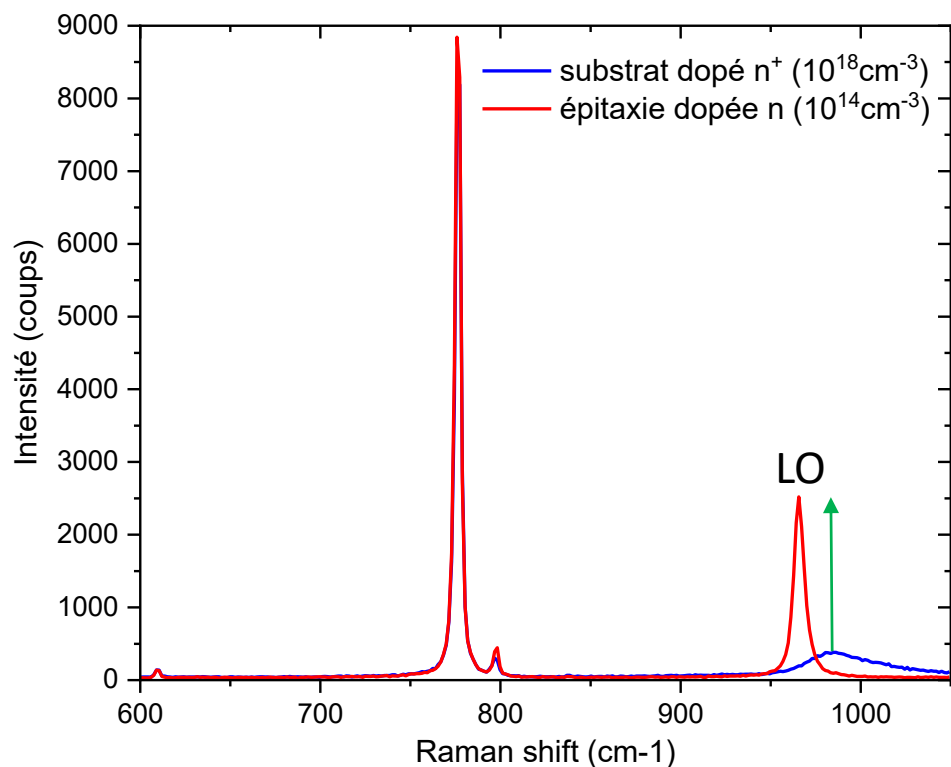
Diode p-n verticale - μ -Raman

- L'augmentation du dopage n abaisse la hauteur du pic LO
- Pas de différence entre le dopage p+ et le 4H-SiC non dopé



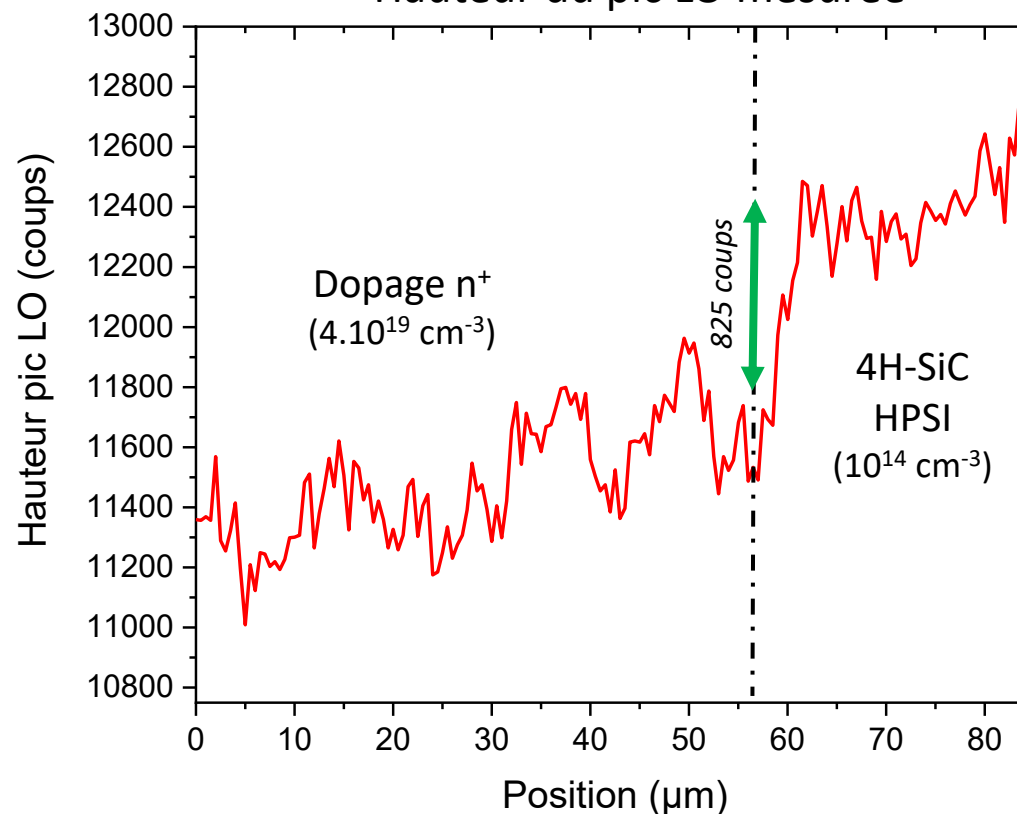
Spectres Raman

4H-SiC avec différents dopages

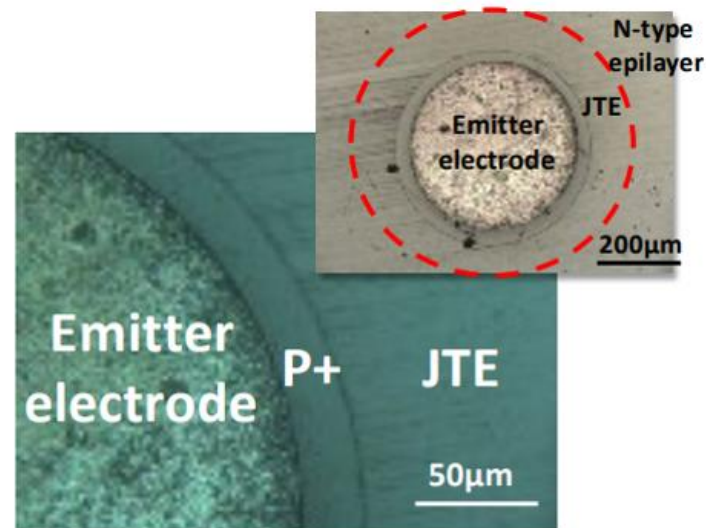
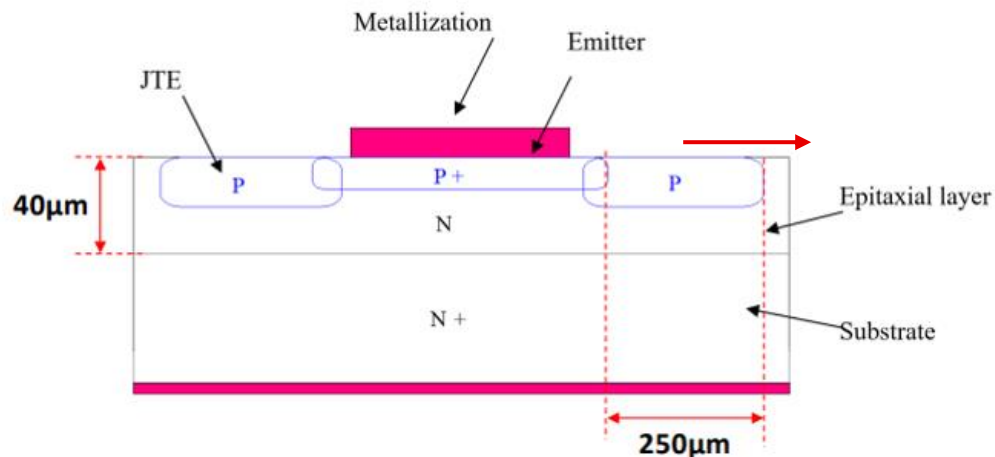


Cartographie Raman

Hauteur du pic LO mesurée

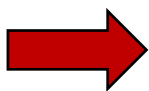


Diode p-n horizontale

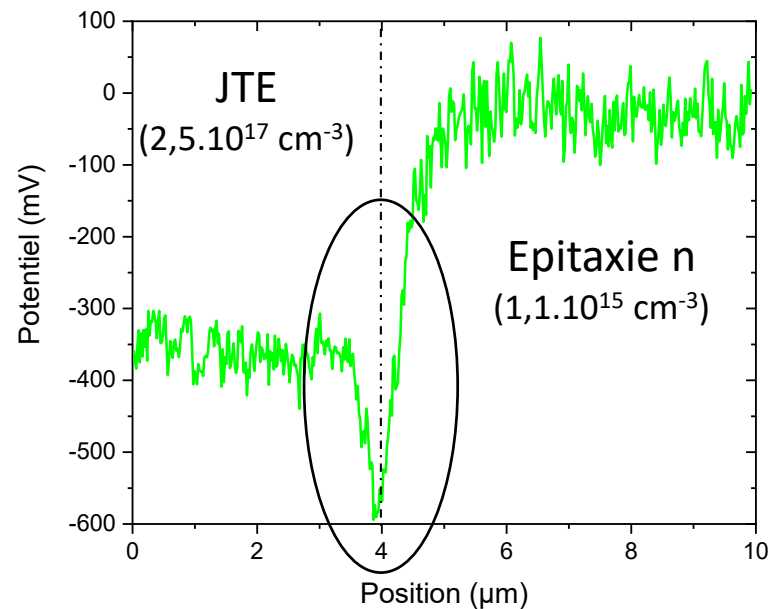
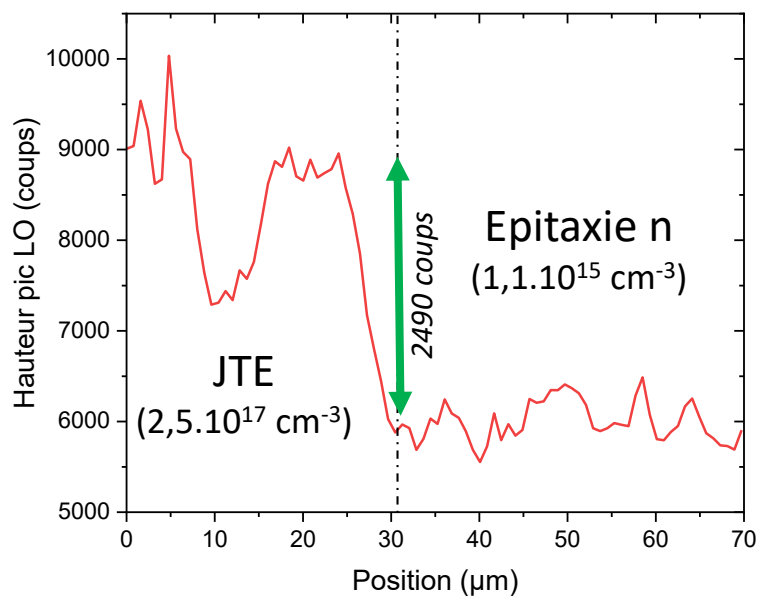


Cartographie

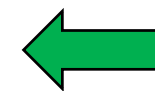
Raman



- Jonction p-n visible
- Dopage n abaisse la hauteur de LO



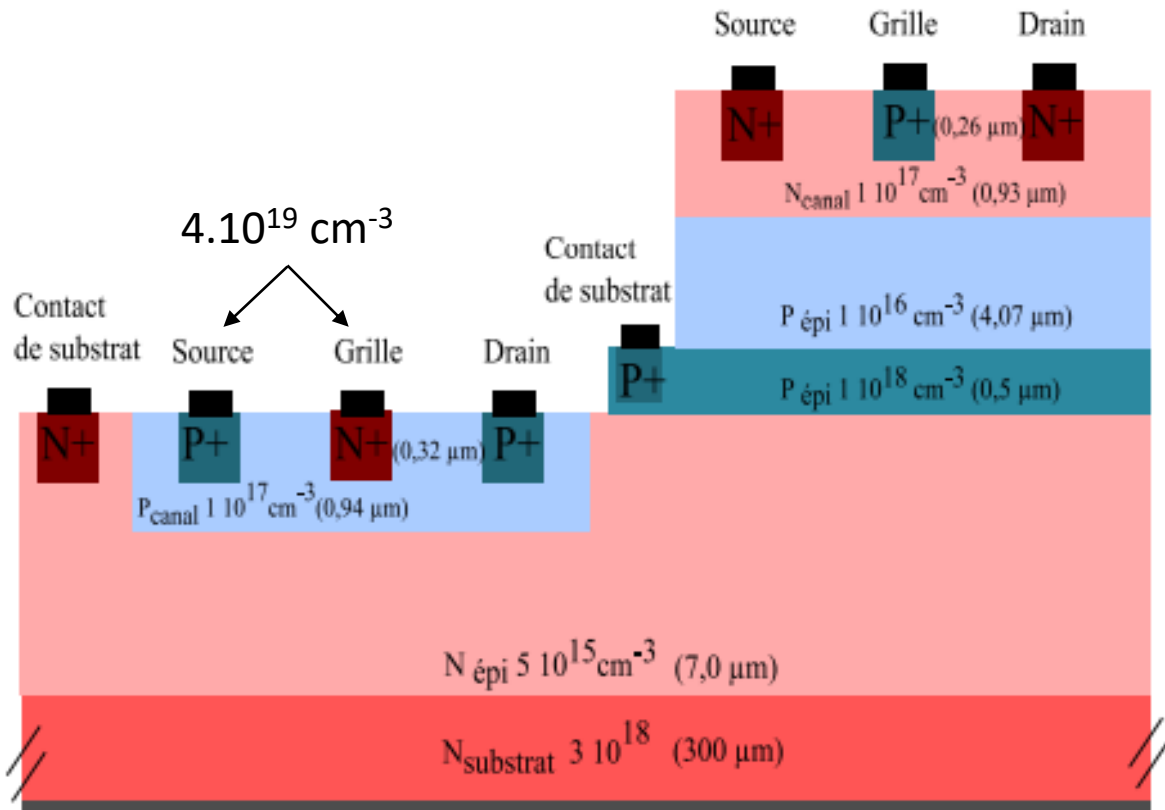
KPFM



- Jonction p-n (332mV) visible avec effet de charge à la transition

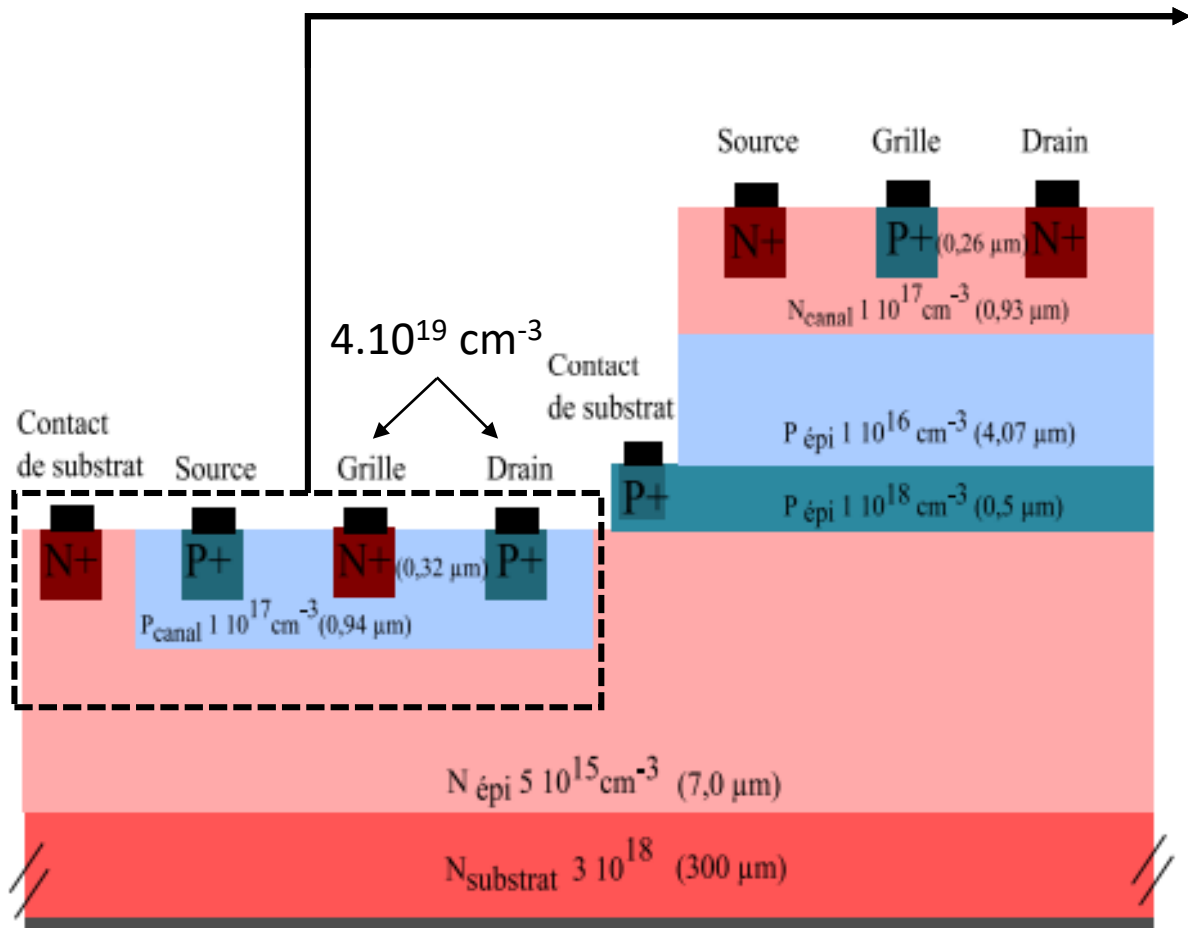
JFETs – transistors à effet de champ

Circuit intégré → 2 transistors JFET canal p et n

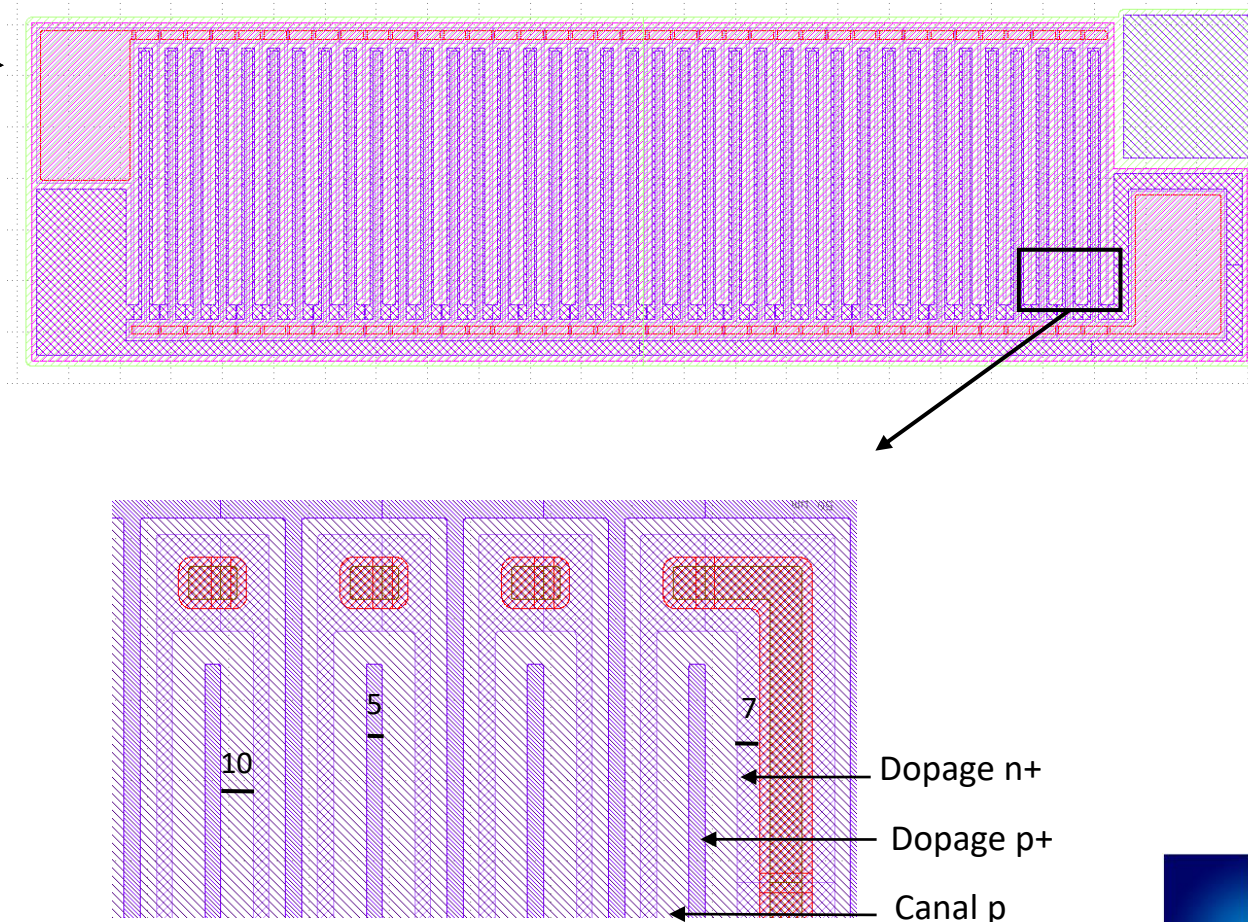


JFET – canal p

Circuit intégré → 2 transistors JFET canal p et n

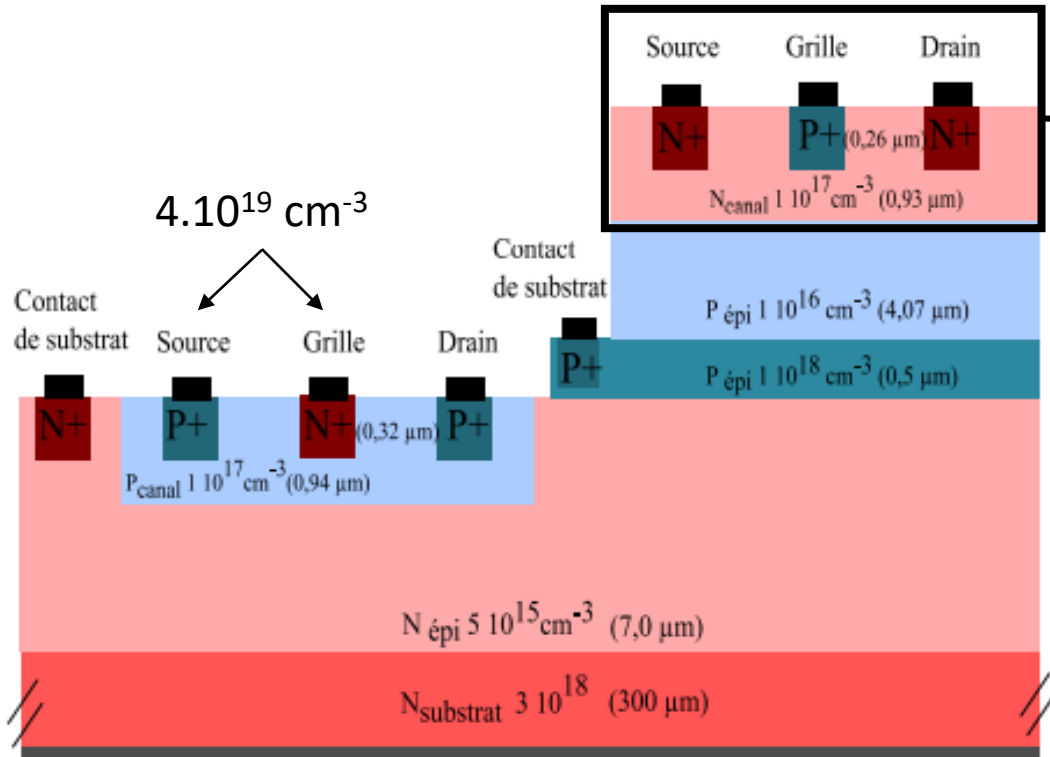


Vue de dessus du transistor à canal P

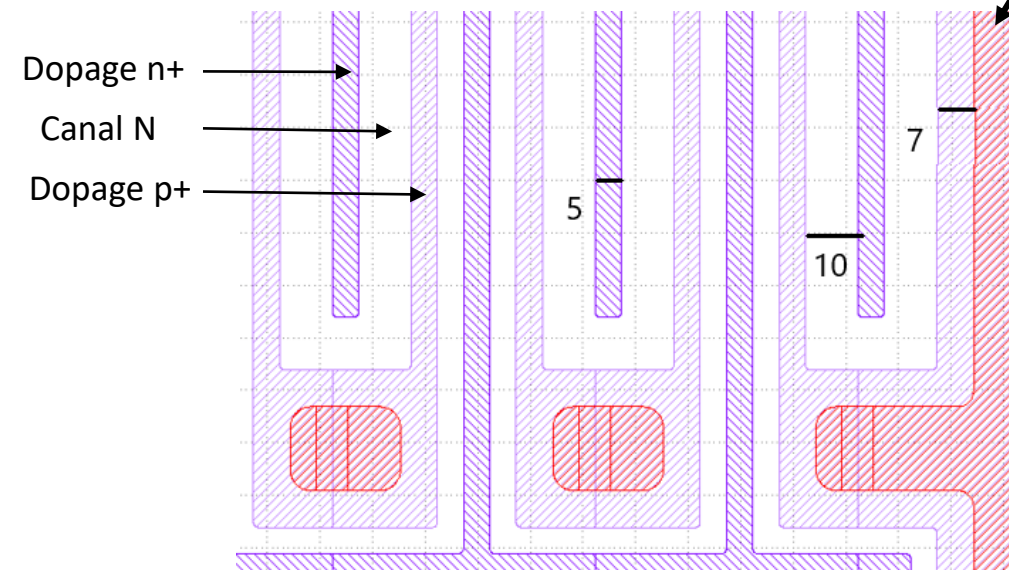
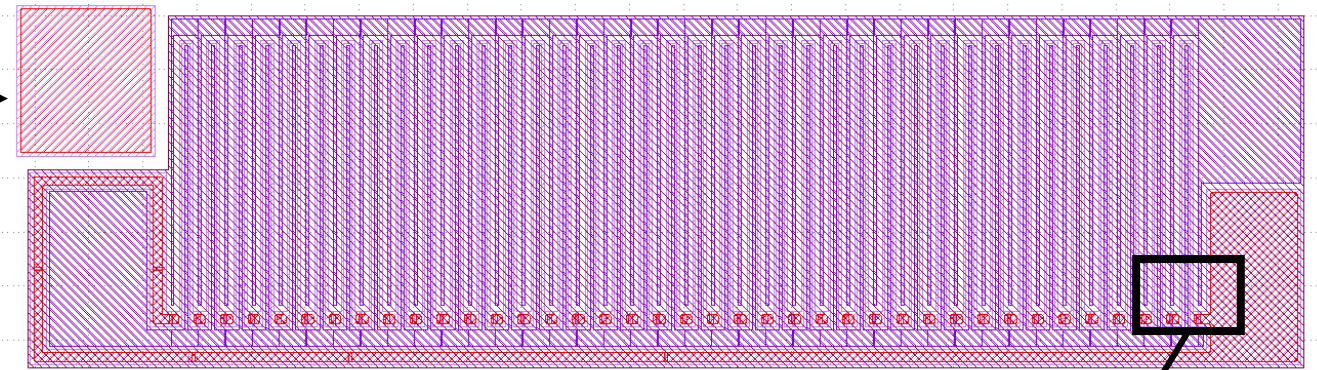


JFET – canal n

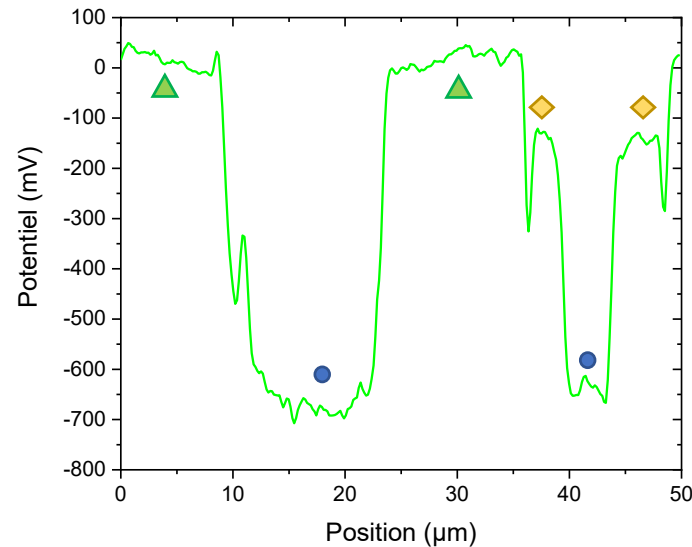
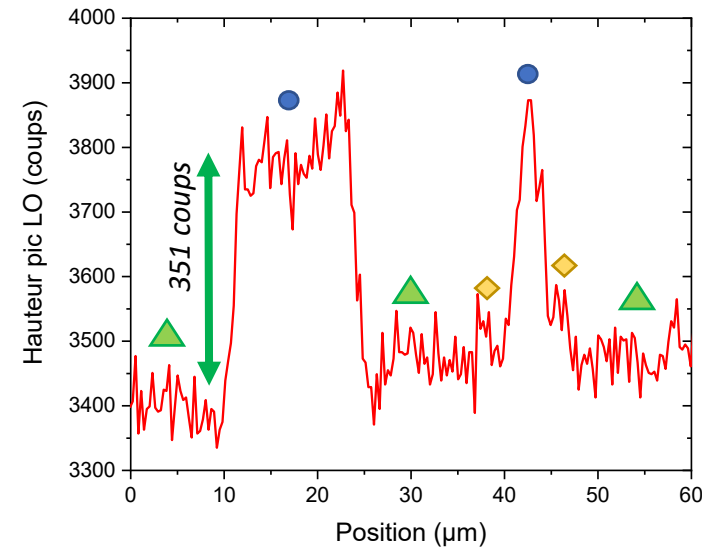
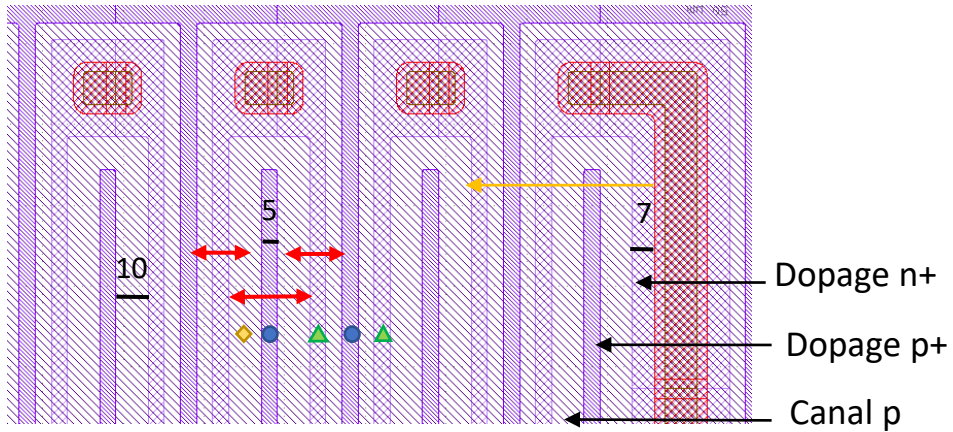
Circuit intégré → 2 transistors JFET canal p et n



Vue de dessus du transistor à canal N



JFET – canal p



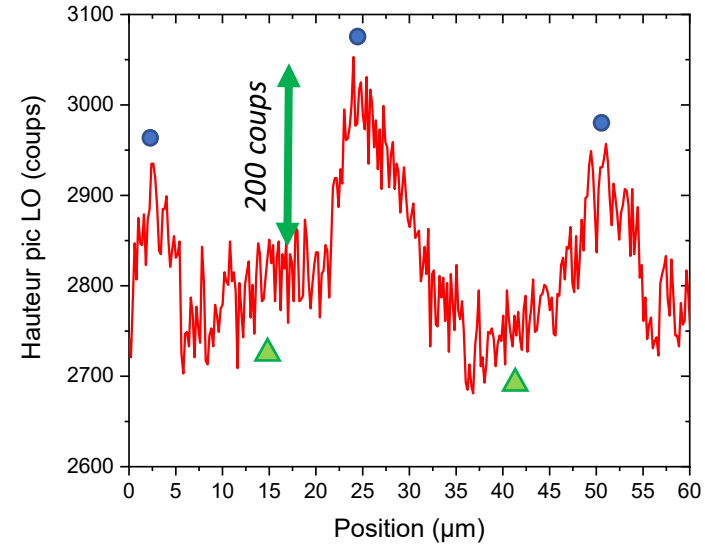
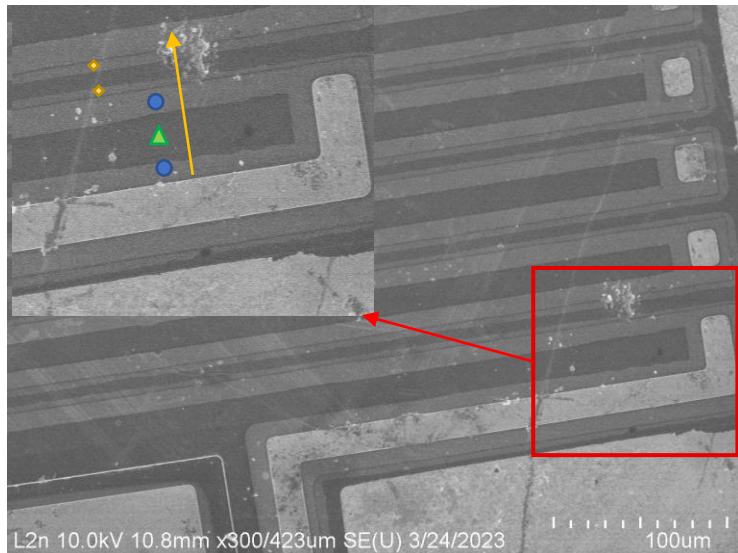
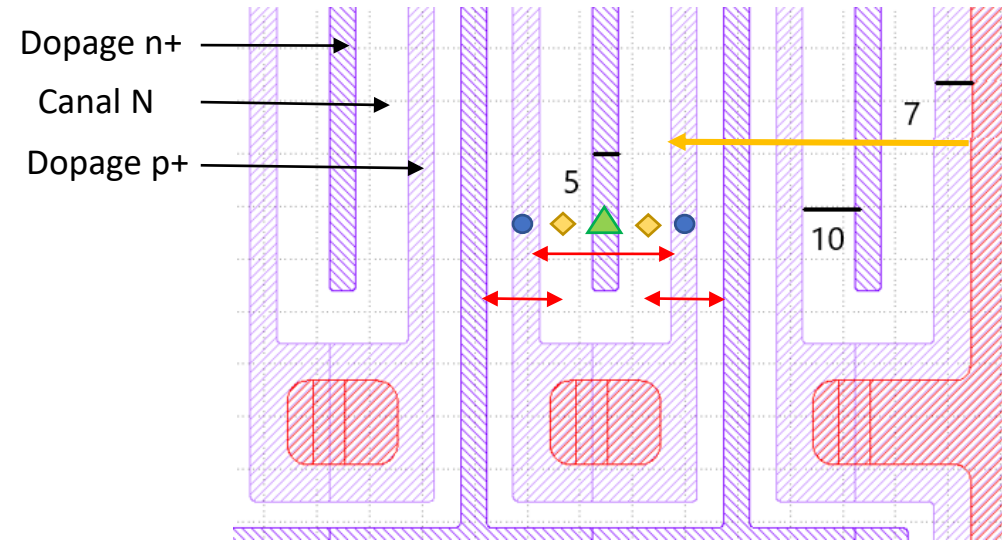
Cartographie Raman

On différencie difficilement le canal p de p+
 → 330 coups de différence entre p+ et n+

Potentiel

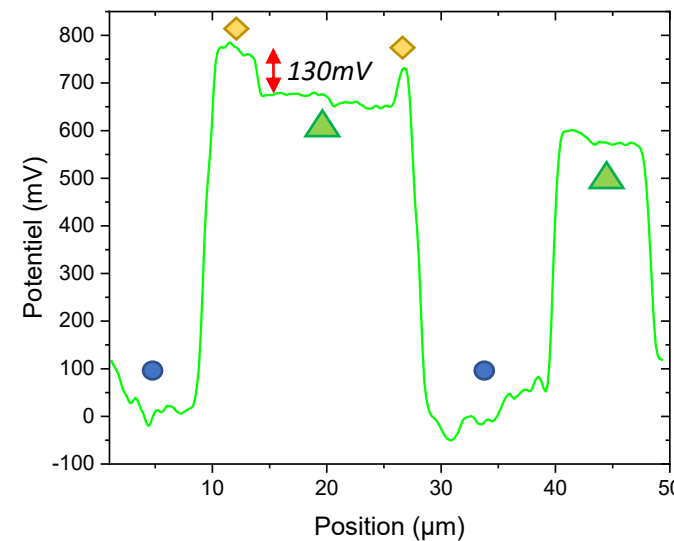
On différencie p+ et n+ du canal p
 → 670mV de différence entre n+ et p+
 → 517mV entre p et p+

JFET – canal n



Cartographie Raman

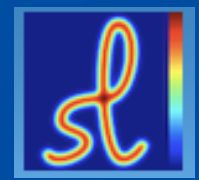
On ne distingue pas le canal n du dopage n+
 → 260 coups de différence entre n+ et p+



Potentiel

Distinction entre n+ et n ou effet de charge ?
 → 602mV de différence entre p+ et n+

- Identification des zones dopées possible par KPFM et μ -Raman
- Cohérence des résultats obtenus par les deux méthodes
- Difficile d'observer la transition entre un dopage p⁺/p ou n⁺/n
- Pas de valeur quantitative de potential de surface obtenue pour l'instant → seulement une différence de potentiel entre deux dopages différents
- Limiter à un balayage de 50 μ m de distance pour le KPFM

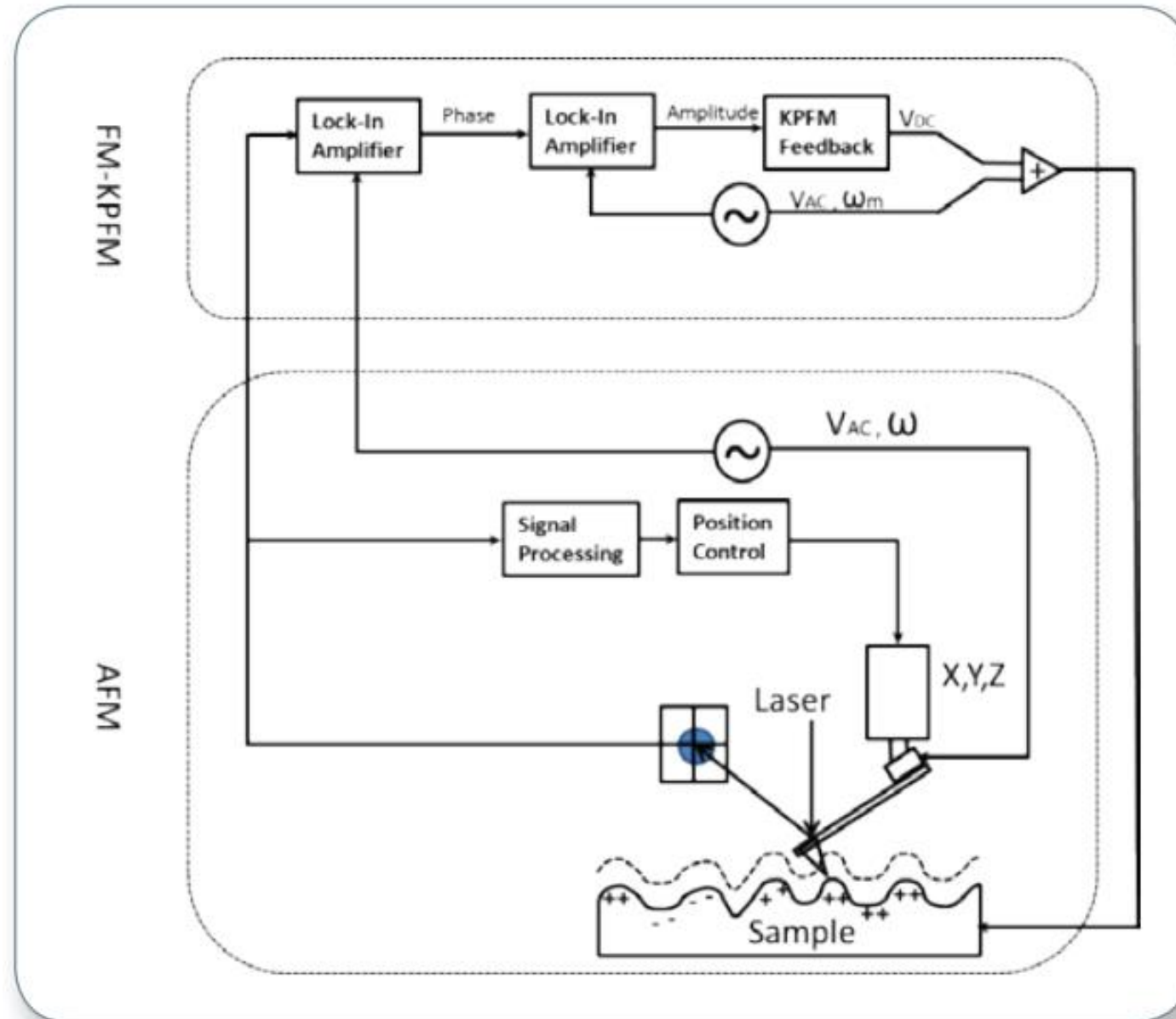


Merci de votre attention !

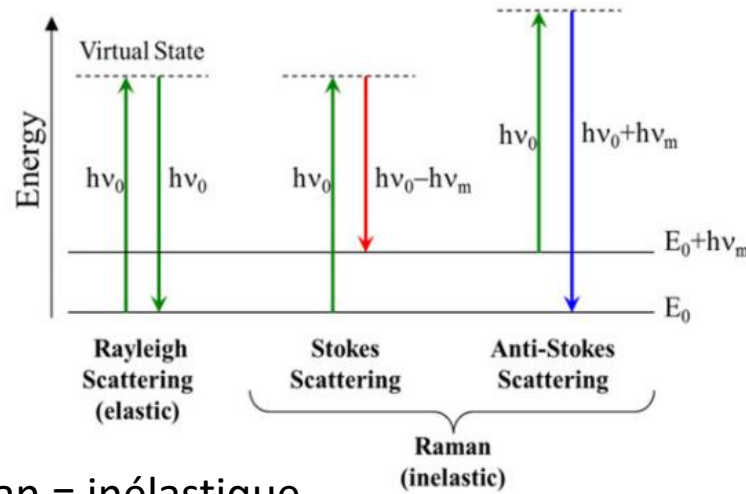
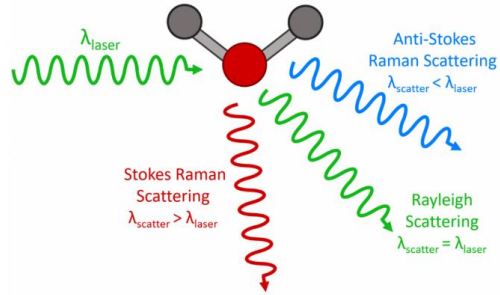
Remerciements

- Anaël Sédilot
- Régis Deturche, Jérémie Béal, Nicolas Bercu, Elise Usureau
- Mihai Lazar

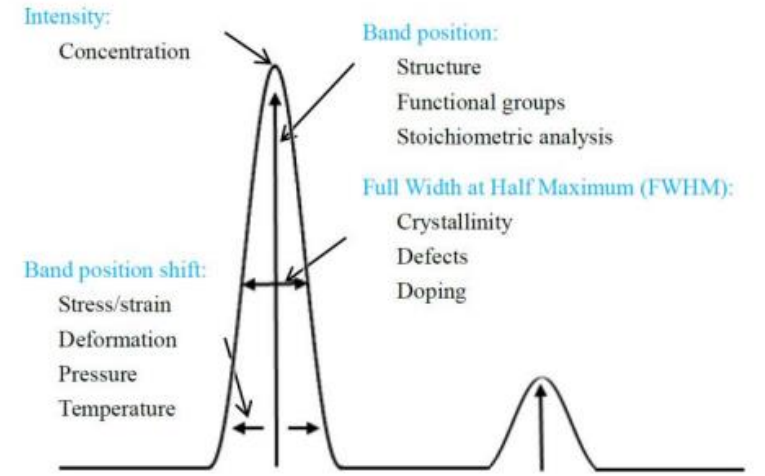




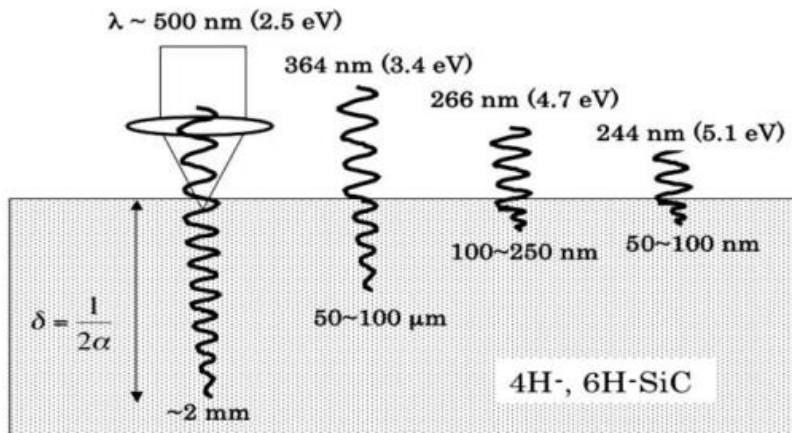
La microscopie Raman



Diffusion Raman = inélastique



Dopage = intensité et FWHM des pics varient



Dopage en surface \rightarrow on utilise le laser de longueur d'onde la plus faible (UV 325nm)