

# Transistors Bipolaires à Hétérojonction : Développement d'une filière InP/GaAsSb pour applications ultra-rapides

Melania Lijadi

Directeur de thèse : Jean-Luc Pelouard  
Laboratoire de Photonique et Nanostructures  
Groupe : Physique des dispositifs

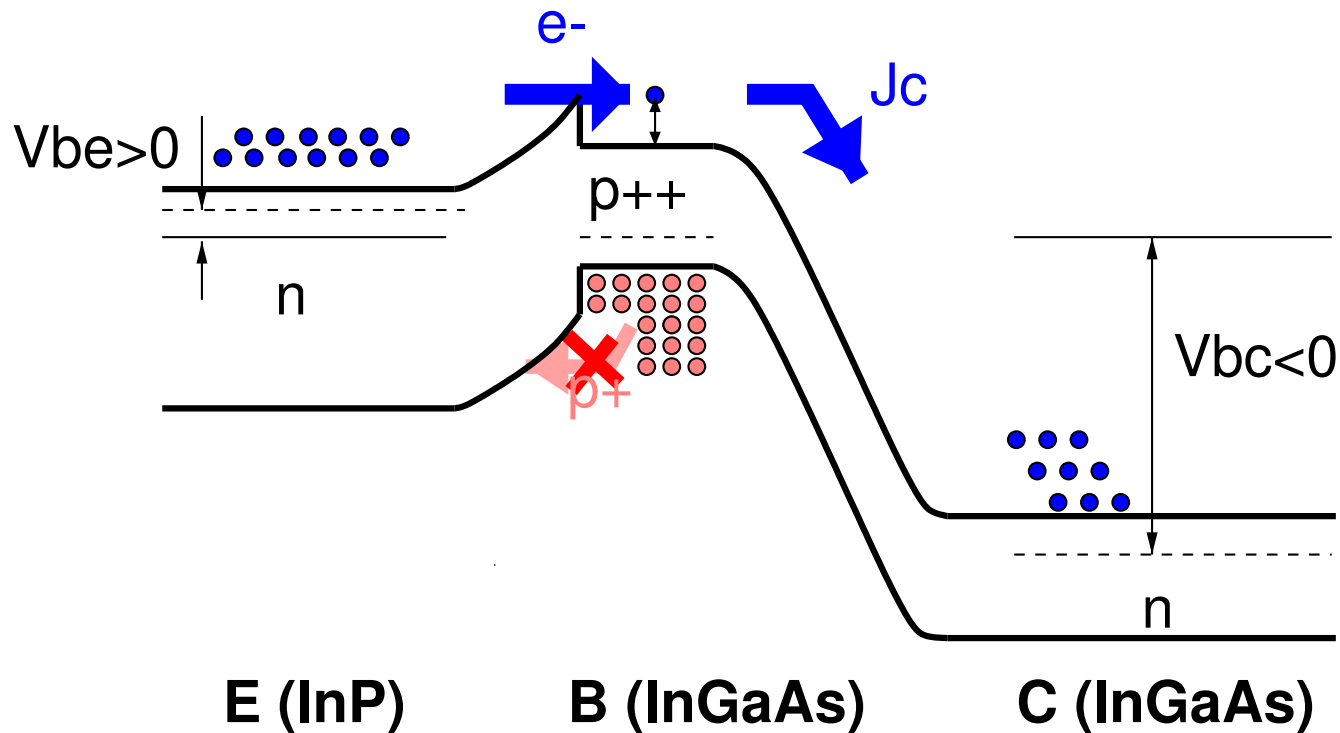
Thèse financée par Picogiga International (Les Ulis) et LPN

23 septembre 2005



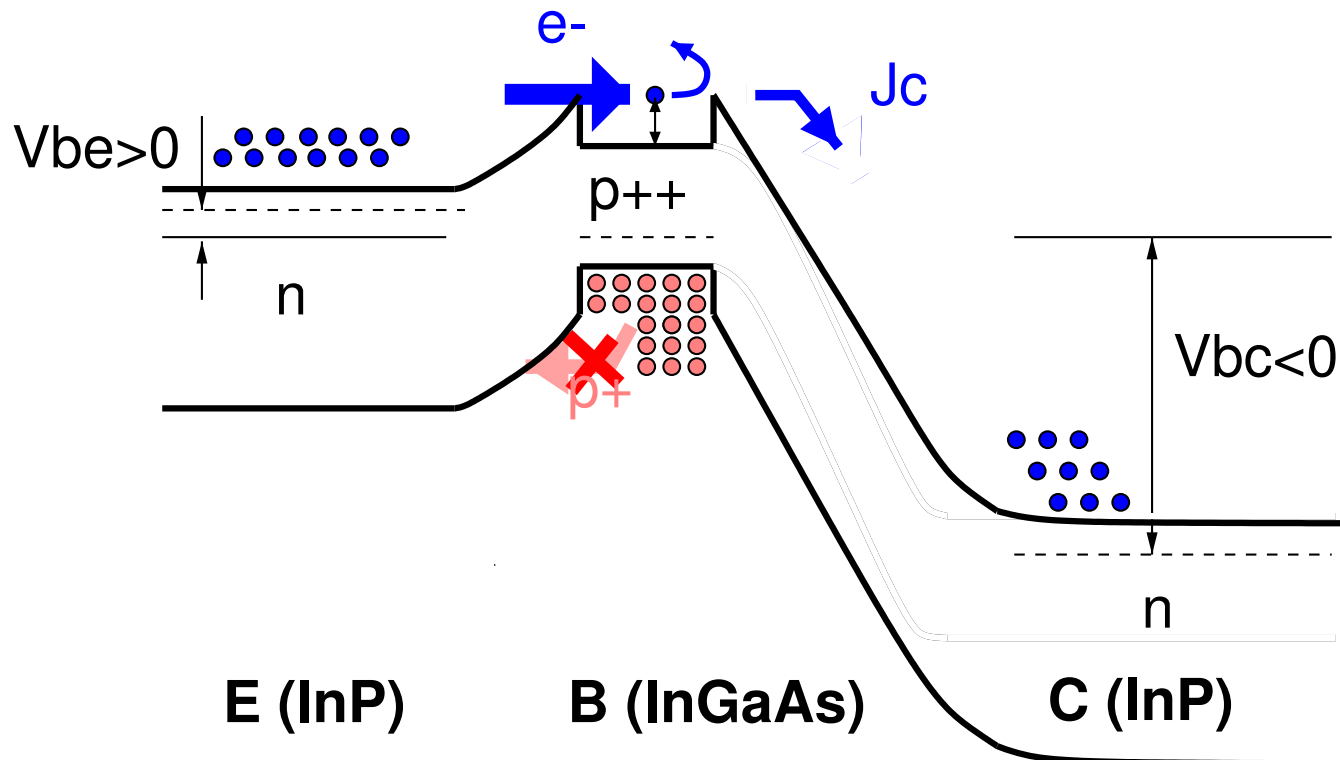
# Les TBH avec l'hétérojonction type I

- ☞ TBH InP/InGaAs : base et collecteur en InGaAs
- ☞ Injection des électrons chauds dans la base  $v_{bal} \gg v_{dif}$  : TBH ultra-rapides de référence.
- ☞  $BV_{CEO}$  faible ( $< 3$  V)  $\rightarrow$  collecteur InP



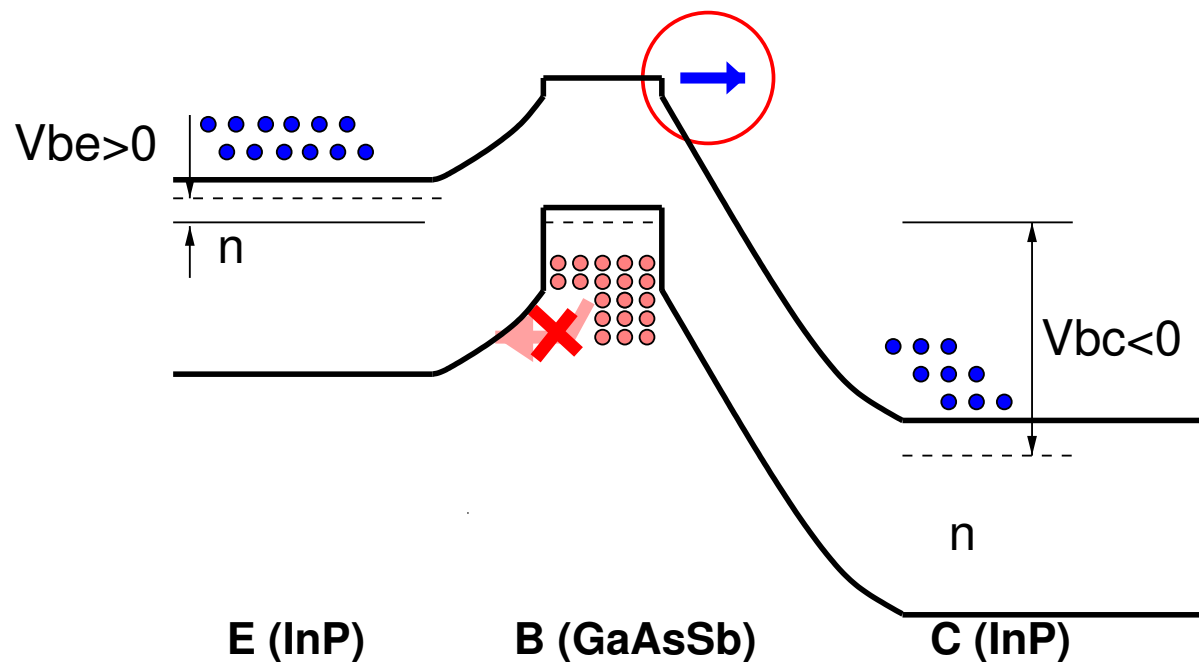
# Les TBH avec l'hétérojonction type I

- ☞ TBH InP/InGaAs : base et collecteur en InGaAs
- ☞ Injection des électrons chauds dans la base  $v_{bal} \gg v_{dif}$  : TBH ultra-rapides de référence.
- ☞  $BV_{CEO}$  faible ( $< 3$  V)  $\rightarrow$  collecteur InP



# GaAsSb<sub>0.49</sub> pour la base : l'hétérojonction type II

- ☞  $\Delta E_c$  InP/GaAsSb type II  $\rightarrow$  pas de blocage des électrons <sup>1</sup>
- ☞ Dopage C élevé ( $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) par MOVPE <sup>2</sup>
  - faible coefficient de diffusion  $\rightarrow$  fiabilité  $\nearrow$
- ☞ Gravure sélective InP/GaAsSb

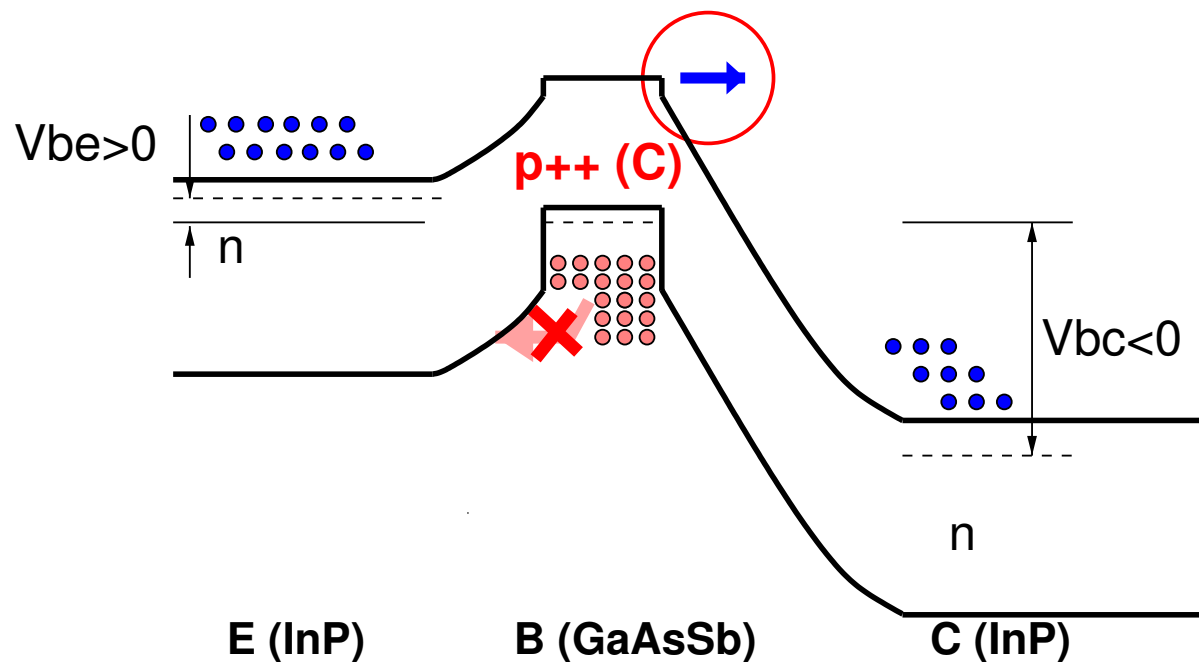


<sup>1</sup>Bhat APL 1996 ;68 :985.

<sup>2</sup>Dermott APL 1996 ;68 :1386

# GaAsSb<sub>0.49</sub> pour la base : l'hétérojonction type II

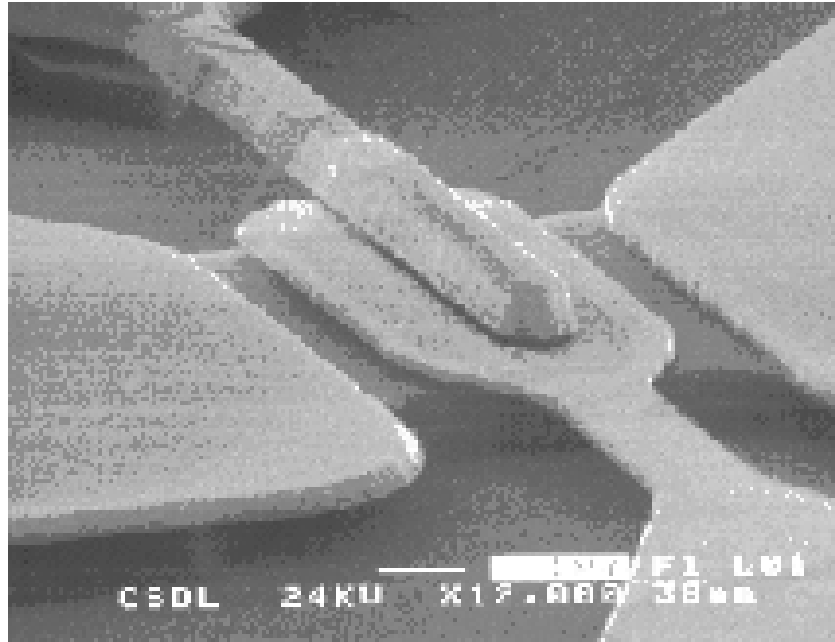
- ☞  $\Delta E_c$  InP/GaAsSb type II  $\rightarrow$  pas de blocage des électrons <sup>1</sup>
- ☞ Dopage C élevé ( $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) par MOVPE <sup>2</sup>
  - faible coefficient de diffusion  $\rightarrow$  fiabilité  $\nearrow$
- ☞ Gravure sélective InP/GaAsSb



<sup>1</sup>Bhat APL 1996 ;68 :985.

<sup>2</sup>Dermott APL 1996 ;68 :1386

# Le développement de TBDH InP/GaAsSb à SFU Canada



- ☞ Technologie performante ( $S_{eb} = 0.4 \times 11 \mu\text{m}^2$ ,  $W_b = 20 \text{ nm}$ )
- ☞ Performance record en 2000 ( $f_T; f_{MAX}$ )  $\sim (305 ; 300) \text{ GHz}$ <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>MW. Dvorak, IEDM Tech. Dig. 2000 :178.

# Contexte de ma thèse

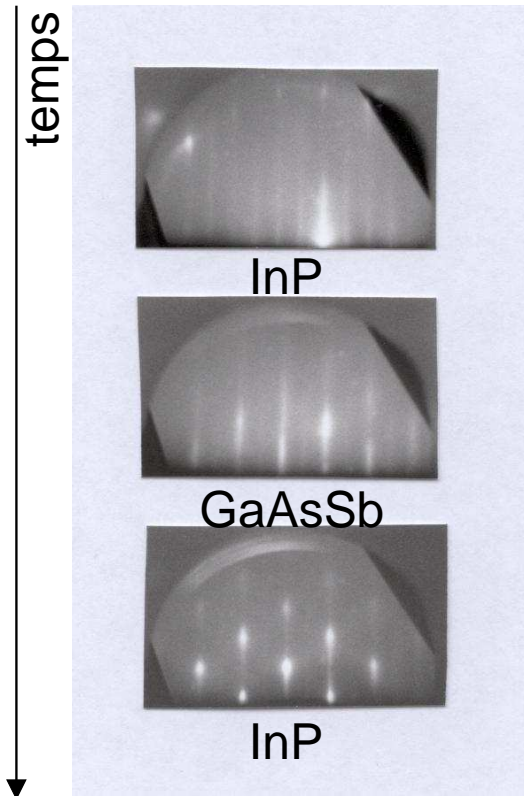
- ☞ Réalisation des TBH ultra-rapides (doigt d'émetteur  $< 1 \mu\text{m}$ )
  - Développer une technologie autour de GaAsSb
  - Développer un process pour structures épitaxiées émetteur up
  
- ☞ Etude des propriétés de transport dans l'hétérojonction de type II
  - Condition d'injection défavorable
  - Pourquoi ce système est-il aussi rapide ?
  - Quel est son potentiel d'évolution ?
  
- ☞ Projet RNRT MELBA :
  - Circuit telecom à 40 Gbit/s
  - Coll : Picogiga, Opto +, LPM, IXL

# Contenu

- I. Introduction
- II. Les résultats des TBH de 1ère génération
  - ☞ Croissance InP/GaAsSb
  - ☞ TBH avec émetteur en InP et émetteur en InGaAlAs
  - ☞ Effet de la composition de Sb dans la base
  - ☞ Offset de bande de conduction
- III. Vers les TBH ultra-rapides : Développement technologique des TBH petites dimensions
- IV. Caractérisations électriques des TBH petites dimensions
- V. Conclusions et perspectives



# Croissance épitaxiale



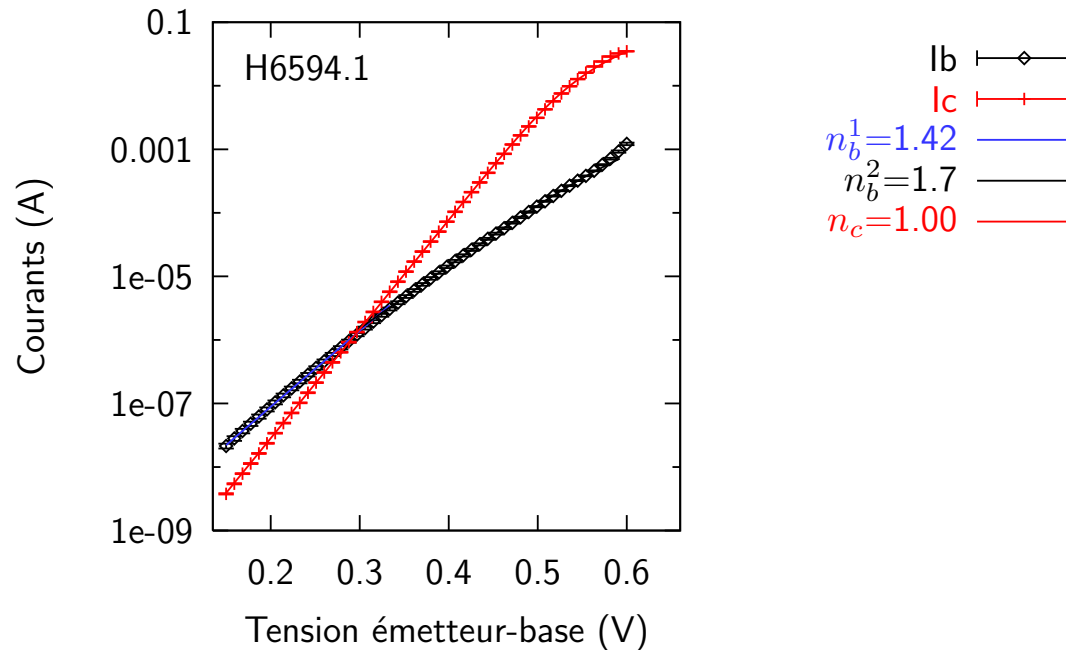
- ☞ Croissance par EJM (Bati V100) à Picogiga, dopage carbone par  $\text{CBr}_4$
- ☞ Mobilité de trous dans  $\text{GaAsSb p}^{++}$  comparable à couche MOVPE (SFU, Dermott)
- ☞ Difficulté de croissance d'InP sur GaAsSb :
  - Bilan des énergies libres ( $\sigma$ ) :
  - Croissance bidimensionnelle :  $\sigma_s > \sigma_f + \sigma_i$ <sup>1</sup>
  - $\sigma_{\text{InP}} > \sigma_{\text{GaAsSb}}$
  - Ségrégation de Sb (effet surfactant)
  - InPSb (8 nm) à l'interface InP/GaAsSb:C<sup>2</sup>

- ➡ Croissance GaAsSb/InP maîtrisée
- ➡ Fort dopage p maîtrisé
- ➡ Difficulté de croissance InP/GaAsSb

<sup>1</sup>M. Copel PRL 1989 ;63 :632.

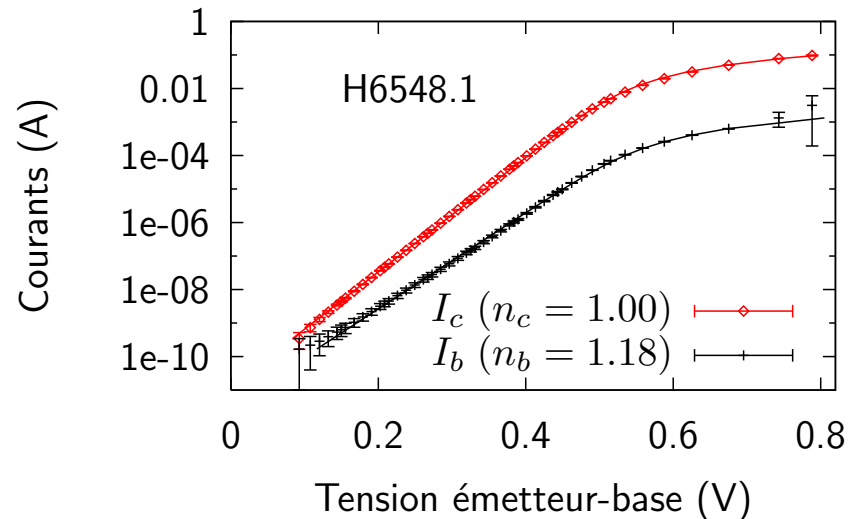
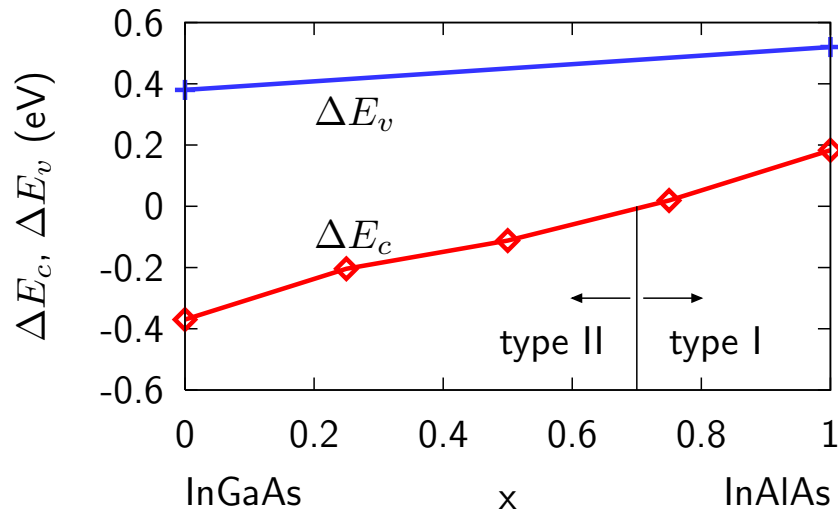
<sup>2</sup>F Brunner J. Cryst. Growth 2004 ;272 :111.

# TBH avec émetteur en InP



- ☞  $I_c \propto \exp \frac{qV}{kT}$
- ☞  $I_b \neq \exp \frac{qV}{kT}$
- ☞ Gain en courant dépend de  $V_{be}$  ( $\beta < 1$  quand  $V_{be} < 0.3$  V).
- ☞ Origine d'excès de courant base :
  - recombinaison croisée due à l'interface EB type II
  - puits de potentiel (InPSb)

# TBH avec émetteur en $\text{In}_{0.52}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.48}\text{As}$



- ☞ Emetteur en  $\text{Q}_{\text{Al}}$  :  $\Delta E_v \gg kT$  &  $\Delta E_c > 0$  à  $x \sim 0.7$ <sup>1 2</sup>
- ☞ Caractéristique TBH H6548 avec  $x = 0.5$  :
  - $I_c, I_b \propto \exp \frac{qV}{kT}$
  - Gain constant et élevé malgré HJ EB type II.

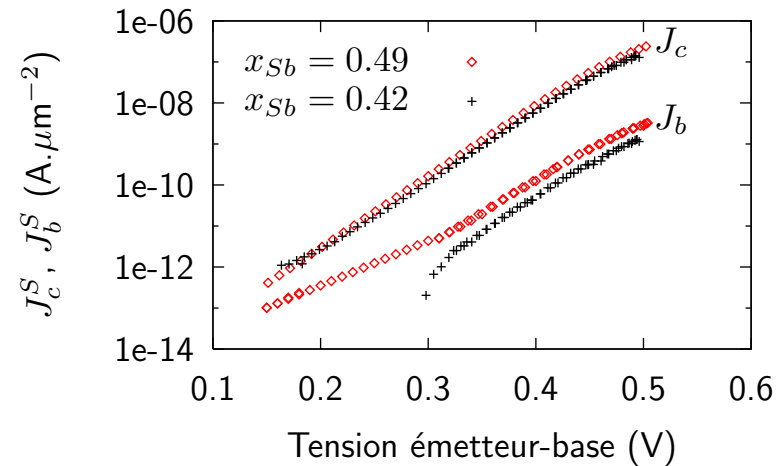
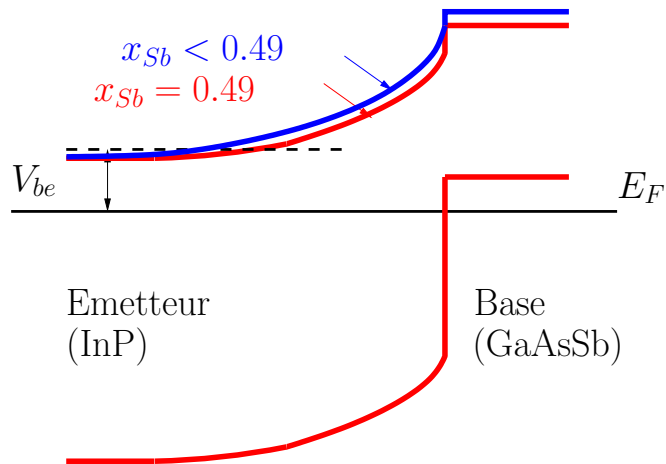
➡ Puits InPsb à l'interface EB pour TBH avec émetteur en InP

➡ Solution choisie : Emetteur en  $\text{Q}_{\text{Al}}$

<sup>1</sup>Sugiyama JJAP 1986 ;25 :L648.

<sup>2</sup>Klem J. Cryst. Growth 1991 ;111 :628.

# Effet de la composition d'antimoine dans la base



Effet de la diminution de  $x_{Sb}$  :

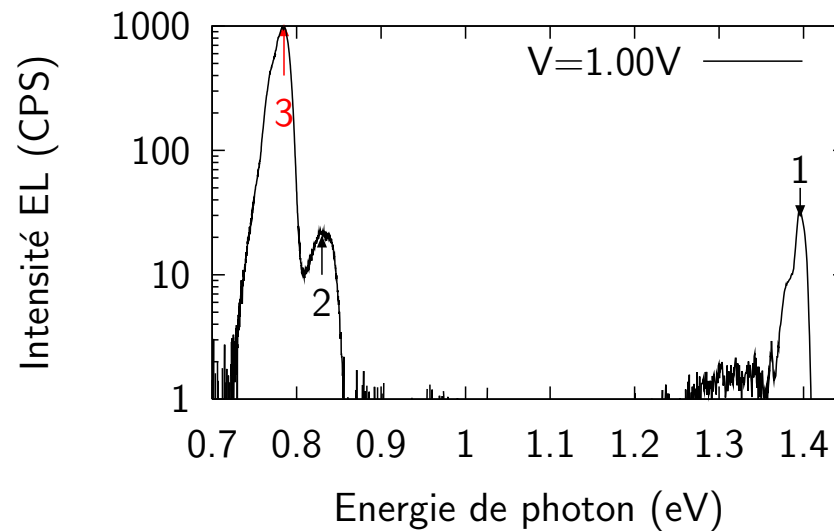
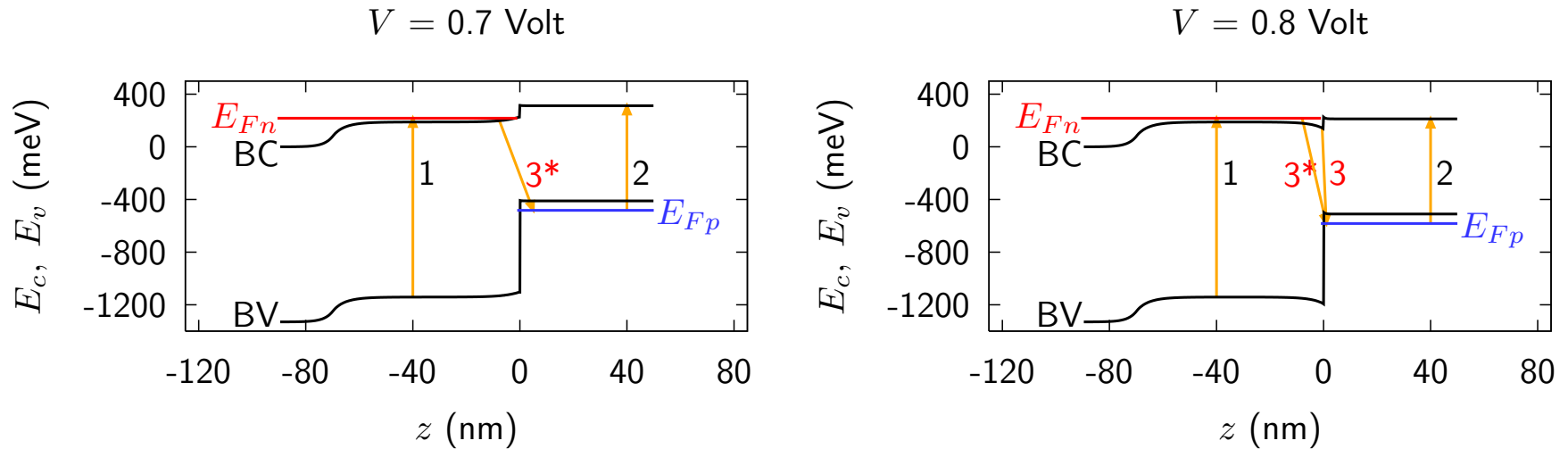
- ☞ Augmentation de  $E_g$
- ☞ Diminution de  $|\Delta E_c|$  InP/GaAsSb <sup>1</sup>
- ☞ Diminution de la recombinaison croisée  $x_{Sb}=0.49 \rightarrow 0.42$  : gain des TBH 80  $\rightarrow$  120

☞  $x_{Sb} < 0.49$

☞ TBH avec base en GaAsSb contraint

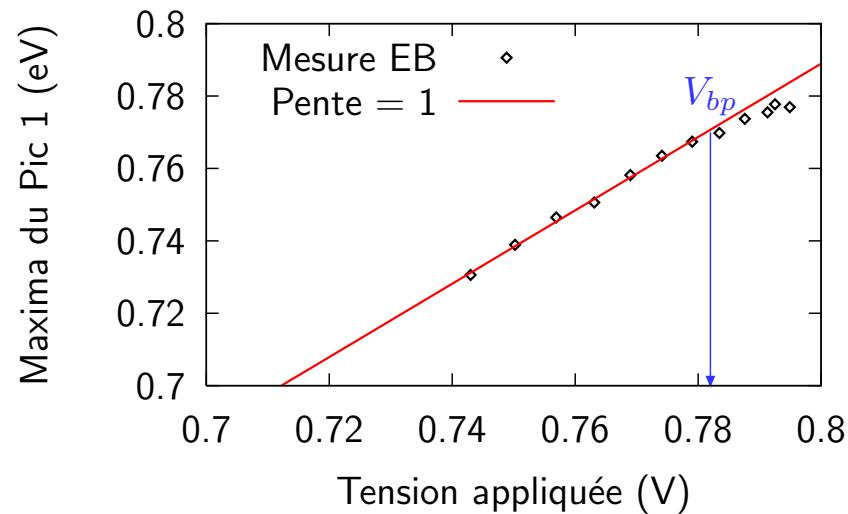
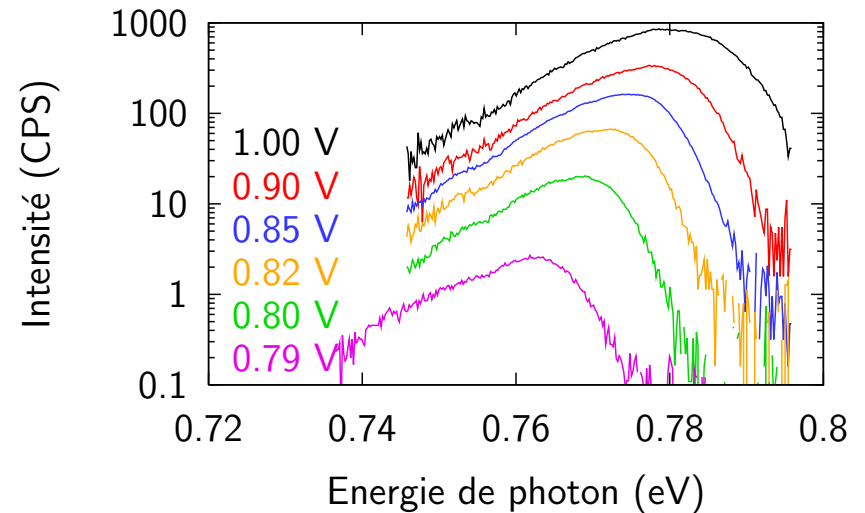
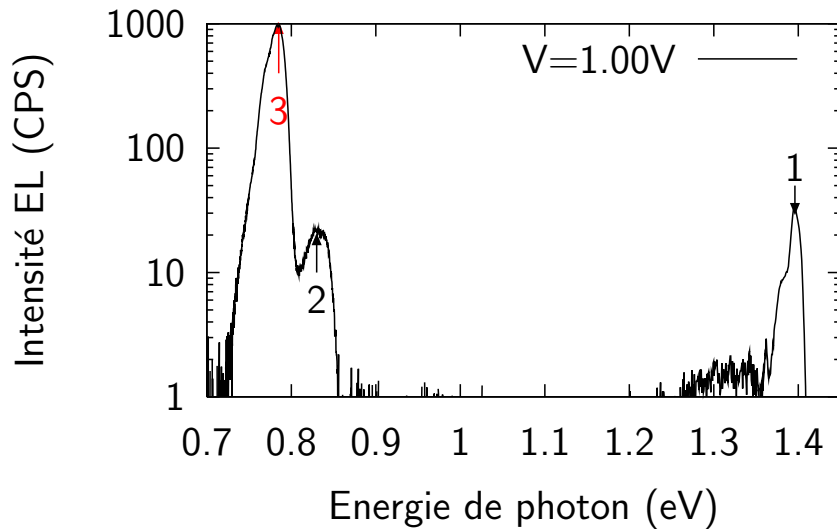
<sup>1</sup>M. Peter APL 1999 ;74 :410.

# Mesure de l'offset de bande dans InP/GaAsSb (1)



- ☞ Mesure de  $\Delta E_c$  par la détermination de la tension de bande plate ( $V_{bp}$ )
- ☞ Pic de recombinaison croisée à l'interface

# Mesure de l'offset de bande dans InP/GaAsSb (2)



- ☞  $V_{bp} = 0.78\text{ V} \rightarrow \Delta E_c = -(0.15 \pm 0.01)\text{ eV}$  pour  $x_{Sb} = 0.44$
- ☞ Littérature :  $-0.09$  à  $-0.18\text{ eV}$

# Conclusion chapitre II

☞ Emetteur en InGaAlAs

☞ Base contrainte ( $x_{Sb} < 0.49$ )

☞  $\Delta E_c$  InP/GaAsSb<sub>0.44</sub> =  $-(0.15 \pm 0.01)$  eV

☞ Injection dans l'hétérojonction de type II : modèle de Shockley à revoir

# Contenu

- I. Introduction
- II. Les résultats des TBH de 1ère génération
- III. Vers les TBH ultra-rapides : Développement technologique des TBH petites dimensions
  - ☞ Approche structurale et technologique pour augmenter la rapidité
  - ☞ Briques technologiques
  - ☞ Procédé de fabrication des TBH petites dimensions pour structure *E-up*
- IV. Caractérisations électriques des TBH petites dimensions
- V. Conclusions et perspectives



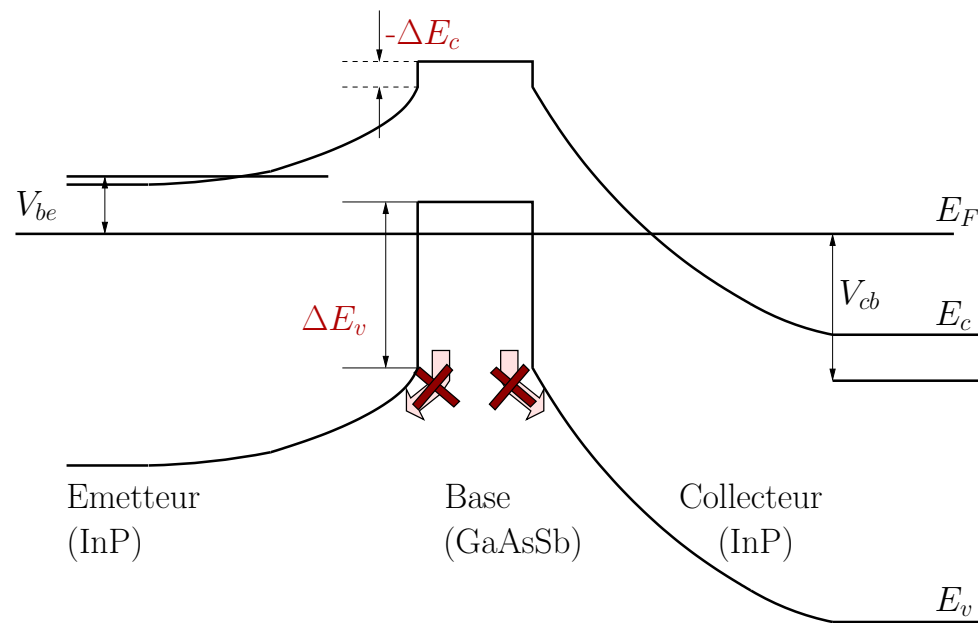
# Approches structurales et technologiques pour augmenter la rapidité

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}}$$

$$f_{MAX} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_b C_{bc}}}$$

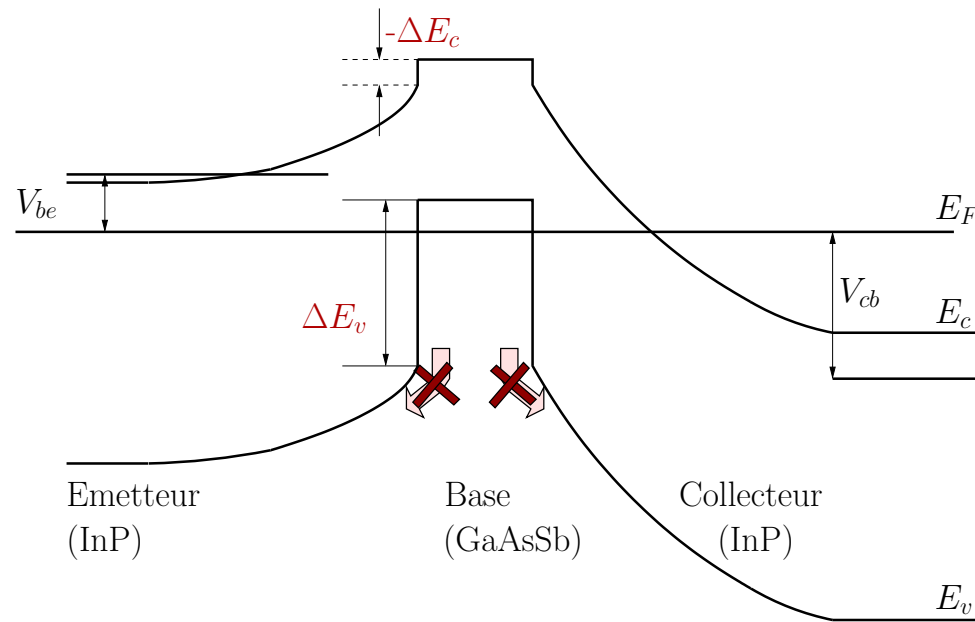
$$\tau_{ec} = \left( \underbrace{t_b + t_c}_{\text{structurale}} + \underbrace{\tau_e + \tau_c}_{\text{technologique}} \right)$$

# Approche structurale : réduire $t_b, t_c, R_b$



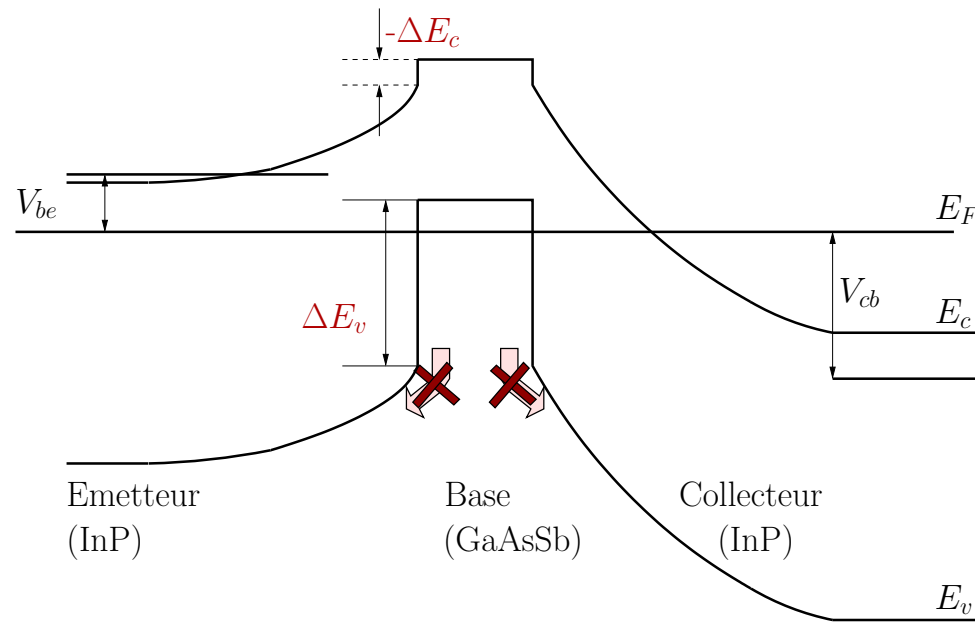
☞ Réduction  $t_b$  par réduction  $W_b$  :  $R_b \nearrow$ , Difficulté de process  $\nearrow$

# Approche structurale : réduire $t_b, t_c, R_b$



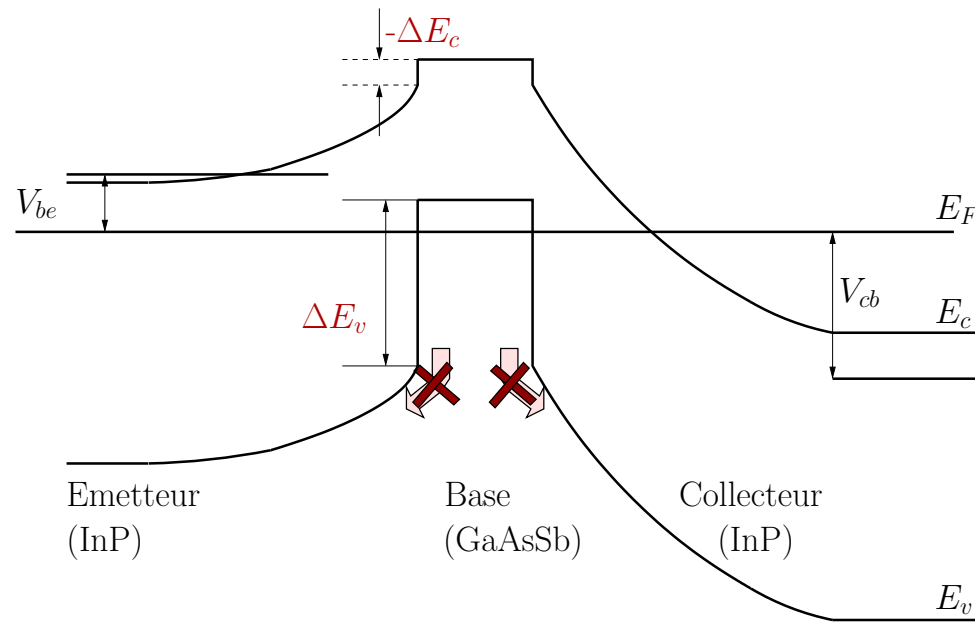
- ☞ Réduction  $t_b$  par réduction  $W_b$  :  $R_b \nearrow$ , Difficulté de process  $\nearrow$
- ☞ Réduction  $t_c$  par réduction  $W_c$  : Tenue en tension  $\searrow$

# Approche structurale : réduire $t_b, t_c, R_b$



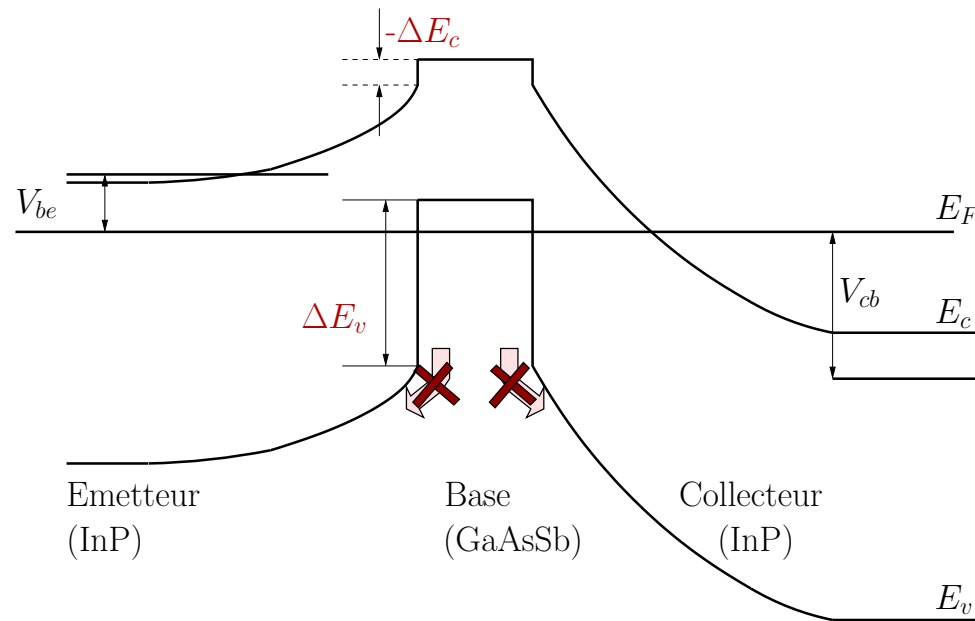
- ☞ Réduction  $t_b$  par réduction  $W_b$  :  $R_b \nearrow$ , Difficulté de process  $\nearrow$
- ☞ Réduction  $t_c$  par réduction  $W_c$  : Tenue en tension  $\searrow$
- ☞ Réduction  $R_b$  par augmentation  $N_A$  : Durée de vie dans la base  $\searrow$  Gain ?

# Approche structurale : réduire $t_b, t_c, R_b$



- ☞ Réduction  $t_b$  par réduction  $W_b$  :  $R_b \nearrow$ , Difficulté de process  $\nearrow$
- ☞ Réduction  $t_c$  par réduction  $W_c$  : Tenue en tension  $\searrow$
- ☞ Réduction  $R_b$  par augmentation  $N_A$  : Durée de vie dans la base  $\searrow$  Gain ?
- ☞ Diminution  $|\Delta E_c|$  par l'utilisation de base contrainte ( $x_{Sb} < 0.49$ )

# Approche structurale : réduire $t_b, t_c, R_b$

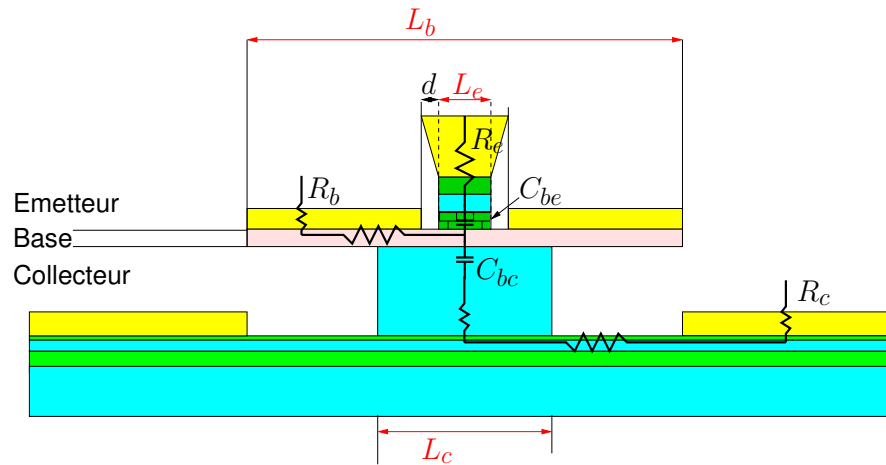


- ☞ Réduction  $t_b$  par réduction  $W_b$  :  $R_b \nearrow$ , Difficulté de process  $\nearrow$
- ☞ Réduction  $t_c$  par réduction  $W_c$  : Tenue en tension  $\searrow$
- ☞ Réduction  $R_b$  par augmentation  $N_A$  : Durée de vie dans la base  $\searrow$  Gain ?
- ☞ Diminution  $|\Delta E_c|$  par l'utilisation de base contrainte ( $x_{Sb} < 0.49$ )
- ☞ Utilisation de matériaux émetteur en  $\text{In}_{0.52}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.48}$ 
  - Diminution  $|\Delta E_c|$  quand  $x \nearrow$  :  $x > 0.7$  : HJ type II  $\rightarrow$  type I  $t_b(\searrow)$

➡ Mais la gravure sélective InGaAlAs/GaAsSb n'était pas connue !

# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

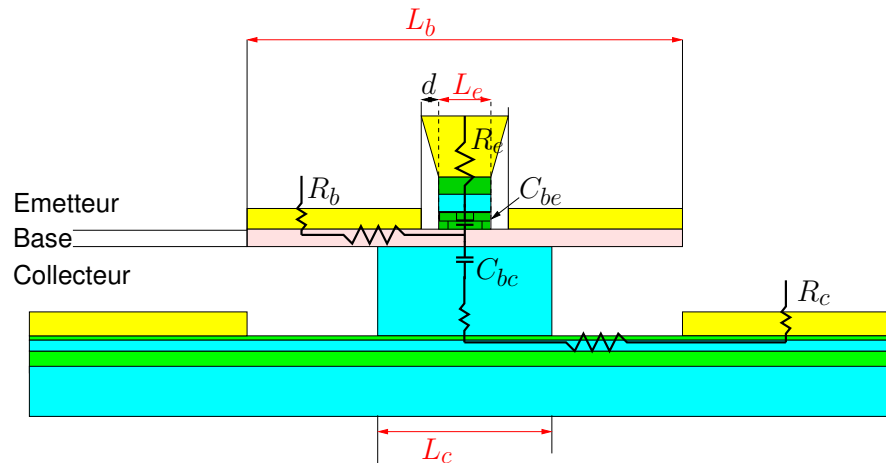
$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}}$  → Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



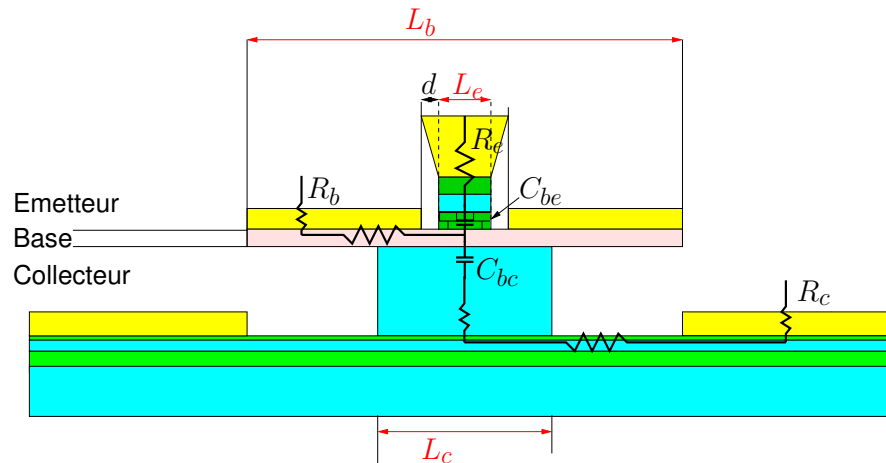
☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}}$  → Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

☞  $C_{bc} \propto S_{bc}$  → Sous-gravure du collecteur



# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



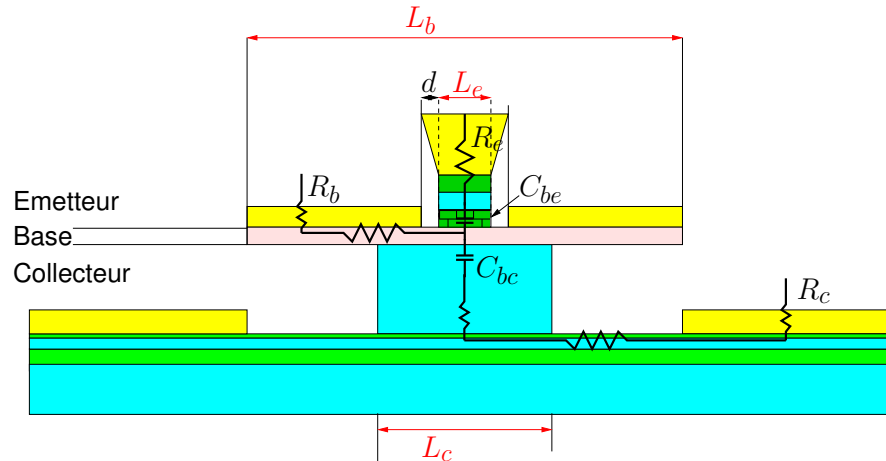
☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}}$  → Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

☞  $C_{bc} \propto S_{bc}$  → Sous-gravure du collecteur

☞  $R_b = R_b^{int} + R_b^{ext} + R_b^c$  :

# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}} \rightarrow$  Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

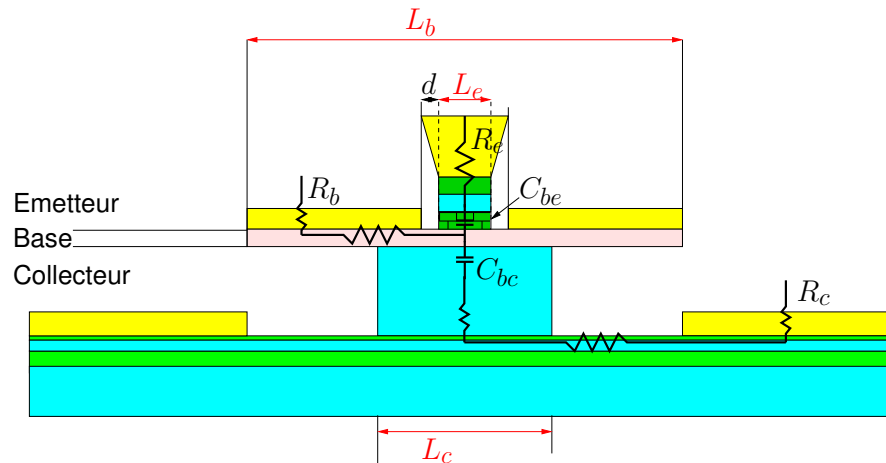
☞  $C_{bc} \propto S_{bc} \rightarrow$  Sous-gravure du collecteur

☞  $R_b = R_b^{int} + R_b^{ext} + R_b^c :$

–  $R_b^{int} \propto P/S :$  Dispositif avec un fort rapport d'aspect (Long  $\gg$  Larg).

# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}} \rightarrow$  Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

☞  $C_{bc} \propto S_{bc} \rightarrow$  Sous-gravure du collecteur

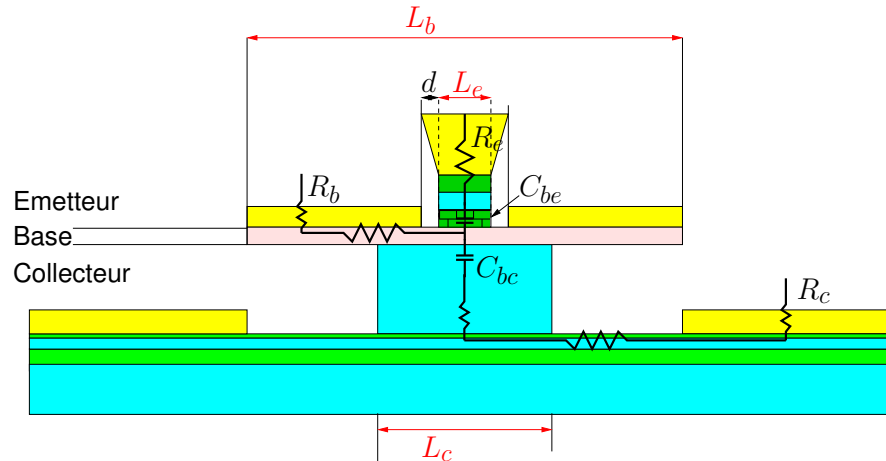
☞  $R_b = R_b^{int} + R_b^{ext} + R_b^c :$

–  $R_b^{int} \propto P/S$  : Dispositif avec un fort rapport d'aspect (Long  $\gg$  Larg).

–  $R_b^{ext} + R_b^c \propto \frac{1}{W_b} \rightarrow$  Gravure sélective émetteur-base et base-collecteur.

# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}} \rightarrow$  Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

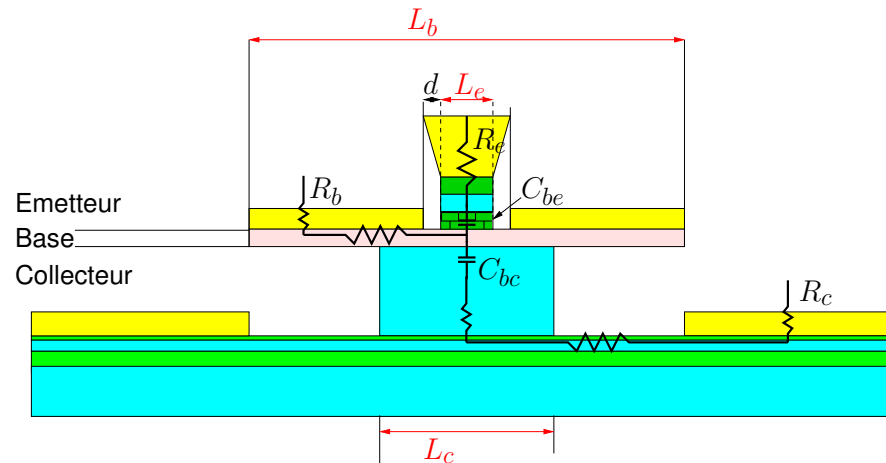
☞  $C_{bc} \propto S_{bc} \rightarrow$  Sous-gravure du collecteur

☞  $R_b = R_b^{int} + R_b^{ext} + R_b^c :$

- $R_b^{int} \propto P/S$  : Dispositif avec un fort rapport d'aspect (Long  $\gg$  Larg).
- $R_b^{ext} + R_b^c \propto \frac{1}{W_b} \rightarrow$  Gravure sélective émetteur-base et base-collecteur.
- Très bon contact ohmique sur la base.

# Approche technologique : réduction $r_e, C_{bc}, R_b$

$$\tau_{techno} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + (R_c + R_e)C_{bc}$$



☞  $r_e \propto \frac{1}{J_e \times S_{eb}} \rightarrow$  Réalisation du doigt d'émetteur petit : thermalisation

☞  $C_{bc} \propto S_{bc} \rightarrow$  Sous-gravure du collecteur

☞  $R_b = R_b^{int} + R_b^{ext} + R_b^c :$

–  $R_b^{int} \propto P/S$  : Dispositif avec un fort rapport d'aspect (Long  $\gg$  Larg).

–  $R_b^{ext} + R_b^c \propto \frac{1}{W_b} \rightarrow$  Gravure sélective émetteur-base et base-collecteur.

– Très bon contact ohmique sur la base.

–  $R_b^{ext} \propto d \rightarrow$  Réduire la distance entre la base extrinsèque et la zone active.

# Contenu

- I. Introduction
- II. Les résultats des TBH de 1ère génération
- III. Vers les TBH ultra-rapides : Développement technologique des TBH petites dimensions
  - ☞ Approche structurale et technologique pour augmenter la rapidité
  - ☞ Briques technologiques
  - ☞ Procédé de fabrication des TBH petites dimensions pour structure *E-up*
- IV. Caractérisations électriques des TBH petites dimensions
- V. Conclusions et perspectives

# Gravures chimiques sélectives pour InGaAl<sub>0.24</sub>As/GaAsSb

Solution C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> :

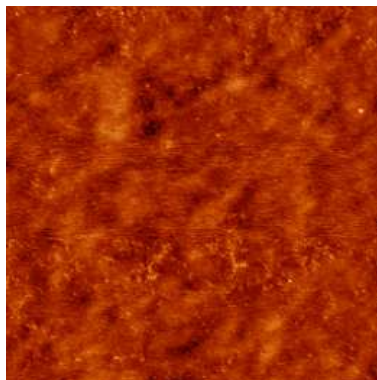
☞ Littérature <sup>1</sup> :

– Sélectivité InGaAs/GaAsSb >40, sélectivité InAlAs/GaAsSb <10

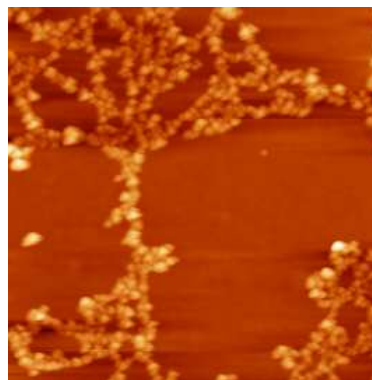
☞ Ce travail <sup>2</sup>

– Sélectivité >30 pour InGaAl<sub>0.24</sub>As/GaAsSb (concentration 2:1 à 7:1)

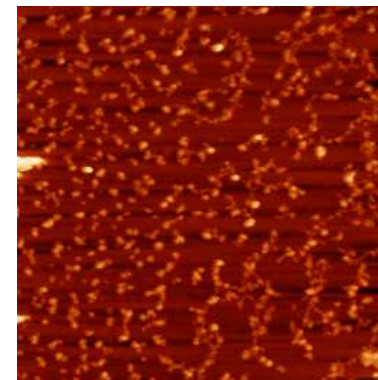
– Rugosité=0.3 nm (concentration 2:1, mesure AFM)



conc.= (2:1)  
R=0.3 nm



conc.= (5:1)  
R=9.4 nm

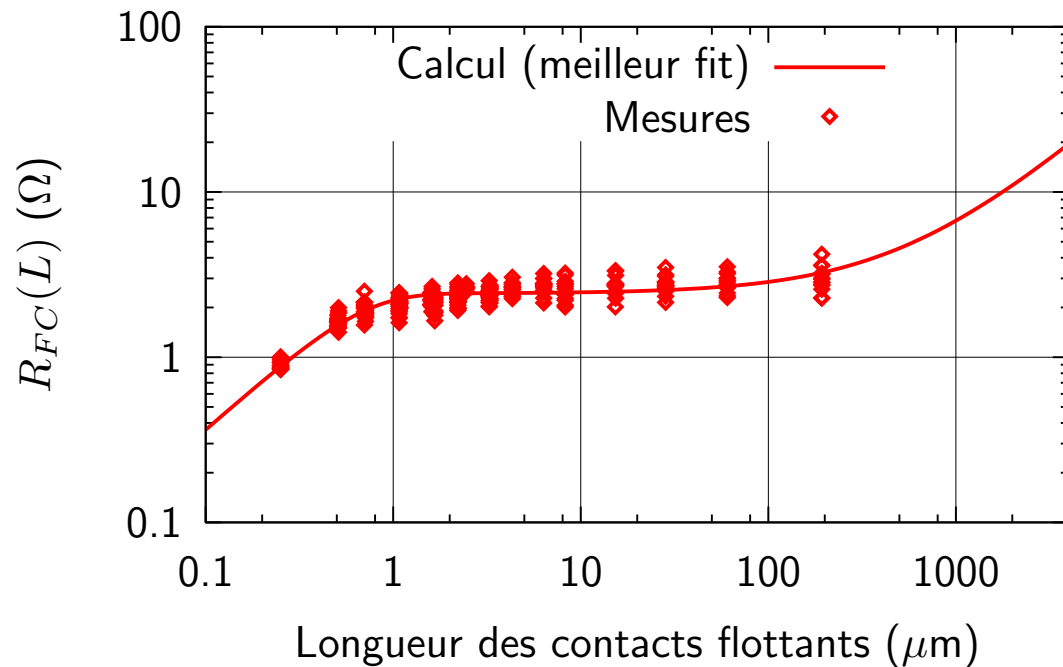


conc.= (10:1)  
R=9.6 nm

<sup>1</sup>GC DeSalvo J. Electrochem. Soc. 1994 ;141 :3526.

<sup>2</sup>M Lijadi et al. Electrochem. Solid State Lett. 2005 ;12.

# Contact ohmique sur la base : méthode FCTLM



- ☞  $L$  varie de 0.25 à 192  $\mu\text{m}$  : Première mesure précise de  $R_S$  et  $L_T$
- ☞ Contact Pt/Ti/Pt/Au sur GaAsSb dopé  $p=3.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 
  - $L_T = (0.32 \pm 0.01) \mu\text{m}$ ,  $\rho_c = (8.1 \pm 0.3) \times 10^{-7} \Omega\text{cm}^{-2}$ .
  - $R_S = 771 \pm 15 \Omega/\square$ .
  - $R_{S0} = 676 \pm 2 \Omega/\square$ .
  - Mise en évidence de  $R_S > R_{S0}$ <sup>1</sup>

<sup>1</sup>M Lijadi et al. Solid State Electronics 2005.

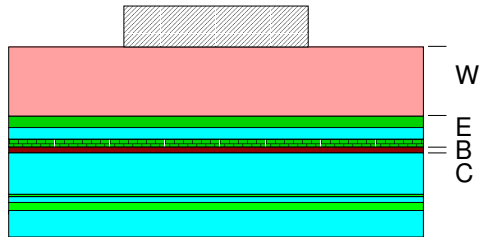


# Contenu

- I. Introduction
- II. Les résultats des TBH de 1ère génération
- III. Vers les TBH ultra-rapides : Développement technologique des TBH petites dimensions
  - ☞ Approche structurale et technologique pour augmenter la rapidité
  - ☞ Briques technologiques
  - ☞ Procédé de fabrication des TBH petites dimensions pour structure *E-up*
- IV. Caractérisations électriques des TBH petites dimensions
- V. Conclusions et perspectives

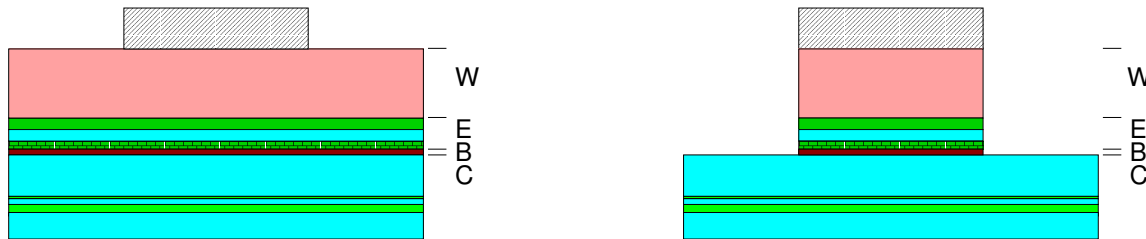
# Process *E-up* auto-aligné

- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



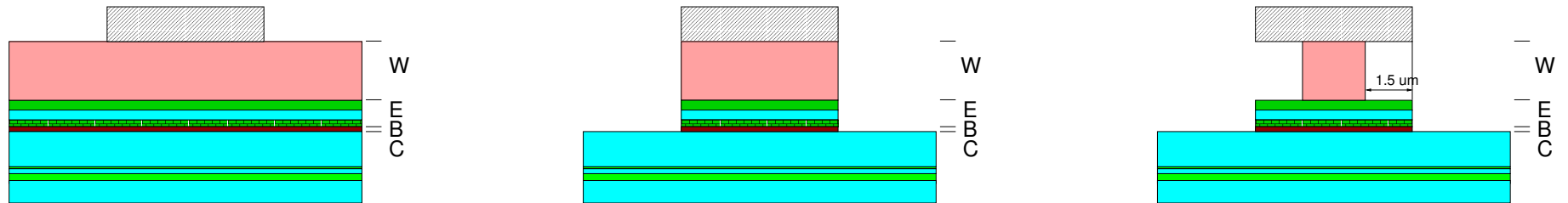
# Process *E-up* auto-aligné

- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



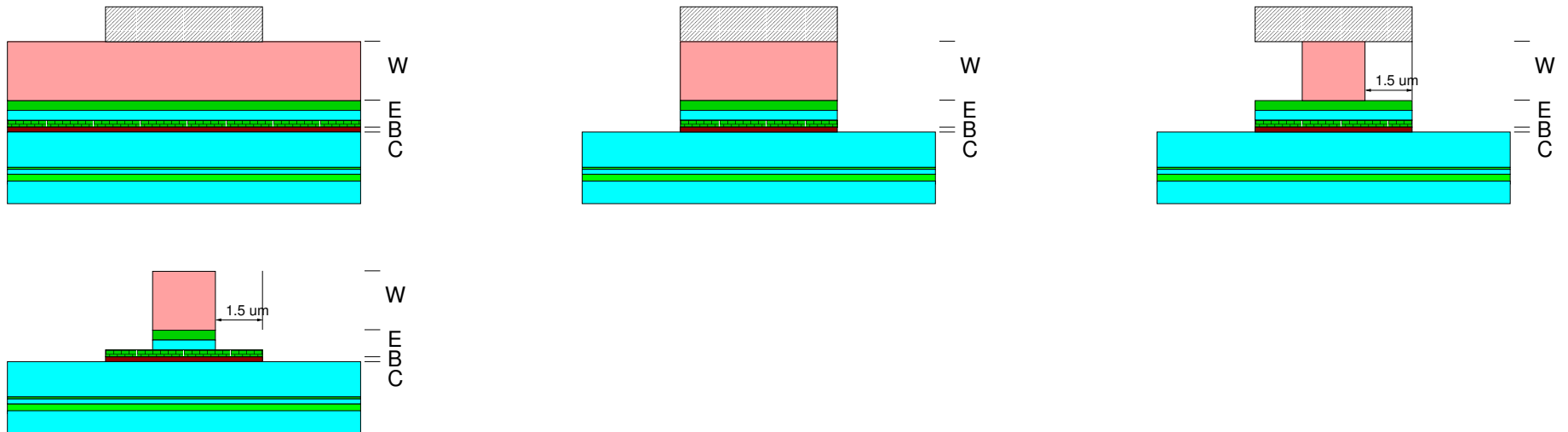
# Process *E-up* auto-aligné

- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



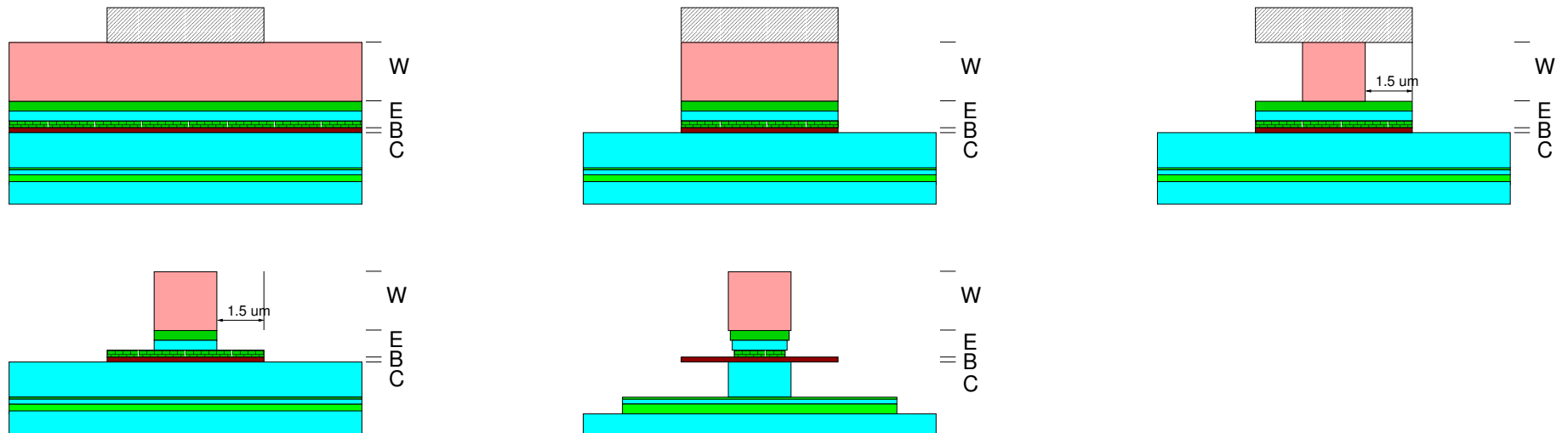
# Process *E-up* auto-aligné

- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



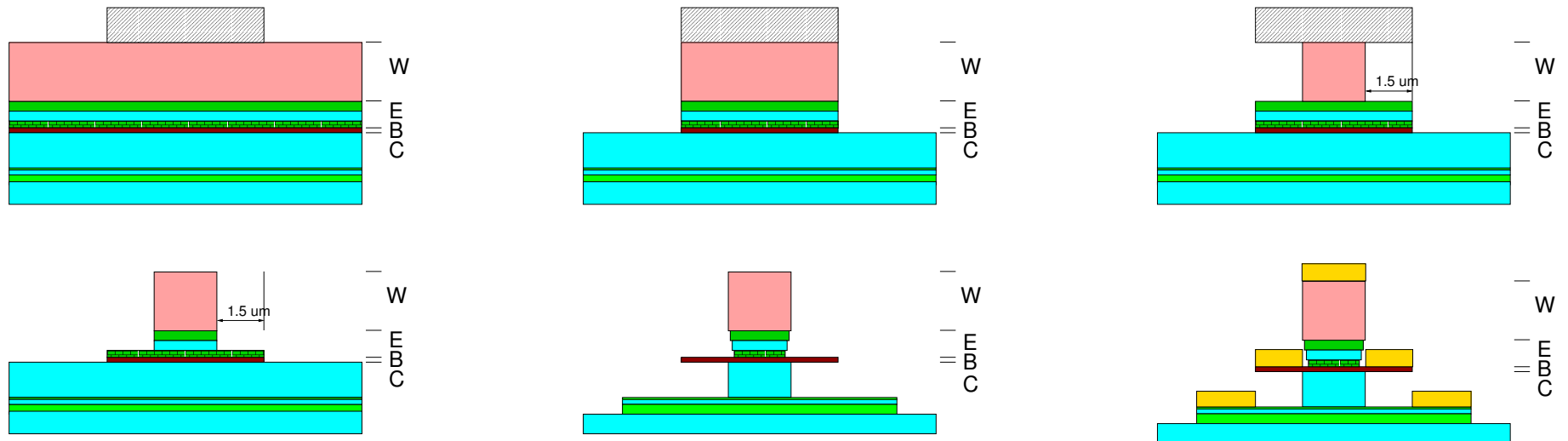
# Process *E-up* auto-aligné

- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



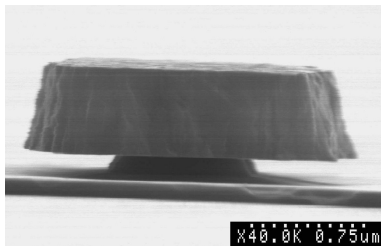
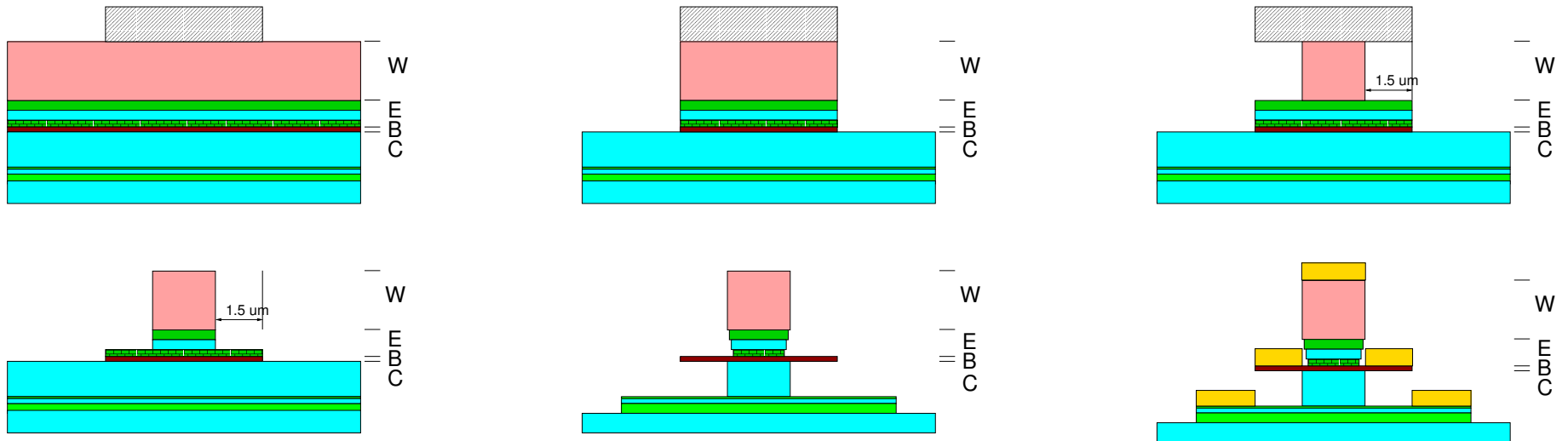
# Process *E-up* auto-aligné

- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



# Process *E-up* auto-aligné

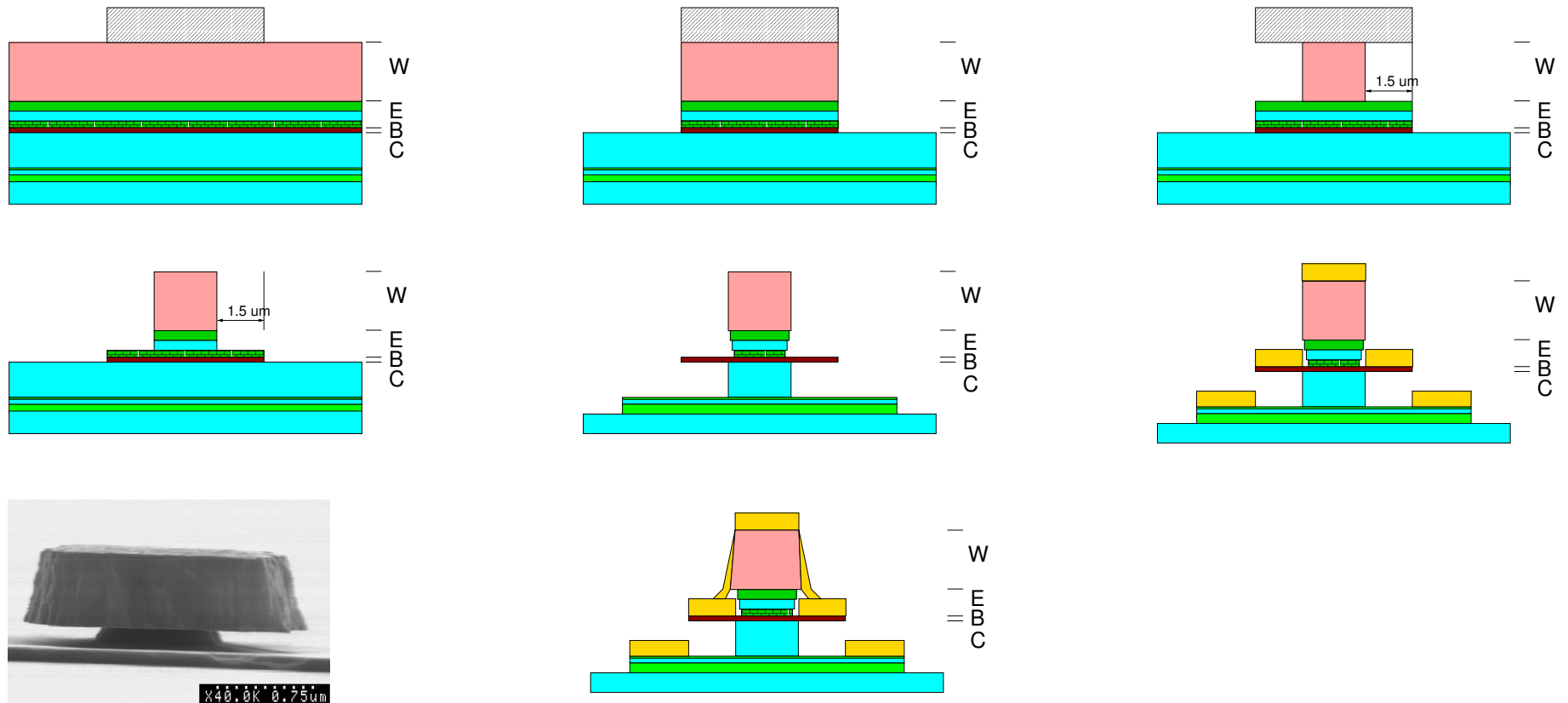
- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.





# Process *E-up* auto-aligné

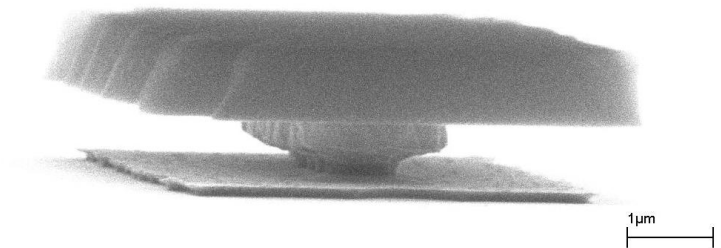
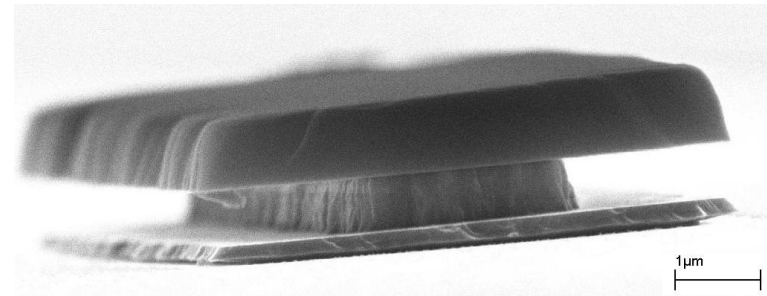
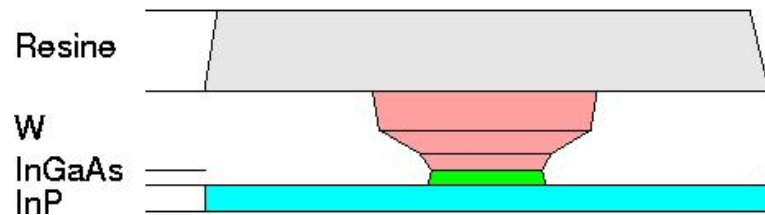
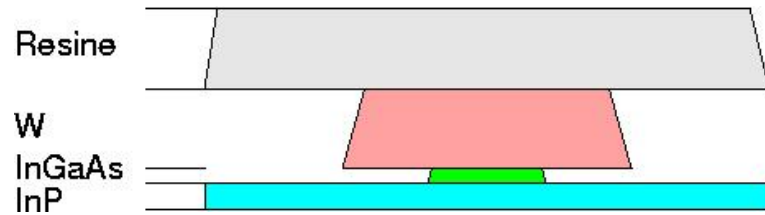
- ☞ Développé au LPN pour structure *C-up*<sup>1</sup>
- ☞ Le transistor est entièrement réalisé avec une seule lithographie.



<sup>1</sup>N. Matine Thèse doctorat Paris XI (1996)

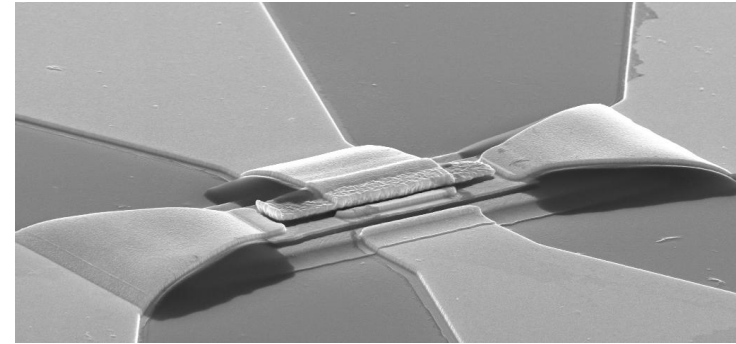
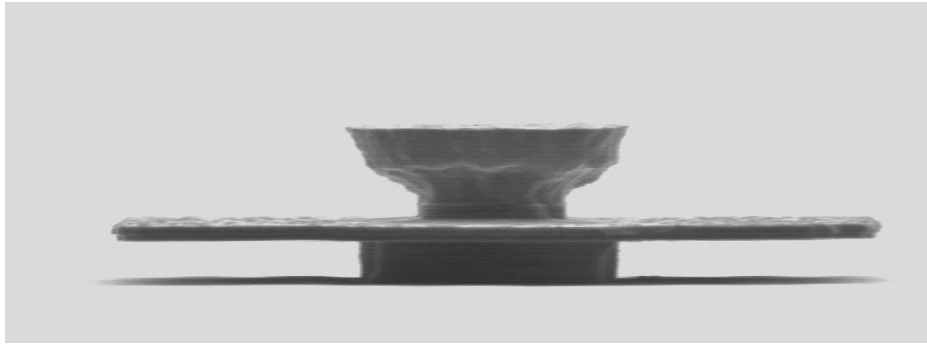
# Élément d'auto-alignement en tungstène

- ☞ Sous-gravure chimique profonde de InGaAs pendant la gravure de tungstène <sup>1</sup>



<sup>1</sup>M. Lijadi et al. Brevet (France) No 05/07604 date 18/07/05.

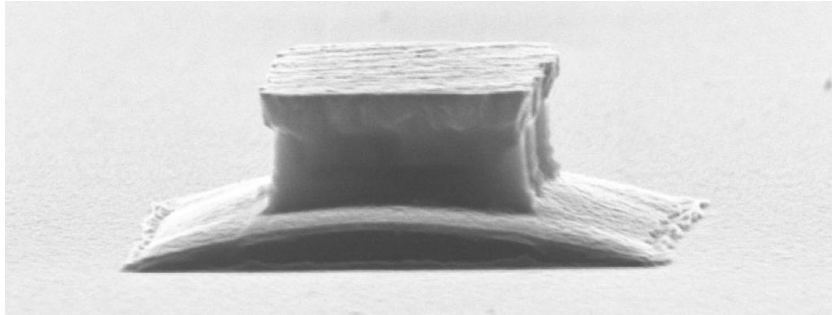
# Process *E-up* auto-aligné pour TBH GaAsSb



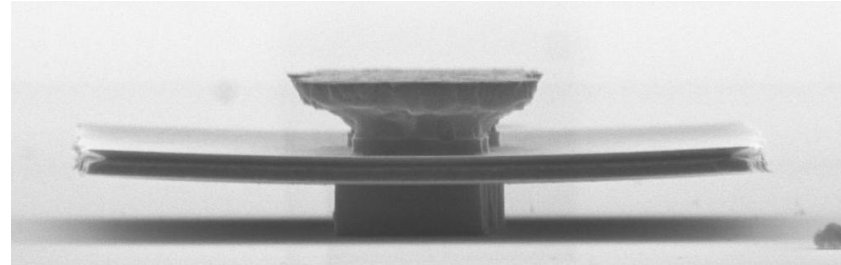
- ☞ Implémentation des trois briques technologiques :
  - gravure sélective
  - contact ohmique
  - inversion du profil tungstène
  
- ☞ Nouveaux masques des niveaux sorties de contacts par pont à air :
  - 3 ponts à air (1 pont d'émetteur + 2 ponts de base)
  - Contrainte d'alignement en  $x$  et en  $y$  de  $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$

➡ Faisabilité démontrée sur structure TBH H6697 ( $\text{GaAsSb}_{0.49}$ ,  $W_b = 50 \text{ nm}$ )

# Tenue mécanique de la casquette de base (Structure base contrainte)



H7466 ( $x_{Sb}=0.38$ )



H7515 ( $Q_{Al} / GaAsSb_{0.38} / Q_{Al}$ )

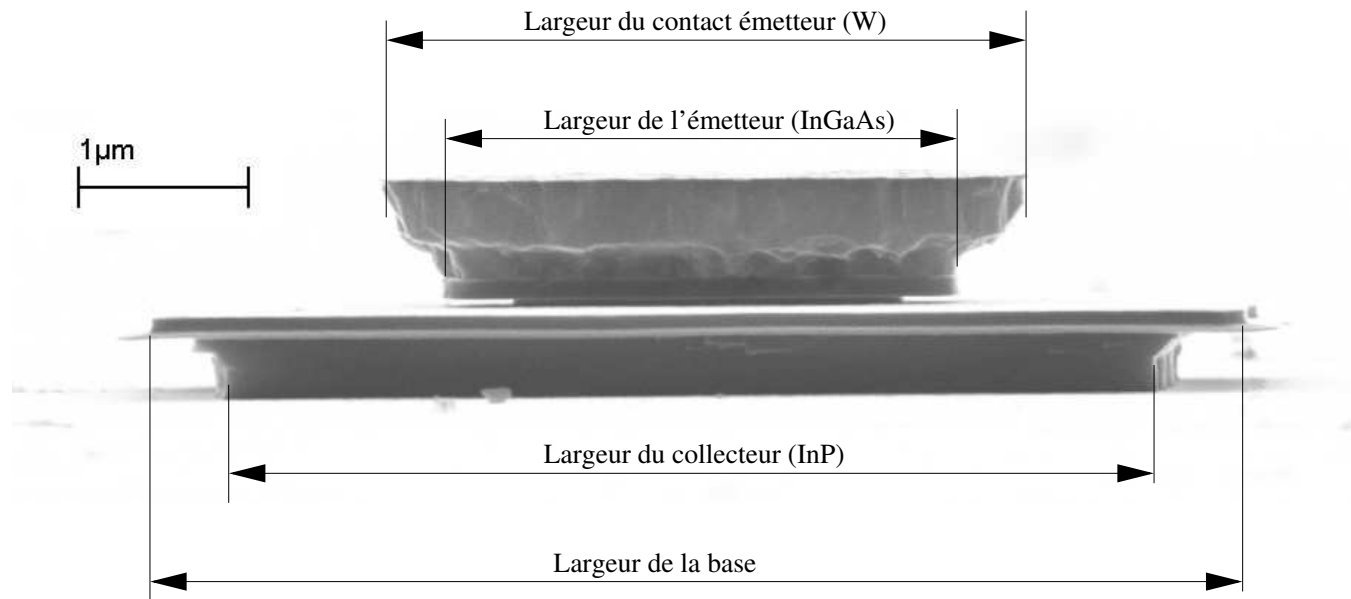
- ☞ Structure base contrainte H7466 ( $x_{Sb}=0.38$  au lieu 0.49) :
  - La base est en contrainte en tension par rapport au collecteur
  - La sous-gravure du collecteur → affaissement de la casquette de base
  - Réalisation des TBH avec collecteur non sous-gravé H7466.3
- ☞ Structure  $Q_{Al} / GaAsSb_{0.38} / Q_{Al}$ <sup>1</sup> :
  - Collecteur en InGaAlAs en accord de maille avec InP.
  - Emetteur en InGaAlAs en accord de maille avec InP.
  - Pas d'affaissement de casquette de base lors de sous-gravure InP

<sup>1</sup>M. Lijadi et al. Brevet (France) No 05/07605 date 18/07/05.

# Contenu

- I. Introduction
- II. Les résultats des TBH de 1ère génération
- III. Vers les TBH ultra-rapides : Développement technologique des TBH petites dimensions
- IV. Caractérisations électriques des TBH petites dimensions
  - ☞ Géométries des TBH petites dimensions
  - ☞ Caractéristiques statiques des TBH
  - ☞ Caractéristiques dynamiques des TBH
- V. Conclusions et perspectives

# Dimensions des zones actives EB et BC



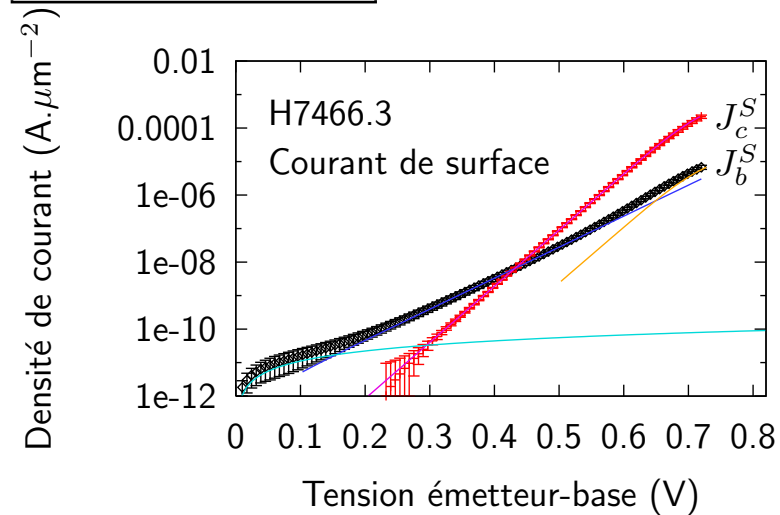
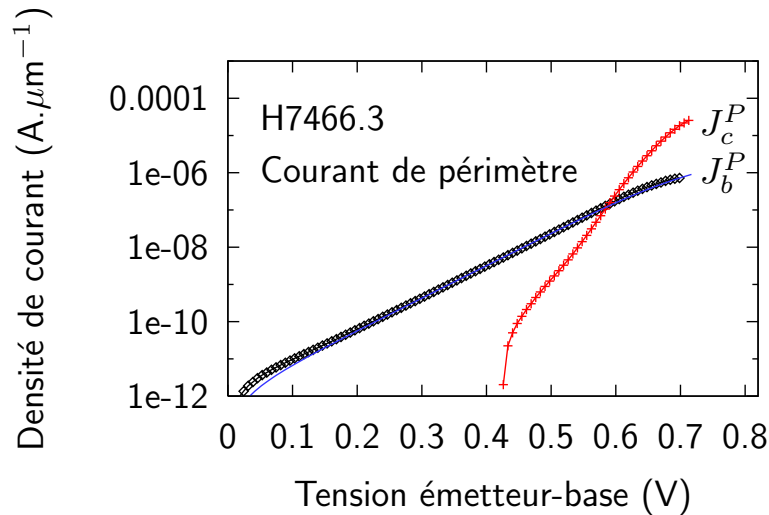
- ☞ Mesure MEB des dimensions de tous les dispositifs au centre de l'échantillon
- ☞ Détermination des dimensions des jonctions EB de tous les dispositifs en utilisant la mesure électrique ( $I_c$ )
- ☞ Incertitude 2%

➡ **Maîtrise des dimensions des transistors**

➡ **Détermination des parties intrinsèques et extrinsèques des courants**

# Caractéristiques statiques des TBH petites-dimensions H7466.3

Pour chaque  $V_{BE}$  :  $I = J^P P + J^S S$



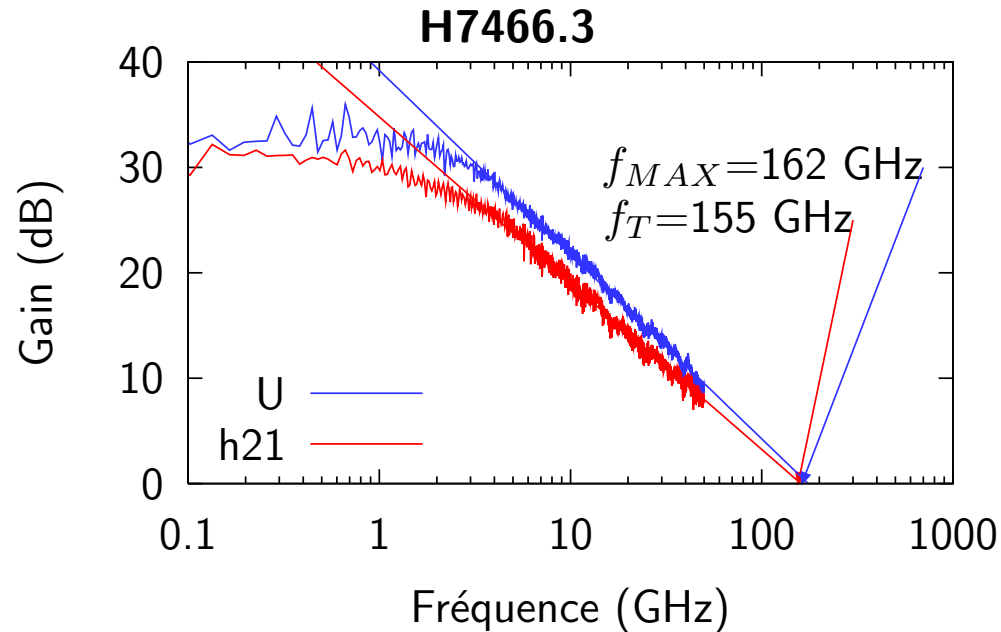
## Surface :

- ☞  $J_c^S$  très proche du cas idéal ( $n = 1.008$ ).
- ☞  $J_b^S$  dominé par rec. sur les centres profonds à l'interface EB ( $V_{be} < 0.65$  V)
- ☞  $J_b^S$  dominé par rec. dans le volume de la base ( $L_n = 215$  nm) ( $V_{be} > 0.65$  V)

## Périphérie :

- ☞  $J_c^P$  négligeable.
- ☞  $J_b^P$  relativement importante à faible polarisation ( $V_{be} < 0.45$  V)
- ☞  $J_b^P$  dominé par rec. sur les centres profonds au voisinage de l'interface EB
  - Technologie (traitements de surface) ?
  - La relaxation locale de la contrainte GaAsSb<sub>0.38</sub> ?

# Caractéristiques dynamiques des TBH petites-dimensions



☞  $(f_T ; f_{MAX})$  (155 ; 162) GHz @  $J_c = 2.3$  mA/ $\mu\text{m}^2$

Littérature :  $(f_T ; f_{MAX})$  (57 ; 66) GHz @  $J_c = 0.8$  mA/ $\mu\text{m}^2$  <sup>1</sup>

→ **état de l'art pour un TBH GaAsSb avec émetteur InGaAlAs**

☞  $\tau_{ec}$  dominé par  $(R_e + R_c)C_{bc}$  (33 %) → Sous-gravure BC

☞ Performance limitée par l'effet Kirk  $J_c < J_{ck}$

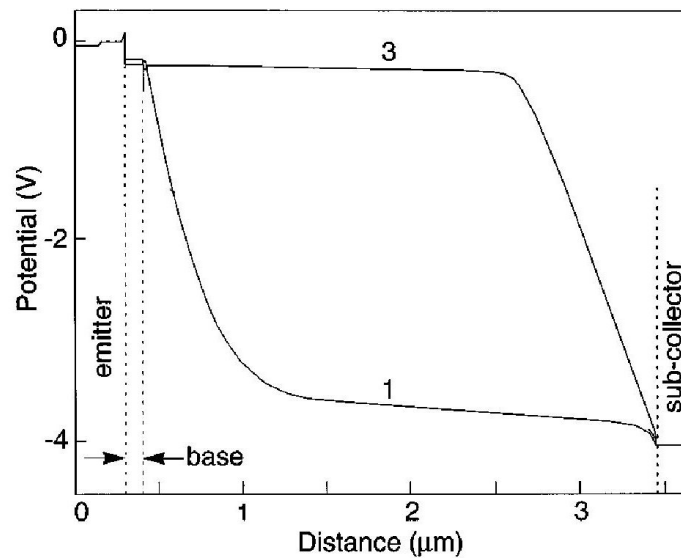
<sup>1</sup>X Zhu IEICE Trans. Electron. 2003 ;E86-C :2010.



# Effet Kirk dans le TBH

- Quand  $J = qnv \nearrow$ ,  $n \nearrow$
- Si  $n \geq N_D$  rétroaction sur le potentiel
- $J_{Kirk}$  défini telle que  $E = 0$  en sortie de la base <sup>1</sup>

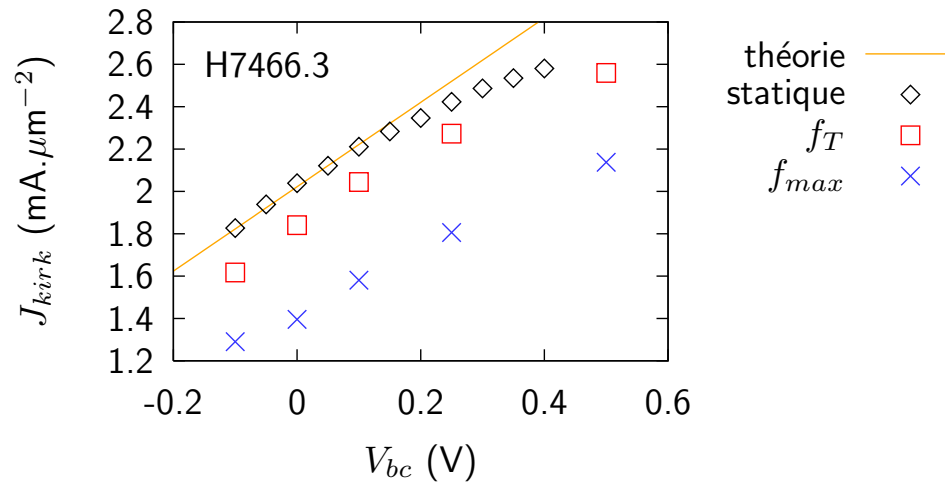
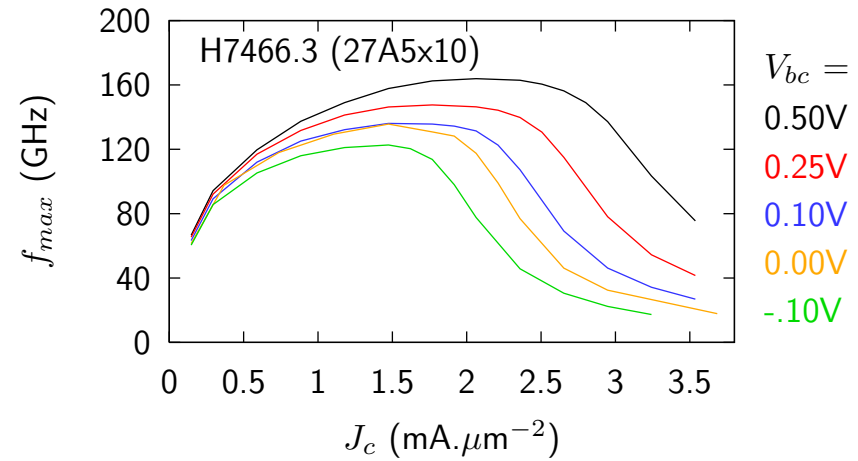
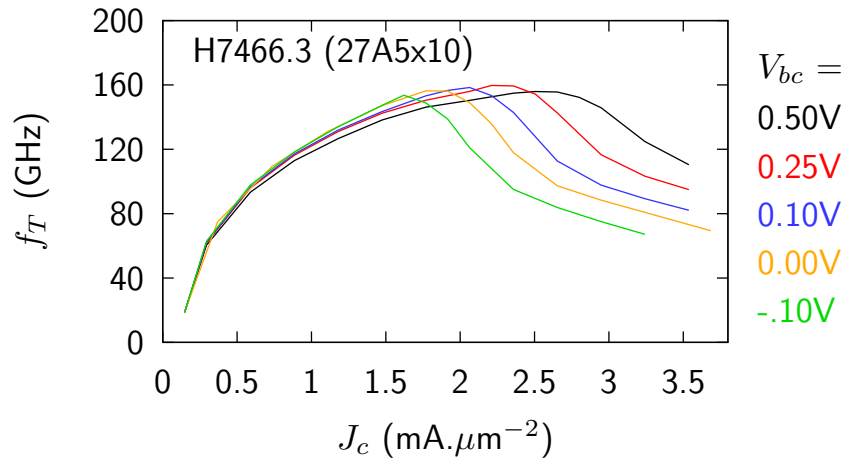
$$J_{Kirk} = qv_s \left( N_D + \frac{2V_{CB}\epsilon_r\epsilon_0}{qW^2} \right)$$



- Dans le cas d'une homojonction :
- $J > J_{Kirk}$  :  $E(W_C = 0)$  est inversé
  - Injection des trous de B → C
  - $W_b$  effective  $\nearrow$

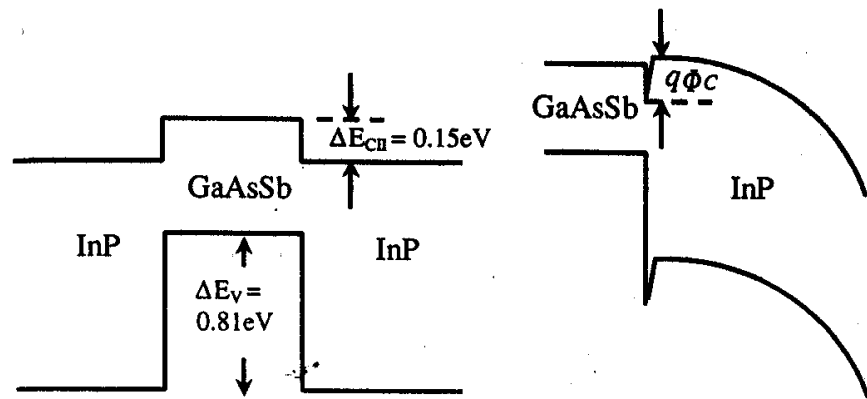
<sup>1</sup>Kirk, IRE Trans. Electron Devices 1962;9 :164.

# Observations expérimentales de l'effet Kirk dans l'hétérojonction de type II

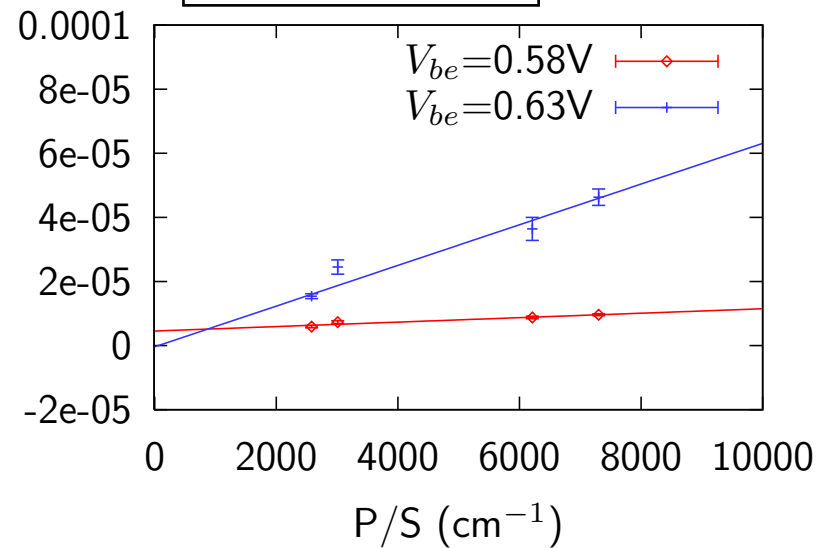


- ☞  $f_T; f_{MAX}$  limité par Effet Kirk
- ☞  $J_{c,k} @ MAX_{f_{MAX}} < J_{c,k} @ MAX_{f_T} < J_{c,k} @ MAX_{\beta}$
- ☞  $v_s = 3 \times 10^7 \text{ cm/s}$  ( $v_{Kirk}$ ?).

# Mécanisme de l'effet Kirk dans l'hétérojonction de type II



$I/S$  ( $A\ cm^{-2}$ )



Mécanisme de l'effet Kirk dans l'HJ GaAsSb/InP :

- ☞ Accumulation  $e^-$  dans le collecteur
- ☞ Pas d'injection de trous de base vers le collecteur ( $\Delta E_v \gg kT$ ) : formation d'une barrière de potentiel<sup>1</sup>
  - Diminution  $v_s$  :  $v_{bal} \sim 1 \times 10^8 \rightarrow 3 \times 10^7$  cm/s.
  - Augmentation  $C_{bc}$  :  $J_{c,k} @ MAX_{f_{MAX}} < J_{c,k} @ MAX_{f_T} < J_{c,k} @ MAX_{\beta}$
  - Saturation du courant collecteur et une augmentation du courant base.
- ☞ Injection latérale des électrons (transport 2D) quand  $J_c > J_{c,k}$  (H6548).

<sup>1</sup>M Yee Semicond. Sci. Technol. 2005 ;20 :412.

## V. Conclusions

- ☞ Propriétés physiques des TBH InP/GaAsSb :
  - Mesure de paramètres physiques clés de GaAsSb.
  - Mise en évidence de l'effet positif de la diminution de  $x_{Sb}$  dans la base.
  - Mécanisme de l'effet Kirk.
  
- ☞ Développement d'une méthode de mesure de  $\Delta E_c$  pour HJ type II :
  - Mesure de la tension de bande plate par électroluminescence.
  
- ☞ Développement des briques technologiques pour les TBH avec base en GaAsSb :
  - Gravure sélective InGaAlAs/GaAsSb : potentiel industriel.
  - Contact ohmique sur GaAsSb (méthode FCTLM nanométrique).
  
- ☞ Développement du procédé de fabrication des TBH *E-up* entièrement auto-alignées.
  - Inversion du flanc de tungstène
  - Structure sandwich  $Q_{Al} / GaAsSb / Q_{Al}$
  
- ☞ Réalisation des TBH InGaAlAs/GaAsSb à l'état de l'art ( $f_T ; f_{MAX}$ ) (155 ; 162) GHz.
  - TBH InP/GaAsSb plus avancés : ( $f_T ; f_{MAX}$ ) (160 ; 200) GHz (Opto+), (331 ; 279) GHz (UIUC), (305 ; 300) GHz (SFU).

## V. Perspective

- ☞ Sous-gravure du collecteur :
  - profondeur =  $0.6 \rightarrow 1.7 \mu\text{m}$
  - $(f_T ; f_{MAX})$  (147 ; 145) GHz  $\rightarrow$  (170 ; 285) GHz.
- ☞ Améliorations proposées :
  - Repousser l'effet Kirk  $J_{c,k} : 2 \rightarrow 7 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ 
    - $N_D^C : 5 \times 10^{16} \rightarrow 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
    - $W_C : 160 \rightarrow 100 \text{ nm}$
  - Emetteur InGaAlAs ( $x_{Al} > 0.34$ ) et InAlAs : HJ EB type II  $\rightarrow$  type I
  - Pour  $W_b = 40 \text{ nm}$ ,  $t_b = 0.35 \rightarrow 0.15 \text{ ps}$  ;  $(f_T ; f_{MAX}) = (380 ; 420)$ .
- ☞ Poursuivre l'étude du transport électronique dans l'hétérojonction de type II.
- ☞ Mesure expérimentale de paramètres physiques de GaAsSb

# Remerciements

Jean-Luc Pe- louard, Fa-  
brice Pardo, Chris- tophe Dupuis, Na-  
thalie Bardou, Philippe Bove (Picogiga Inter-  
national), Hacène Lahreche (Picogiga Inter-  
national), Christophe David, Jean-Christophe  
Harmand, Elchuri Rao, Laurent Couraud,  
Laetitia Leroy, Gilbert Chanconie, Laurent  
Merzeau, Eric Minoux (Thales R &  
T), Olivier Boule (LPN-Thales),  
et tous les membres du  
LPN avec qui j'ai  
travaillé ...

