

INCLINE

Inductively Coupled Plasmas for CMOS –compatible etchIng
of III-V integrated laser sourcEs

Plasmas à couplage inductif pour technologies de gravure
compatibles CMOS dédiées aux sources optiques III-V
intégrées

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR



CNRS, Marcoussis



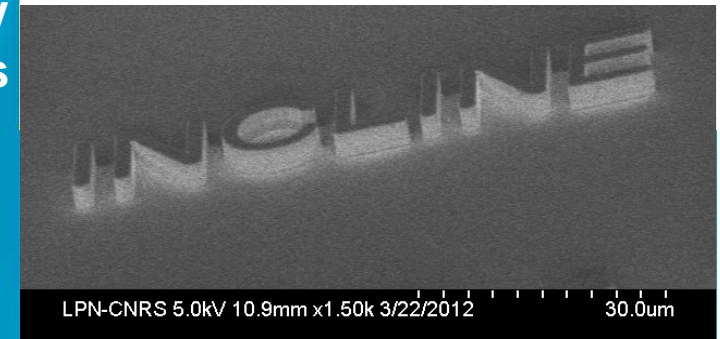
CNRS, Ecole Polytechnique
Palaiseau



CNRS, Univ. Nantes



CNRS, Ecole Centrale Lyon



- **Projet interdisciplinaire : CSD STIC et SPI**
- **Du 01/10/2009 au 31/12/2012 (39 mois)**
- **ANR Blanc (ANR-09-BLAN-0019)**

Photonique et technologie

Physique et chimie des plasmas

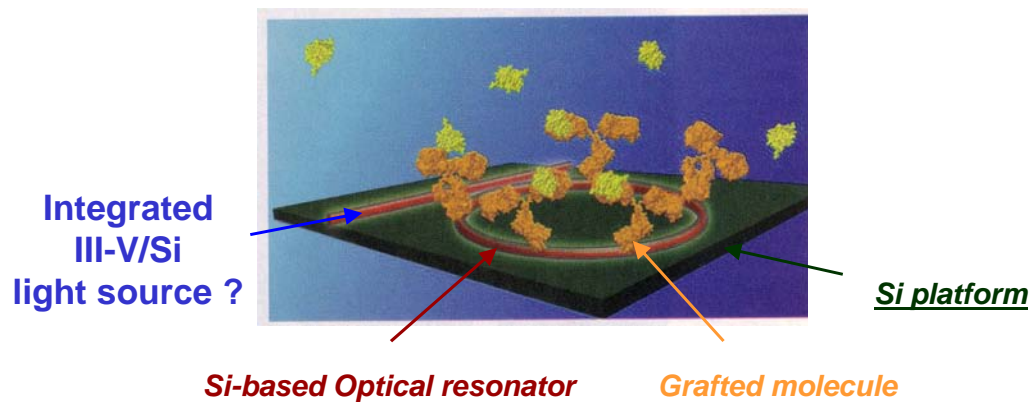
Contexte : Intégration photonique large surface sur Silicium

☆ Circuits photoniques intégrés sur Si

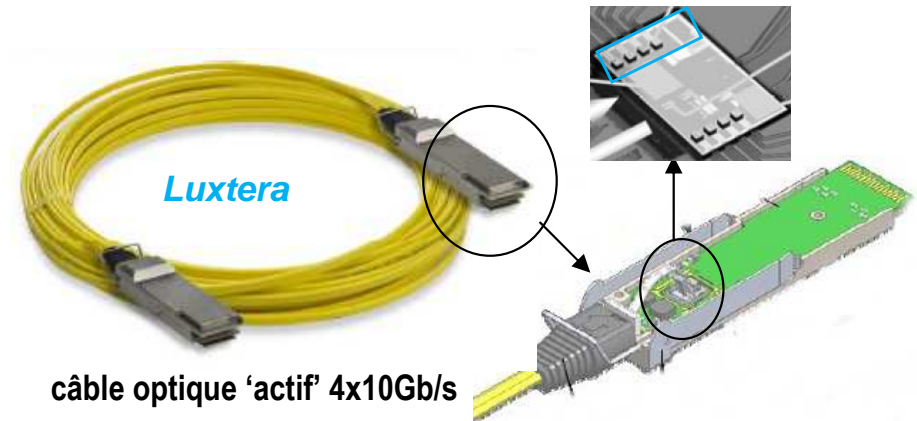
- Composants passifs Si
- Modulateurs Si (40Gb/s – 50GHz)
- Détecteurs Si/Ge
- ... Source laser ?

$\lambda > 1.3\mu\text{m}$ -> système InP

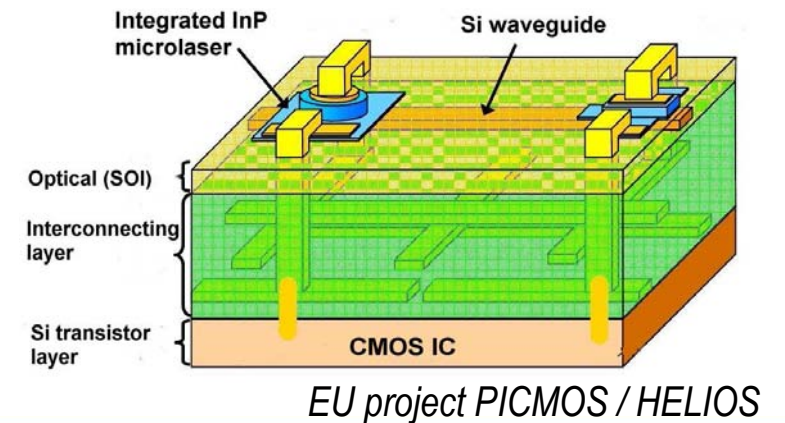
- Capteurs chimiques et biologiques



- Applications Telecom



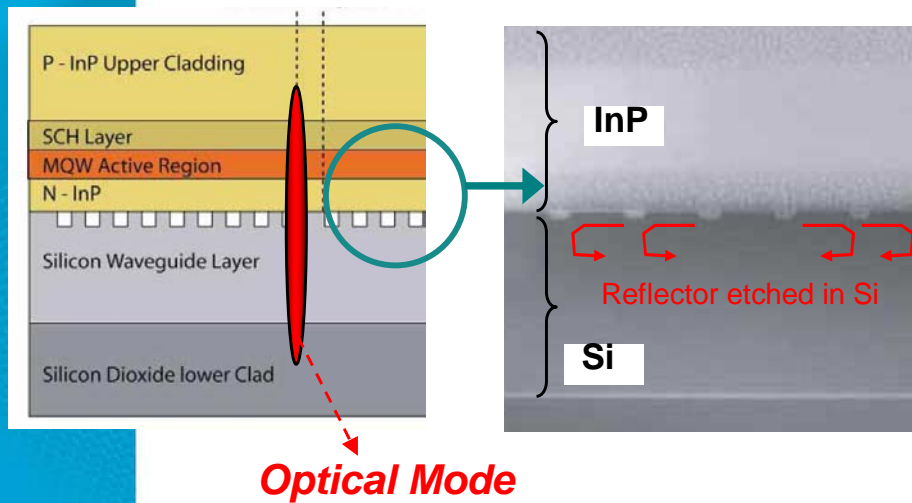
- Interconnexions optiques



Contexte : Stratégies d'intégration laser III-V sur Si

Stratégie 1:

→ Réflecteurs/cavité dans le Si



Optical Mode

UCSB, *OE* (2008)

CEA-LETI, Univ. Ghent,
CEA-LETI + III-V lab (2012)

Contexte : Stratégies d'intégration laser III-V sur Si

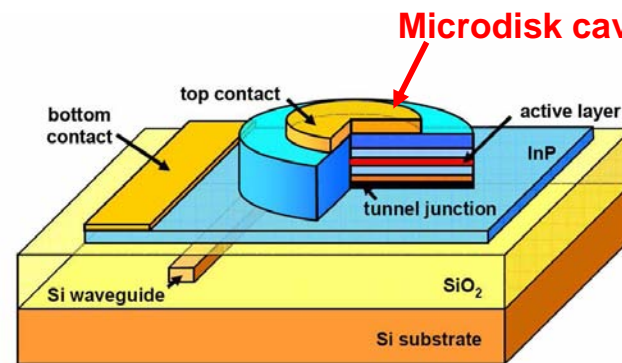
Stratégie 1:

→ Réflecteurs/cavité dans le Si

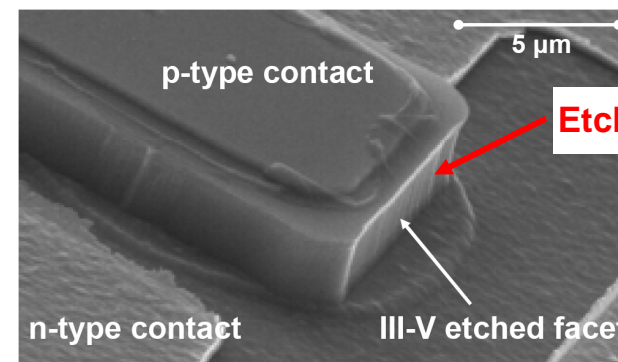
- + Gravure III-V performante pas nécessaire !
- Faible confinement optique dans le III-V
- Laser moins compact ?
- ... nécessite un couplage Si ↔ III-V efficace

Stratégie 2:

→ Réflecteurs/cavités dans l'InP



Univ. Ghent+ CNRS-INL,
OE (2007)
CEA-LETI, UCSB



CEA-LETI
IPRM (2008)
UCSB

Contexte : Stratégies d'intégration laser III-V sur Si

Stratégie 1:

→ Réflecteurs/cavité dans le Si

- + Gravure III-V performante pas nécessaire !
- Faible confinement optique dans le III-V
- Laser moins compact ?
- ... nécessite un couplage Si ↔ III-V efficace

Stratégie 2:

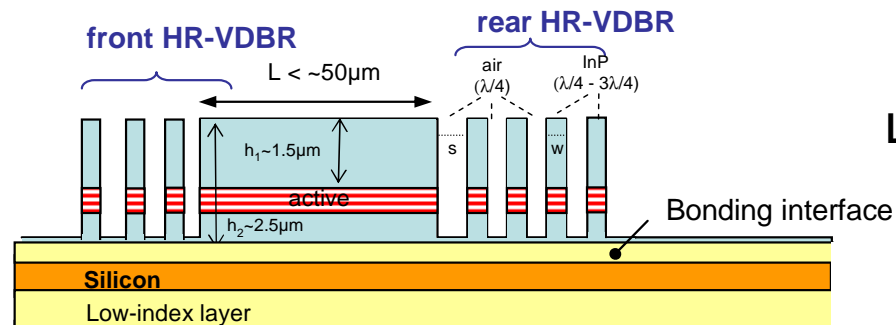
→ Réflecteurs/cavités dans l'InP

- + Fort confinement, sources compactes !
- Technologies plus critiques
- Compatibilité techno CMOS ?
- ... nécessite une gravure performante 'compatible-CMOS' du III-V (InP)

INCLINE - Objectifs :

- Démontrer la possibilité de réaliser par gravure plasma compatible-CMOS une diode laser III-V intégrée (avec des miroirs de cavité laser gravés par plasma).

- chimie de gravure plasma 'compatible-CMOS' ← Réacteur ICP
← Gaz chlorés
- compatibilité de la fabrication avec un réacteur CMOS 200/300 mm.



$L_{\text{laser}} : 500 \mu\text{m} \rightarrow 50 \mu\text{m} \text{ ou moins ..}$

INCLINE - Objectifs :

- Démontrer la possibilité de réaliser par gravure plasma compatible-CMOS une diode laser III-V intégrée (avec des miroirs de cavité laser gravés par plasma).

→ chimie de gravure plasma 'compatible-CMOS' ← Réacteur ICP
← Gaz chlorés

→ compatibilité de la fabrication avec un réacteur CMOS 200/300 mm.

- Aboutir à une meilleure compréhension et à un meilleur contrôle des mécanismes de gravure anisotrope en jeu

→ méthodes de caractérisation *in-situ* et *ex-situ* des surfaces gravées

- Caractériser et modéliser la cinétique du plasma et les interactions plasmas surface en jeu dans les décharges inductives

→ connaissance des paramètres intrinsèques du plasma

→ modèle du plasma/réacteur de gravure

→ modèle prédictif de la gravure de l'InP

- **Projet interdisciplinaire concentrant les efforts de 4 laboratoires académiques**

- de physique et chimie des plasmas



- d'optoélectronique, technologies photoniques

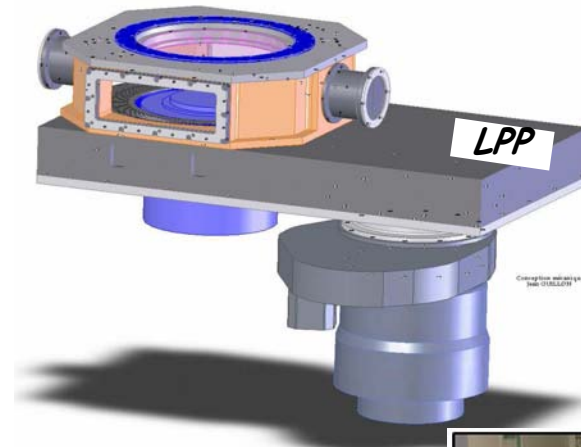


LABORATOIRE
DE PHOTONIQUE
ET DE NANOSTRUCTURES

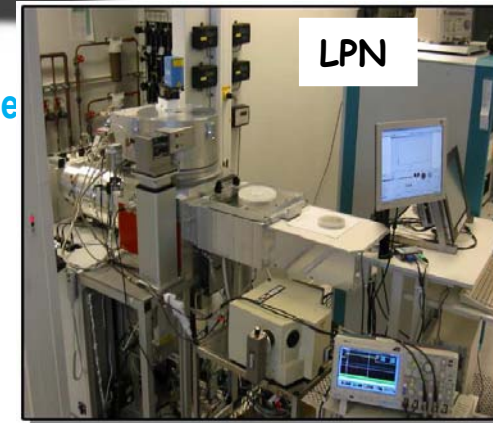
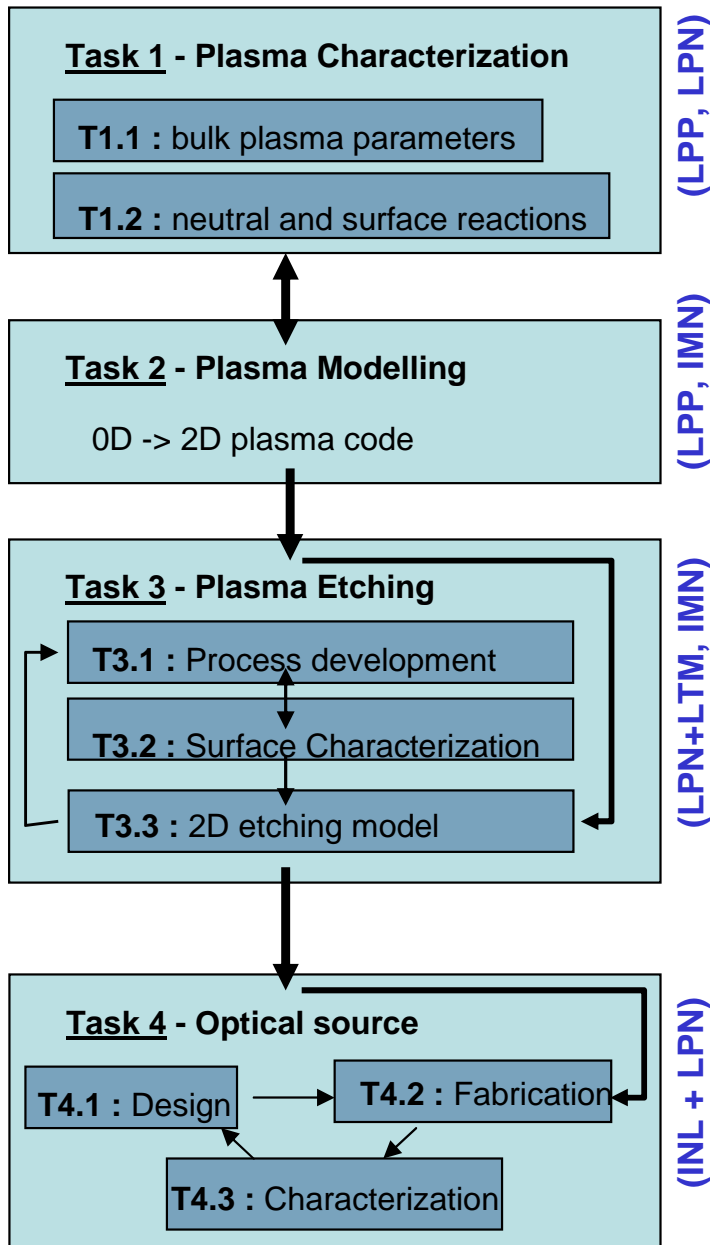
+



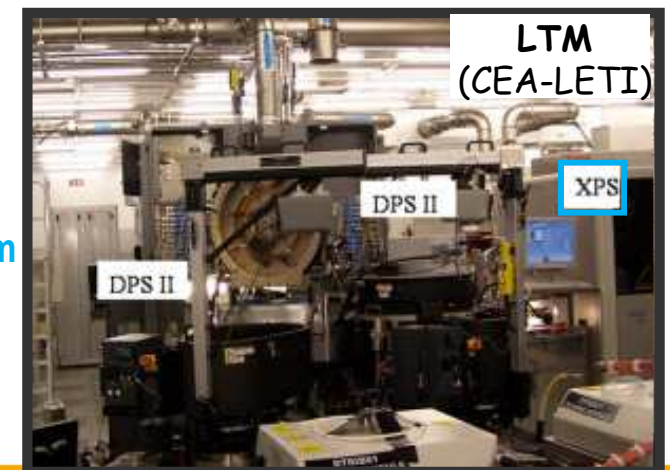
INCLINE - Moyens :



- Réacteur ICP industriel modifié
- Diagnostics quantitatifs
- Mesures-modèle plasma 2D

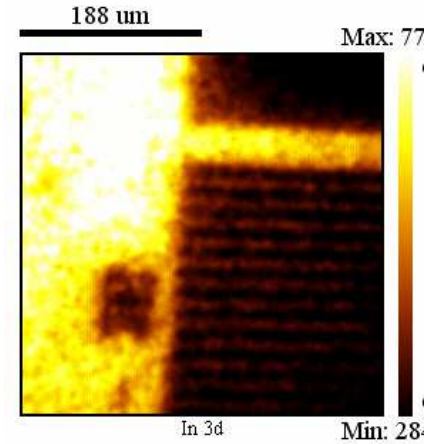
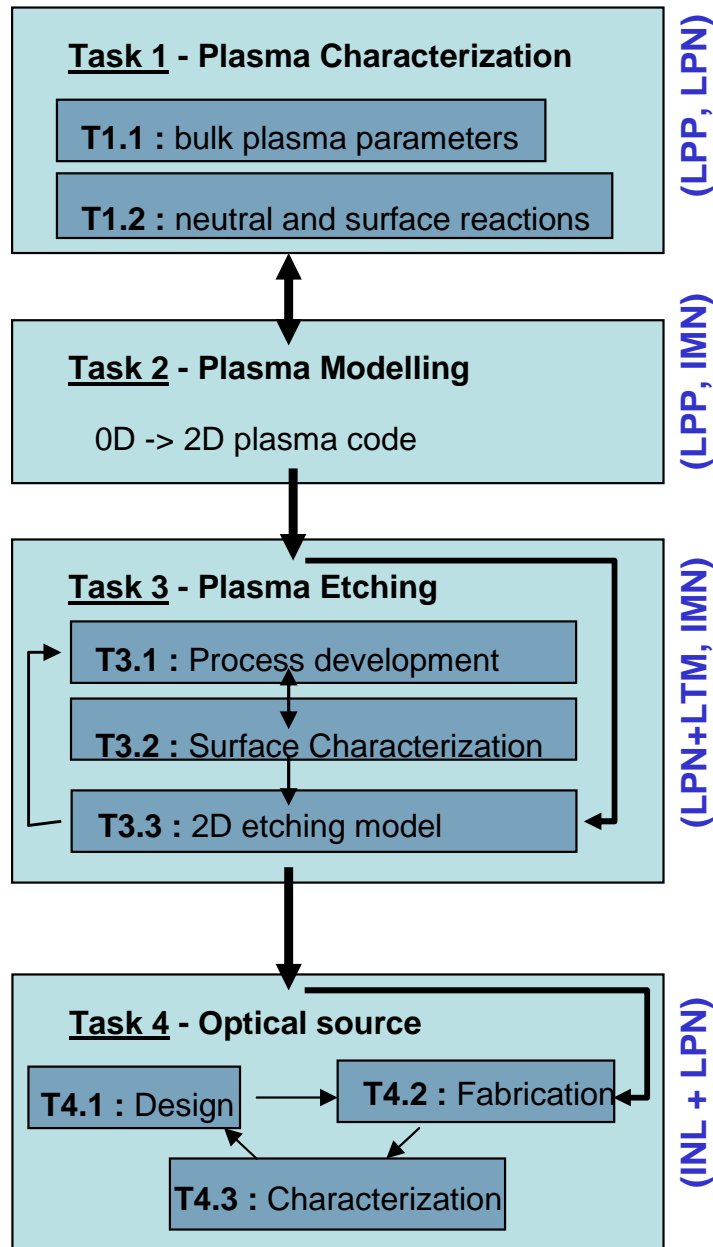


- Réacteur ICP III-V recherche
- 14 gaz – T°C (20°C-250°C)
- Diagnostics relatifs
- Analyse STEM-EDX *ex-situ*



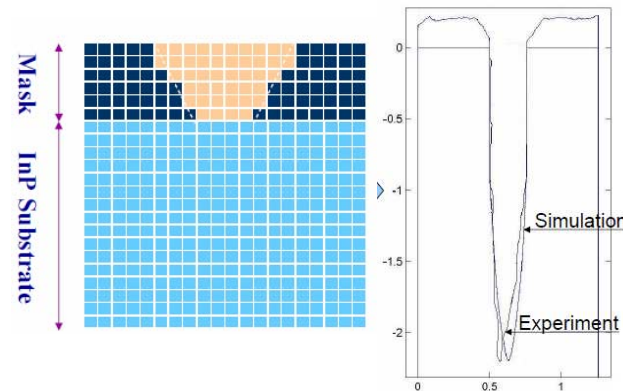
- Réacteur ICP CMOS 300mm
- Cl₂/HBr/O₂ Ar, N₂
- Analyse XPS *in-situ*

INCLINE - Moyens :



- Analyse XPS *ex-situ*
- Résolution angulaire
- Support rotatif XYZ, θ , φ
- Imagerie contrôle $\theta \sim 1^\circ$

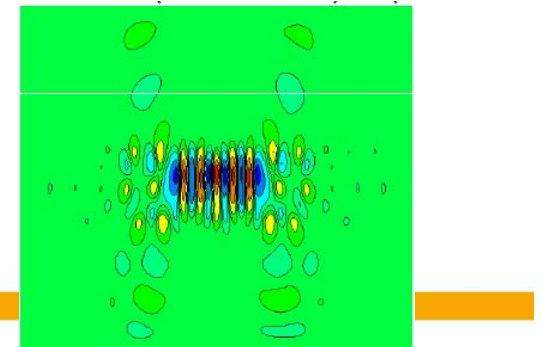
IMN - XPS (Kratos Ultra)



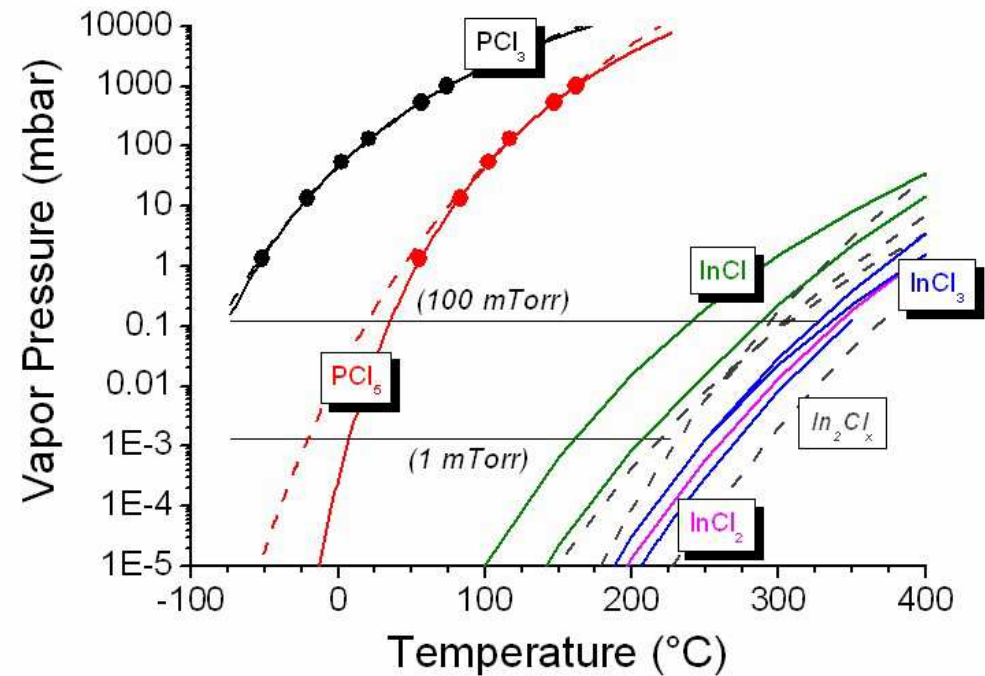
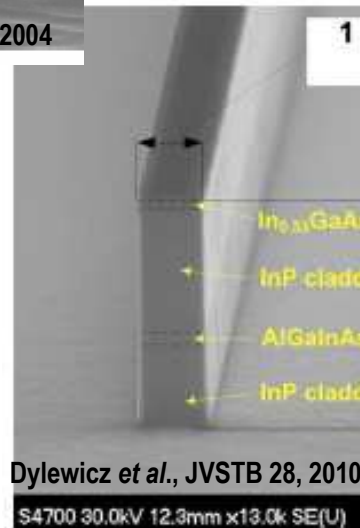
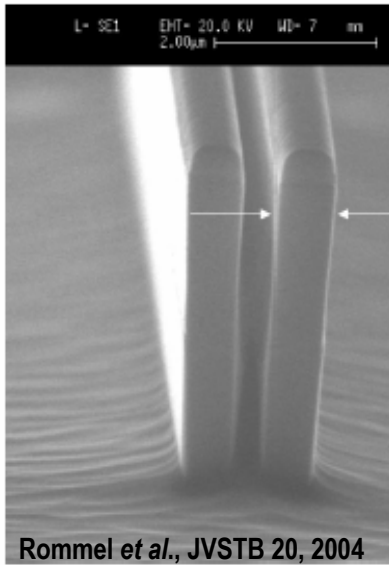
IMN •Modèle 2D de gravure

INL •Simulation FDTD 2D,3D

•Test optique des dispositifs
(LPN, INL)



Gravure InP (ICP, chimie chlorée):



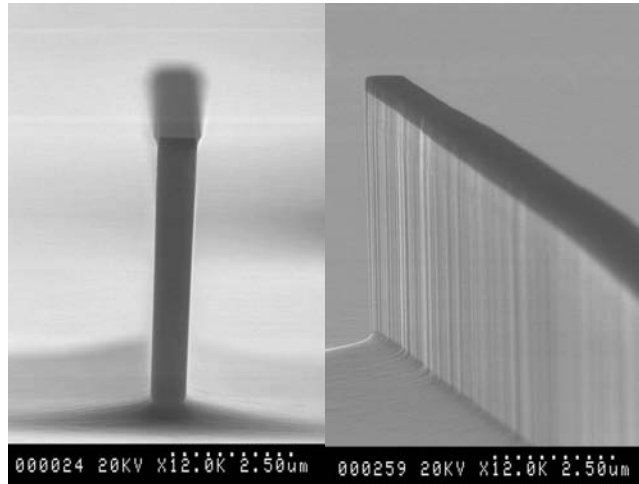
- Nécessite une haute température
- Gravure limitée par la désorption In

- Origine de l'anisotropie ?

Origine de l'anisotropie :

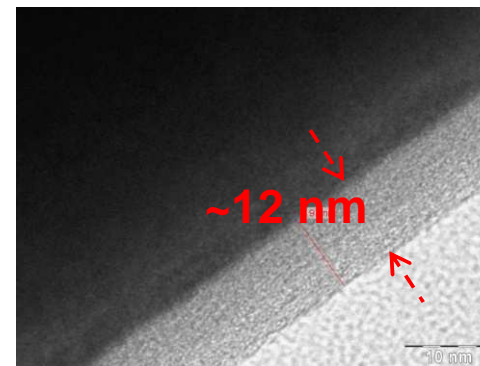
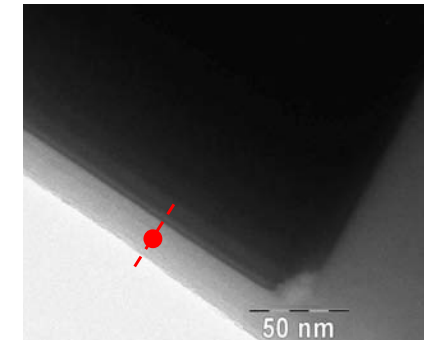
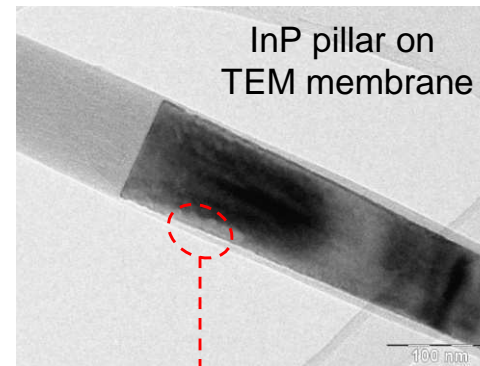
Gravure InP 'assistée Silicium'

Anisotropic window



- Chimie $\text{Cl}_2\text{-H}_2$

EDX sidewall analysis

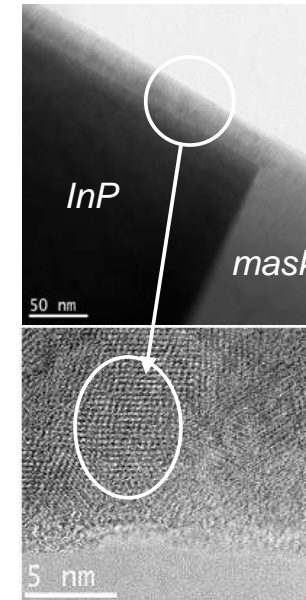
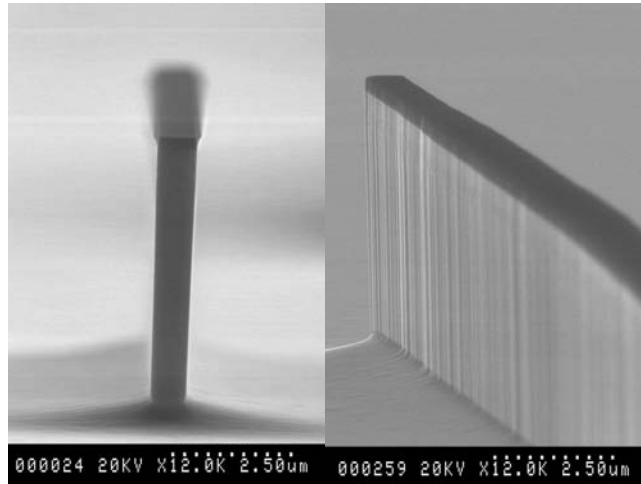


Ex-situ
Composition:
Si ~ 50% (Si/O ~1)
O ~ 50%
Cl ~ 2%-3%

Origine de l'anisotropie :

Gravure InP 'assistée Silicium'

Anisotropic window



• SiH_4/Cl_2

Ex-situ:

**nc-Si
+SiOx (Si>90 %)**

- Chimie $\text{Cl}_2\text{-H}_2$
- Chimies HBr , HBr/O_2 ,
 SiCl_4/H_2 , SiH_4/Cl_2 ,
 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$, ...

- Gravure anisotrope par dépôt passivant SiOx
- Dépôt SiOx favorisé par Hydrogène
- Stoechiométrie : $\text{a-Si:H} \rightarrow \text{SiO}_2$
(suivant ratio Hydrogène/Oxygène)

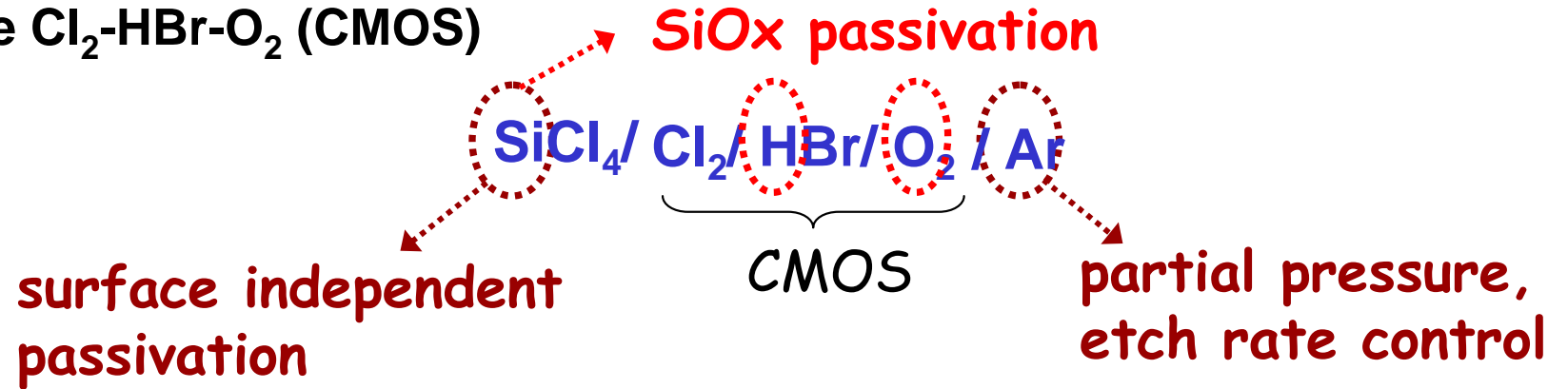
Gatilova *et al.* JVSTA **27**, 262 (2009)

Gatilova *et al.* JVSTB **28**, 020601 (2011)

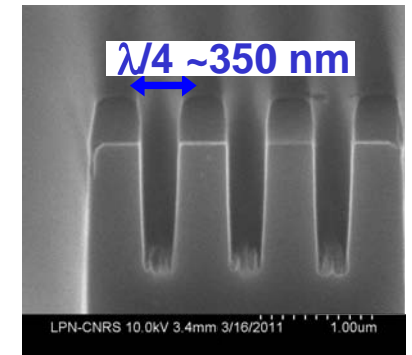
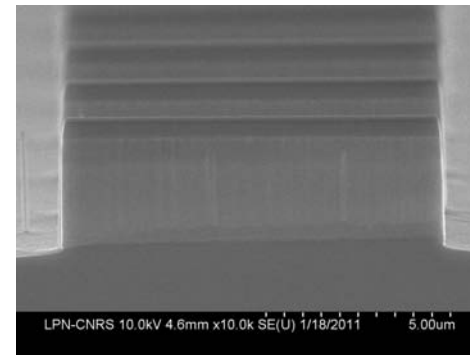
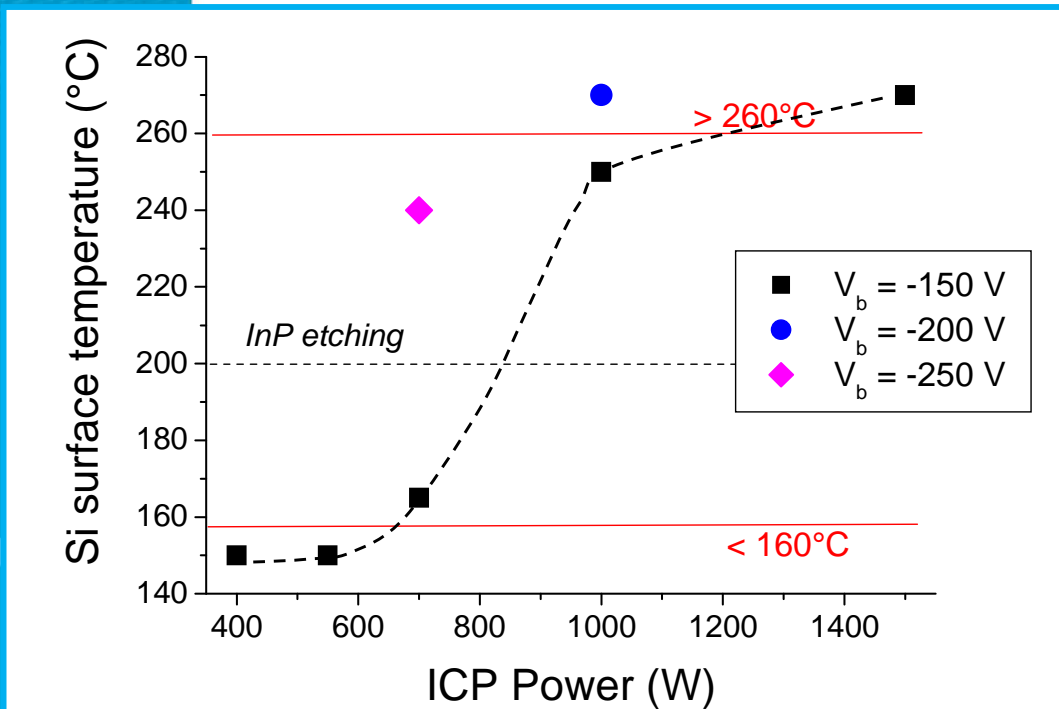
Passivation SiOCl utilisée en gravure CMOS du Si
(ICP $\text{Cl}_2/\text{HBr/O}_2$)

Transfert réacteur 300 mm :

- Base : Chimie $\text{Cl}_2\text{-HBr-O}_2$ (CMOS)



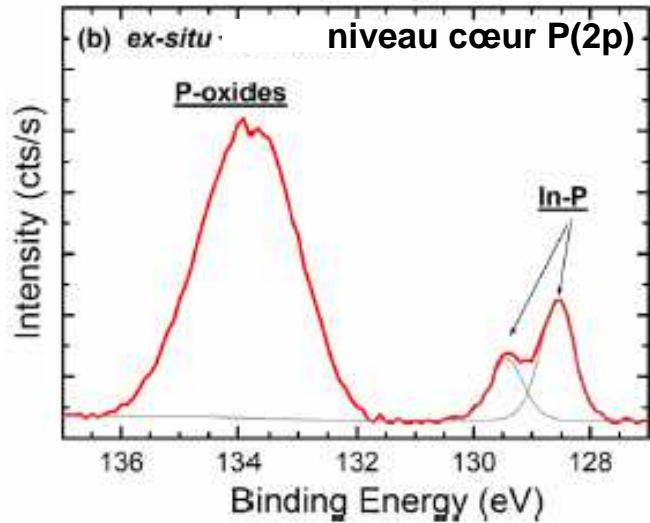
- + quelques pbs pratiques .. (T°C = 60°C)



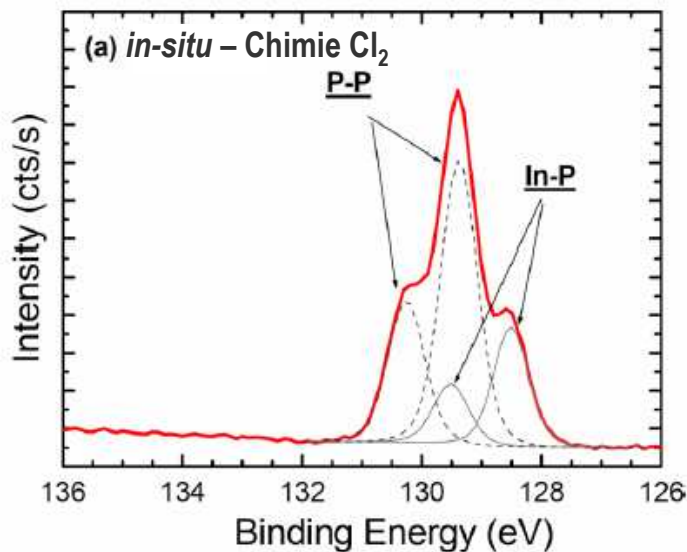
Bouchoule *et al.* JVSTA **30**, 031301 (2012)

Analyse plus fine de surface : XPS *in-situ*

○ Etape1 : analyse du fond de gravure



Analyse *ex-situ* (remise à l'air)
→ information perdue sur chimie de surface



Analyse *in-situ* (LTM –réacteur CMOS)

Integrated intensity In/P ratio:

In(3d5/2) / P(2p3/2)	In(4d5/2) / P(2p3/2)
0.30	0.31

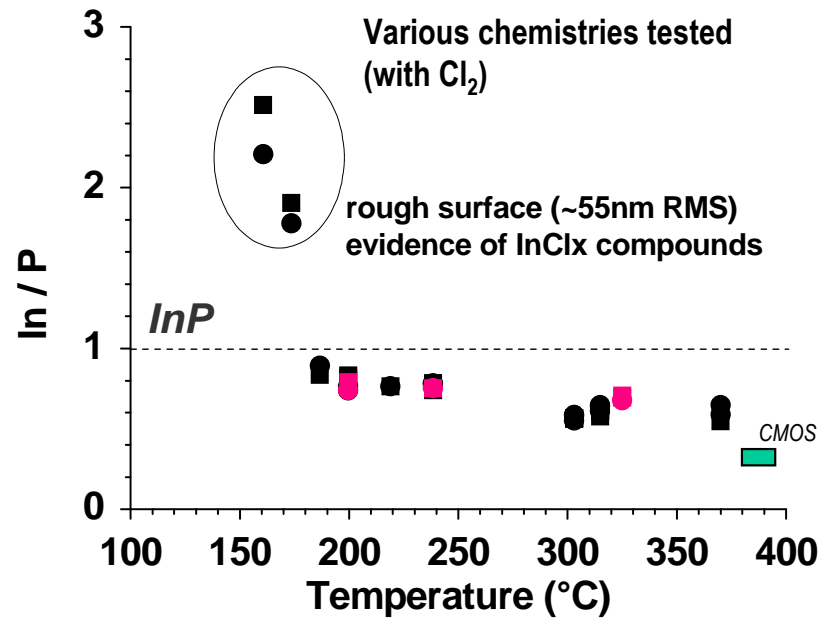
•XPS résolu en angle : $e_{P-P} \sim 1 - 1.5$ nm

Inattendu : surface riche en P !

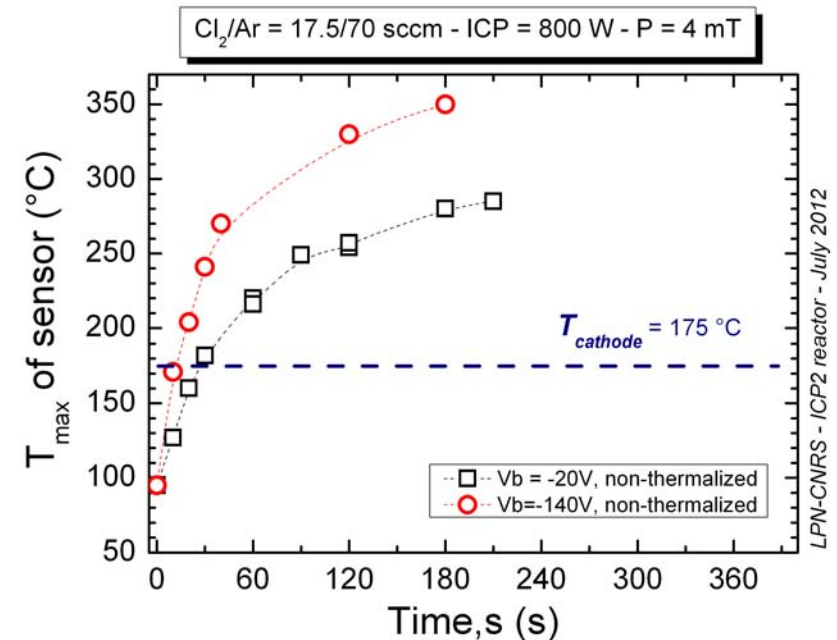
Analyse plus fine de surface (XPS) :

- Etape1 : analyse du fond de gravure

Enrichissement Phosphore
(*ex-situ*)



Principal paramètre : T°C de surface

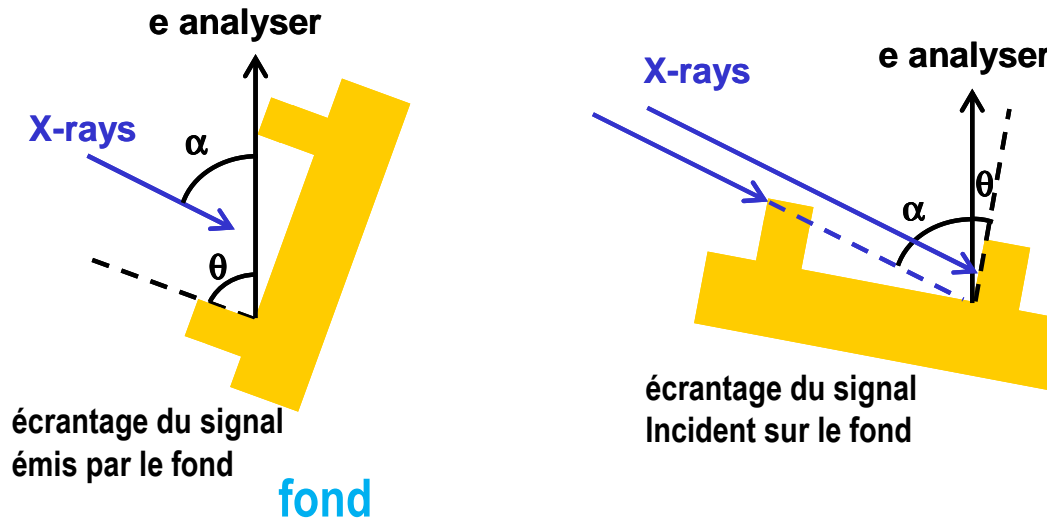


Chanson *et al.*, JVSTB (to be submitted)

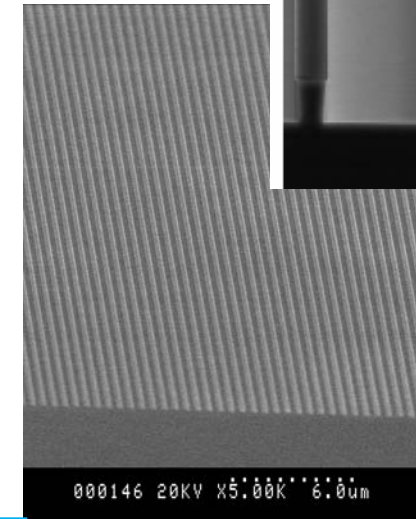
Analyse plus fine de surface (XPS) :

XPS ex-situ
Support rotatif (θ)
+ imagerie chimique

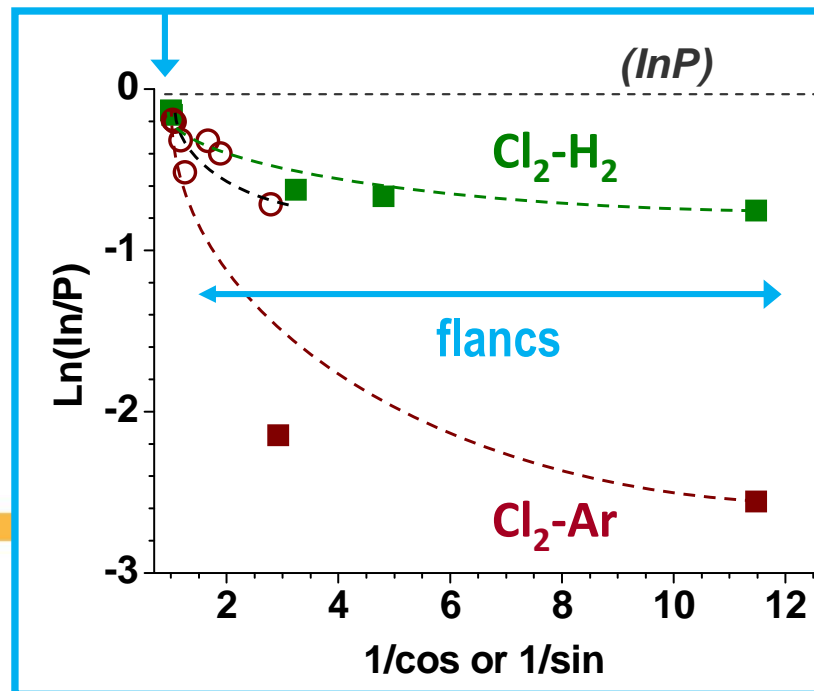
- Etape2 : analyse des flancs de gravure



Motifs microniques
(process rapide)



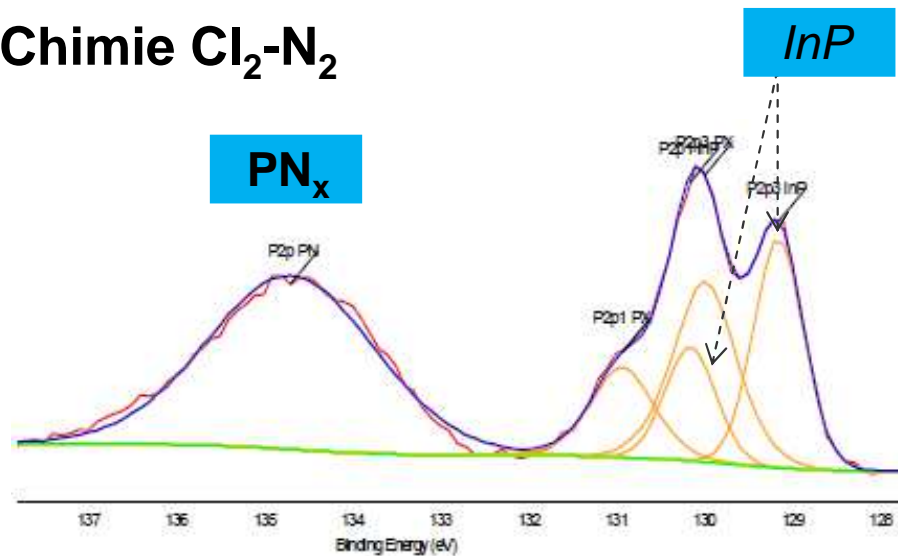
~1mmx1mm



Flancs de gravure
très enrichis en P

Passivation alternative : P-X ? (X=?)

Chimie $\text{Cl}_2\text{-N}_2$



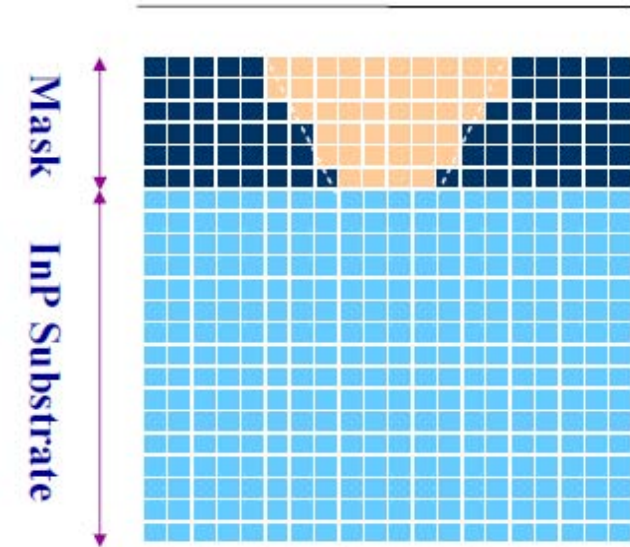
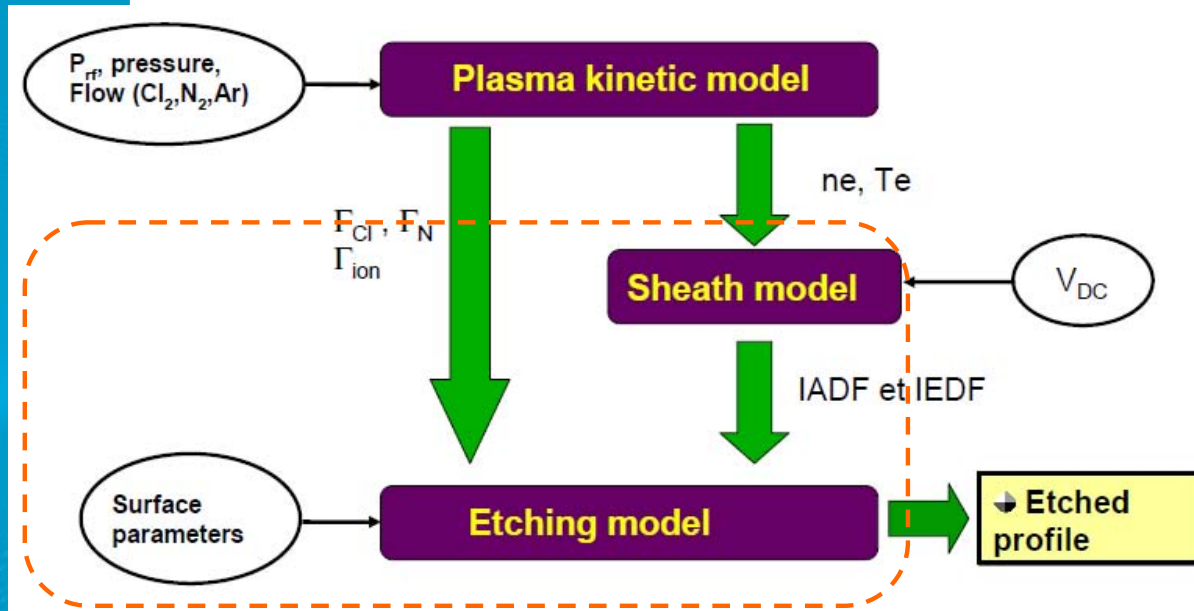
Spectre P(2p)

	Normalized In/P ratio	
	In(3d5) / P(2p3)	In(4d5)/P(2p3)
Un-etched InP sample	1	1
After Ar ⁺ ion gun	1.15	1.10
After N ₂ plasma (2min)	0.44	0.44
After Cl ₂ /N ₂ plasma (1min)	0.30	0.36
After Cl ₂ /N ₂ plasma (3min)	<0.1	<0.1

Fort enrichissement
 PN_x

- Comparaison des passivations SiO_x , et PN_x , pour les miroirs gravés

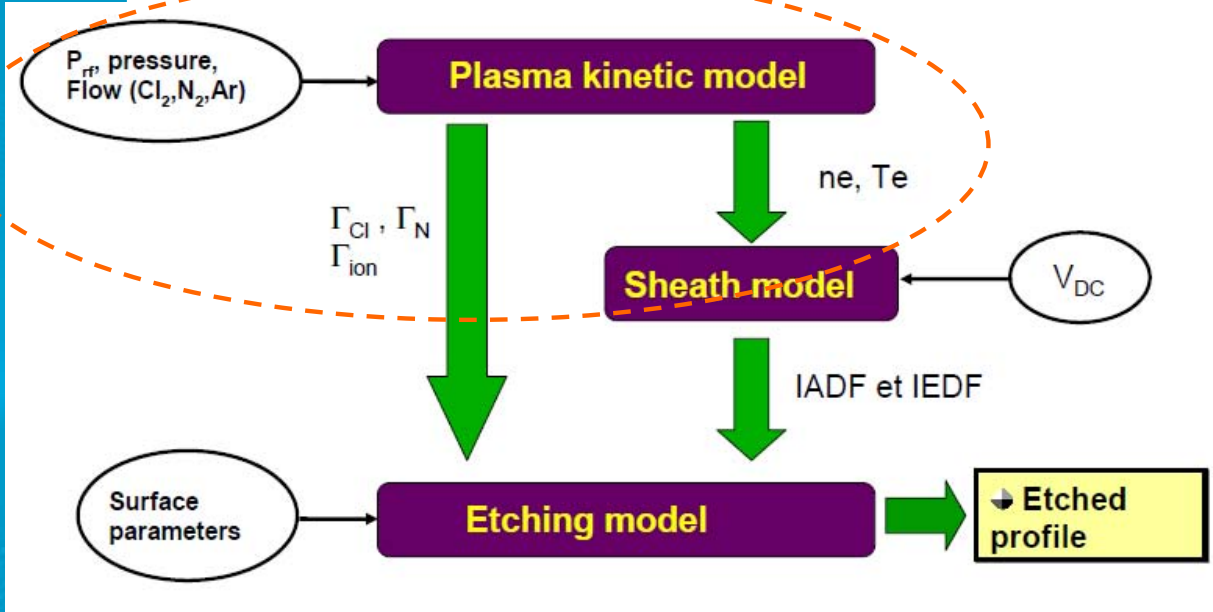
Modèle de gravure 2D



Interaction des espèces réactives et des sites InP: approche Monte-Carlo

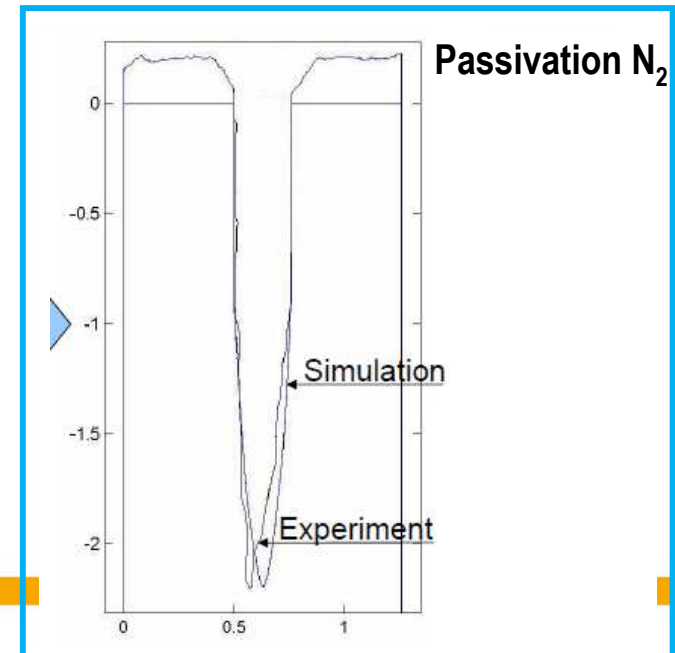
- Principaux produits de réaction
- Coefficients d'adsorption / desorption
- fonction de la température ..
- bcp d'allers-retours simulations-expériences...

Modèle de gravure 2D



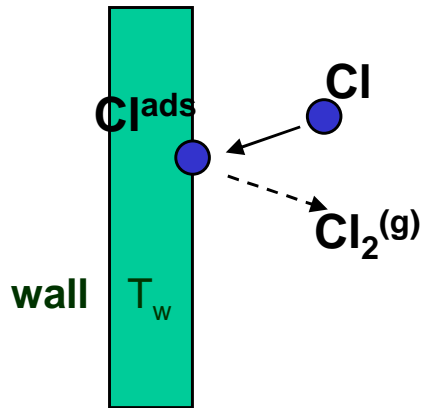
- Chimie Cl₂/Ar
- Passivation par l'azote
- Introduction de HBr

R. Chanson et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* 40, 959 (2012).

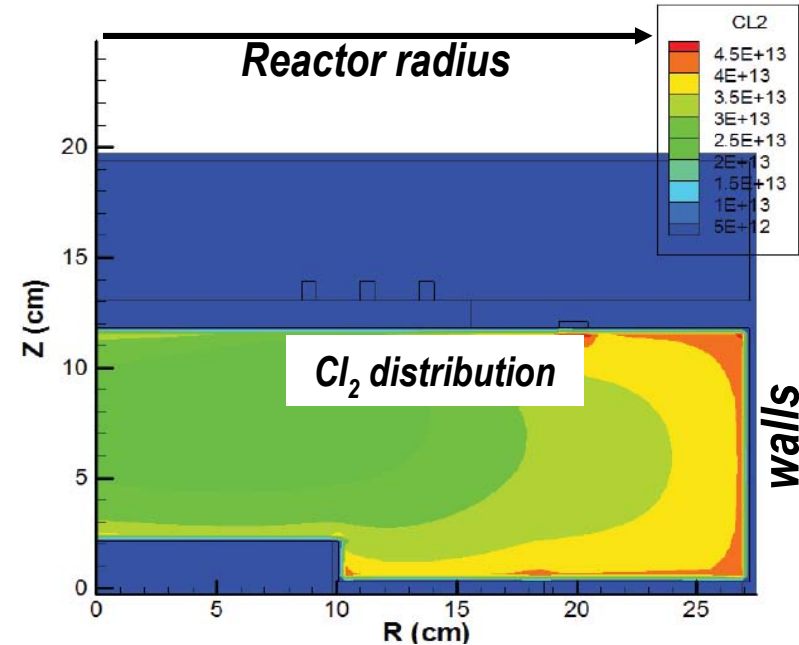
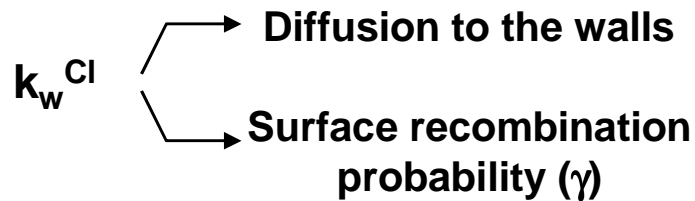


Modèle 2D du réacteur/plasma : code HPEM

- *Hybrid plasma-equipmpent model* : U. Michigan (M. Kushner) avec LPP



Surface reactions:

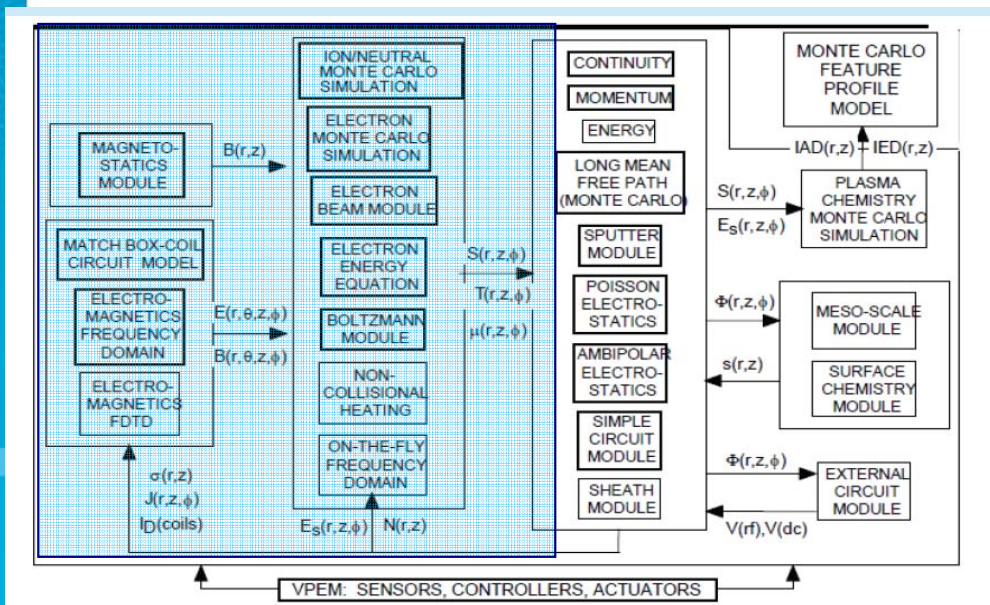
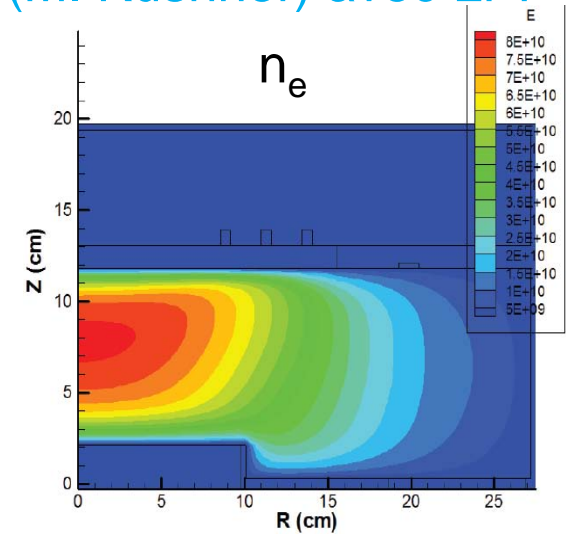
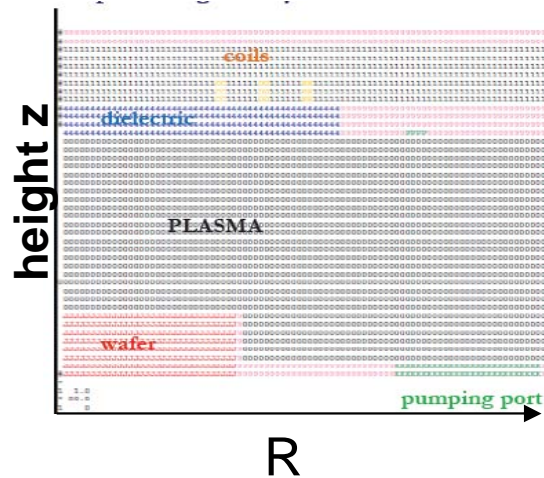
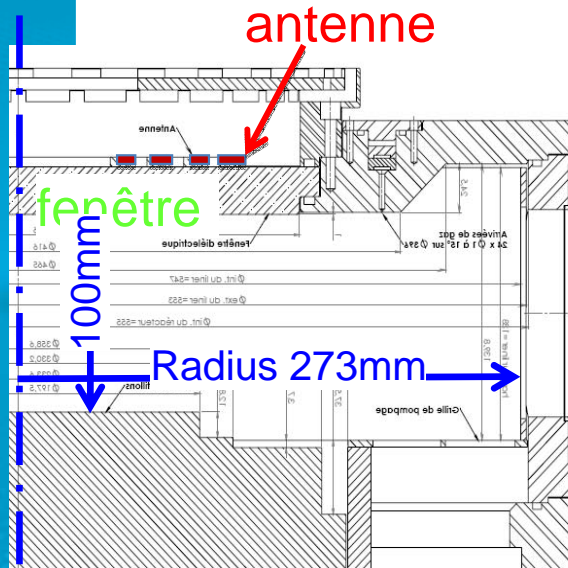


- Nécessité d'un modèle 2D

- *Nécessité de déterminer le coefficient de recombinaison des radicaux aux surfaces*

Modèle 2D du réacteur/plasma : code HPEM

- Hybrid plasma-equipmpent model : U. Michigan (M. Kushner) avec LPP



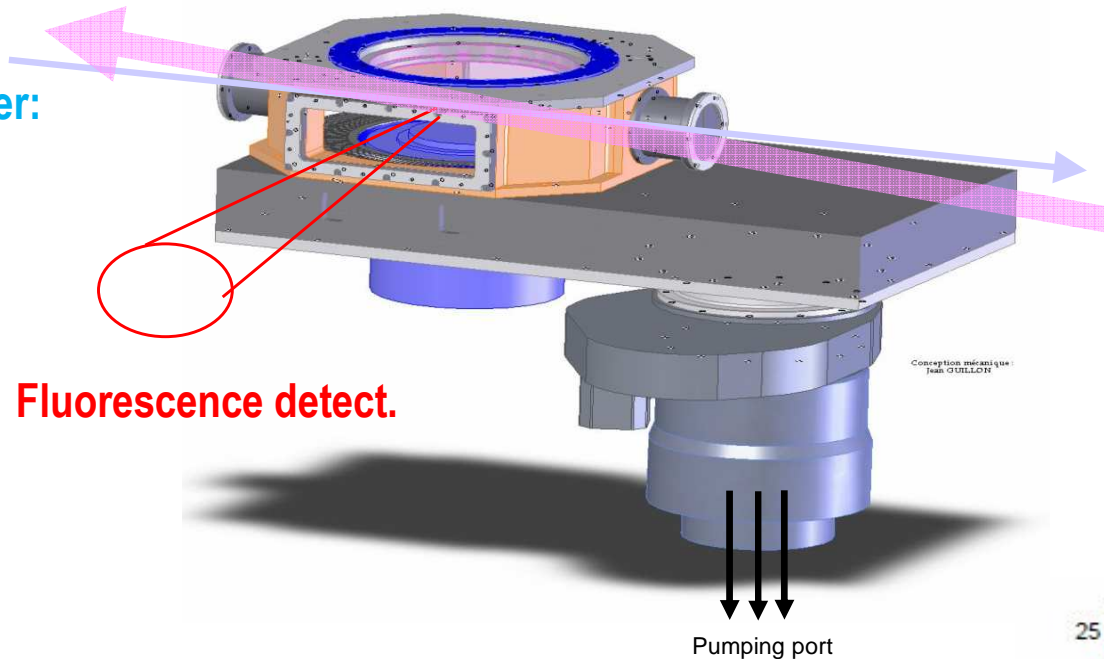
Reactions	Rate coefficient (s ⁻¹)	Reactions
Cl(4s) → Cl+hv	2.03×10 ⁶	Cl ₂ +Ar* → Ar+Cl ₂ ⁺
Cl(4p) → Cl+hv	3.3×10 ⁷	e _{hot} +Ar* → Ar+e _{hot}
Cl(3d) → Cl+hv	1.83×10 ⁶	e+Ar _m → Ar _i +e
Cl ₂ (1Eu) → Cl ₂ +hv	4.74×10 ⁶	e+Ar _m → Ar(4p)
Ar _i → Ar+hv	10 ⁶	e+Ar _m → Ar _i ⁺ +e
Ar(4p) → Ar+hv	3.20×10 ⁷	2Ar _m → 2Ar
Ar(4p) → Ar _m +hv	3×10 ⁷	Ar _i +Ar _m → Ar ⁺ +Ar
N(P) → N(D)+hv	2.30×10 ⁶	2Ar _m → Ar+Ar ⁺
N(P) → N(S)+hv	2.30×10 ⁶	Ar _m +Ar → 2Ar
N(D) → N(S)+hv	2.51×10 ⁷	Ar _m +N ₂ → Ar+2N(S)
N ₂ (B) → N ₂ (A)+hv	2×10 ⁵	
N ₂ (C) → N ₂ (B)+hv	2.74×10 ⁷	

more than 100 reaction paths..

Modèle 2D du réacteur/plasma : code HPEM

- *confrontation simulation - expérience*

TALIF Laser:
233.2nm,
3 mJ, 5ns



Cl₂, HBr, O₂, Ar, Xe

Photolysis Laser
355 nm, 10 mJ Ø2mm
Calibration absolue (Cl)

Fluorescence detect.

Pumping port

- *avec nombreux diagnostics*

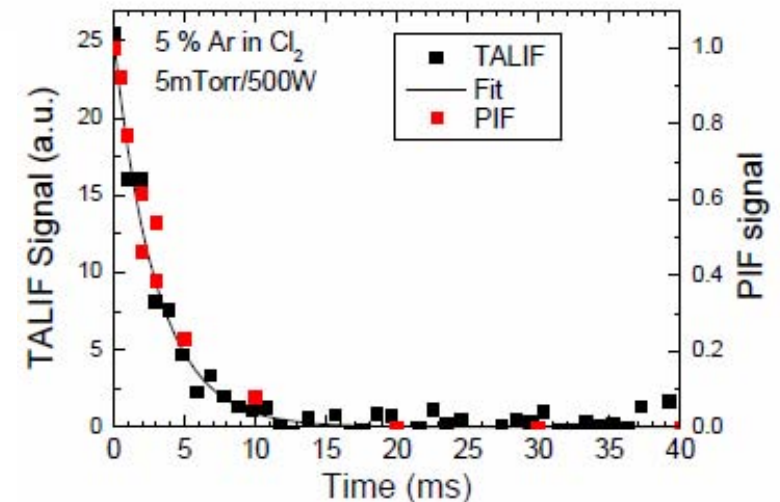
TALIF → [Cl] absolu, réactions de surface

Sondes → n_e , T_e , ions positifs

IRLAS (Ar metastables) → T°C du gaz

Laser photodetachment → *ions négatifs*

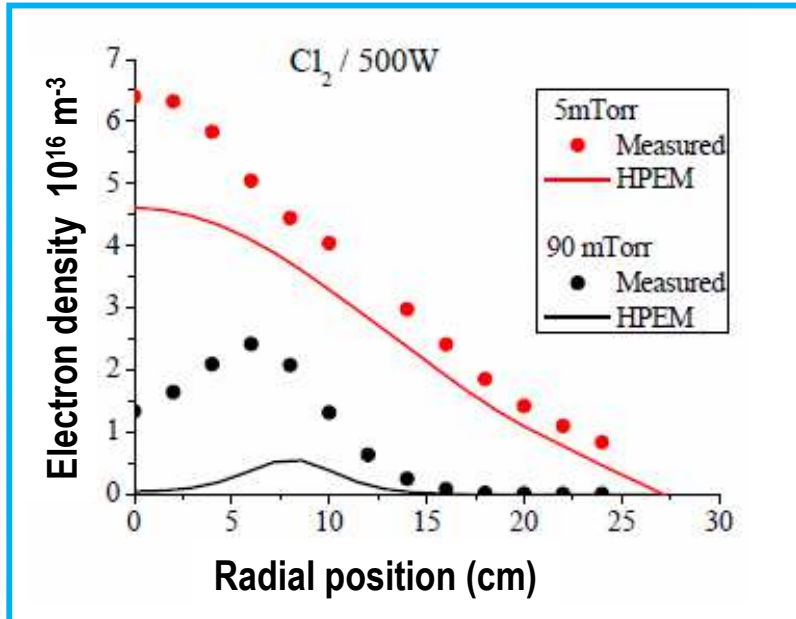
RF probes → puissance transmise au plasma



Détermination expérimentale du
coefficient de recombinaison
aux surfaces de Cl

Modèle 2D du réacteur/plasma : code HPEM

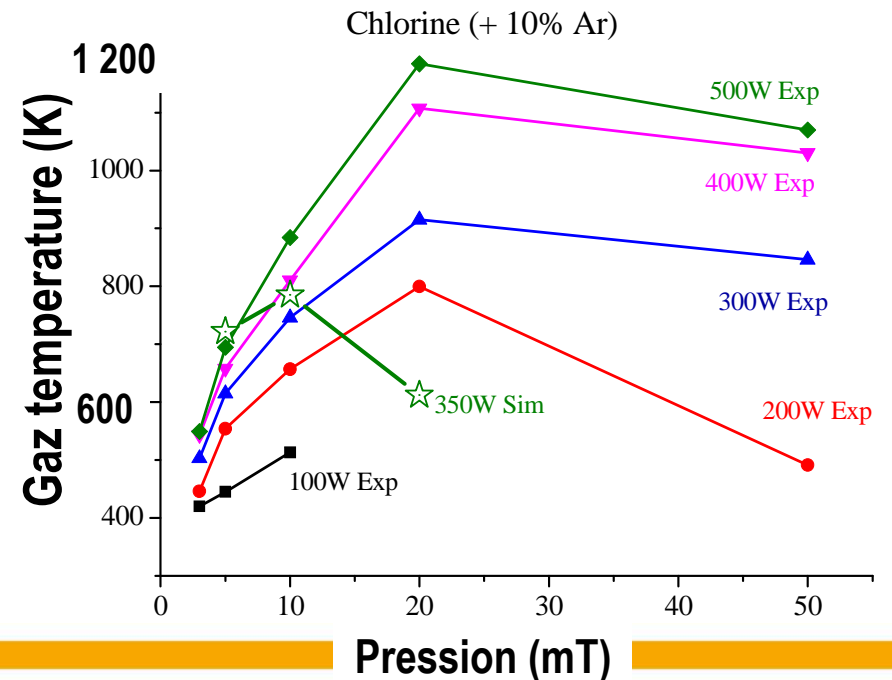
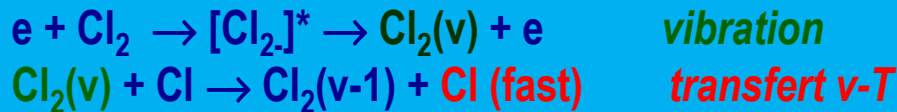
- *confrontation simulation - expérience*



- Très grand désaccord à haute pression
- Profil radial mal prédit

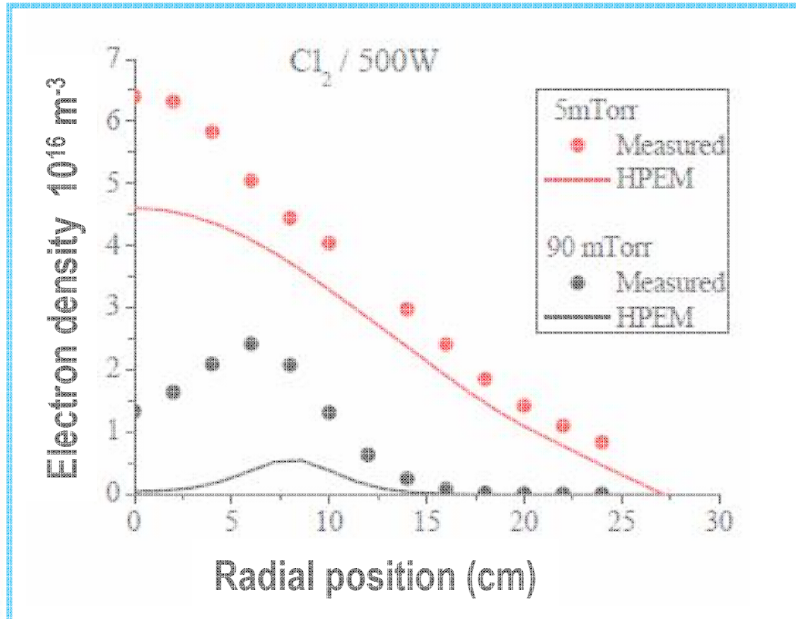
.... Pourquoi ?

Excitation vibrationnelle, suivie de transfert v-T ne peut pas être négligée en gaz moléculaire (Cl₂)



Modèle 2D du réacteur/plasma : code HPEM

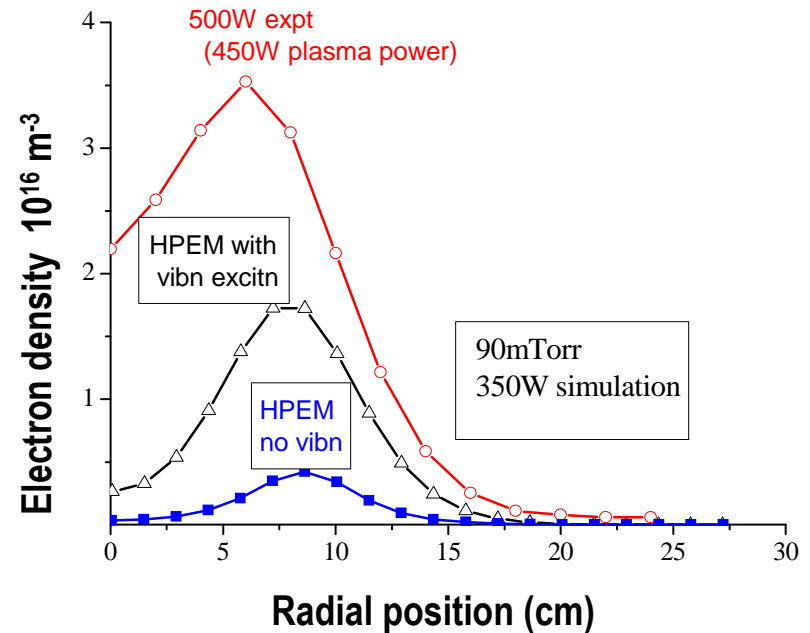
- *confrontation simulation - expérience*



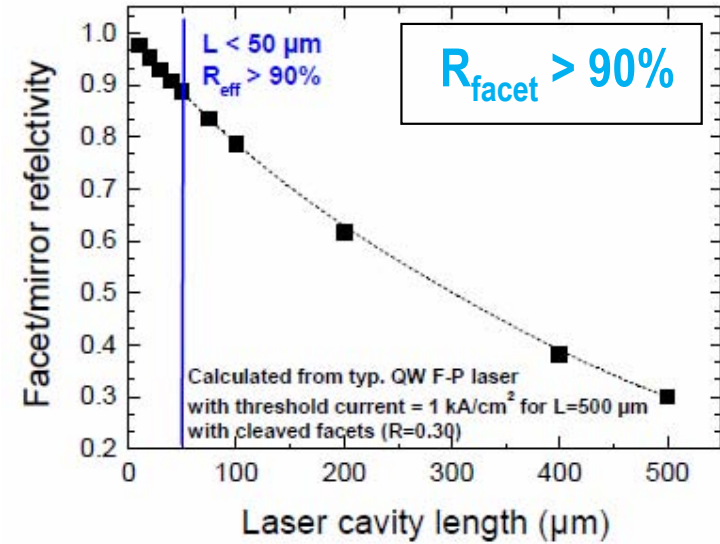
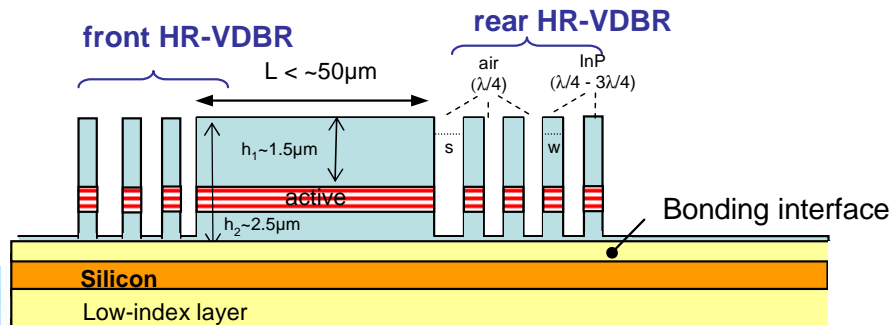
- Très grand désaccord à haute pression
- Profil radial mal prédit

- **Excitation vib. + transfert v-T pris en compte :**

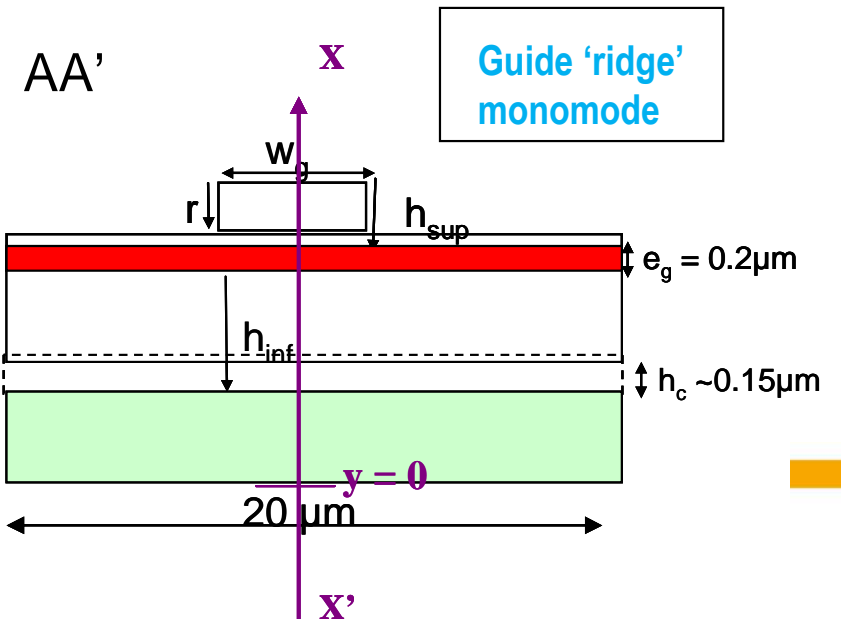
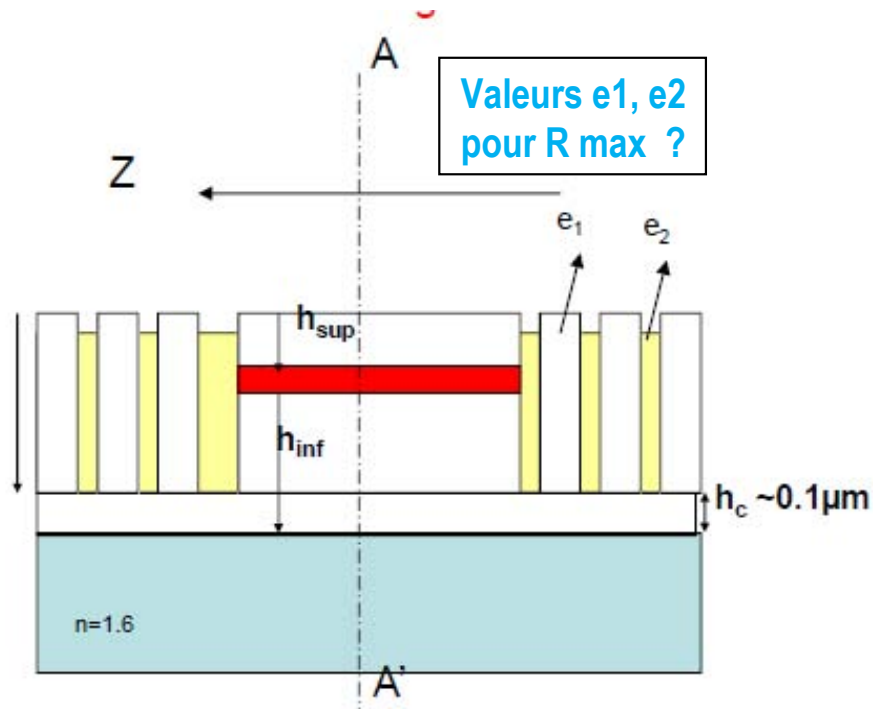
Code HPEM modifié (LPP + U. Michigan)



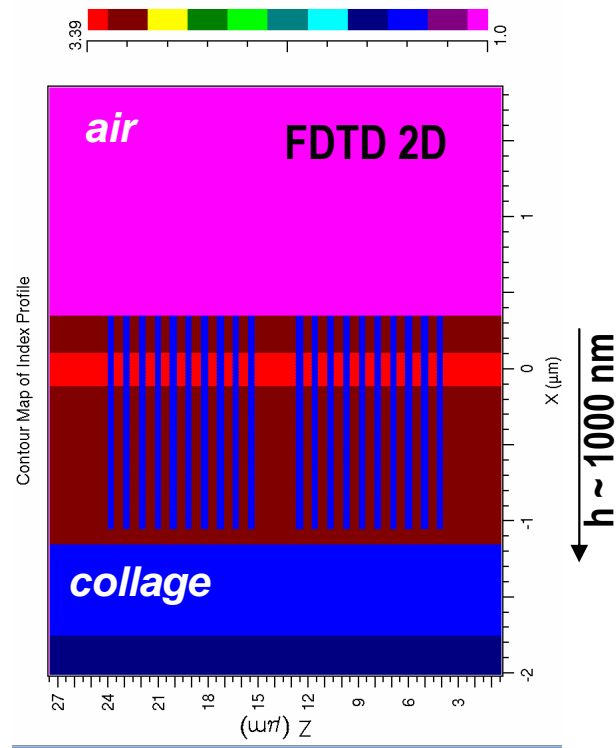
Test du procédé sur le démonstrateur



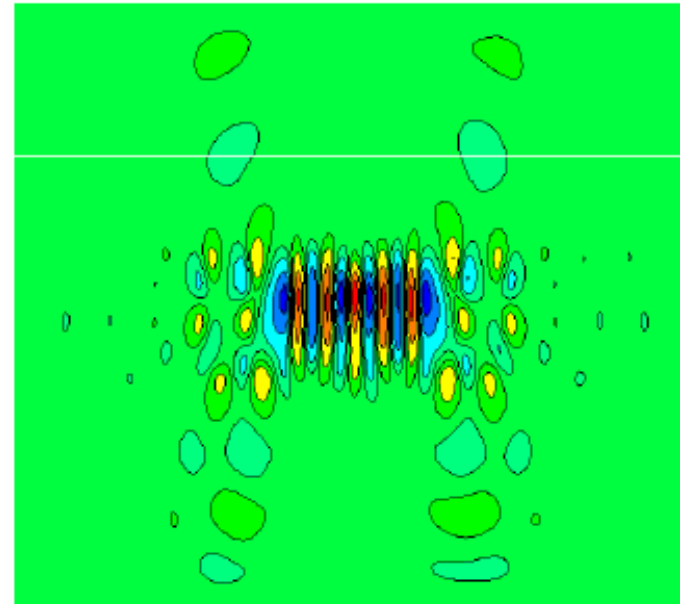
- Validation sur guide passif
→ mesure de R



Démonstrateur : simulation (FDTD)



- Couches quart d'onde
 $e_1, e_2 : n \cdot e \sim \lambda/4$ (miroir de Bragg)



$$Q = \lambda/\Delta\lambda$$

$$R_{\max} \sim 80\%$$

pertes: ~65% par diffraction dans la couche de collage

• augmenter h

• optimiser e_1, e_2 , et la profondeur de gravure ($< h$)

Démonstrateur : simulation (FDTD)

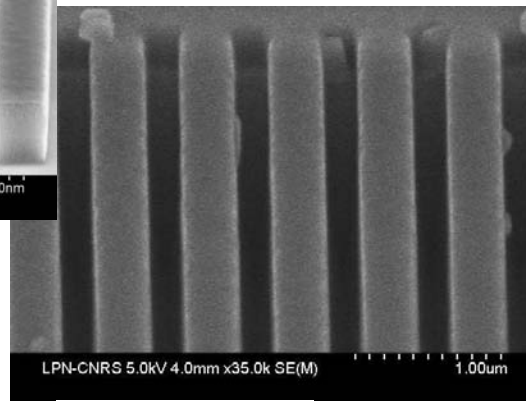
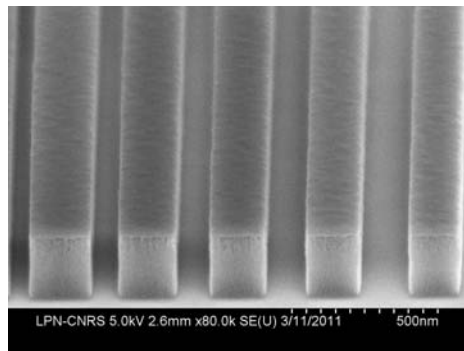
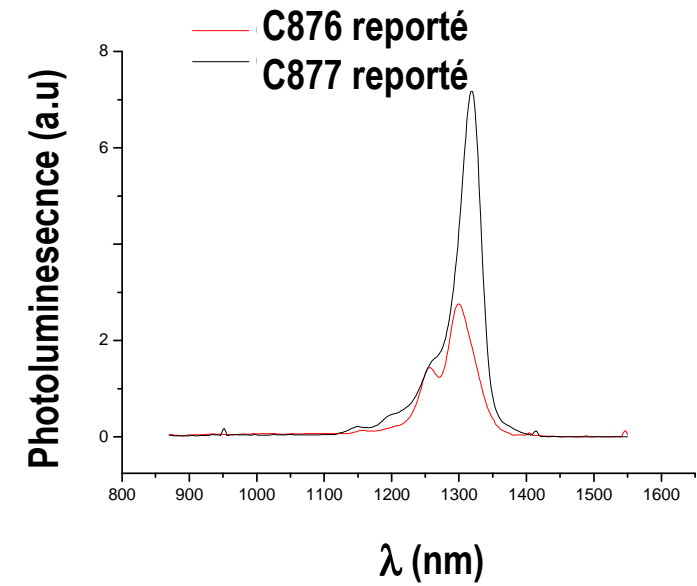
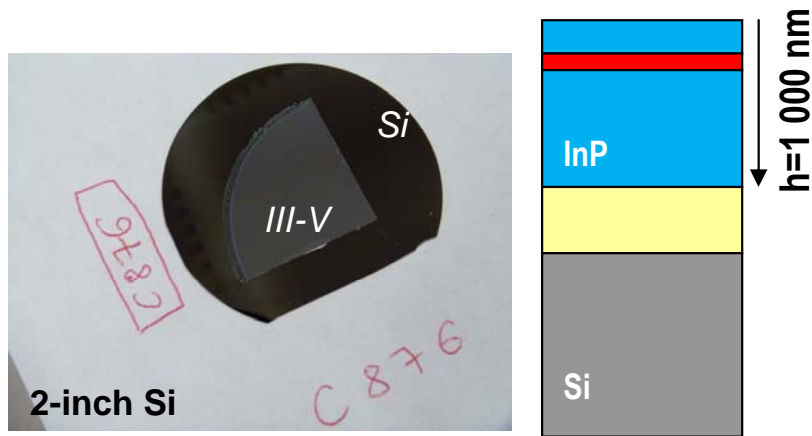
Profondeur de gravure →

		Profondeur de gravure →					
		profondeur	766	800	840	890	920
Largeur fente e_2 ($n_2 \cdot e_2$) ↓	largeur						
	190						
	240			650	1550	405	
	290			430	1100	700	
	340			50	710	710	340
	390			340	310	560	340

Miroir inefficace Spectres brouillés

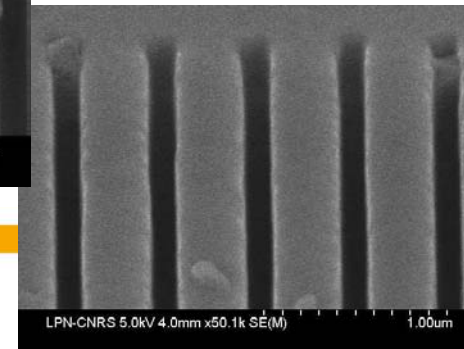
Largeur (nm)	Profondeur (nm)	Lambda (nm)	Q	P (effectif)	R
290	890	1549	580	13.8	92.5%
240	840	1546	1400	15.5	96.5%

Démonstrateur : fabrication / test

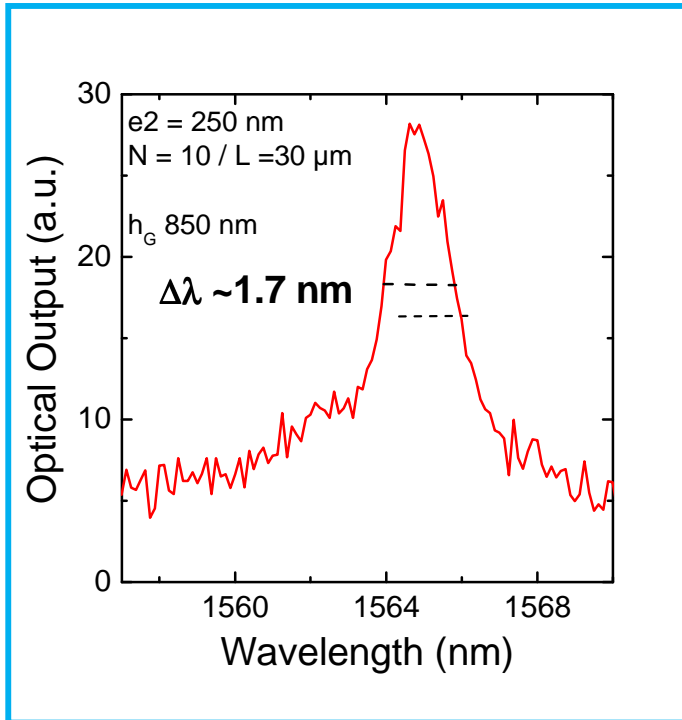


- Gravure miroir
- Planarisation
- Gravure ridge

$\text{Cl}_2/\text{HBr}/\text{O}_2$
passiv. SiO_x

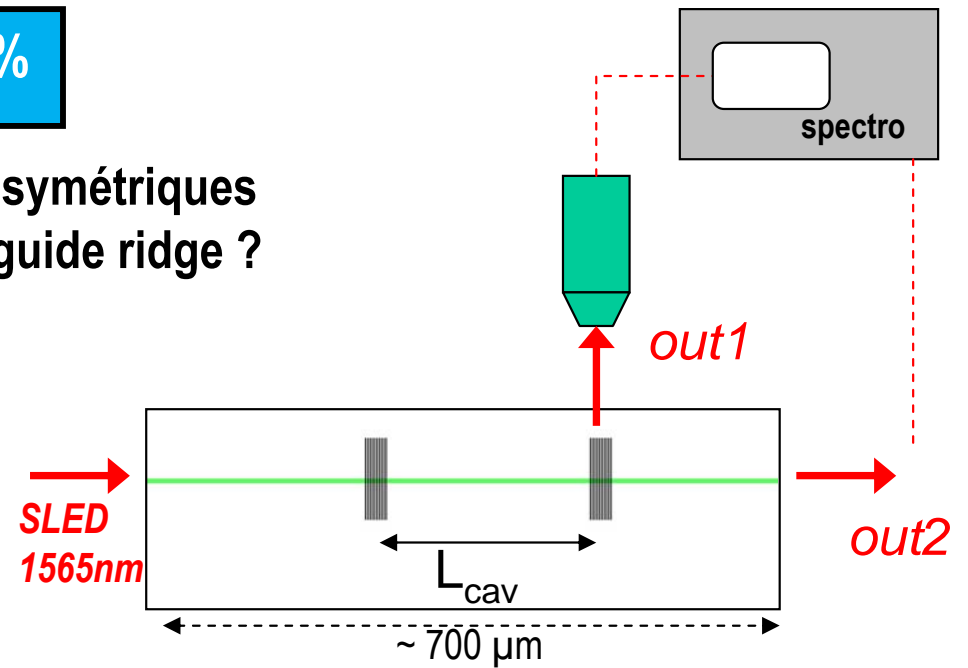


Démonstrateur : fabrication /test



• $R \sim 65\%$

- Miroirs symétriques
- Pertes guide ridge ?



Résumé - perspectives

- **Compréhension mécanisme de gravure InP très améliorée**
 - collab. LPN – LTM (réseau RENATECH)
- **Etude chimie de surface / flancs gravés**
 - Méthode d'analyse des flancs exportable sur d'autres matériaux (IMN)
- **Plateforme d'analyse [code – expérience] du plasma-Cl₂ unique**
 - Poursuite coopération U. Michigan, nvelle coop. INP Greiswald
- **1ère réalisation démonstrateur - à poursuivre R > 30 % !**

- **Financé par ANR : 1 thèse (IMN) – 10 mois post-doc (LPP)**
- **Production scientifique :**
 - **7 publications** (3 multipartenaires) / 3 en préparation (2 multipartenaires)
 - **15 communications** (8 multipartenaires) dont 4 invitées
 - diffusion : 1 (journées RENATECH)



Projet Interdisciplinaire *INCLINE* - partenaires



S. Bouchoule,
G. Patriarche, L. Gatilova (2010) L. Le Gratiet, S. Guilet
L. Vallier, T. Chevolleau, C. Petit-Etienne.



C. Cardinaud, A. Rhallabi
R. Chanson (*thèse 2009-2012*)



J.-P. Booth, P. Chabert,
E. Despiau-Pujo (*p-doc 2010*)



P. Rojo-Romeo, X. Letartre, J.-L. Leclercq