



# Composants pour la génération et la détection d'impulsions térahertz

## Olivier OFFRANC

Thèse financée par la DGA

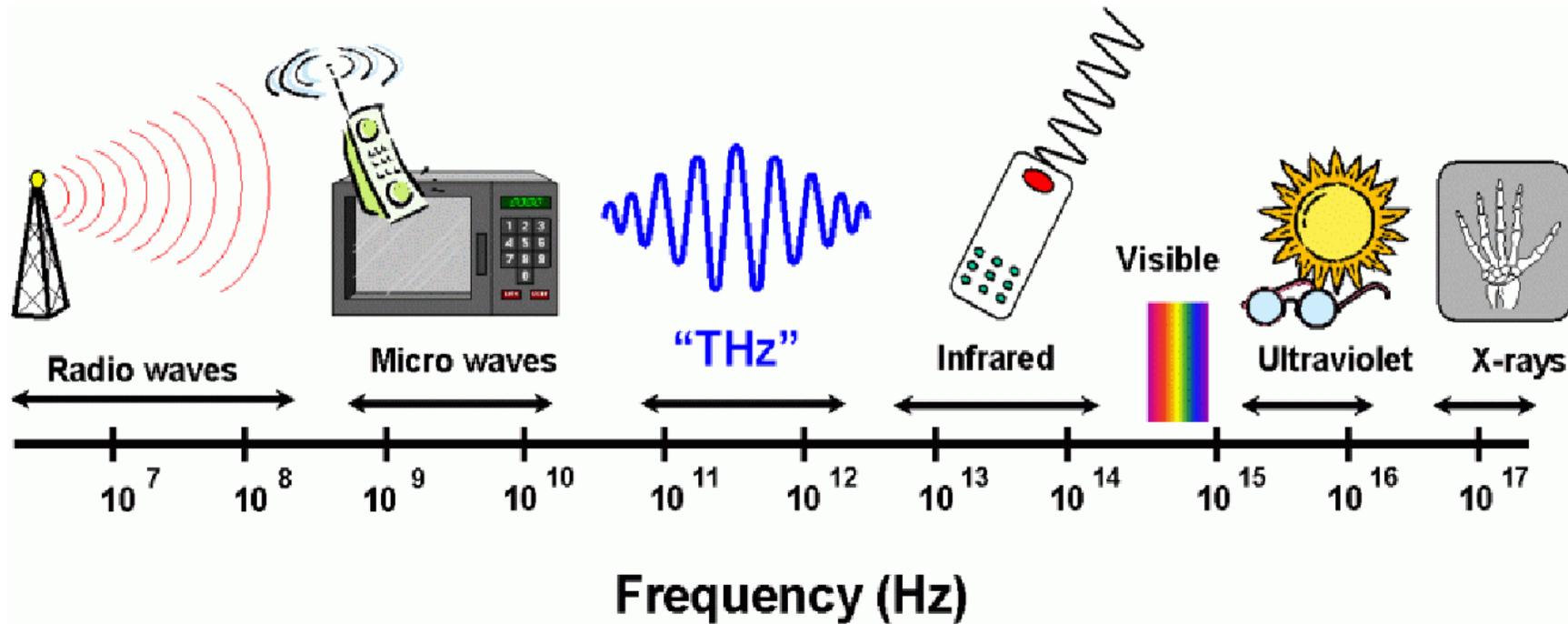
Directeur de thèse : J.-F. LAMPIN



- Contexte général
- Étude d'un monostable pour la détection d'impulsions térahertz
- Croissance et caractérisation du GaAsSb-BT
- Résultats sur les antennes photoconductrices en GaAsSb-BT
- Réalisation et caractérisation de photomélangeurs à base d'UTC-PD en GaAsSb

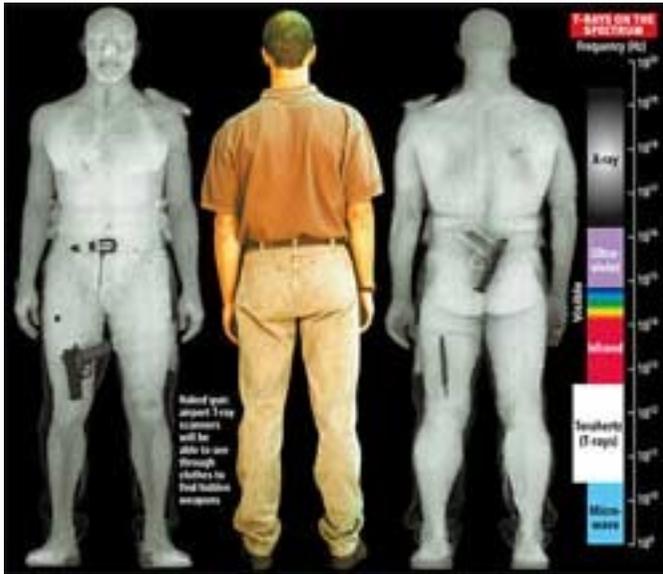
# Contexte général

# Le domaine térahertz



Le domaine térahertz :  $100 \text{ GHz} < f < 10 \text{ THz}$

# Applications des térahertz



Sécurité



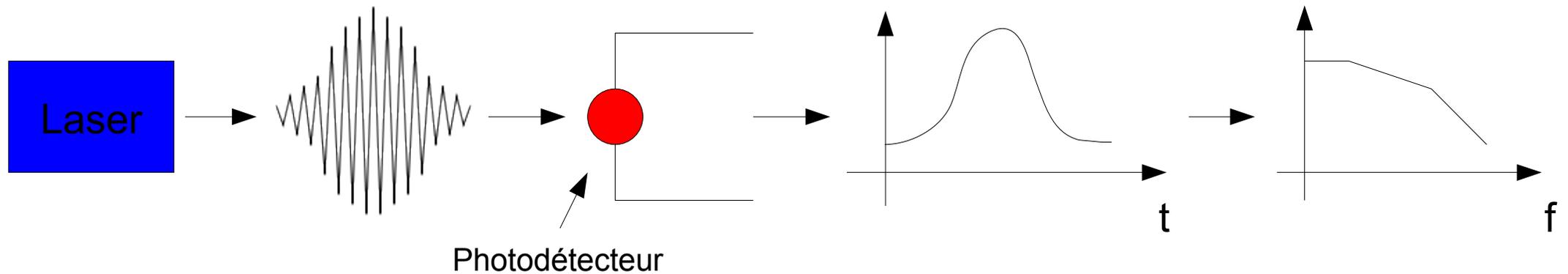
Télécommunications



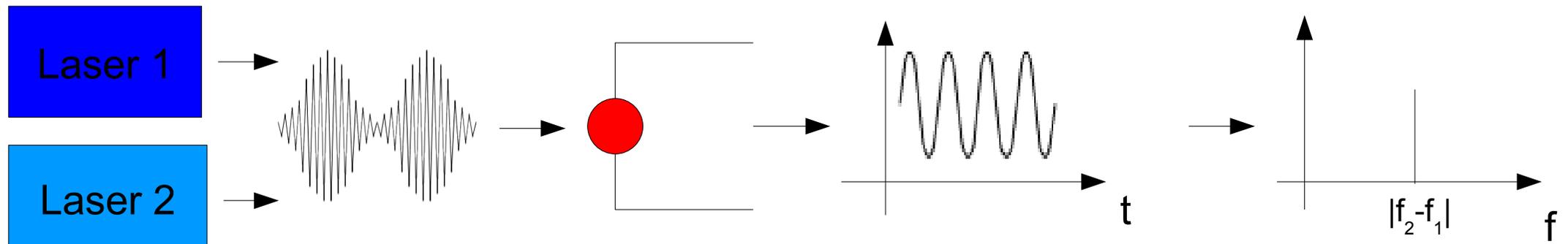
Imagerie THz

## Génération de térahertz par voie optoélectronique

### Impulsion térahertz



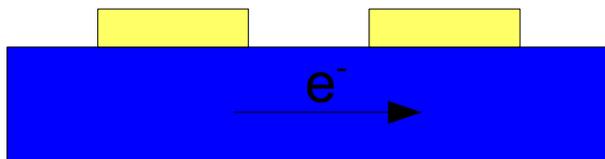
### Onde continue térahertz



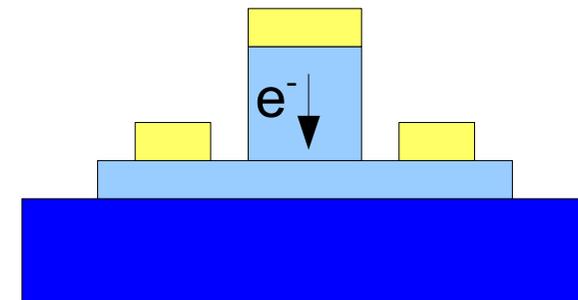
# Les photodétecteurs ultra-rapides

## Photodétecteurs ultra-rapides

### Photocommutateurs



### Photodiodes



- Technologie de fabrication relativement simple
- Matériaux à temps de vie des porteurs court : GaAs-BT, **GaAsSb-BT**
- Limitations en fréquences :
  - temps de vie des porteurs
  - constante de temps RC

- Technologie de fabrication plus complexe
- Photodiodes : PIN, **UTC-PD**
- Limitations en fréquences :
  - temps de transit des électrons dans le collecteur
  - constante de temps RC

Pourquoi chercher à développer des dispositifs sensibles à  $\lambda > 1\mu\text{m}$  ?

Sources optiques commerciales :

- diodes lasers accordables
- systèmes fibrés
- amplificateurs (Ytterbium à  $1,06\mu\text{m}$  et erbium à  $1,55\mu\text{m}$ )



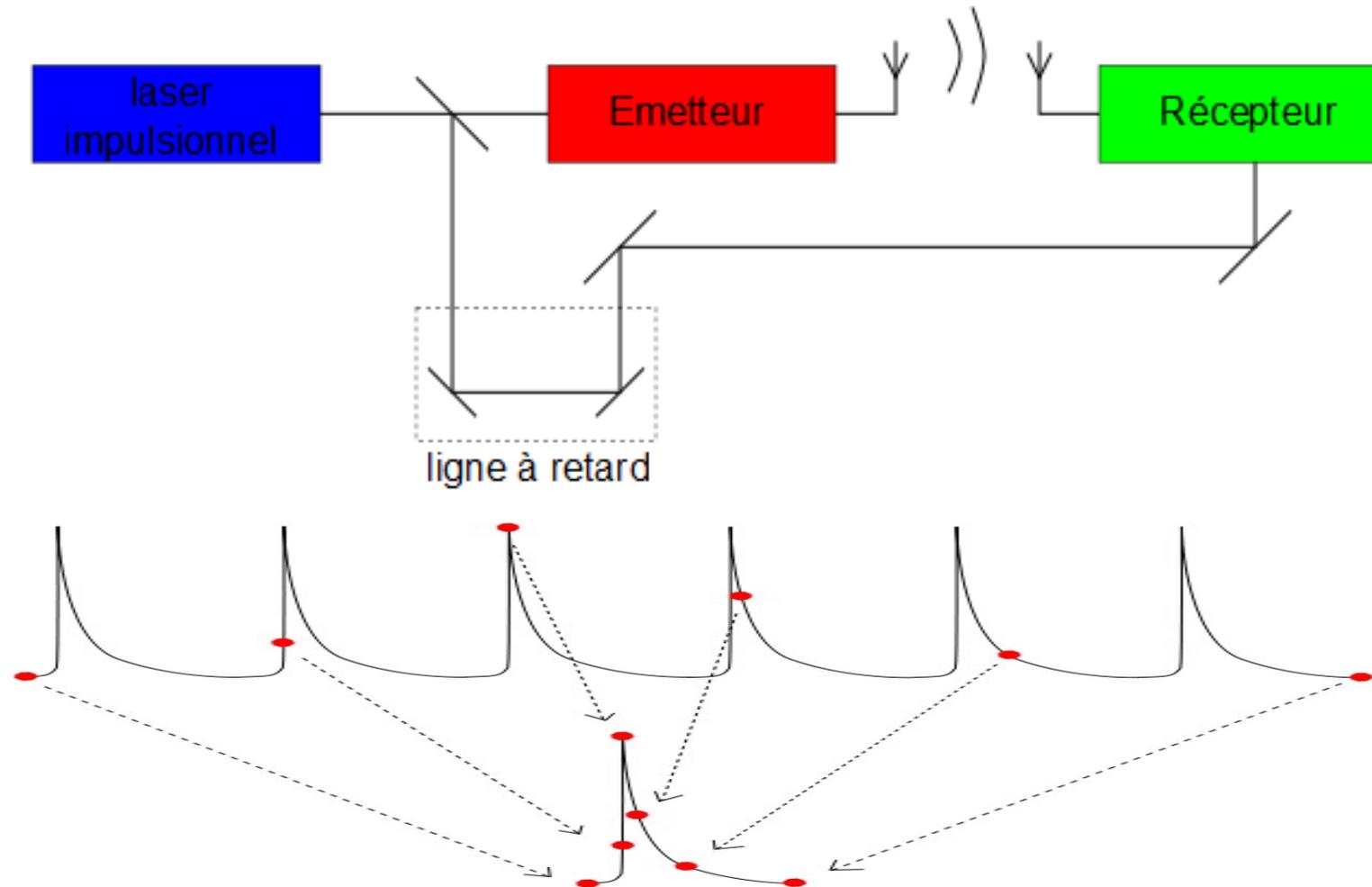
Laser impulsionnel 1560nm

=> développer des photodétecteurs sensibles à  $\lambda > 1\mu\text{m}$

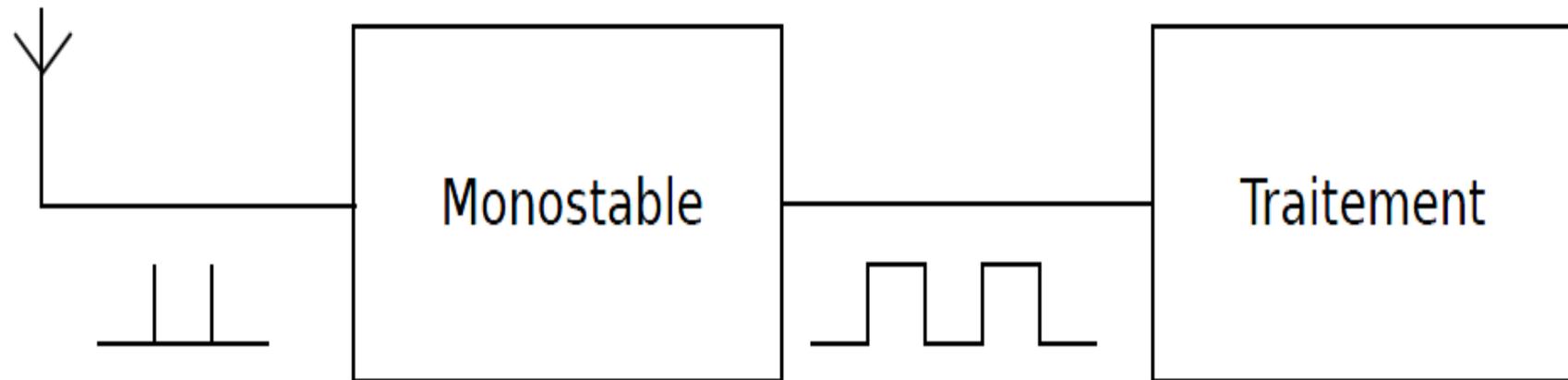
# Étude d'un monostable pour la détection d'impulsions térahertz

# Détection d'impulsions térahertz

- Détection cohérente d'impulsions térahertz

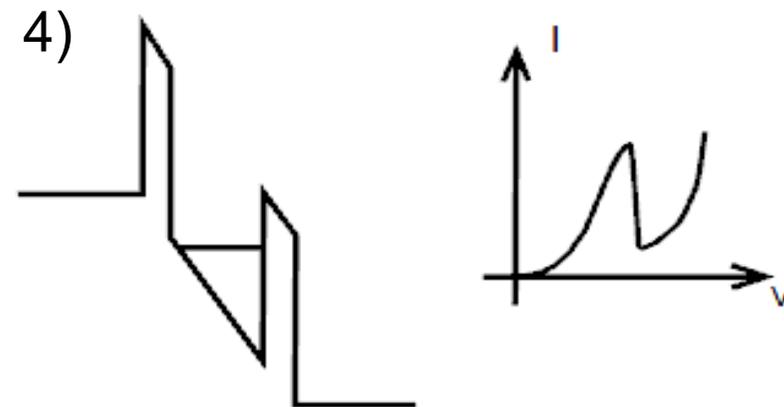
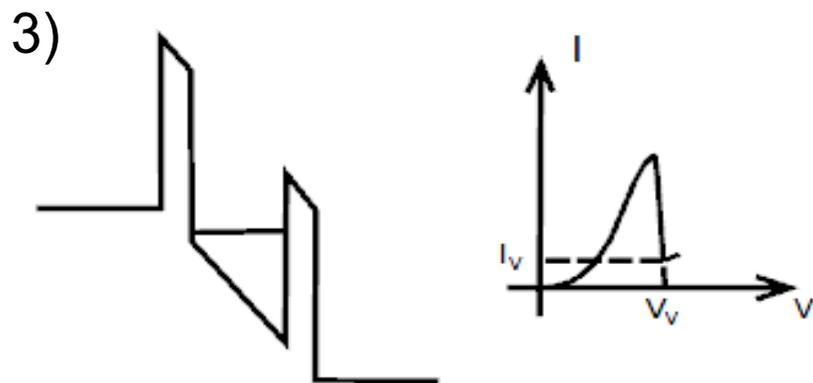
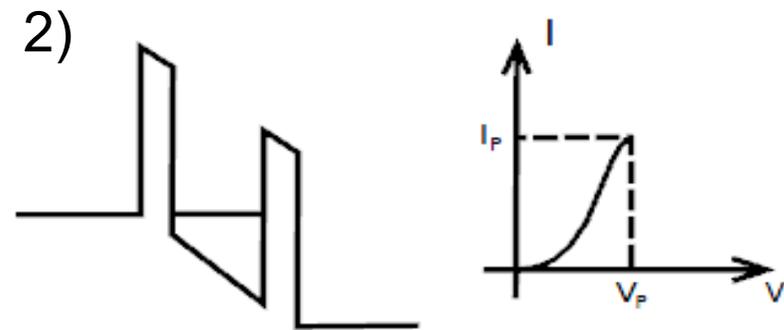
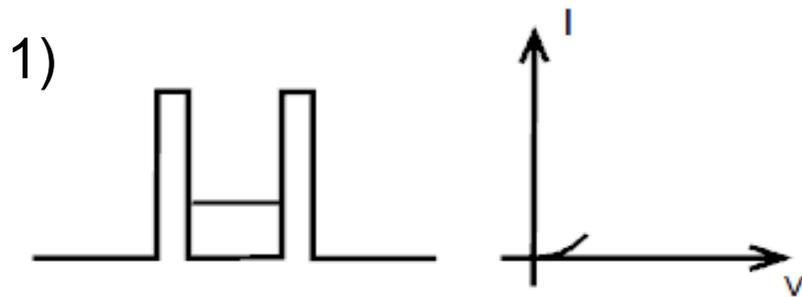


- Problématique : Impulsions térahertz trop rapides pour de l'électronique « classique »  
=> allonger la durée des impulsions



# Principe de fonctionnement de la DTR

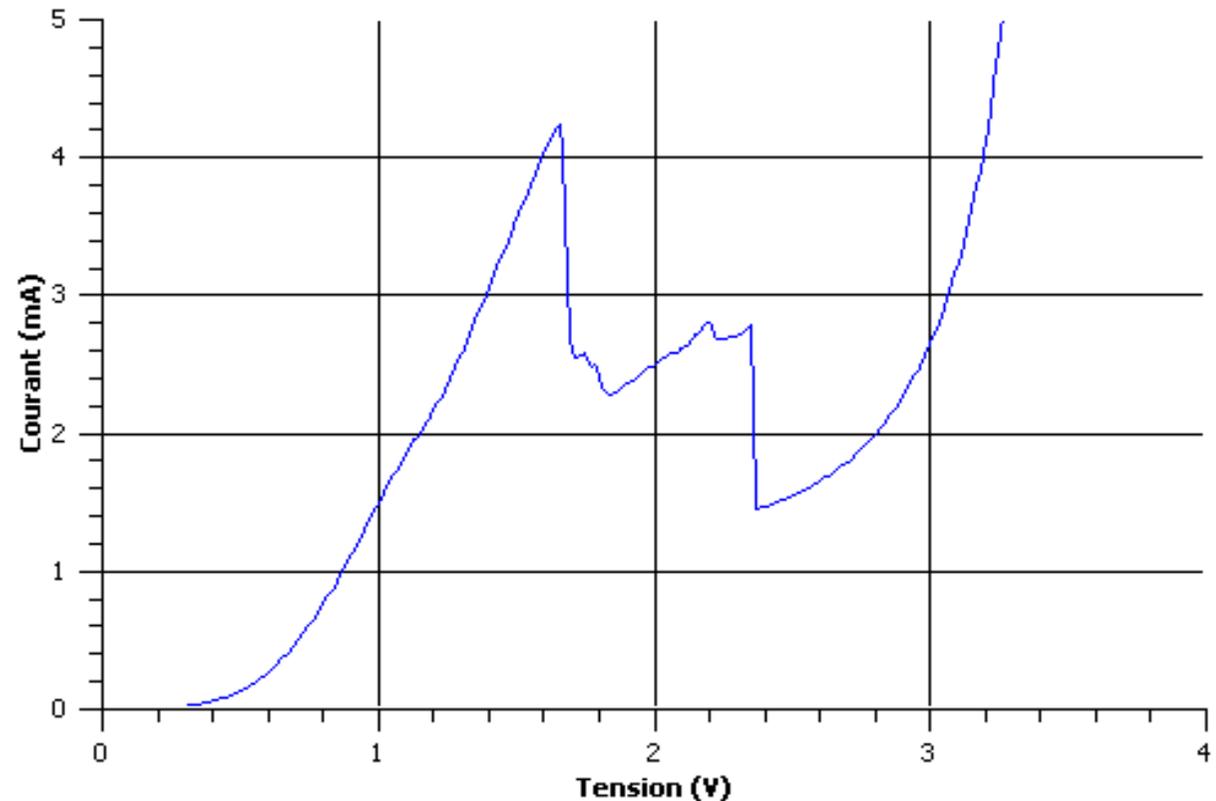
- Monostable à base de DTR : mettre à profit la forte non-linéarité de la caractéristique  $I(V)$



# La diode à effet tunnel résonnant

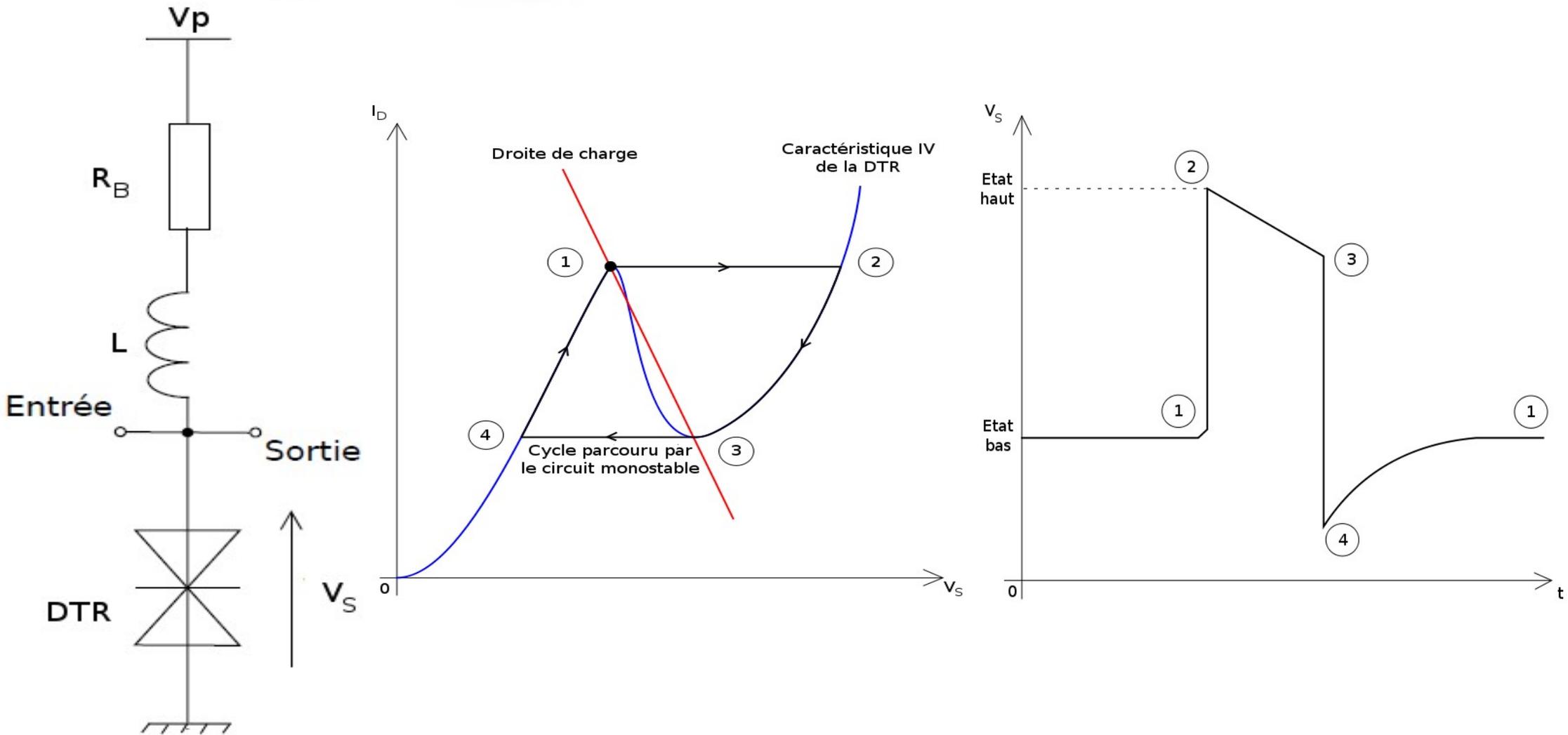
- DTR InGaAs/AlAs
  - $I_{\text{pic}} / I_{\text{vallée}} \sim 3$  ( $I_{\text{pic}} = 4,2\text{mA}$ )
  - $J_{\text{pic}} \sim 165\text{kA/cm}^2$
  - $V_{\text{pic}} = 1,7\text{V}$  et  $V_{\text{vallée}} = 2,4\text{V}$
- Oscillations présentes dans la zone de la RDN

Courbe IV diode à effet tunnel résonnant



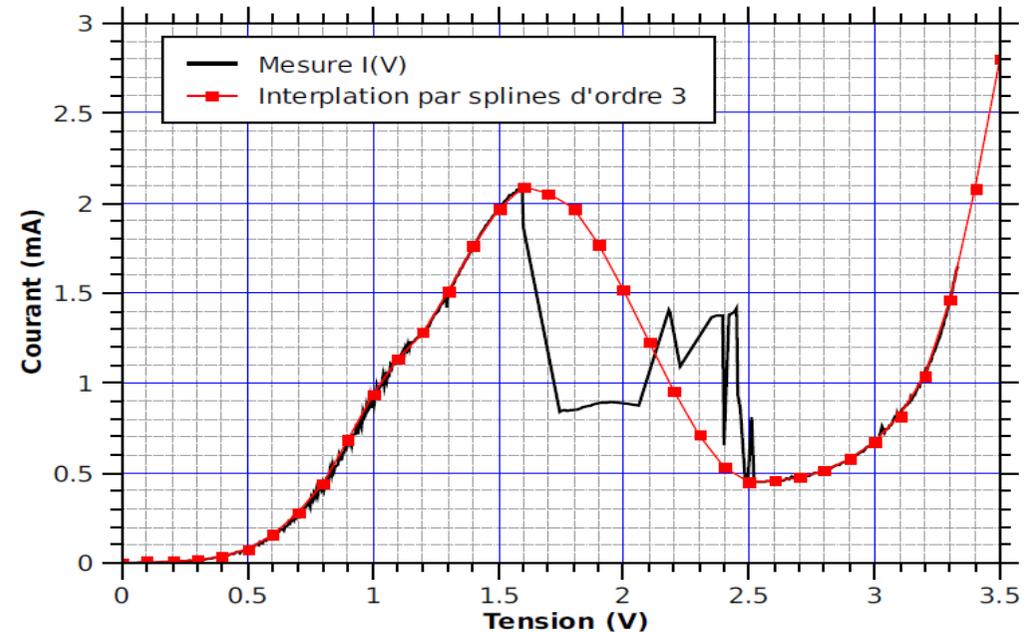
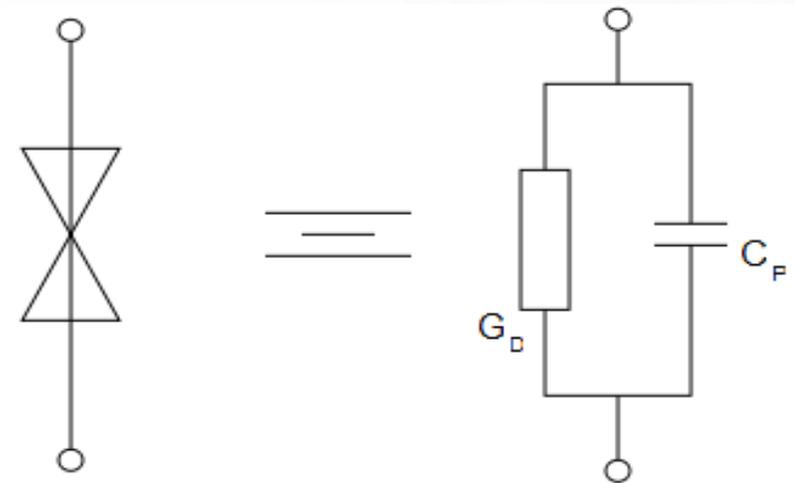
Caractéristique I(V) DTR  $\varnothing 2\mu\text{m}$   
( $\varnothing 1,8\mu\text{m}$  avec sous gravure)

# Principe de fonctionnement du monostable



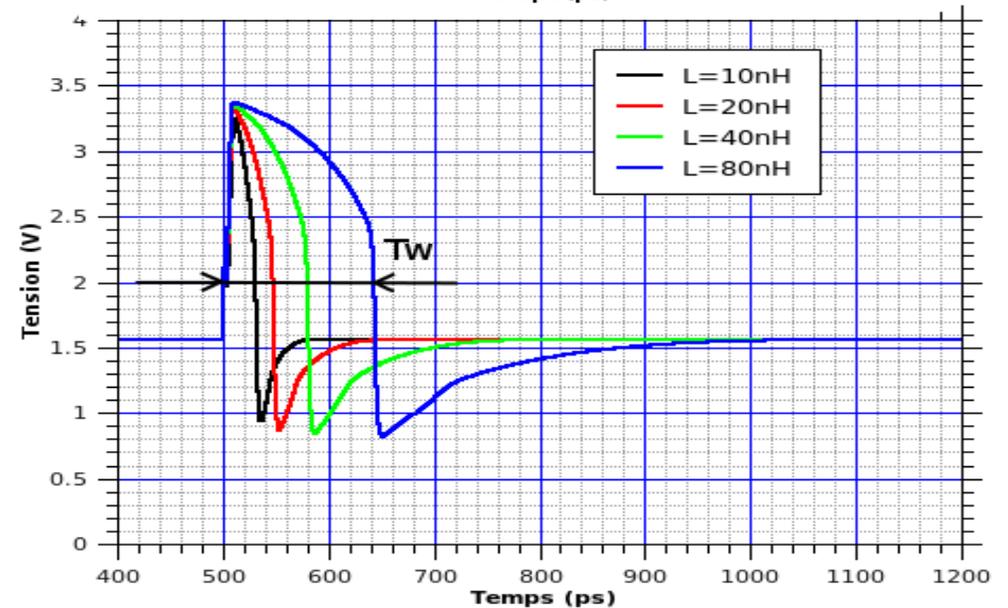
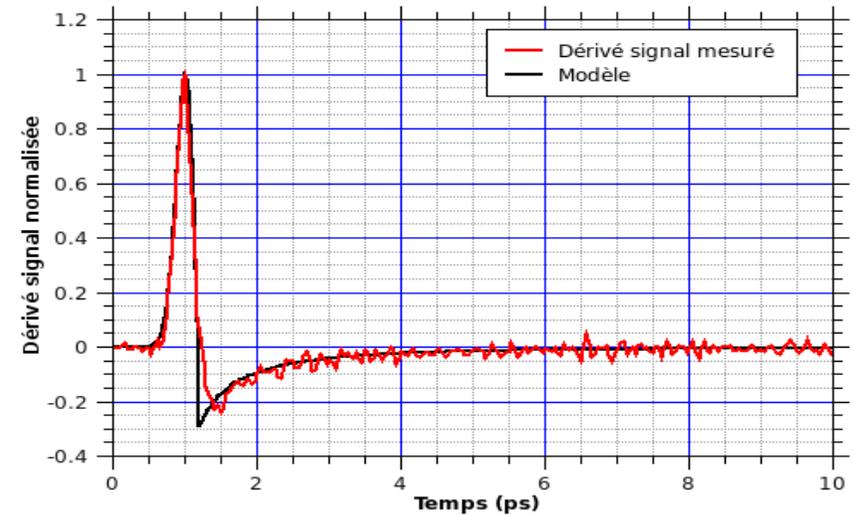
# Modélisation de la DTR

- Modèle au 1er ordre de la DTR  
=> conductance + capacité de jonction
- Interpolation polynomiale  $I(V)$  DTR par splines d'ordre 3  
=> souplesse de modélisation par rapport aux équations analytiques



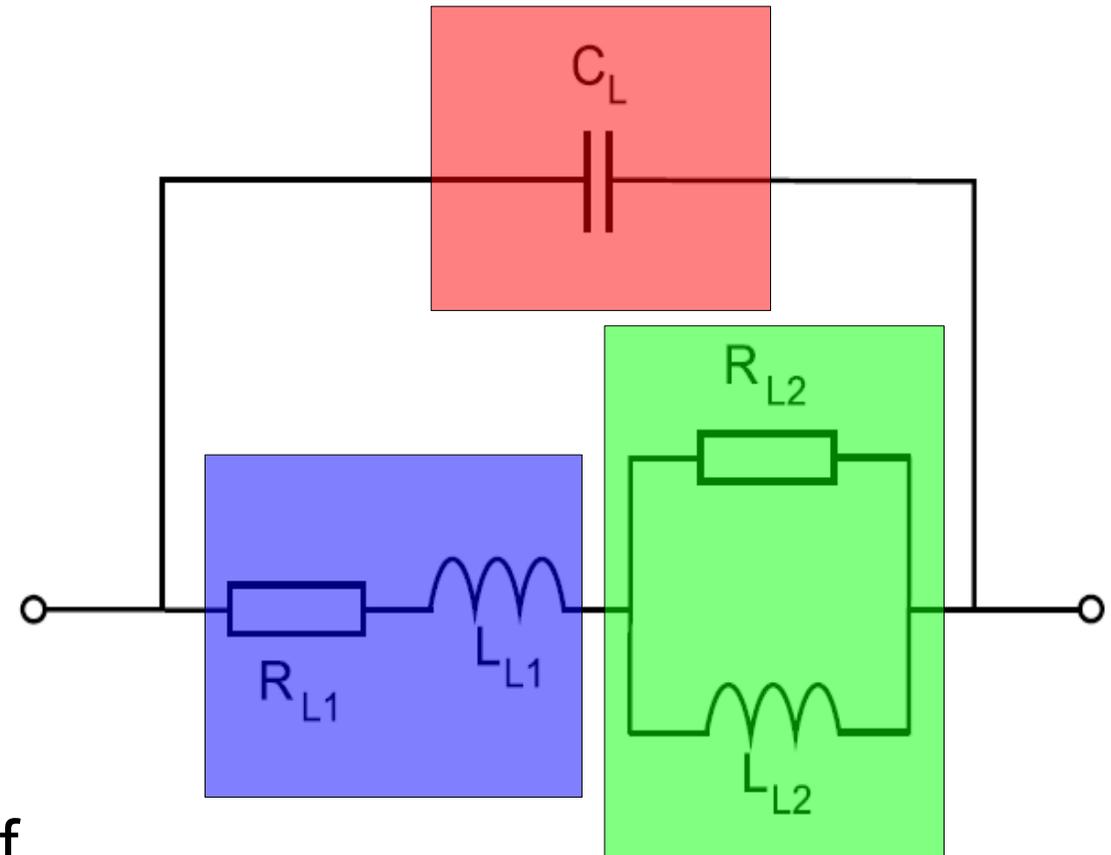
# Résultats des simulations du monostable

- Système à 2 constantes de temps  $\tau_1$  et  $\tau_2$ 
  - $\tau_1 \sim C_P / G_D$  (fixée par la DTR)
  - $\tau_2 \sim G_D L / (1 + G_D R_B / 2)$
- Temps à l'état haut fixé par  $\tau_2$   
=> augmenter L  $\rightarrow$  augmenter  $T_W$
- $T_W(L) = 30\text{ps}$  (10nH), **50ps** (20nH), 80ps (40nH) et 140ps (80nH)



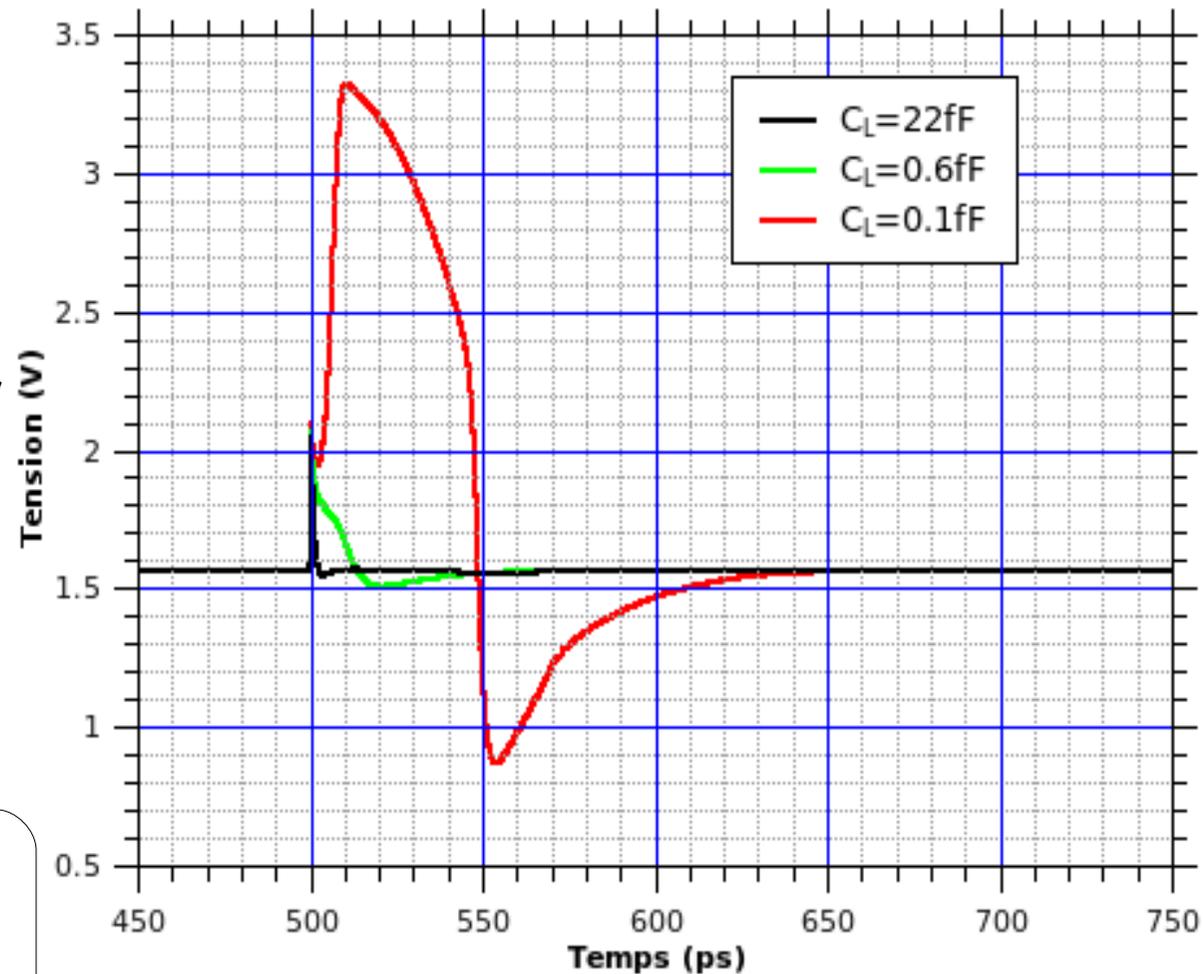
# Modélisation de l'inductance

- Inductance  $L_{L1}$  et  $R_{L1}$
- Capacité parasite  $C_L$
- Effet de peau ( $R_{L2}$  et  $L_{L2}$ )
- Fréquence de résonance de l'inductance :  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{L1}C_L}}$   
=> passage inductif → capacitif



- Comportement capacitif de l'inductance à l'arrivée de l'impulsion
- Inductance court-circuitée par la capacité parasite  
=> variation plus faible de la tension de sortie qui empêche le basculement

Principale limitation pour la détection d'impulsions rapides



# Bilan de l'étude du monostable

- Maximiser  $R_B$  pour augmenter la sensibilité du circuit  
=> compromis sur la caractéristique  $I(V)$
- L'inductance  $L$  permet d'ajuster la largeur des impulsions en sortie  
=> augmenter  $L$  diminue la fréquence de résonance de l'inductance

La largeur de l'impulsion en sortie du monostable fixe également la largeur minimale de l'impulsion d'entrée détectable par le circuit



# Croissance et caractérisation du GaAsSb-BT

# Le GaAsSb épitaxié à basse température

## Pourquoi étudier le GaAsSb-BT ?

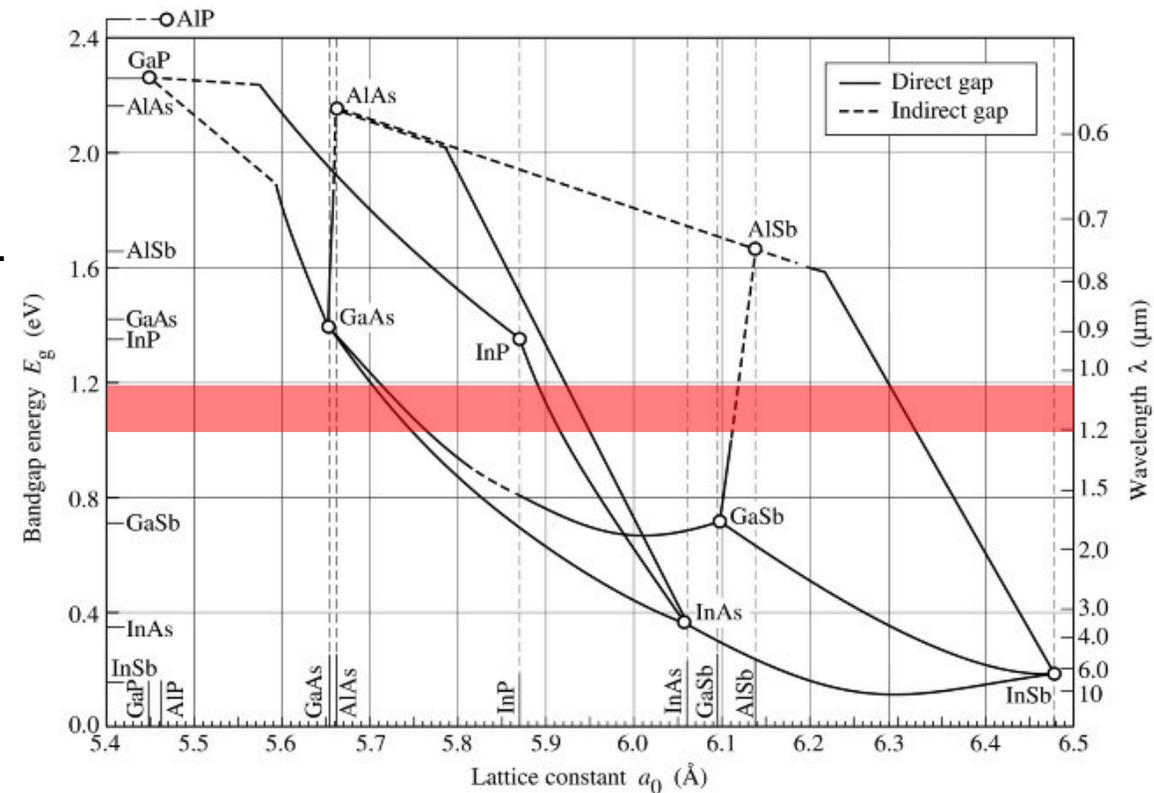
GaAs-BT sensible à 830nm

Comment le rendre sensible à  $\lambda > 1\mu\text{m}$  ?

- ajouter de l'indium  $\Rightarrow$  InGaAs-BT
- ajouter de l'antimoine  $\Rightarrow$  GaAsSb-BT

InGaAs-BT :

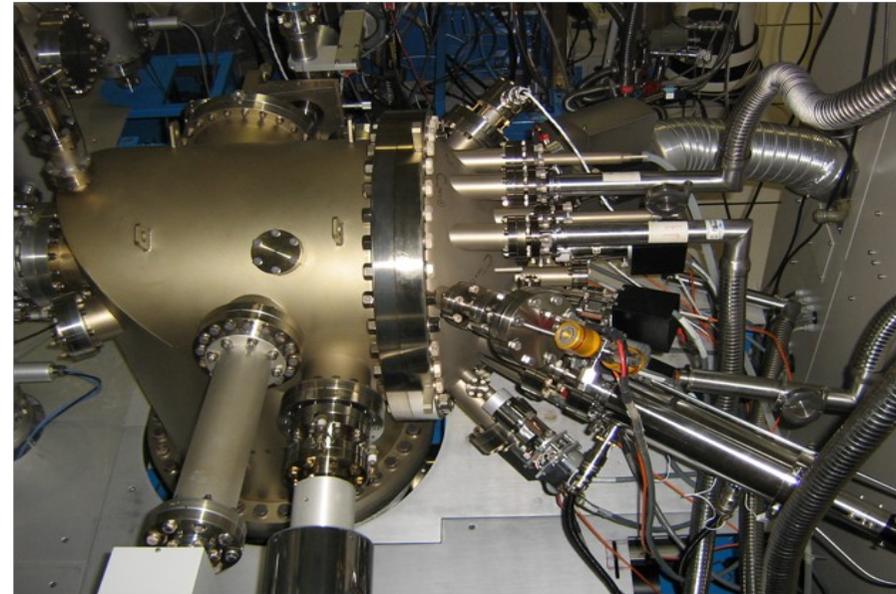
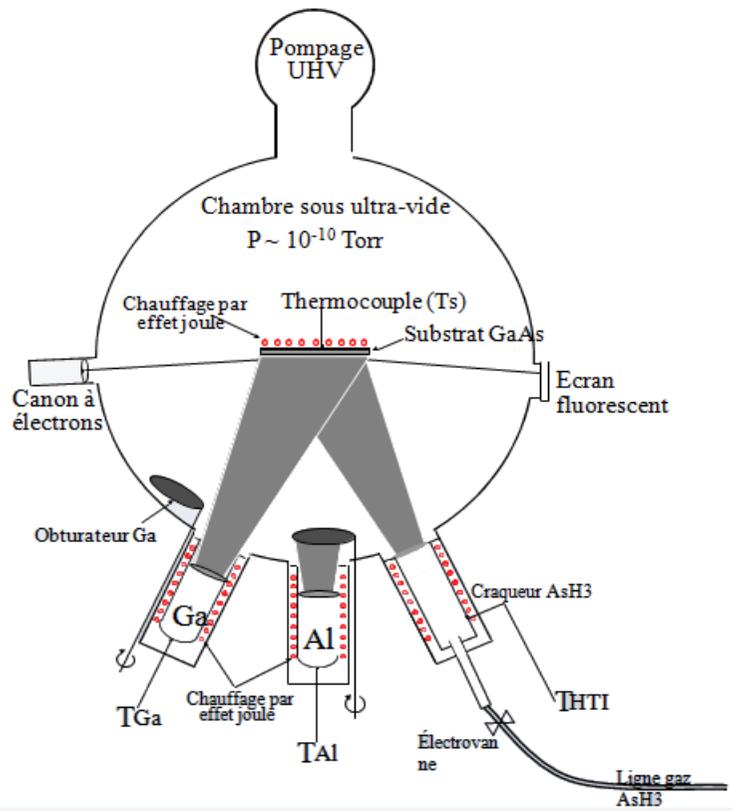
- temps de vie des porteurs court
- **résistivité très faible**



Le GaAsSb-BT avec  $15 < \% \text{Sb} < 20$  peut être une alternative à l'InGaAs-BT

# Matériaux épitaxiés à basse température

## Epitaxie par jets moléculaires de matériaux III-V



- Pour une croissance classique avec peu de défauts :

Règle des trois températures :  $T_v < T_s < T_{III}$

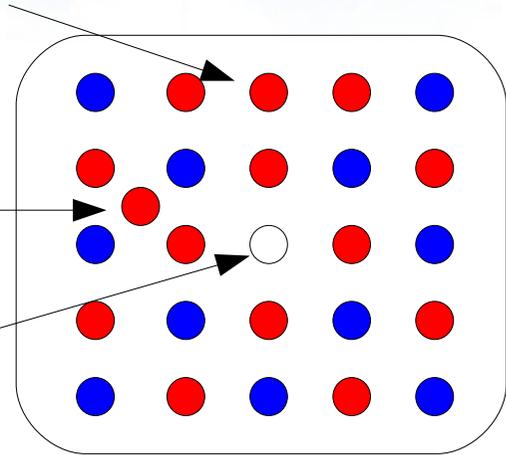
- Matériaux épitaxiés à basse température :

$T_s \sim T_v$  (230-330°C)

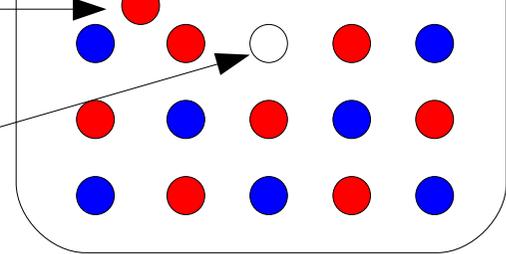
=> augmentation de la concentration de défauts ponctuels

# Le GaAs épitaxié à basse température

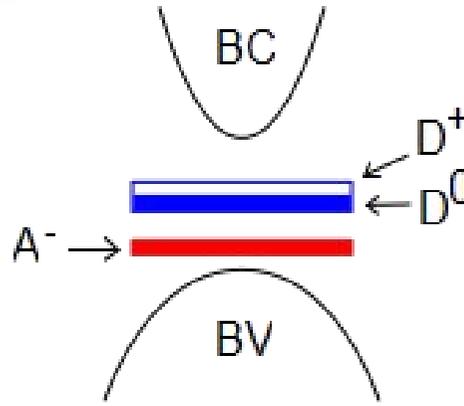
Arsenic en antisite



Arsenic en site interstitiel

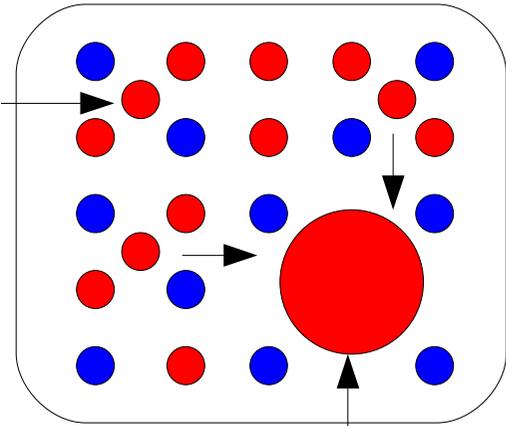


Lacune de gallium

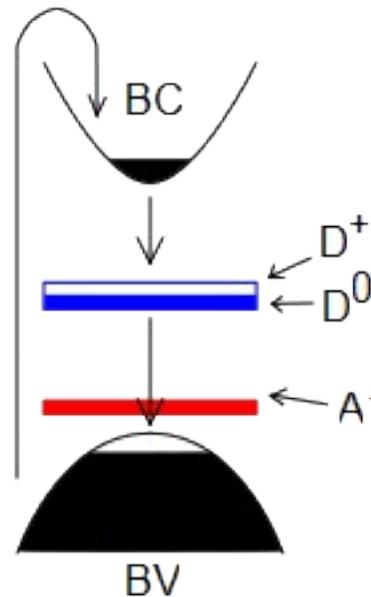


- Mécanisme de compensation
- Résistance d'obscurité :  $10^6$  à  $10^7 \Omega\text{cm}$

Arsenic en site interstitiel



Précipité



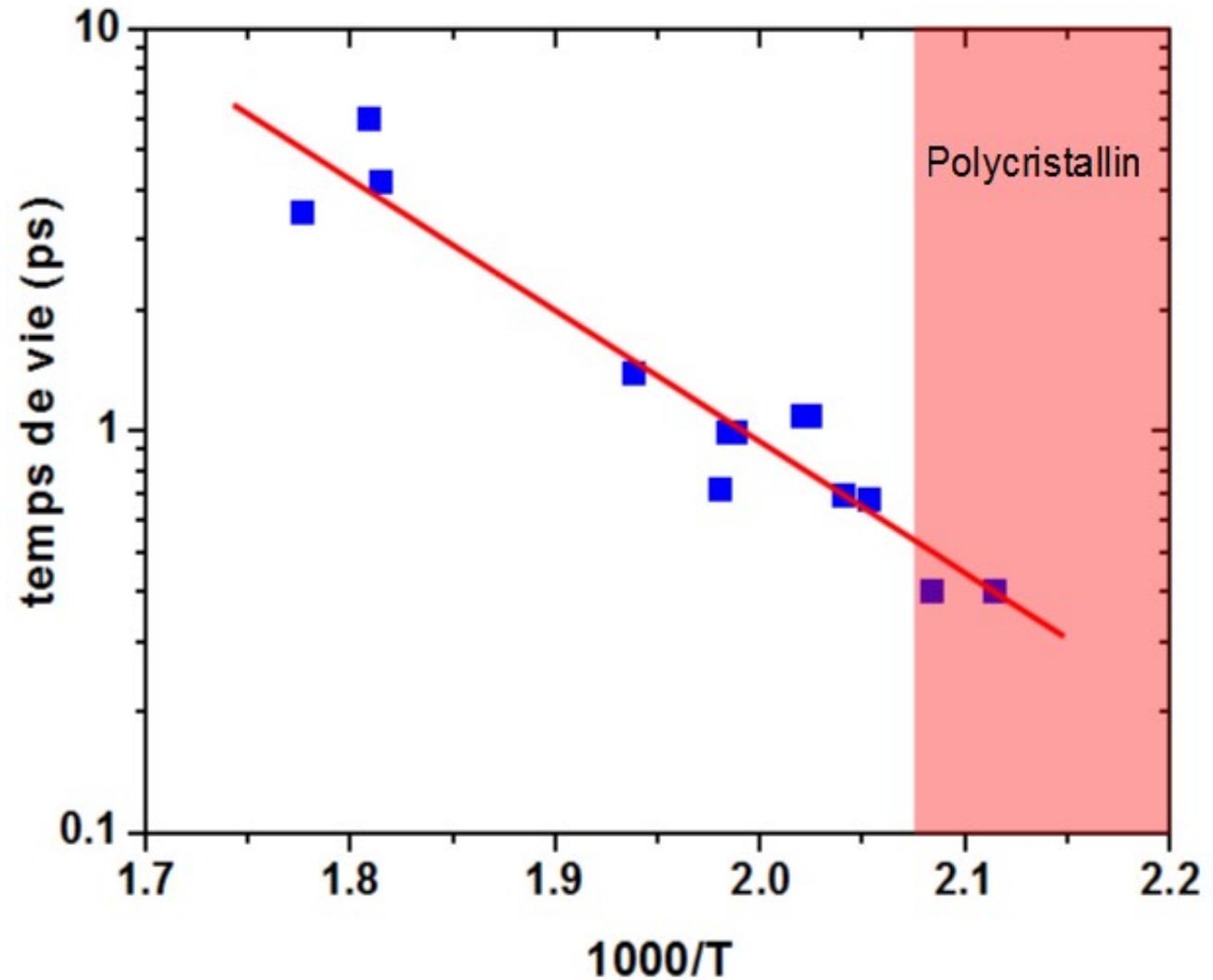
- Temps de vie des porteurs court :
- thermalisation
  - recombinaisons électrons
  - recombinaisons trous
- => 3 constantes de temps

\*Czarny, thèse USTL 2007

# Temps de vie dans le GaAs-BT

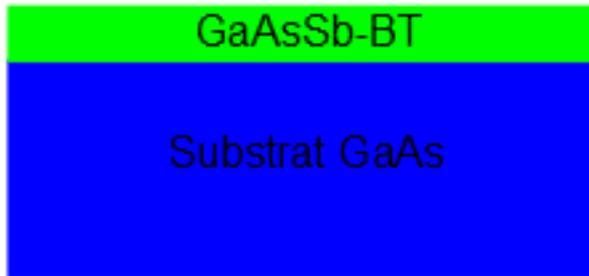
- Temps de vie augmente avec  $T_C$ 
  - $T_C$  trop faible matériau devient polycristallin
  - $T_C$  trop grand temps de vie incompatible avec la génération de THz

- $280^\circ\text{C} \leftrightarrow 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- $230^\circ\text{C} \leftrightarrow 2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

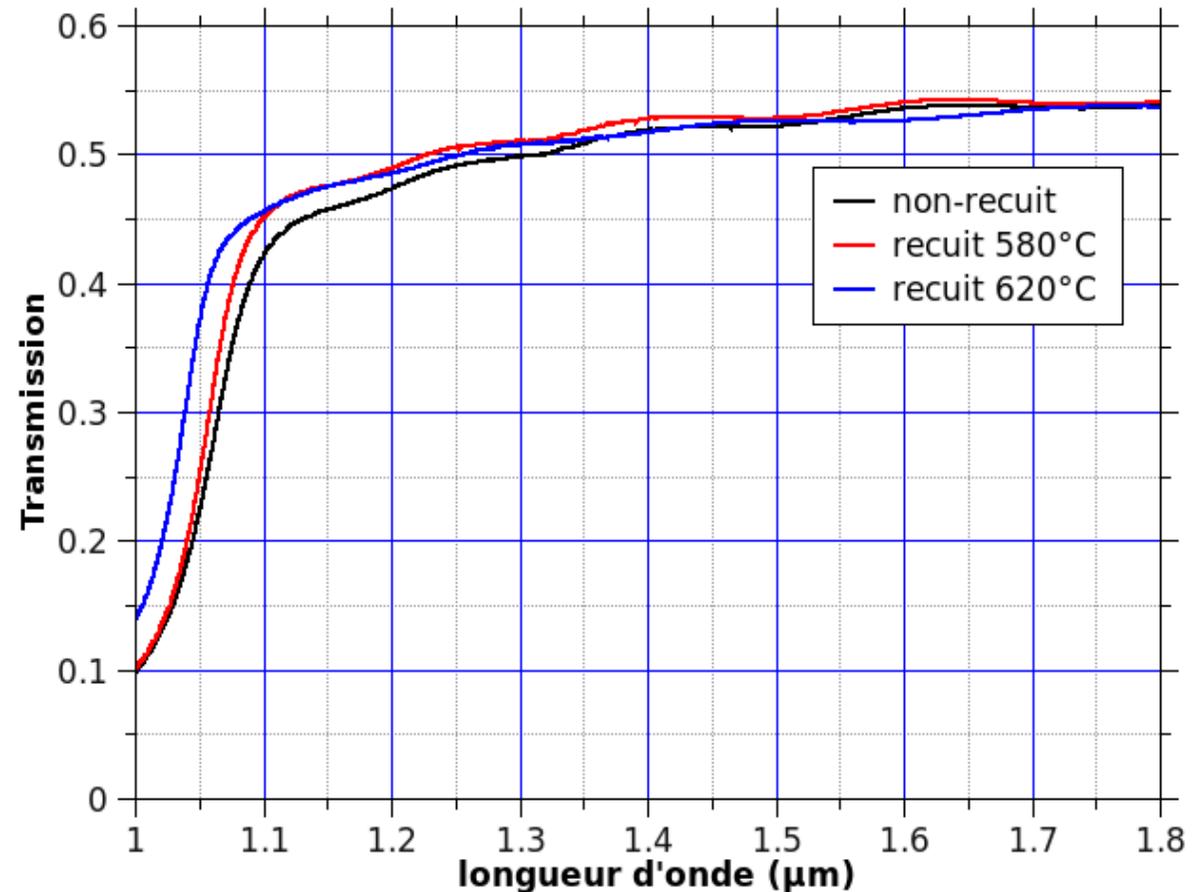


# Caractérisation du GaAsSb-BT

Cavité Fabry-Perot

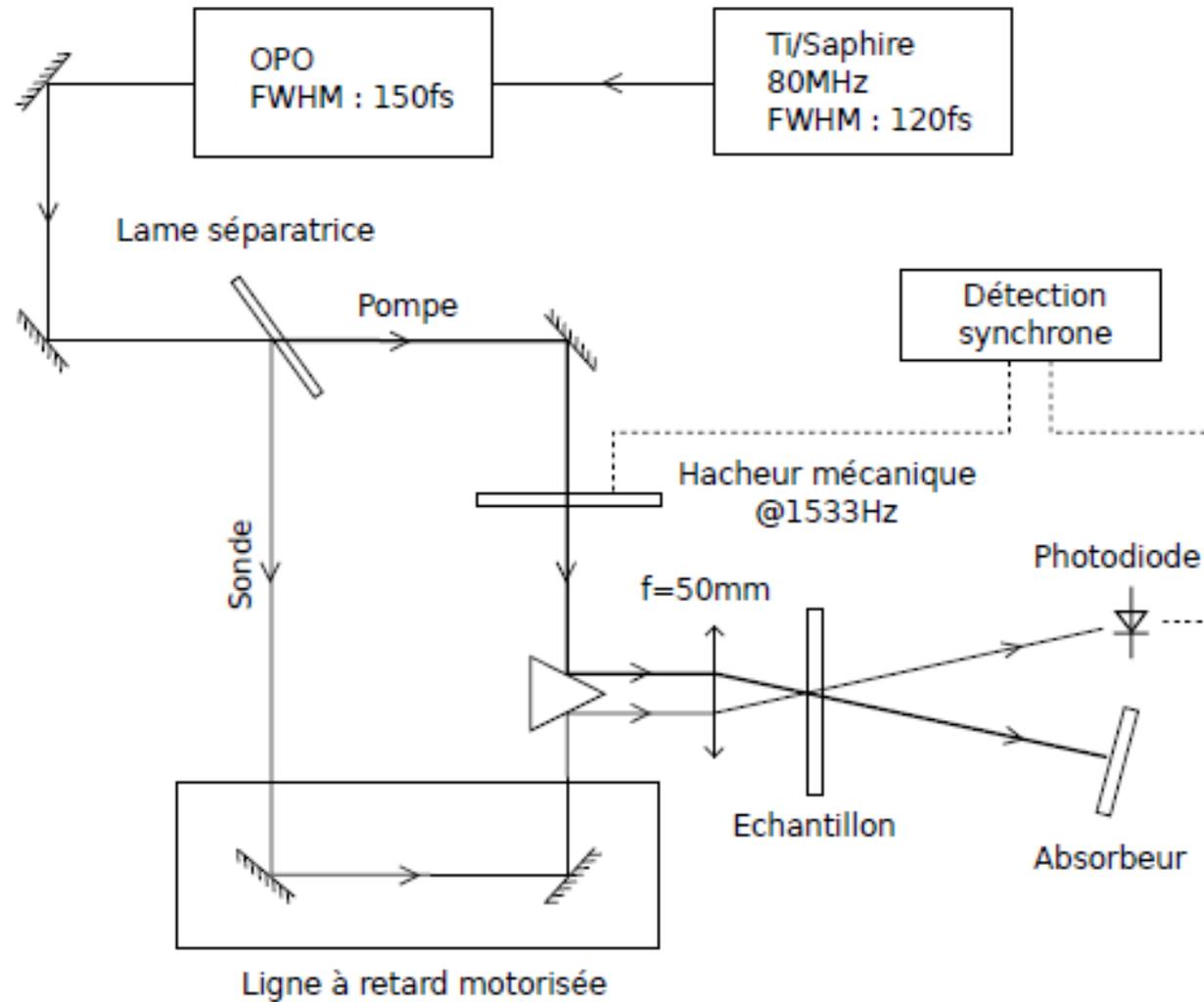


- Bande interdite  $\sim 1,16\text{eV}$  ( $1,07\mu\text{m}$ )
- Queue d'absorption sous la bande interdite
- Effet Fabry-Perot formé par la couche de GaAsSb-BT responsable des ondulations



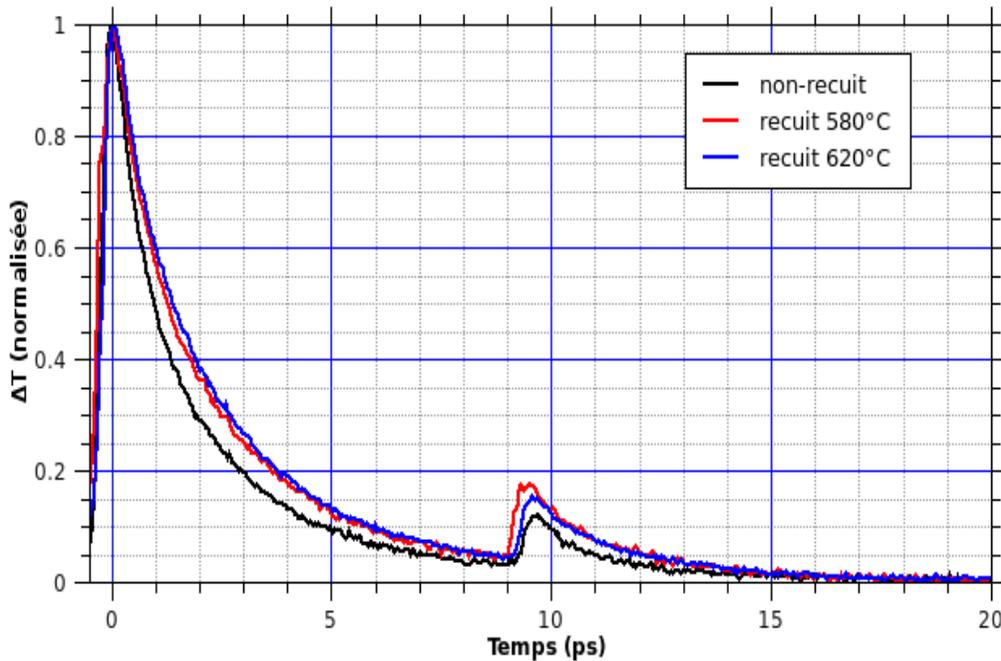
GaAsSb-BT  $T_C = 310^\circ\text{C}$

# Caractérisation du GaAsSb-BT

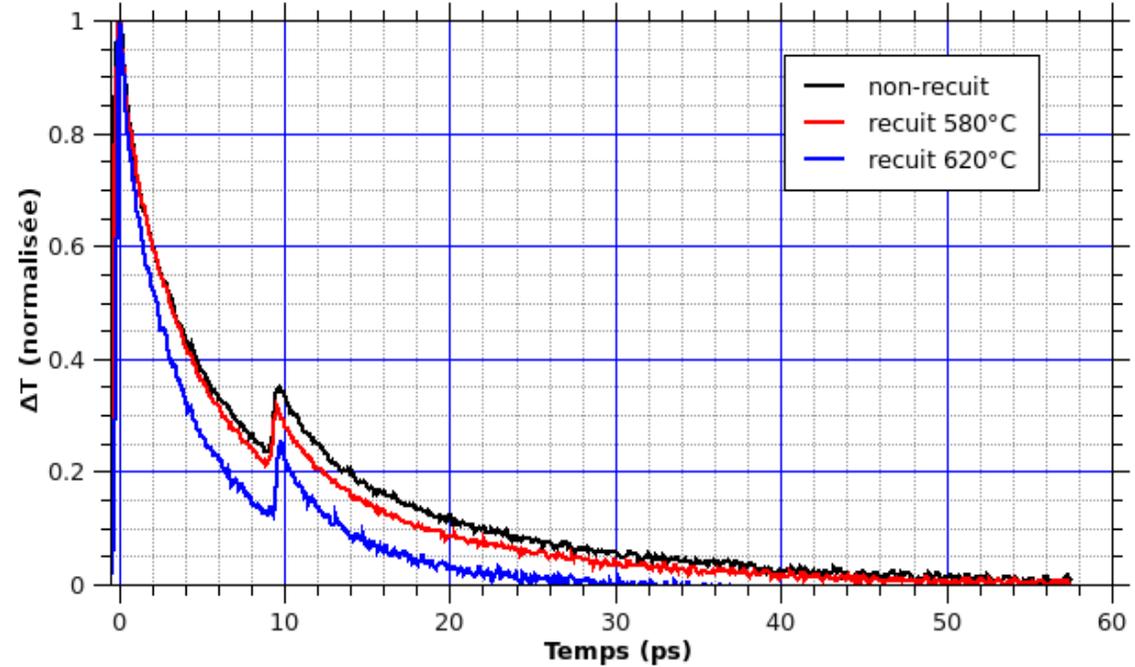


Dispositif expérimental pour la mesure du temps de vie des porteurs

# Caractérisation du GaAsSb-BT



GaAsSb-BT  $T_C = 310^\circ\text{C}$



GaAsSb-BT  $T_C = 330^\circ\text{C}$

- $T_C = 310^\circ\text{C}$   $\tau_0 \sim 2\text{ps}$  non-recuit
- $T_C = 330^\circ\text{C}$   $\tau_0 \sim 6\text{ps}$  non-recuit et  $\tau_0 \sim 4\text{ps}$  recuit à  $620^\circ\text{C}$

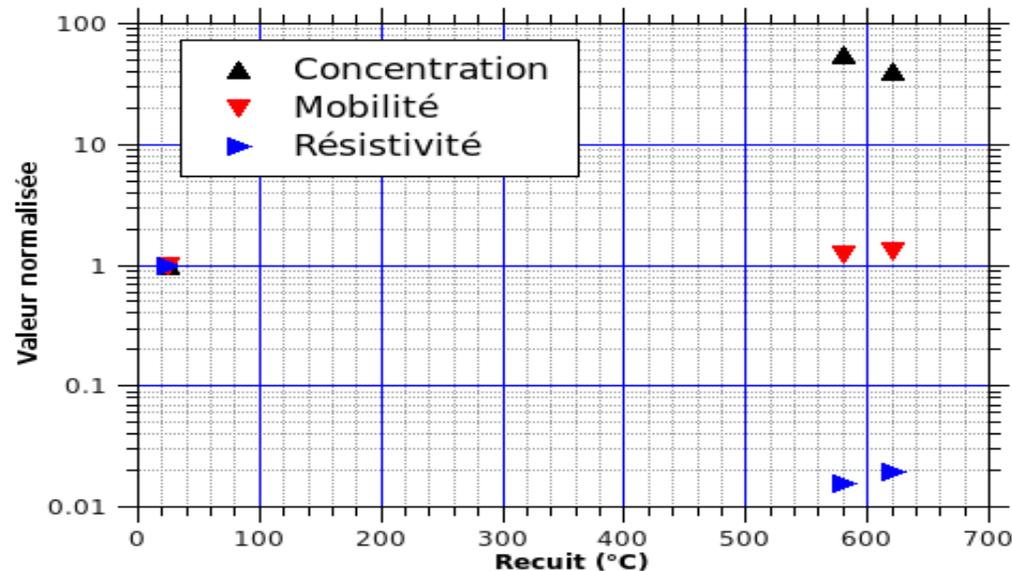
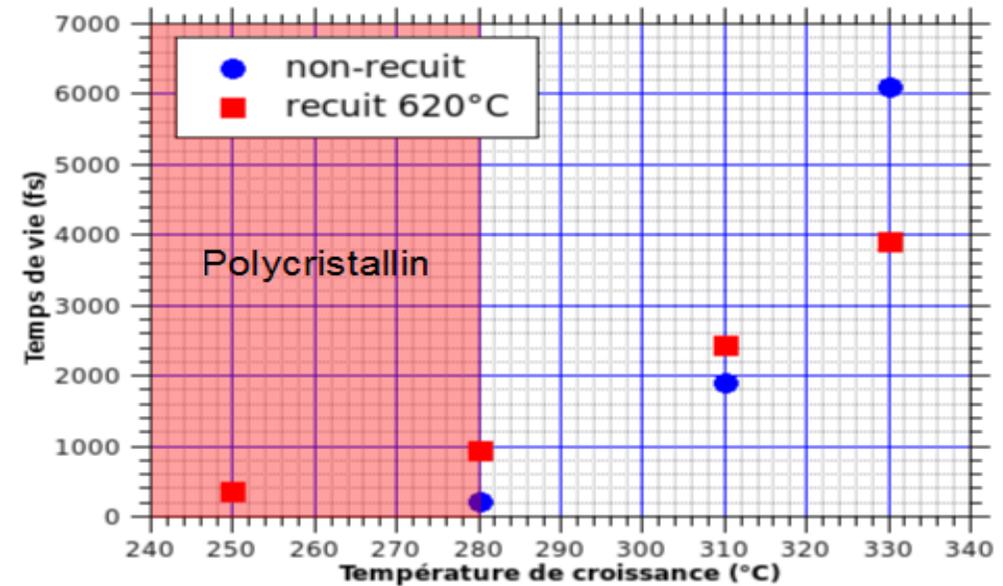
# Caractérisation du GaAsSb-BT

- Temps de vie augmente avec la température de croissance
  - le recuit allonge le temps de vie pour  $T_c < 320^\circ\text{C}$

**Temps de vie :  $200 \text{ fs} < \tau_0 < 6 \text{ ps}$**

- La résistivité diminue avec le recuit :
  - concentration de porteurs ↗
  - mobilité des porteurs ↗

**Résistivité :  $70 \Omega\text{cm} < \rho < 980 \Omega\text{cm}$**



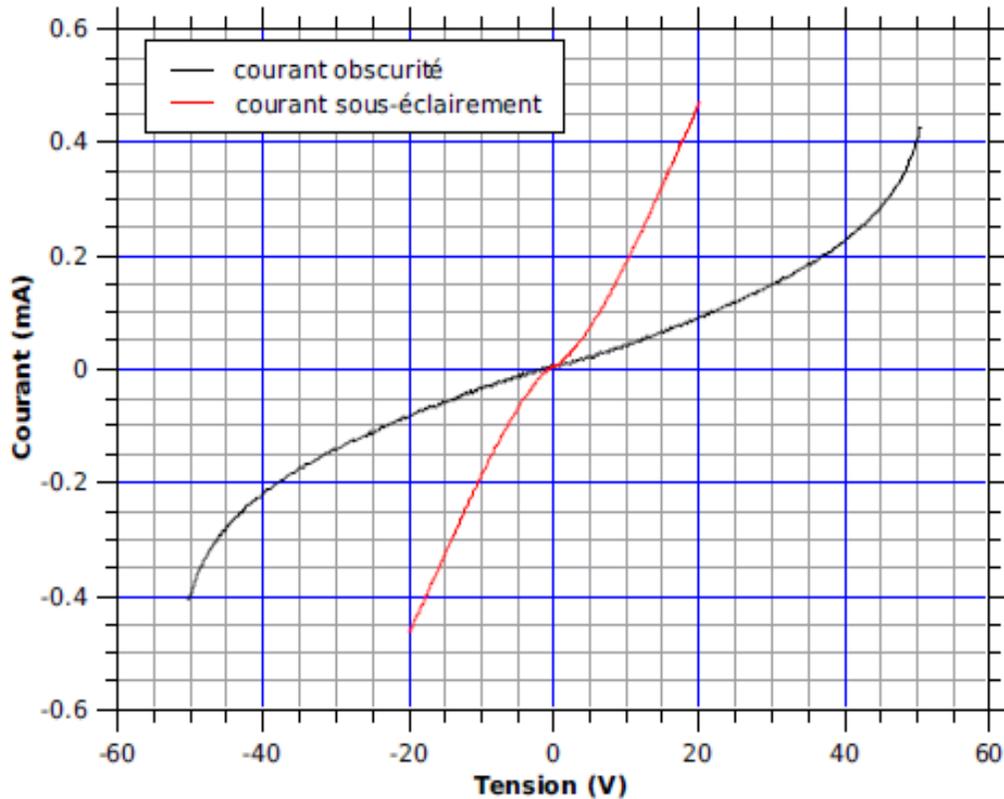
# Comparatif des matériaux à temps de vie court

	$\lambda(\mu\text{m})$	$\tau(\text{ps})$	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$
GaAs-BT	830nm	200fs - 2ps	$10^6 - 10^7$	~200
InGaAs-BT <sup>(1)</sup>	1,06	3 - 8	-	-
<b>GaAsSb-BT</b>	<b>1,06</b>	<b>200fs - 6ps</b>	<b>70 - 980</b>	<b>80 - 1770</b>
InGaAs irradié	1,55	~ps	5 - 10	-
Multi-couches AlInAs/InGaAs:Be <sup>(2)</sup>	1,55	-	$10^6\Omega/\square$	-

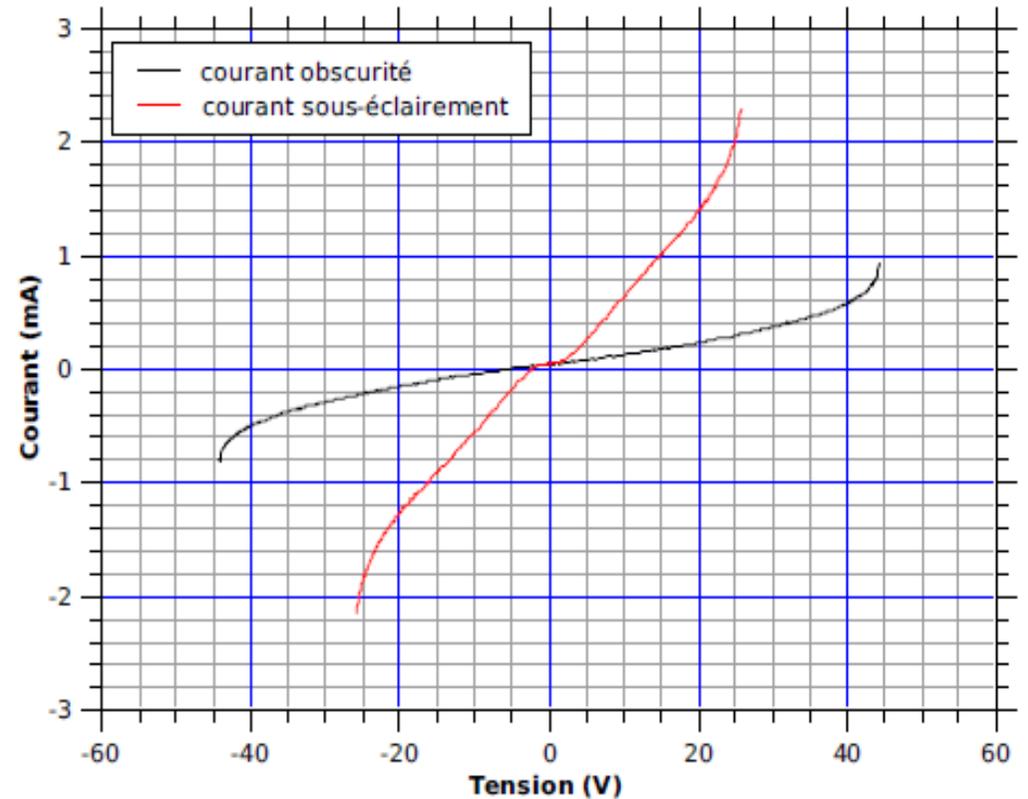
(1) Czarny, thèse USTL, 2007

(2) Sartorius, Opt. Express, 16, 2008

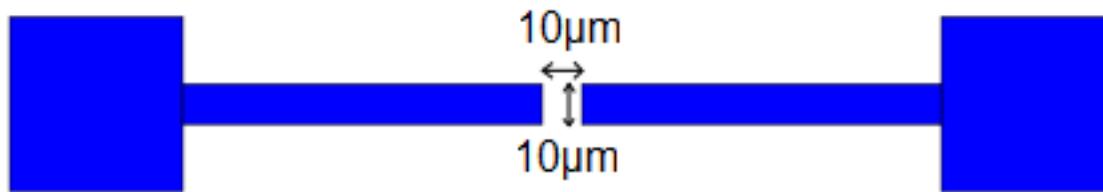
# Mesures du photocourant



GaAsSb-BT -  $T_c = 310^\circ\text{C}$



GaAsSb-BT -  $T_c = 330^\circ\text{C}$



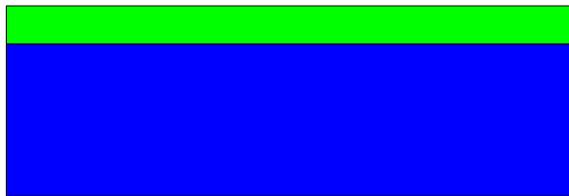
- Température idéale de croissance  $\sim 300^{\circ}\text{C} - 320^{\circ}\text{C}$
- Meilleur résultat obtenu pour  $T_c = 310^{\circ}\text{C}$  15% Sb
  - temps de vie permettant la génération de THz :  $\tau_0 = 1,8\text{ps}$
  - résistivité acceptable :  $\rho = 190\Omega\text{cm}$

Les premiers résultats obtenus permettent d'envisager la réalisation d'antennes photoconductrices pour générer du THz

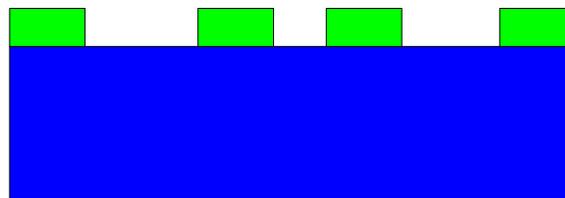
# Résultats obtenus sur les antennes photoconductrices en GaAsSb-BT

# Réalisation d'antennes photoconductrices en GaAsSb-BT\*

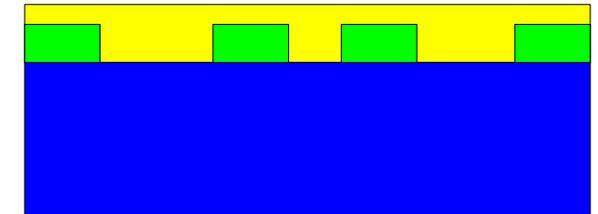
Première étape : réalisation des lignes et du plan de masse de l'antenne cornet



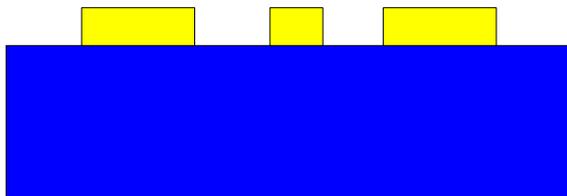
1. Dépôt de résine



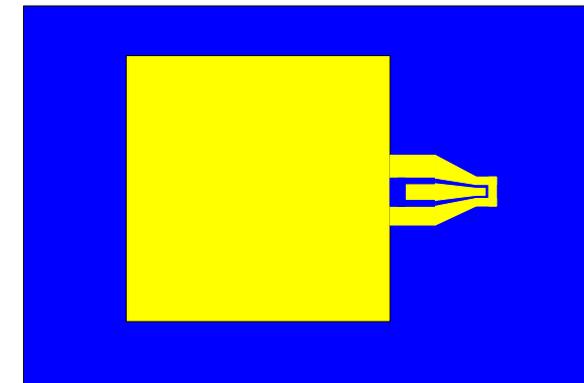
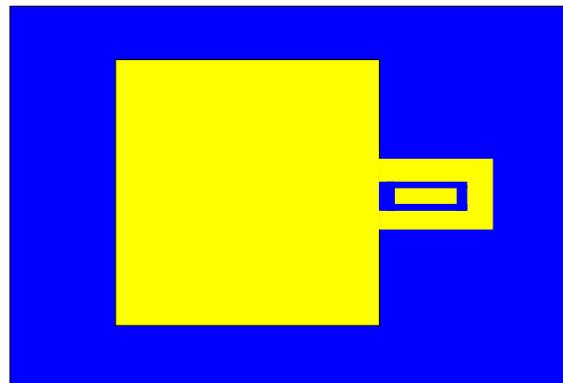
2. Exposition puis révélation



3. Métallisation



4. Lift-off

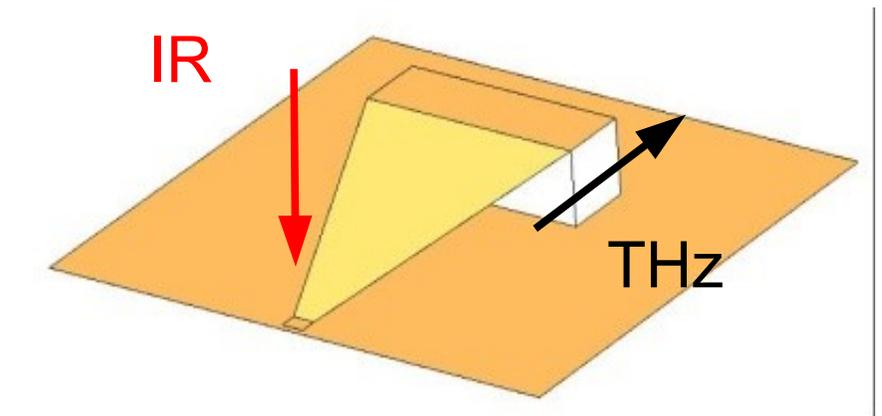


5. Vue de dessus après lift-off des 2 topologies

\*Process développé par E. Peytavit

# Réalisation d'antennes photoconductrices en GaAsSb-BT en GaAsSb-BT

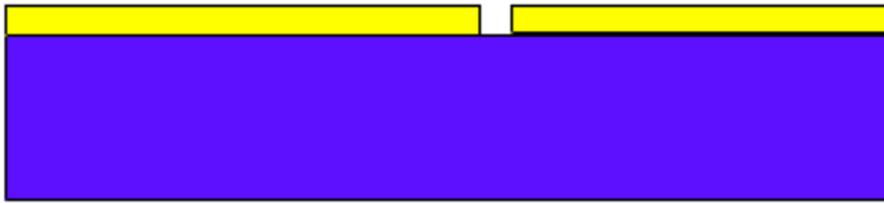
- Antenne large bande 100GHz – 1THz à fort gain\*
- Pas de lentille en silicium => bonne reproductibilité des mesures
- Structure 3D => réalisation plus difficile



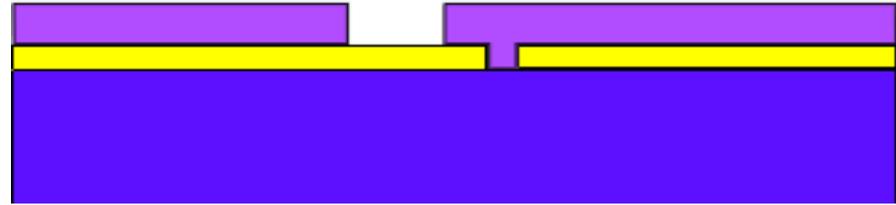
\* dimensions de l'antenne définies par simulation par T. Akalin

# Réalisation d'antennes photoconductrices en GaAsSb-BT

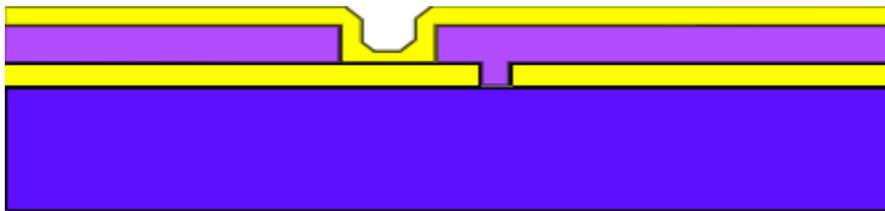
Deuxième étape : réalisation de l'antenne cornet TEM



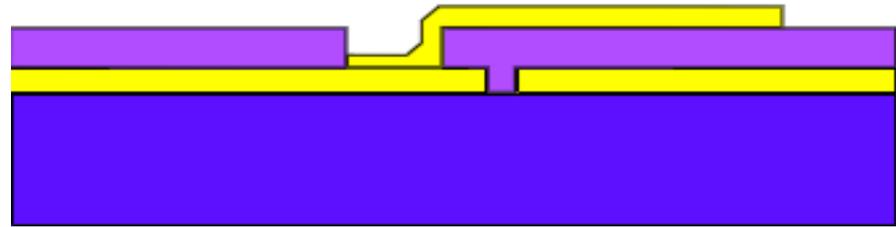
1. Ligne CPW + plan de masse



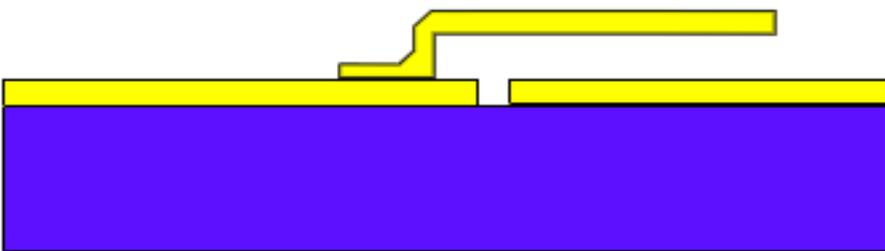
2. Dépôt de la résine sacrificielle



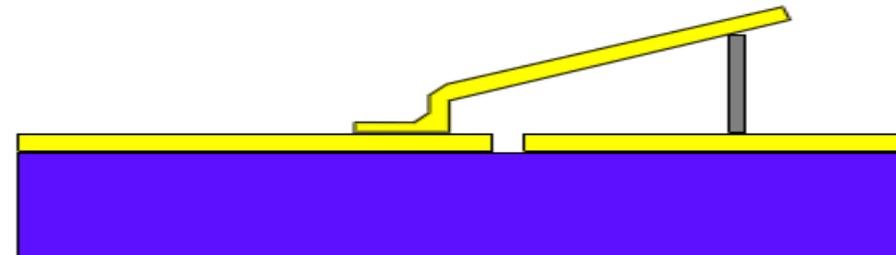
3. Métallisation



4. Gravure de la métallisation

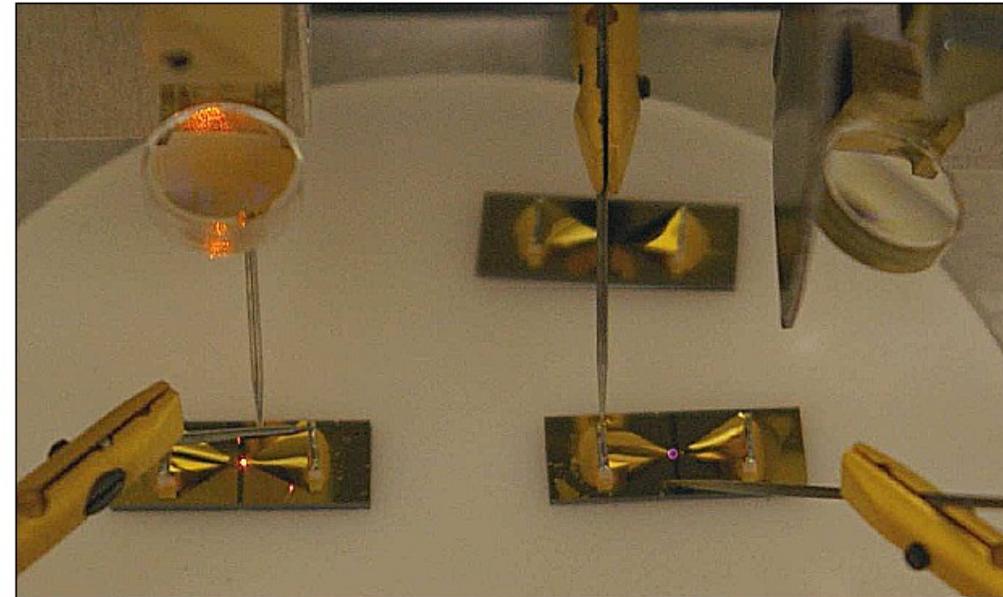
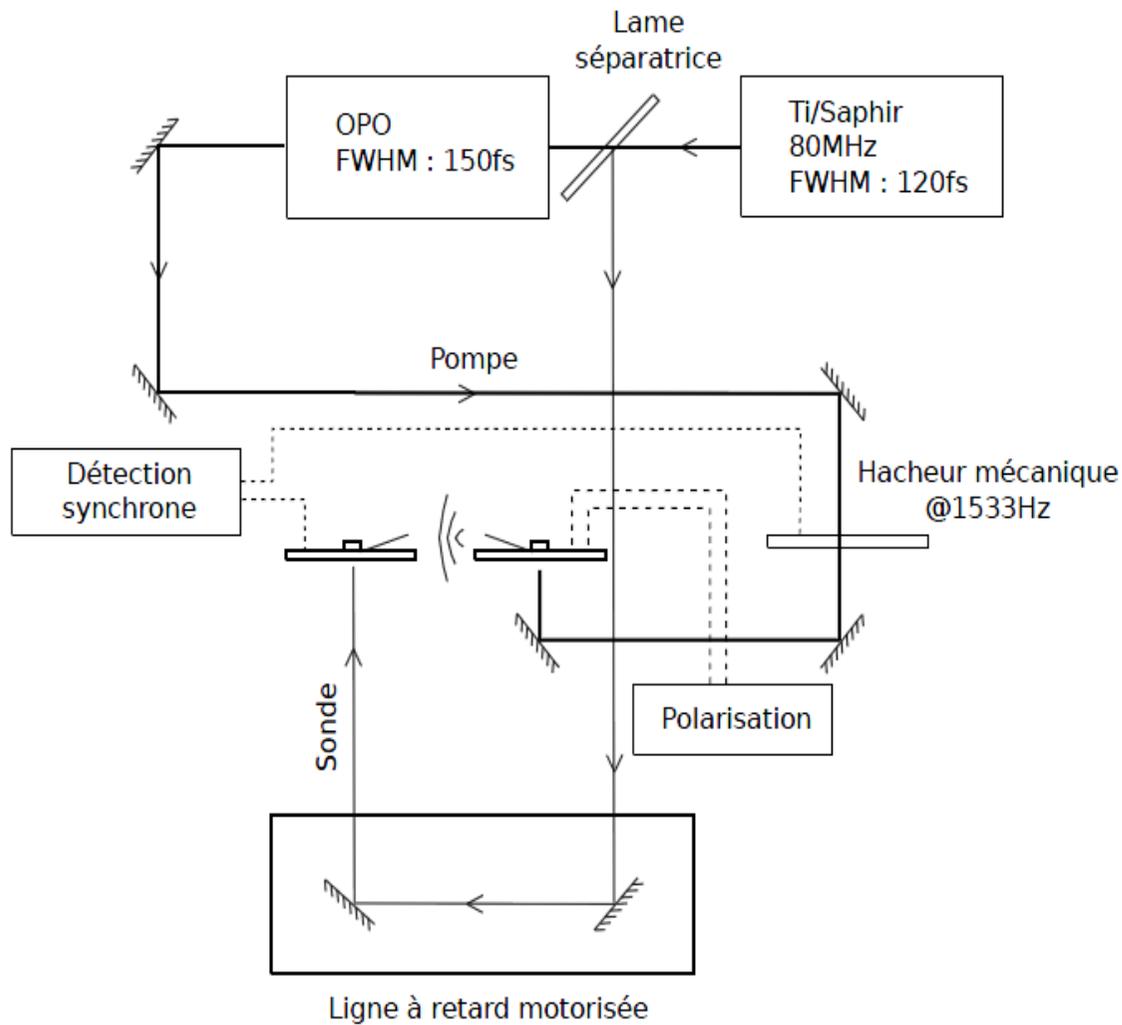


5. Libération de l'antenne

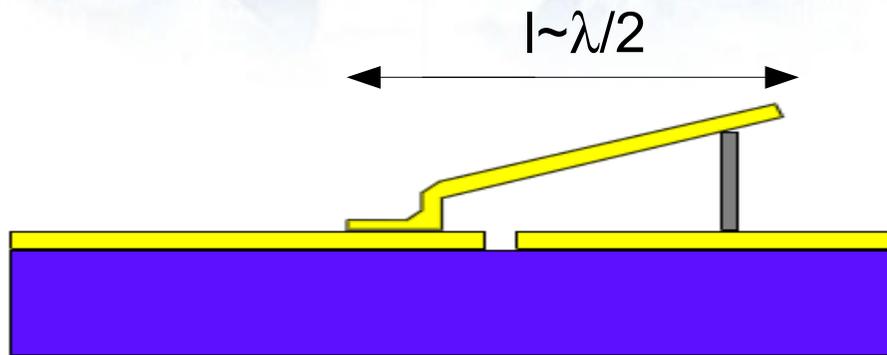


6. Stabilisation de l'antenne avec une cale de téflon

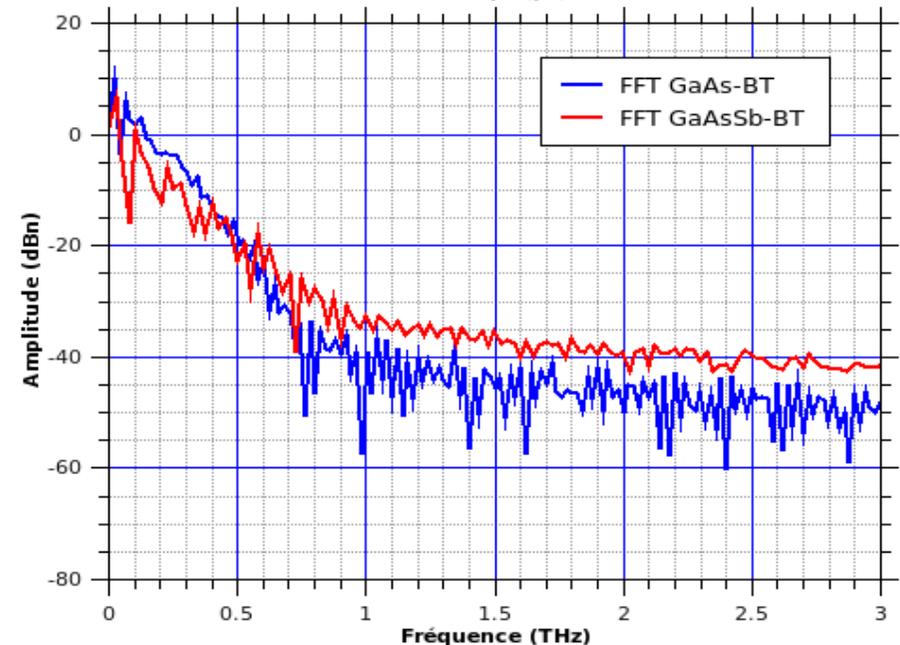
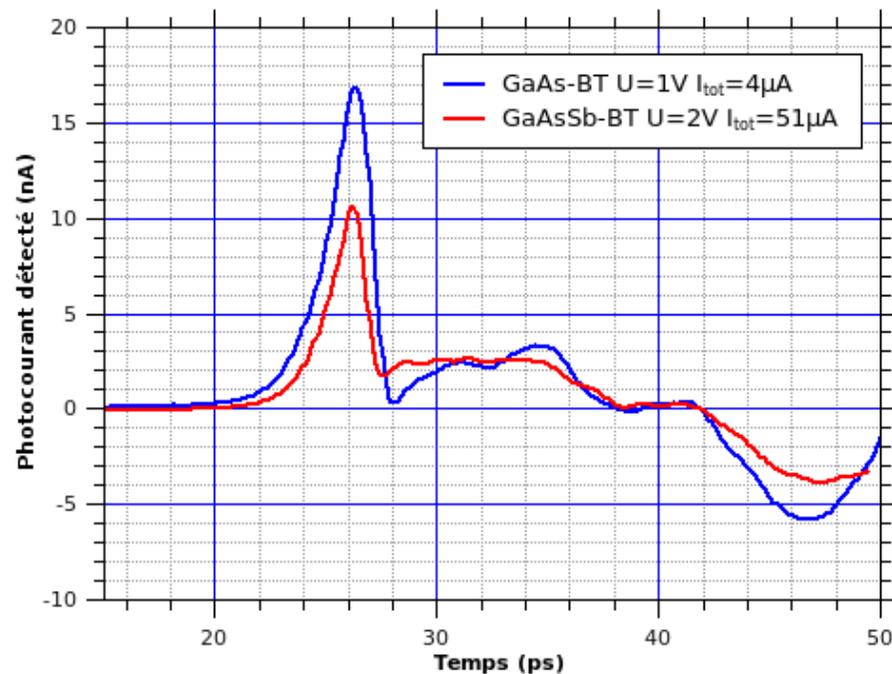
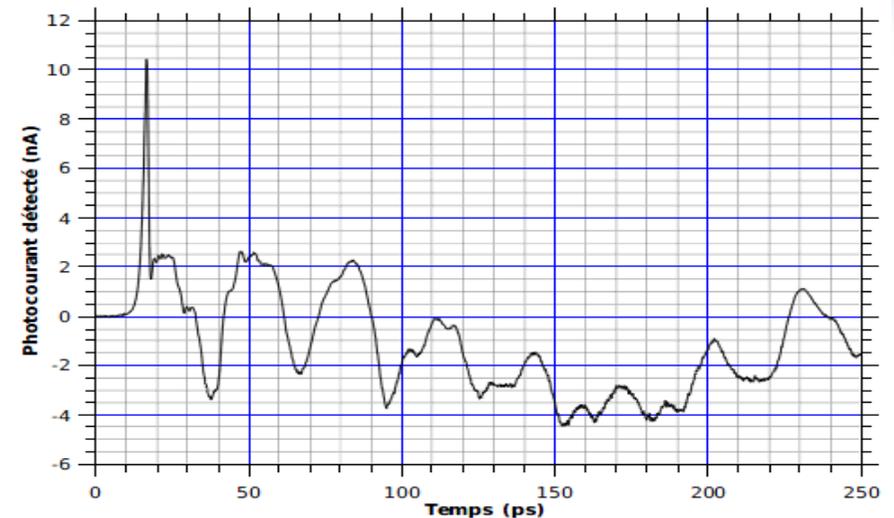
# Antenne photoconductrice en GaAsSb-BT



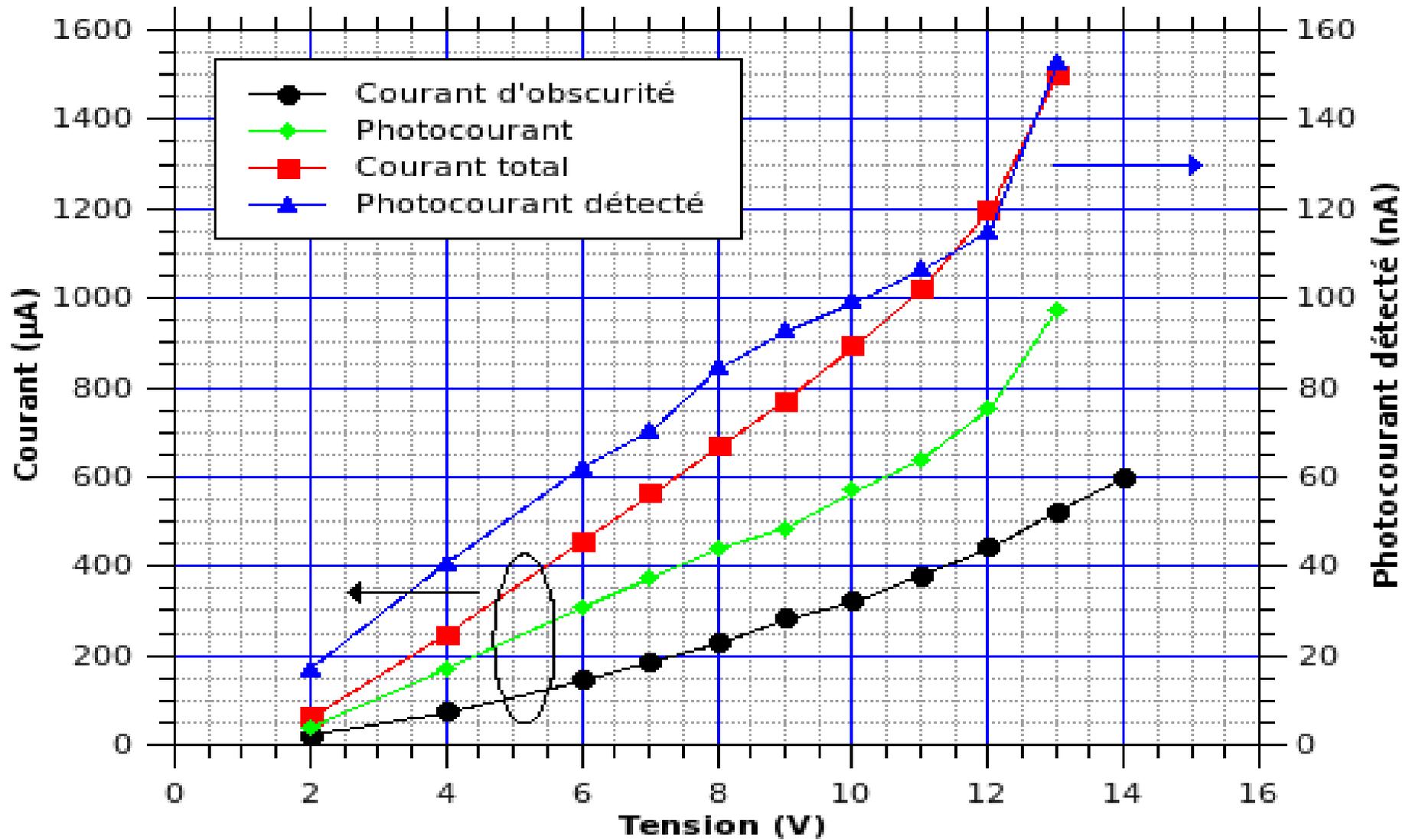
Photographie des antennes photoconductrices espacées de 7mm



- Oscillation parasite à 30GHz
- Signal jusqu'à 1THz



# Résultats



- Bons résultats (inférieurs à ceux du GaAs-BT) : matériau utilisable en pratique

- Photocourant détecté de 150nA pour une tension de polarisation de 13V

- Spectre du signal s'étend jusqu'à 1THz

=> premiers résultats encourageants qui peuvent être améliorés en optimisant la croissance du GaAsSb-BT

# Réalisation et caractérisation de photomélangeurs à base d'UTC-PD en GaAsSb\*

\* Travaux commencés par A. Beck lors de sa thèse

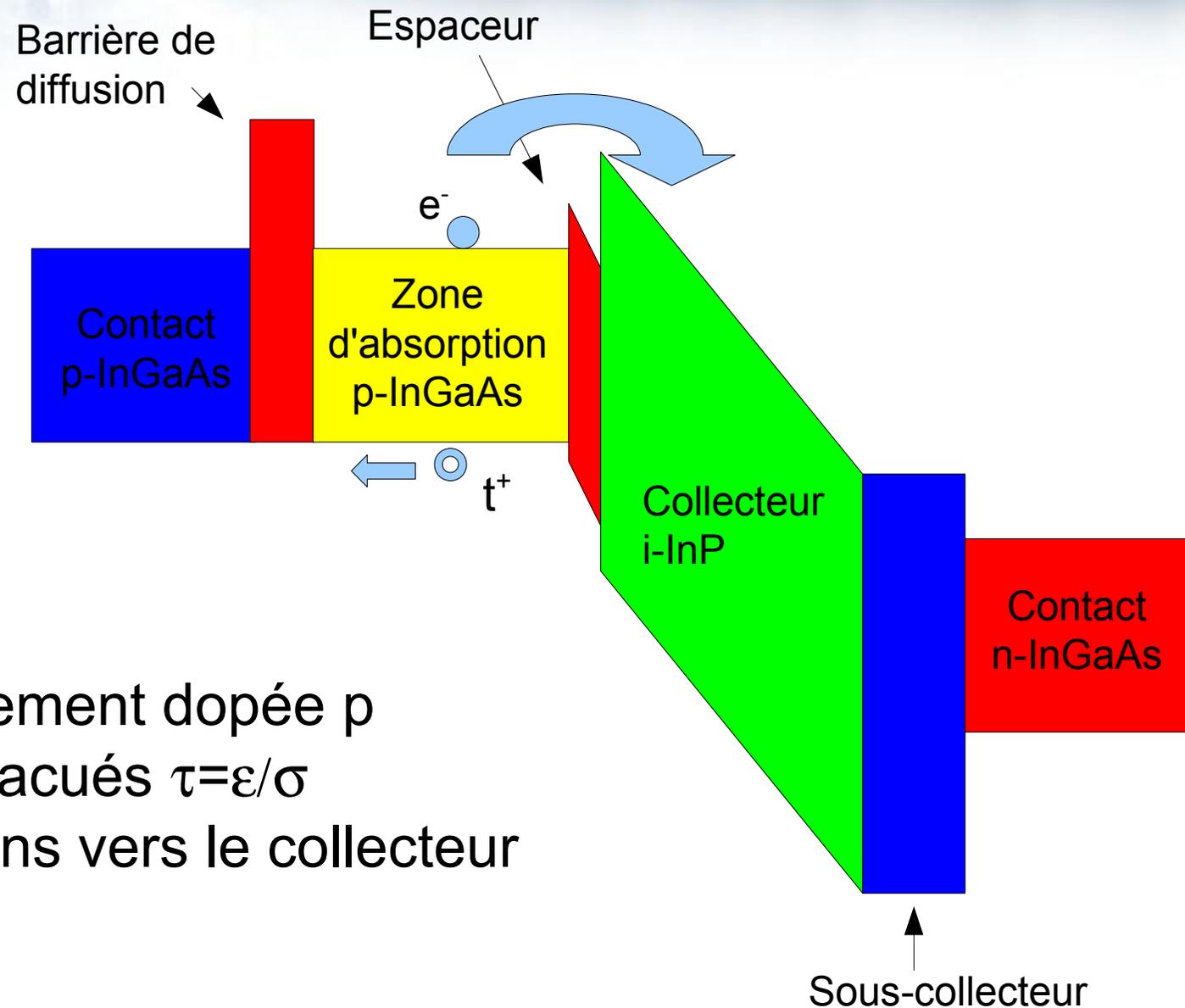


40/61



## UTC-PD InGaAs

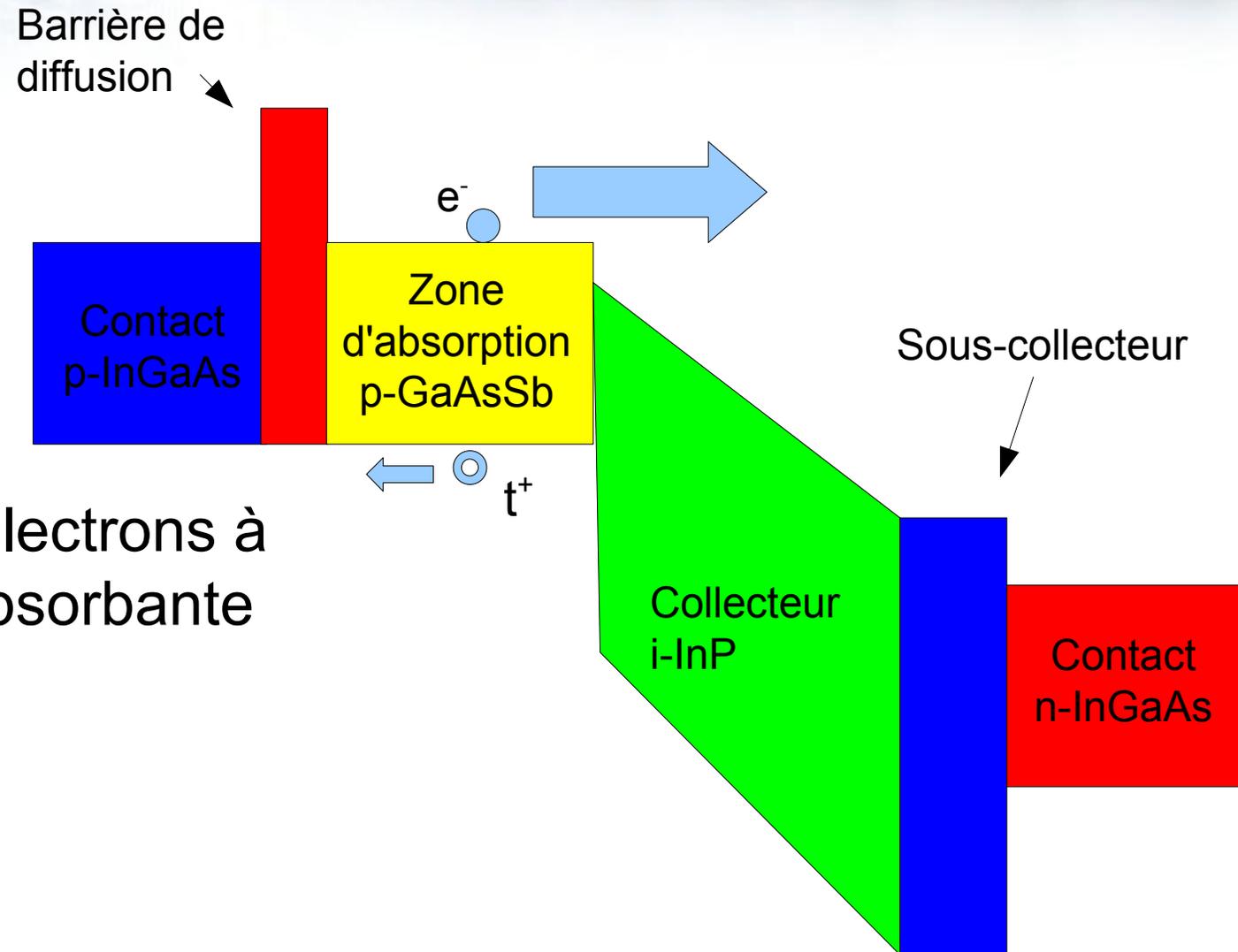
- Structure PIN
- Un seul type de porteurs participe au photocourant
- Zone d'absorption fortement dopée p
  - trous rapidement évacués  $\tau = \varepsilon / \sigma$
  - diffusion des électrons vers le collecteur



## UTC-PD GaAsSb

- Plus d'espaceur

=> accélération des électrons à la sortie de la zone absorbante



- Photomélangeur à base d'UTC-PD
  - système à 3 fréquences de coupure

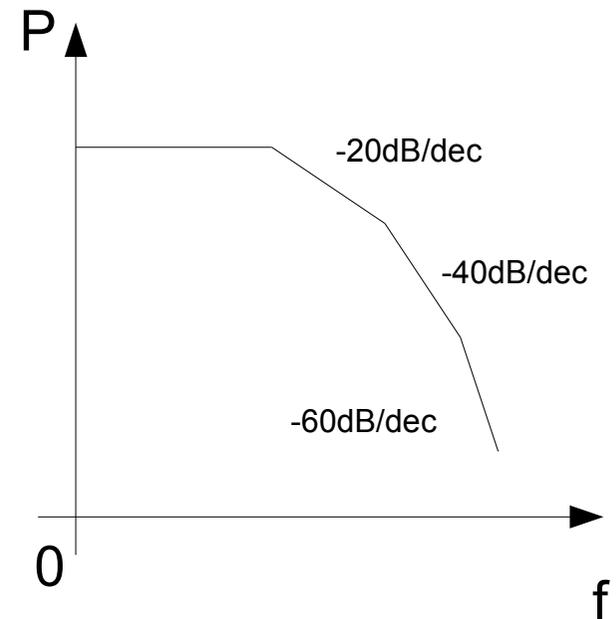
$$P_{THz} \propto R_{ant} I_{THz}^2$$

$$|i(\omega)| = \frac{I_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_a)^2} \sqrt{1 + (\omega\tau_{RC})^2}} \frac{\sin(\omega \frac{\tau_t}{2})}{\omega \frac{\tau_t}{2}}$$

Zone  
d'absorption

Constante de  
temps RC

Temps de transit  
dans le collecteur

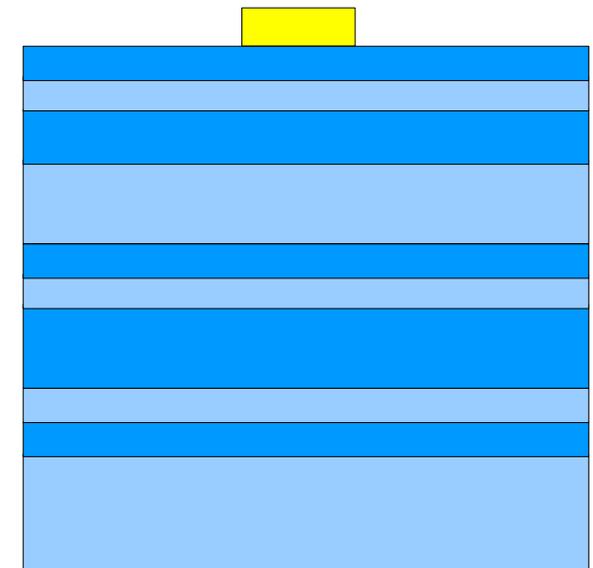


\*Feiginov, JAP, 102(8), 2007

# Réalisation de photodiodes UTC-PD

Couche	Matériau	Épaisseur (Å)	Dopage
Contact anode	GaAsSb	500	p
Barrière de diffusion	AlGaAsSb	200	p
Zone d'absorption	GaAsSb	1000	p
Collecteur	InP	2500	nid
Sous-collecteur (1)	InP	500	n
Contact cathode	GaInAs	600	n
Sous-collecteur (2)	InP	3000	n
Couche d'arrêt de gravure	GaInAs	200	nid
Couche tampon	InP	175	nid
Substrat InP semi-isolant	InP		

Métallisation du contact d'anode

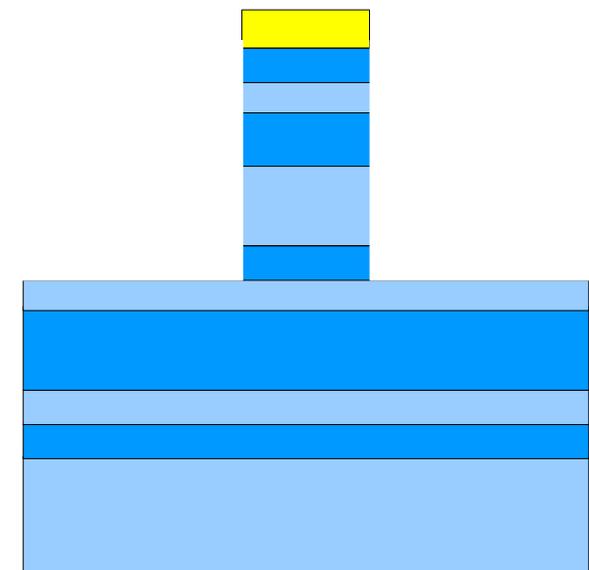




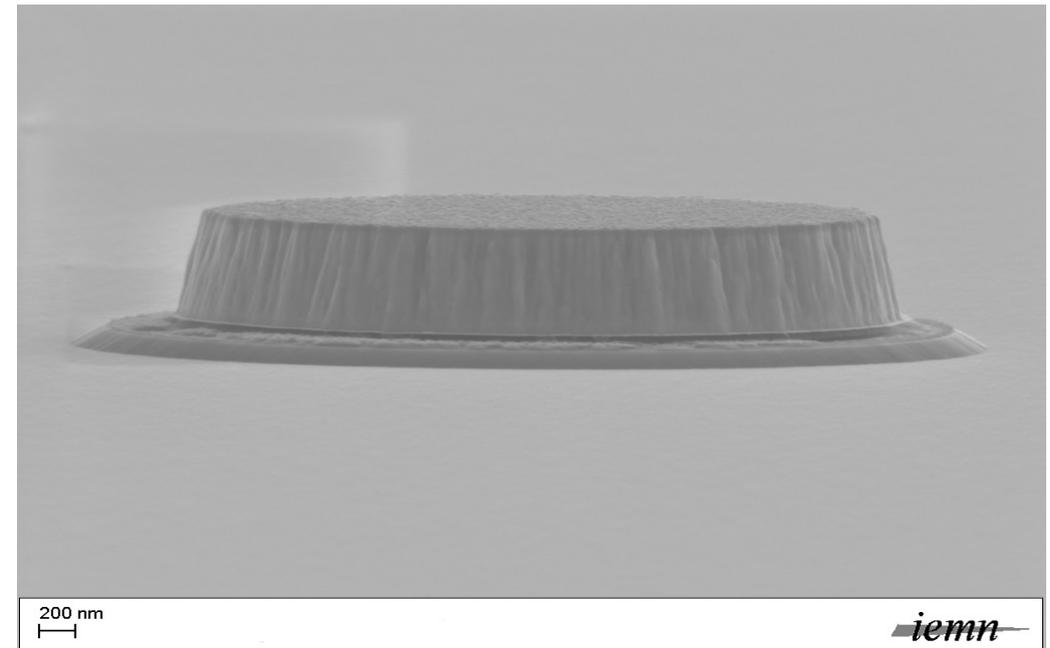
# Réalisation de photodiodes UTC-PD

Couche	Matériau	Épaisseur (Å)	Dopage
Contact anode	GaAsSb	500	p
Barrière de diffusion	AlGaAsSb	200	p
Zone d'absorption	GaAsSb	1000	p
Collecteur	InP	2500	nid
Sous-collecteur (1)	InP	500	n
Contact cathode	GaInAs	600	n
Sous-collecteur (2)	InP	3000	n
Couche d'arrêt de gravure	GaInAs	200	nid
Couche tampon	InP	175	nid
Substrat InP semi-isolant	InP		

Gravure des couches InP :



- Sous-gravure importante
  - compensée par une ouverture du masque plus grande
- Présence d'un oxyde sur le dessus du méso

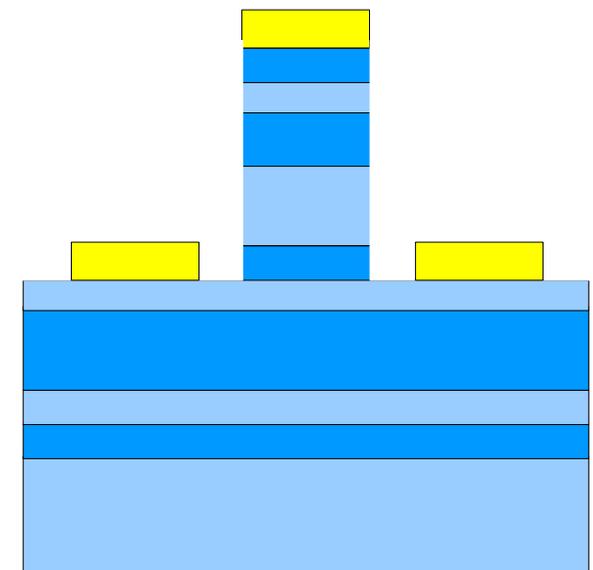


UTC  $\text{\O}5\mu\text{m}$  après gravure du méso

# Réalisation de photodiodes UTC-PD

Couche	Matériau	Épaisseur (Å)	Dopage
Contact anode	GaAsSb	500	p
Barrière de diffusion	AlGaAsSb	200	p
Zone d'absorption	GaAsSb	1000	p
Collecteur	InP	2500	nid
Sous-collecteur (1)	InP	500	n
Contact cathode	GaInAs	600	n
Sous-collecteur (2)	InP	3000	n
Couche d'arrêt de gravure	GaInAs	200	nid
Couche tampon	InP	175	nid
Substrat InP semi-isolant	InP		

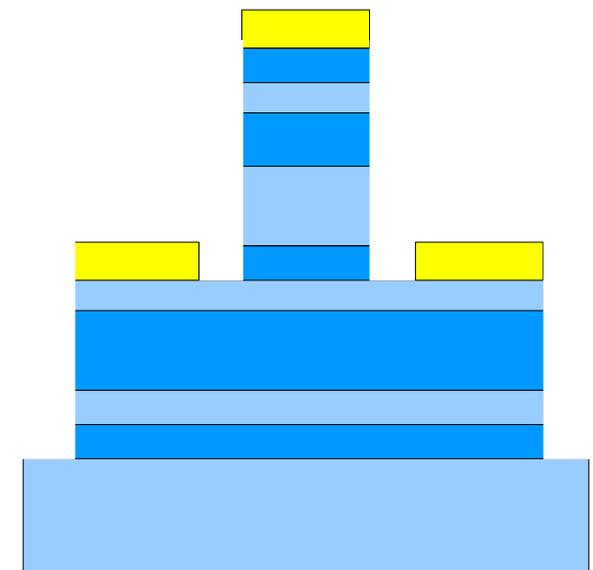
Métallisation du contact de cathode



# Réalisation de photodiodes UTC-PD

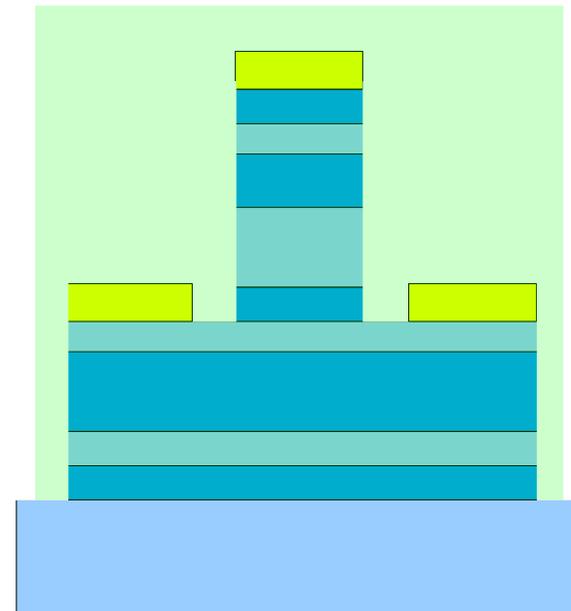
Couche	Matériau	Épaisseur (Å)	Dopage
Contact anode	GaAsSb	500	p
Barrière de diffusion	AlGaAsSb	200	p
Zone d'absorption	GaAsSb	1000	p
Collecteur	InP	2500	nid
Sous-collecteur (1)	InP	500	n
Contact cathode	GaInAs	600	n
Sous-collecteur (2)	InP	3000	n
Couche d'arrêt de gravure	GaInAs	200	nid
Couche tampon	InP	175	nid
Substrat InP semi-isolant	InP		

Gravure d'isolation



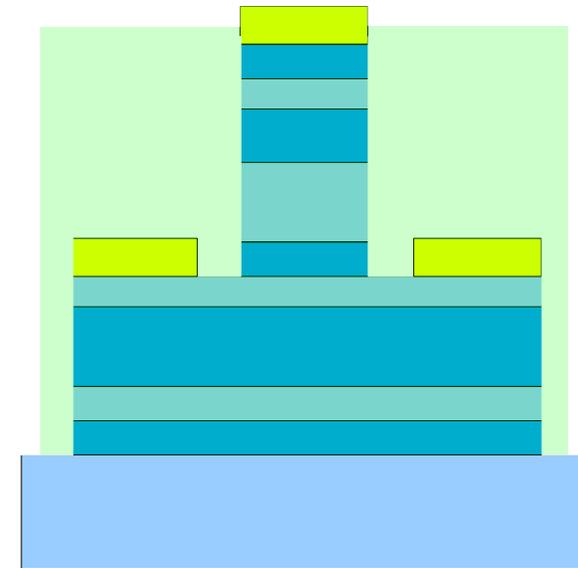
## Résine copolymère pour le support de pont

- Contact supérieur :
  - gravure RIE
- Contact inférieur :
  - lithographie électronique
  - métallisation + lift-off



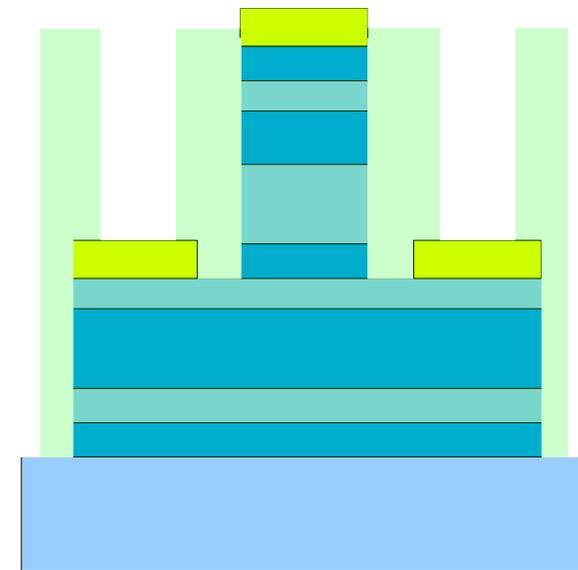
## Résine copolymère pour le support de pont

- Contact supérieur :
  - gravure RIE
- Contact inférieur :
  - lithographie électronique
  - métallisation + lift-off



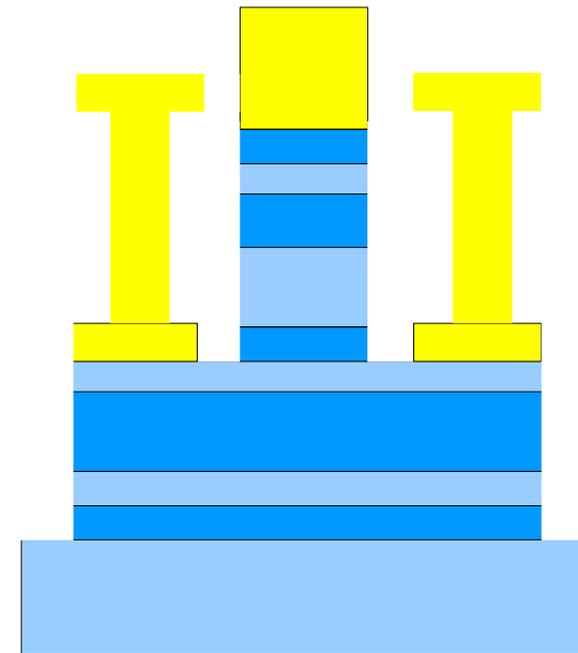
## Résine copolymère pour le support de pont

- Contact supérieur :
  - gravure RIE
- Contact inférieur :
  - **lithographie électronique**
  - métallisation + lift-off

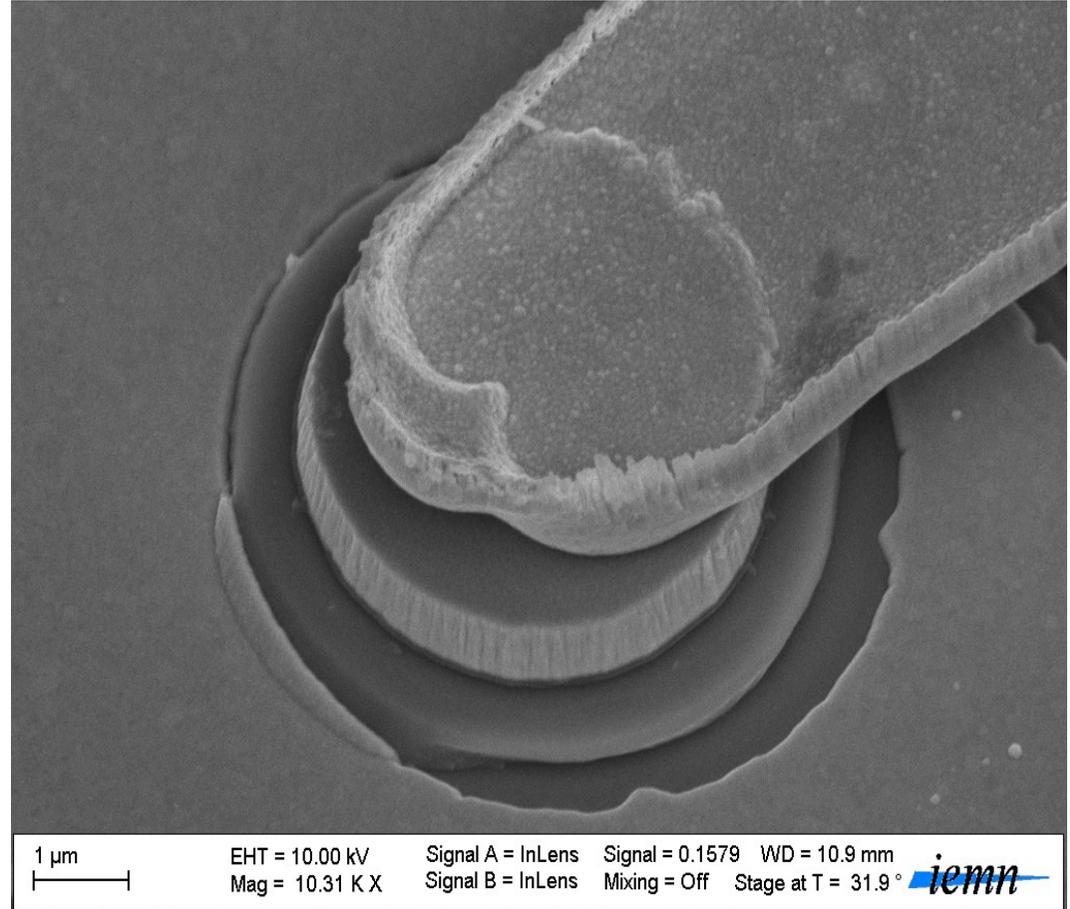
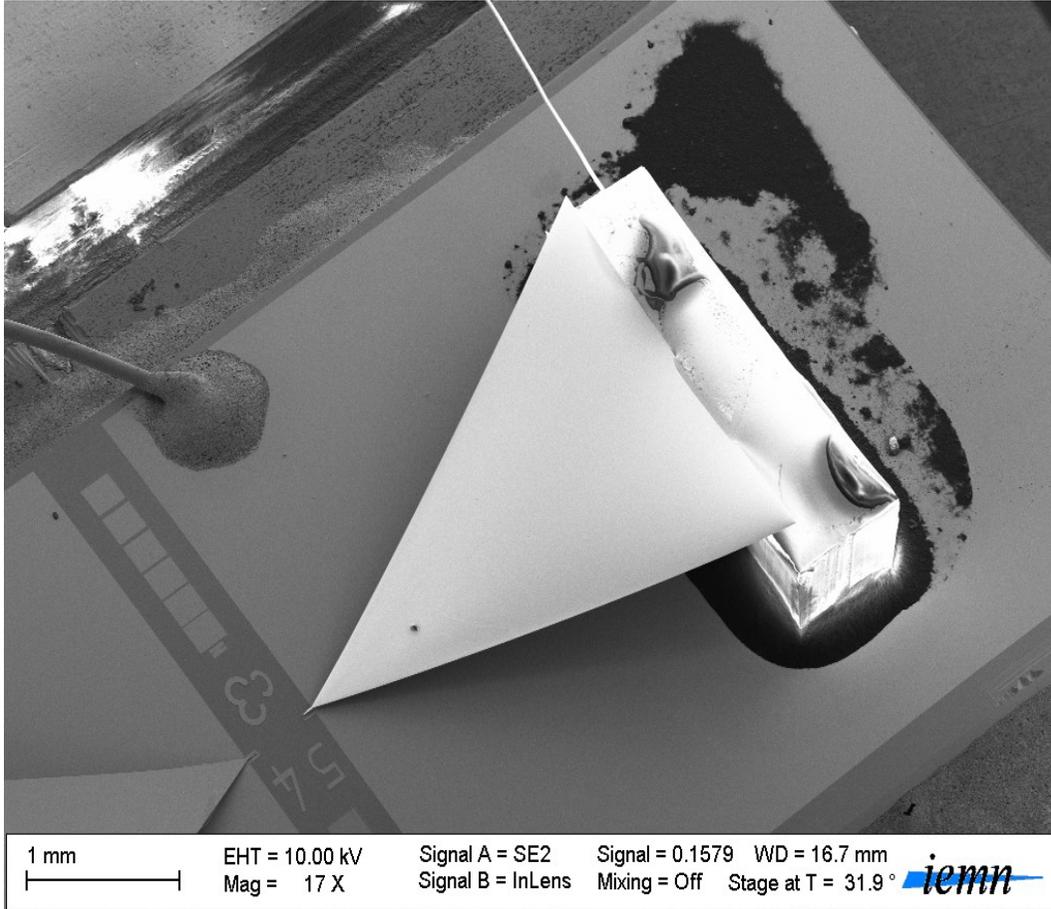


## Résine copolymère pour le support de pont

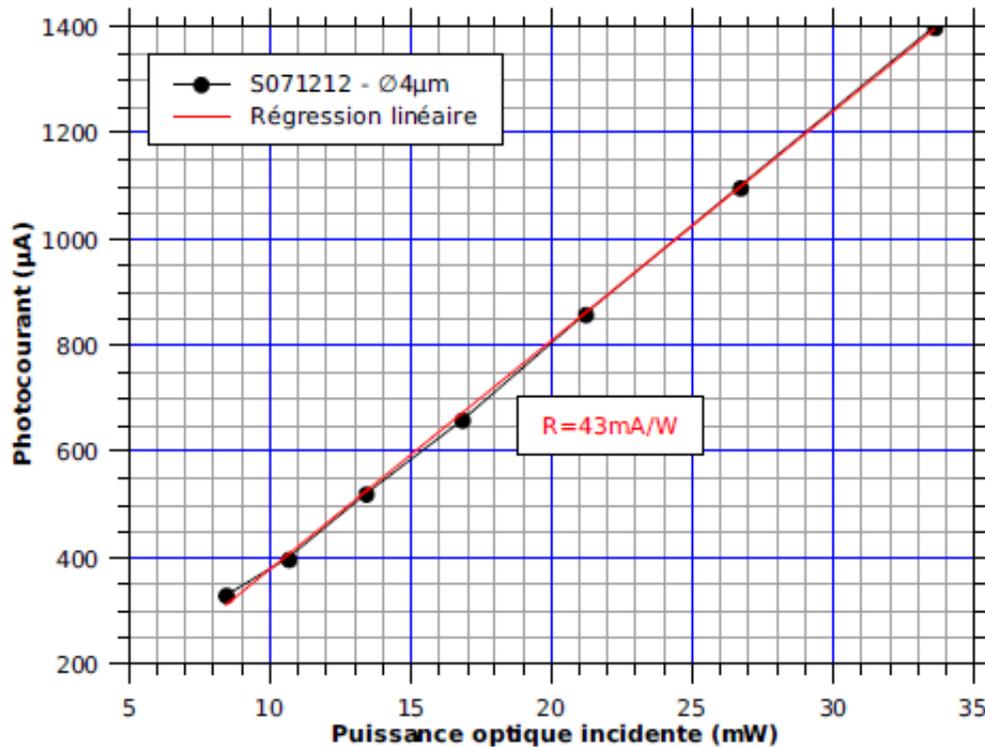
- Contact supérieur :
  - gravure RIE
- Contact inférieur :
  - lithographie électronique
  - **métallisation + lift-off**



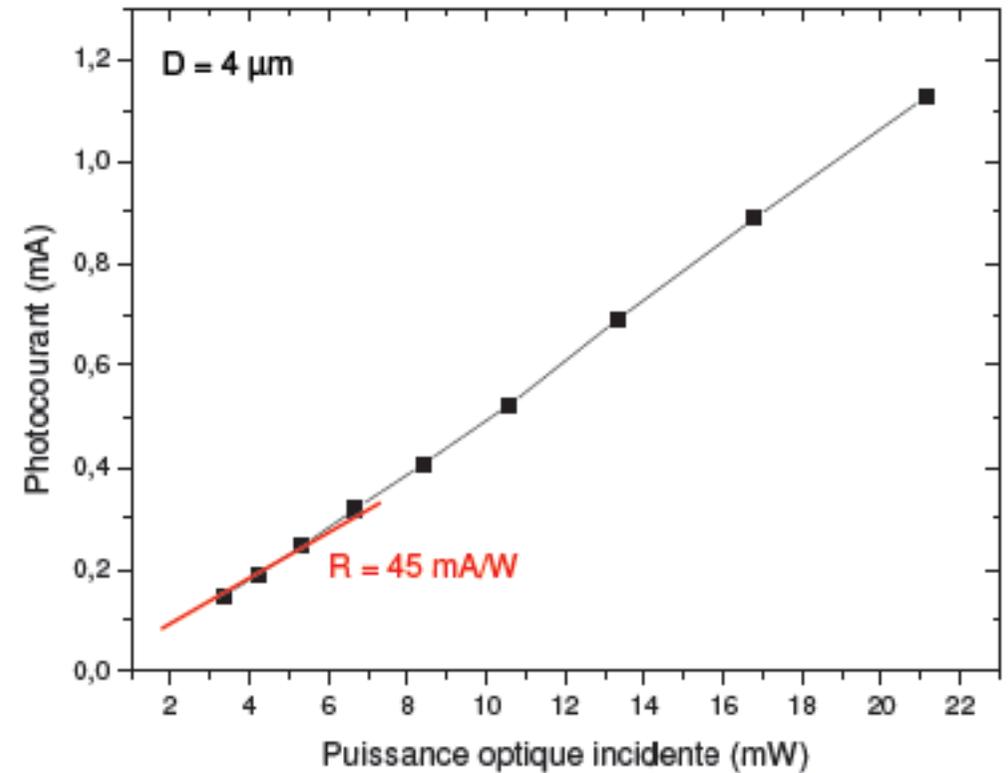
# Réalisation du pont à air pour les UTC-PD



# Caractérisation des UTC-PD



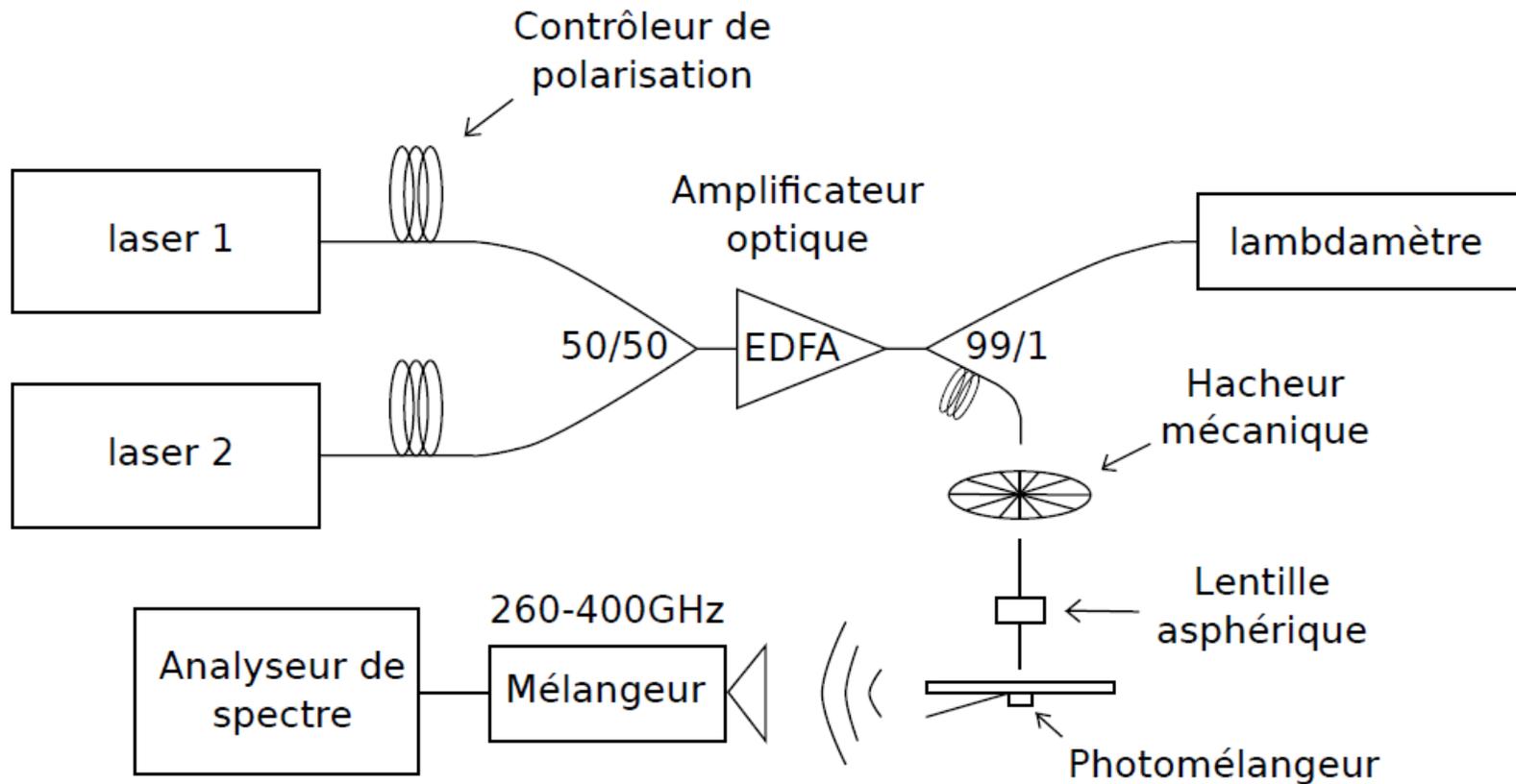
UTC-PD en GaAsSb



UTC-PD en InGaAs

=> Réponse identique entre UTC-PD en InGaAs et GaAsSb  
(gradient de composition dans la zone absorbante des UTC-PD en InGaAs)

# Caractérisation des UTC-PD\*

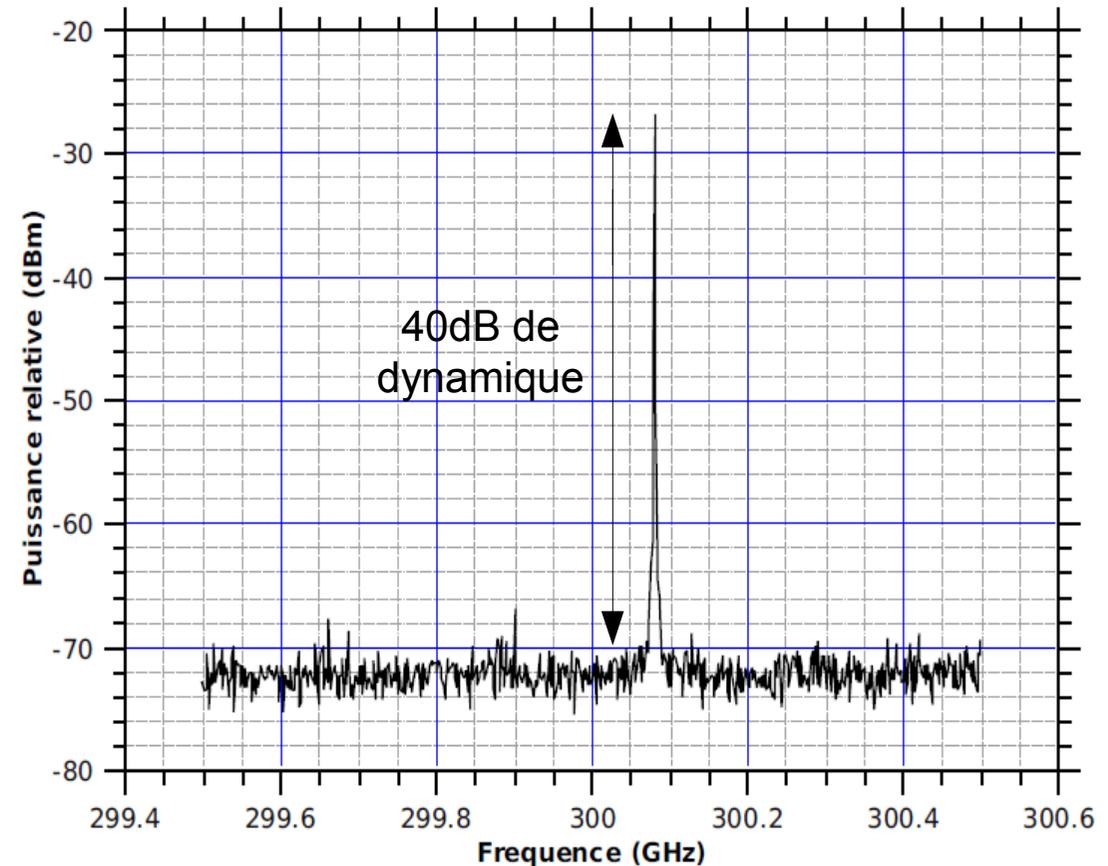


Dispositif expérimental pour la caractérisation des UTC-PD

\*Banc de mesure développé par G. Ducournau

# Caractérisation des UTC-PD

- UTC-PD **GaAsSb** Ø4µm
    - photocourant : **1,4mA**
  - UTC-PD **InGaAs** Ø3µm
    - photocourant : **280µA**
- => différence de puissance émise de 1dB



Les UTC-PD en InGaAs offrent de meilleures performances

- Premier photomélangeur avec UTC-PD en GaAsSb
- Réponse similaire entre les UTC-PD InGaAs et GaAsSb
- Génération de THz plus importante avec les UTC-PD InGaAs
- Problèmes adhésions au niveau des antennes cornets  
=> améliorer le process des étapes technologiques critiques

- Étude d'un monostable pour la détection d'impulsions térahertz
  - => la largeur de l'impulsion de sortie détermine la largeur de l'impulsion détectable en entrée
- Caractérisation d'un matériau à temps de vie des porteurs court, sensible à  $1,06\mu\text{m}$  : le GaAsSb-BT
  - premiers résultats encourageants
- Réalisation de sources THz à  $1,06\mu\text{m}$  et  $1,55\mu\text{m}$ 
  - antennes photoconductrices en GaAsSb-BT
  - photomélangeurs à base d'UTC-PD en GaAsSb

- Réaliser de nouveau un monostable afin de valider les tendances dégagées pendant l'étude théorique
- Améliorer les résultats des antennes photoconductrices en optimisant la croissance du GaAsSb-BT
- Gradient dans la zone d'absorption des UTC-PD en GaAsSb tout en gardant une hétérostructure de type II
- Améliorer les étapes technologiques pour l'intégration monolithique d'antennes cornets



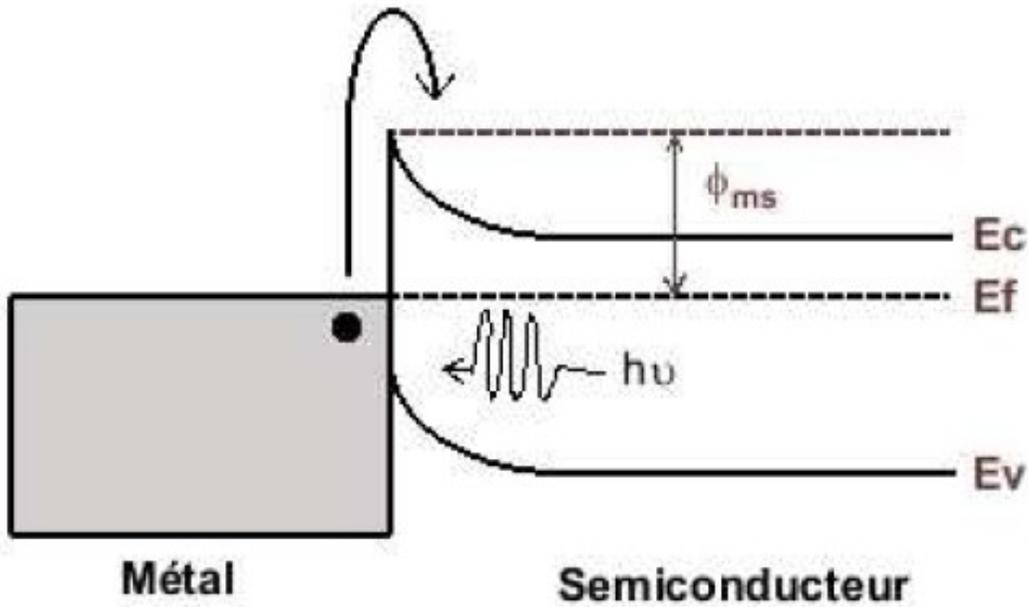
Je tiens à remercier l'ensemble des personnes  
qui ont contribué aux résultats obtenus pendant  
ce travail de thèse



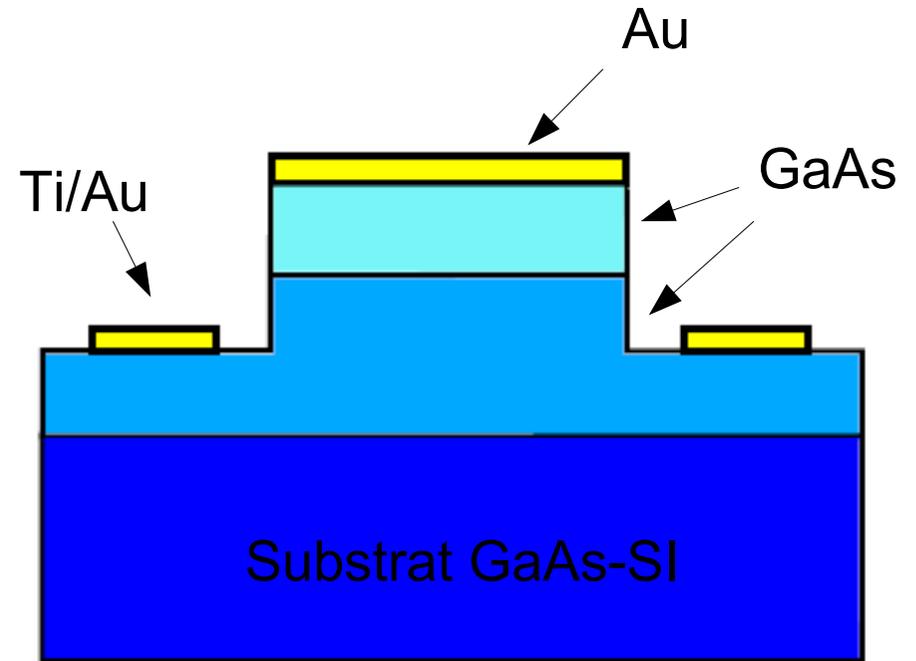
61/61



# Photodiode émission interne (1)

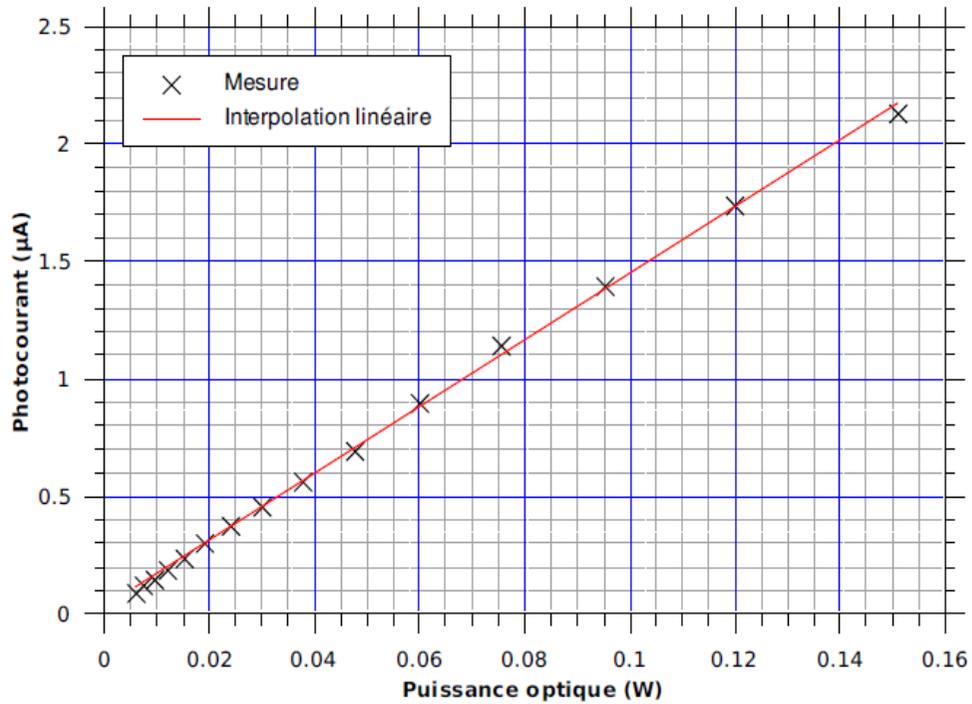


Mécanisme de la photoémission interne

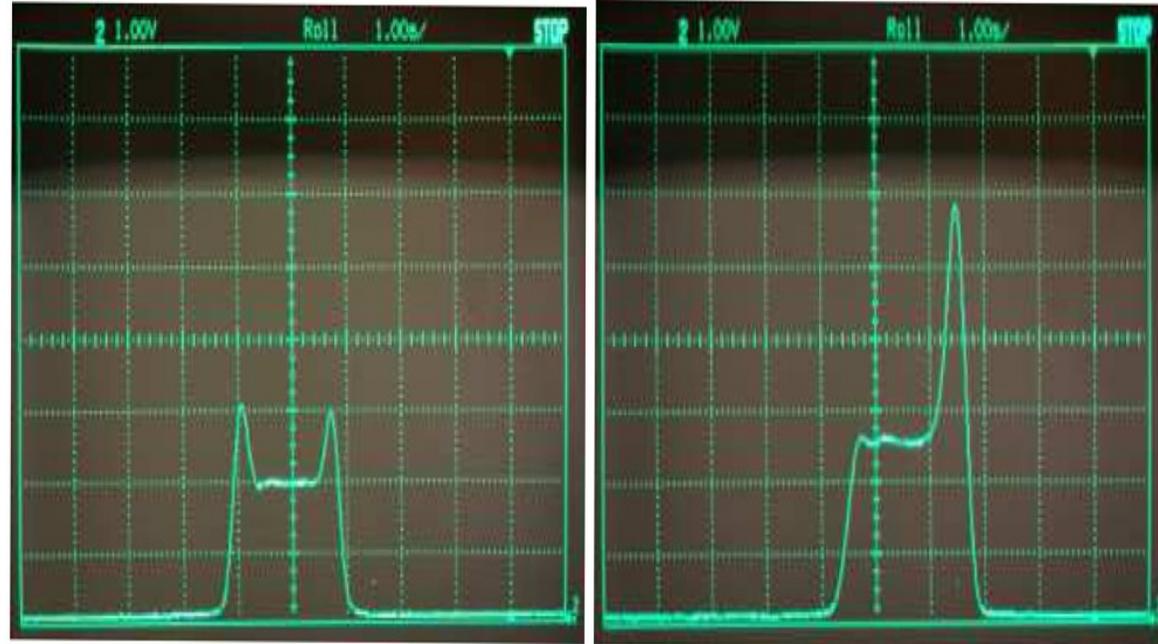


Structure épitaxiale

# Photodiode émission interne (2)



Mesure du photocourant à  $\lambda=1545\text{nm}$ .  
 $R=14\mu\text{A/W}$



Effet de la polarisation sur le photocourant

# Photodiode émission interne (3)

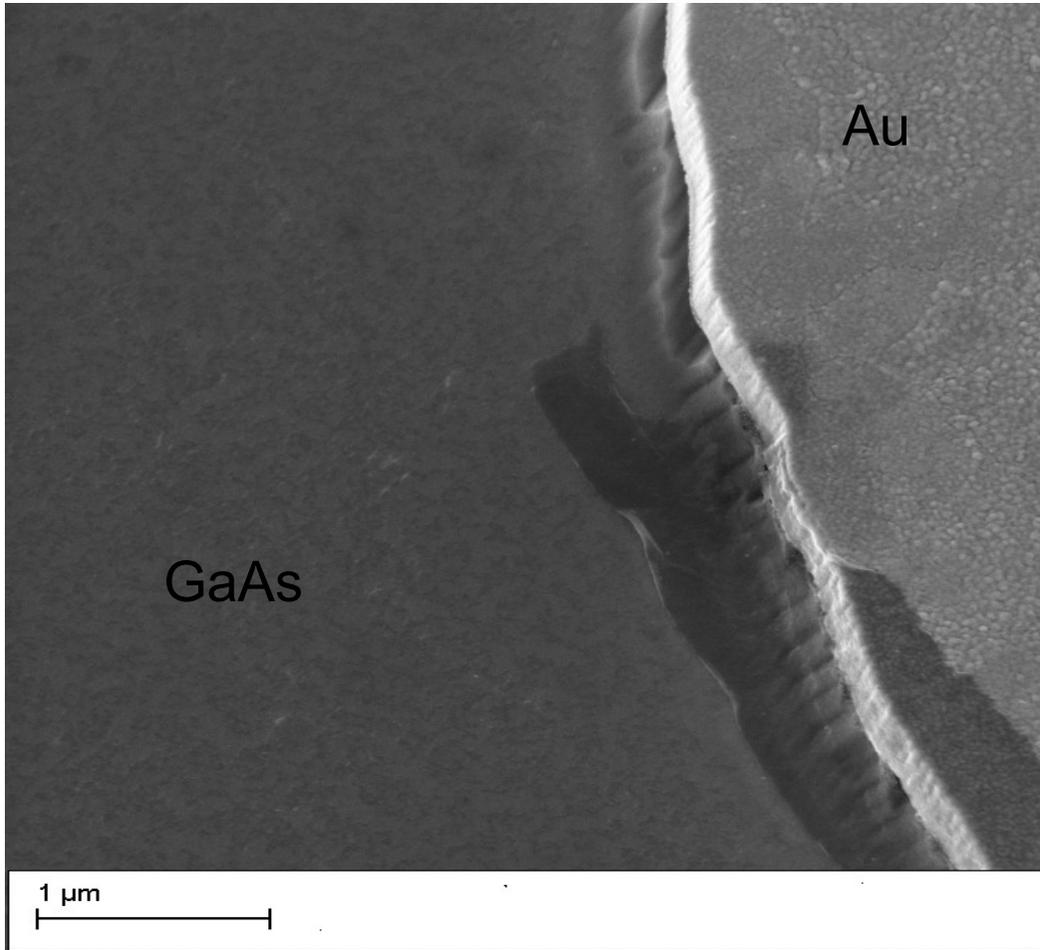
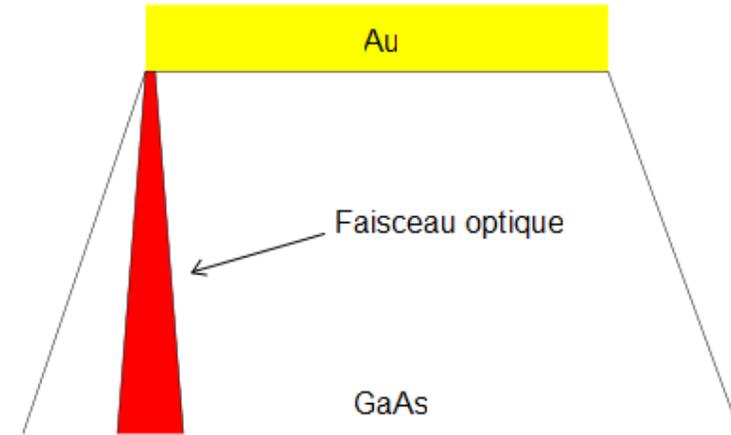
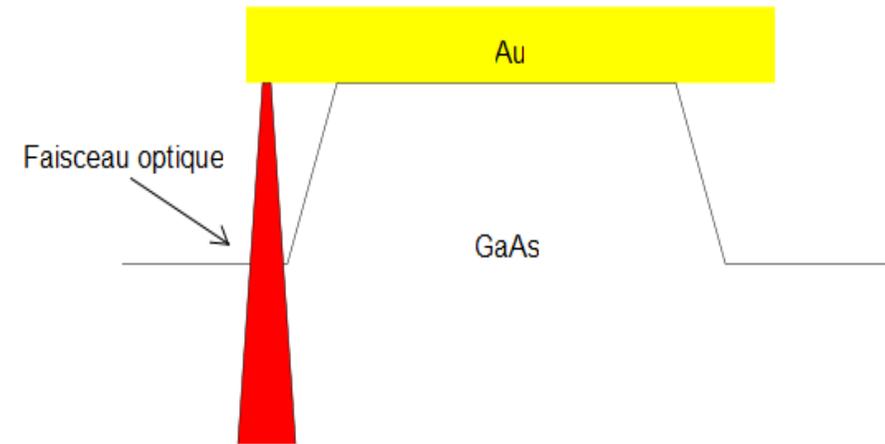


Image MEB du mesa de la photodiode

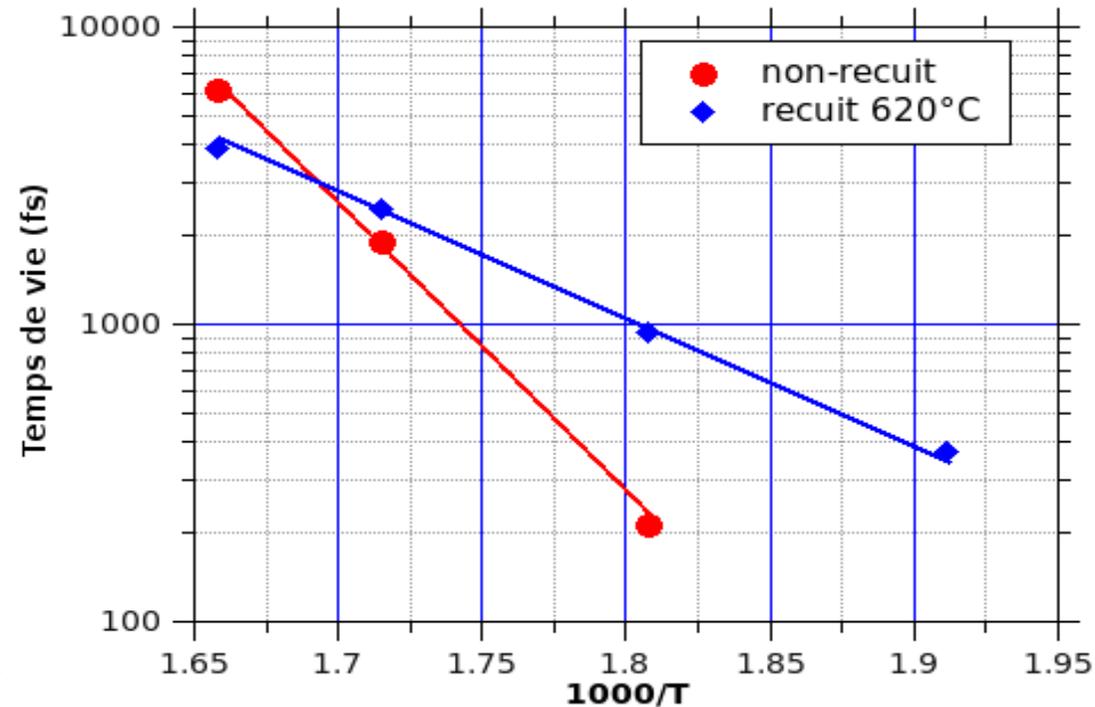
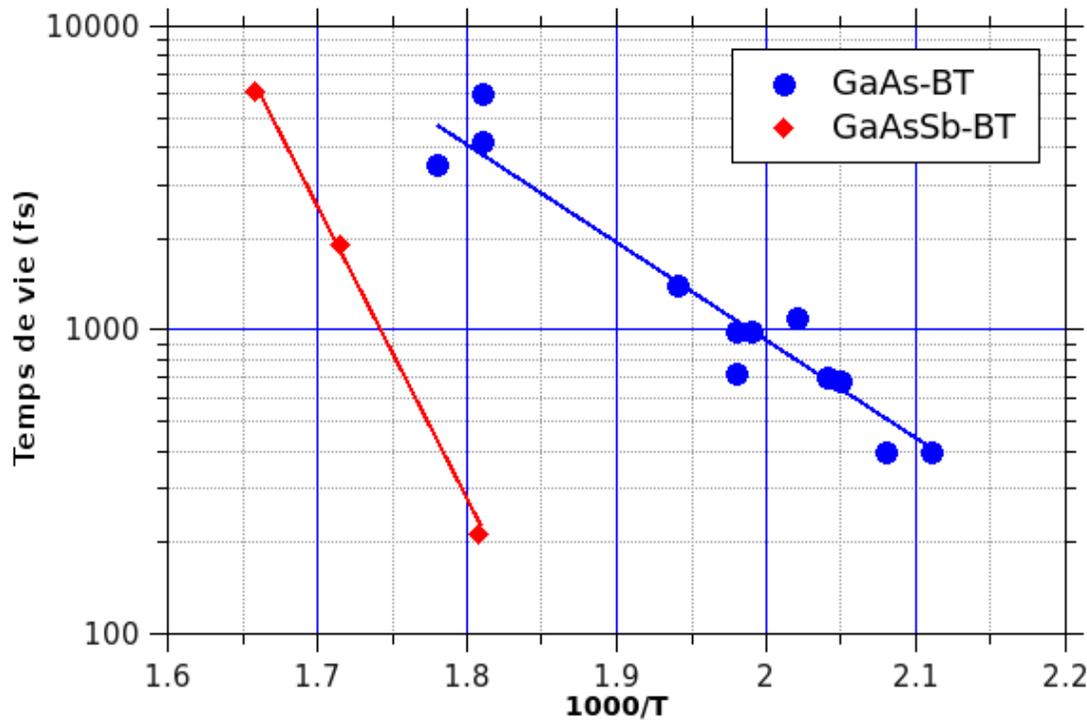


Excitation de plasmons de surface



Cavité optique

# Caractérisation du GaAsSb-BT



- $280^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 1,8 \text{ K}^{-1}$
- $230^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 2 \text{ K}^{-1}$