2004 – 2017 *(3 ANR Pnano successives sur nos microdetecteurs THz)*

Mesoscopics Physics Research Group

Microdetecteurs THz autonomes

Jean-Claude PORTAL

INSA Toulouse
(Institut National desSciences Appliquees)

Institut Universitaire de France (1998-2003 et 2003-2008)
Emerite IUF

portal@insa-toulouse.fr

"La vie ne produit pas de corps symetrique "(L.Pasteur)

" La Symetrie c'est l'ennui ! " (Victor Hugo,Les Miserables)

Marcher pas a pas , n'est qu'avancer ,grace a l' Asymetrie!

1 Ratchet electronique

1-Principe fondamental de base,utilisant l'effet generique de l'Asymetrie

(effet cliquet ou ratchet en anglais)

Rappel :Ratchet mecanique de Feynman , Moteurs moleculaires ,microfluidiques ,.

2-Transfert analogique du ratchet microfluidique au ratchet electronique

L'analogie de l'Asymetrie electronique est concue en fabricant des potentiels asymetrique, a l'aide de reseaux de trous nanometriques et asymetriques (semi-circulaire) , **a l'interface du confinement electronique 2 D** ,d'une heterostructure semiconductrice, choisie pour ses mobilites elevees des electrons , aux temperatures ambiante et spatiale.

Ainsi , le confinement electronique 2D de conduction est fortement module , a l'image d' un efficace tamis qui sera le coeur de la detection THz de notre microdetecteur .
(avec une selection de nos 4 meilleurs materiaux et types d'heterostructures)

3-Fabrication et optimisations geometriques de ces reseaux de trous semi-circulaires , circulaires

(technologies de lithographie electronique nanometriques extremes, avec gravure plasma ,profondeurs controlees a moins de 10 nm ,a l' aide d'etudes et de mesures AFM)(Litho Electronique :Jeol 9300 Georgia Tech,Jeol 6300 CEA)

4-Caracterisations electroniques de ces microdetecteurs ,a l'aide des mesures de transport nano-electronique,avec optimisations des effets de commensurabilite ,
de ces reseaux asymetriques de potentiel ,a comparer aux reseaux symetriques ,en fonction des geometries des trous *(profondeurs et dimensions nanometriques)*

Nous mesurons ces effets de conductivite, a l'aide de tres faible champ electrique et champ magnetique ,des basses temperatures a la temperature ambiante .

5-Mesures des photovoltages sous radiations THz avec reseau des trous (semi-circulaires , circulaires) et sans trous , avec faible champ magnetique **permettant de tester la robustesse de l'asymetrie des potentiels** des reseaux , creee seulement par des reseaux de trous asymetriques .

L'effet du champ magnetique (inferieur a 1 Tesla)entraine les electrons avec une faible courbure de trajectoire ,en attenuant ainsi , leur visibilte de l'asymetrie du potentiel des trous semi-ciculaires.C'est un outil precieux pour optimiser ces effets d'asymetrie et pour optimiser les reponses de photovoltage eleves sous radiations THz .

6-Equipements experimentaux de tests et de mesures de photovoltage ,sous guide d'ondes , avec WR adaptes et polarises avec 6 sources de carcinotrons BWO (Backward Wave Oscillator) **entre 32 et 380 GHz ,**
irradiant nos microdetecteurs (avec et sans champ magnetique)
Puissances des radiations polarisees fournies a travers les WR respectifs (de 50 mW a 10mW) a temperature ambiante

1

2 Ratchet plasmonique

Notre second principe fondamental est la creation et l'utilisation des effets de conduction plasmonique :

C'est celle créée par la radiation THz (a detecter) sur la surface du microdetecteur qui interfere **avec les effets issus des electrons**
et de *la modulation ,de la conduction plasmonique d'un reseau de trous (circulaire) ou meme semi- circulaire , deja utilise pour le ratchet electronique .*

Le ratchet electronique est preponderant aux basses temperatures ***(en raison des mobilites electronique plus elevees).Alors que les effets ratchet plasmoniques donnent des photovoltages THz aussi importants mais ,a temperature ambiante (ou les mobilites electroniques sont toujours bien plus faibles qu' a basse temperature) avec des effets plasmonique predominants .***

Ainsi , le confinement electronique 2D de conduction du microdetecteur est fortement module par la conduction plasmonique du reseau de trous , ***a l'image "d' un efficace tamis" d'effets plasmonique qui est au coeur de la detection THz de notre microdetecteur .***

Plasmons de surface localises , **resonance plasmonique dependantes de la geometrie des nanoparticules,** .., sont tres etudies, durant des decennies et pour de nombreux domaines scientifiques.

L'immense connaissance de tous ces travaux ,nous permet de considerer, que la fabrication de nos trous circulaires de taille nanometrique ,sur nos microdetecteurs ,serait aussi dans une approche phenomenologique ,**l'inverse d'une presence de nanoparticules** (Effets d'influence plasmonique pour une geometrie voisine) et de tailles comparables [4].

Actions de recherches et d'innovations pour nos microdetecteurs THz autonomes

ondes millimétriques (300GHz)

(2002-2018)

Domaines etendus en frequences :

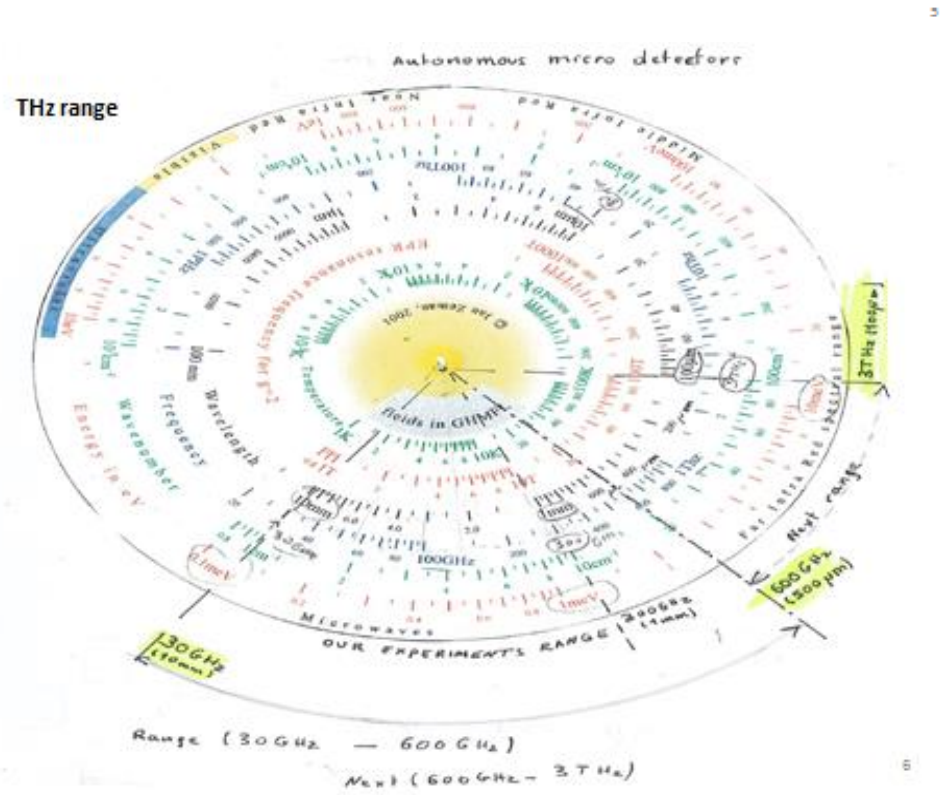
-de 33 a 380 GHz (6 carcinotrons) avec guide d'ondes polarisees

-de 580 a 630 GHz(Source electronique)

Domaine des temperatures

-de l'ambiante aux temperatures spatiales

Pour memoire :Nous depassons la bande Ka (26-40GHz)a la bande D (110-170GHz)



Comment sont nos microdetecteurs THz ondes millimétriques (300GHz)?

Microdétecteurs innovants THz , autonomes, fonctionnant

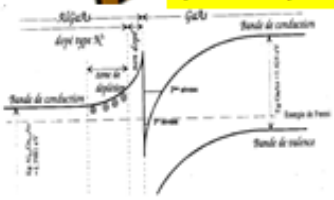
--***a la température ambiante***, avec effets predominants de conduction plasmonique maitrises et accrus par reseaux de trous (**circulaires ou semi circulaires**) fabriques par la litho electronique

ratchet plasmonique

--***aux températures spatiales***, avec effets predominants de la conduction electronique asymetrique par reseaux de trous **semi circulaires** fabriques par la litho electronique

ratchet electronique

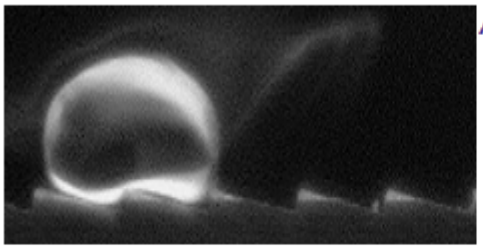
Tamis de trous Modulateur (electronique ou plasmonique)



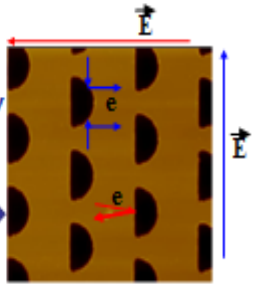
Ces deux effets sont fortement couples avec la conduction 2 D de l' heterostructure ,choisie a l'image d' un efficace tamis qui sera le coeur de la detection THz de notre microdetecteur ,sans jamais traverser l'epaisseur de 10 nm ,de la couche 2 D)

7

"Ratchet" effect in semi-conductors ?



Analogy



AFM image of the antidot lattice

1) Water droplets
2) Metallic sawtoothed surface
3) Heat

analogy

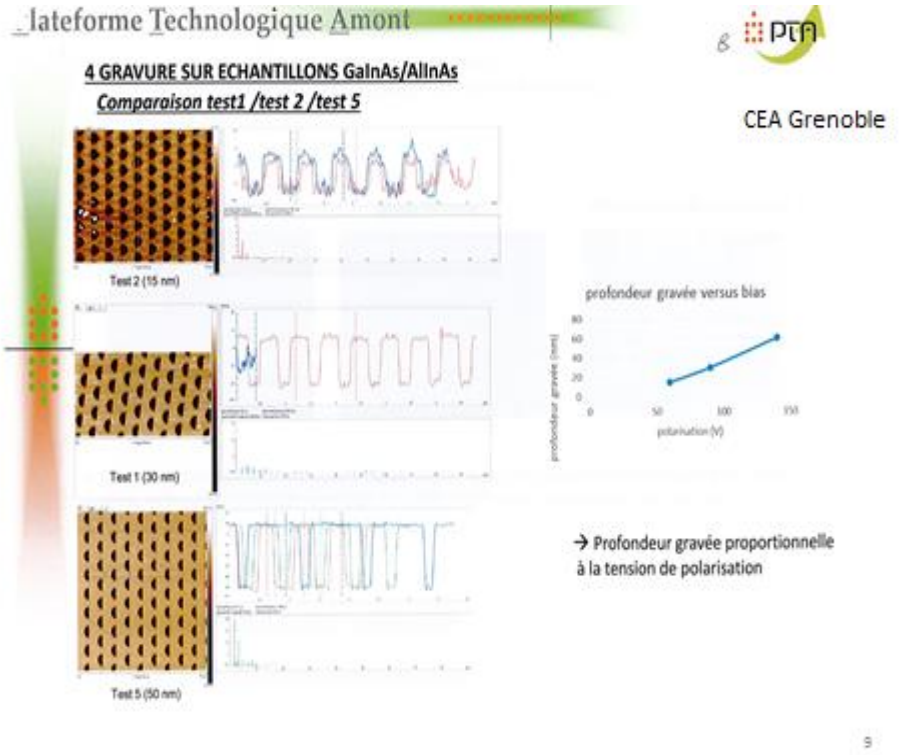
1) electrons
2) Semicircular antidot lattice in a two dimensional electron gas
3) Linearly polarized microwave irradiation $\vec{E}$

Under polarized microwave irradiation, the electronic scattering with the asymmetric antidot lattice, induce a directed electronic motion.
It is the first experimental evidence of a large ratchet photovoltage device (about 60 mV for cell of 230 microns X 50 microns).

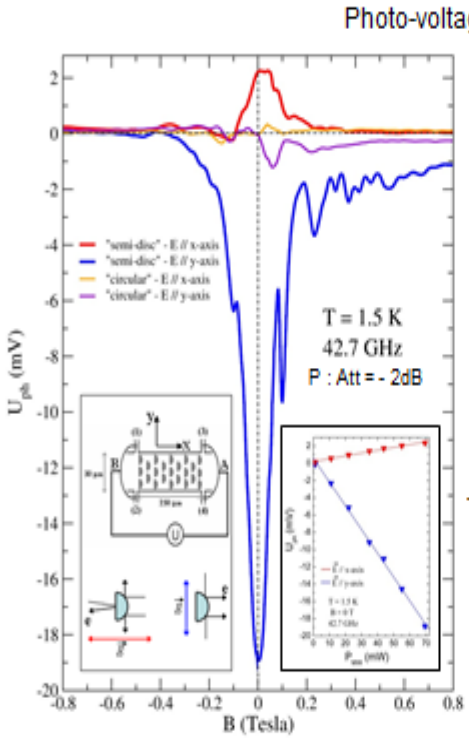
Recent theoretical works :

[A.D. Chepelianskii and D.L. Shepelyansky (Phys. Rev. B 71, 052508, 2005)]
[A.D. Chepelianskii (Eur. Phys. J. B 52, 389, 2006)]

8



Effet ratchet dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs



-S. Sassine et al., Phys. Rev. B 78, 045431 (2008) [Selected for the August 11, 2008 issue (Volume 18, Issue 6) of the Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology].

- Prix de Thèse 2007 de l'ED GEET de Toulouse.

-Prix International AIXTRON 2007 (Nanosciences, depuis sa création en 1999, première fois pour la France).

-S. Sassine et al. Physica E 40, 2043 (2008)

10

2 Ratchet plasmonique

Creation et utilisation des effets de conduction plasmonique

C'est celle créée par la radiation THz (a detecter) sur la surface du microdetecteur qui interfere **avec les effets issus des electrons et de** *la modulation ,de la conduction plasmonique d'un reseau de trous (circulaire) ou meme semi- circulaire , deja utilise pour le ratchet electronique .*

*Ainsi , le confinement electronique 2D de conduction du microdetecteur est fortement module par la conduction plasmonique du reseau de trous , **a l'image** "d' un efficace tamis" **d'effets plasmonique qui est au coeur de la detection THz de notre microdetecteur** .*

Plasmons de surface localises , **resonance plasmonique dependantes de la geometrie des nanoparticules,** .., sont tres etudies , depuis des decennies et dans de nombreux domaines scientifiques.

Les effets de resonance plasmoniques 2 D ,produits par lithographie electronique sur les nano particules(Prof.R.VanDuyne)sont un guide utile pour etudier ces effets sur des trous (l'inverse d'une particule)

Effets plasmoniques pour une geometrie voisine et de tailles comparables

11

Plateforme Technologique Amont

PTA

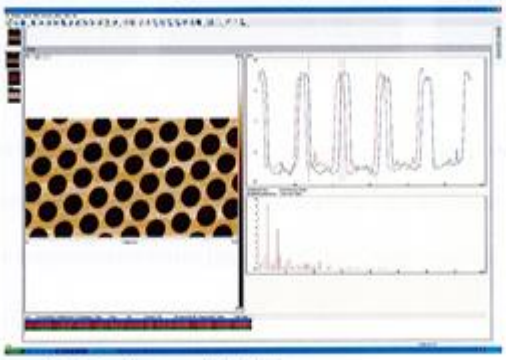
CEA Grenoble

6 GRAVURE SUR NOUVEAU DESIGN GaInAs/AlInAs

Nvdesign 4 (avec trois sondes)

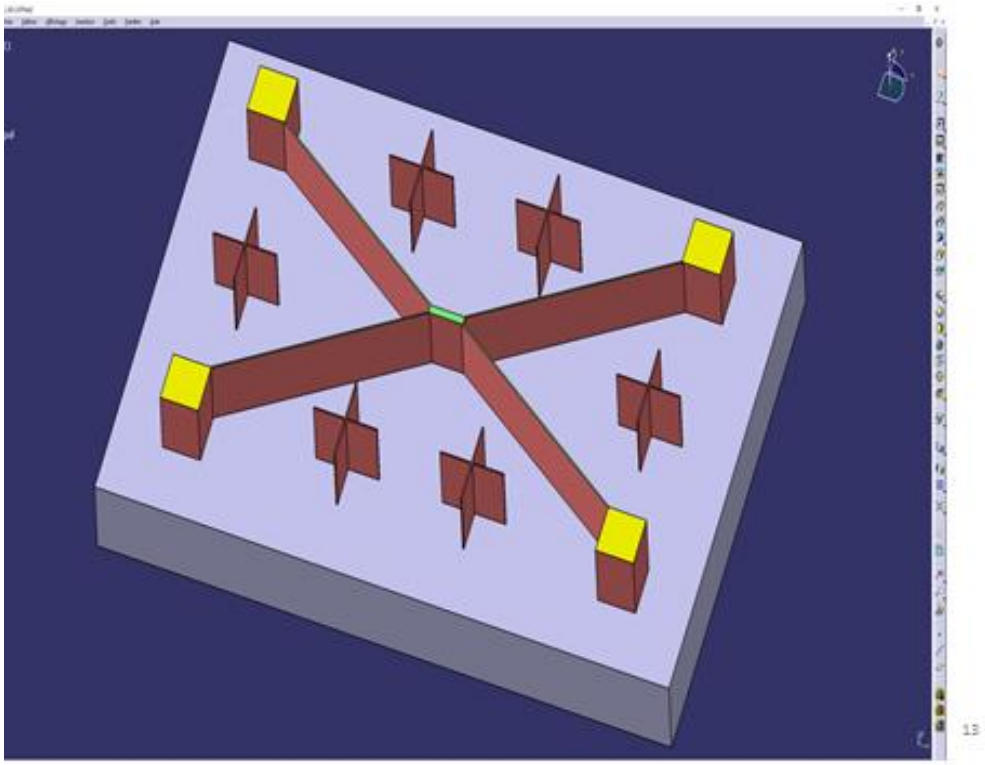
→ **Mesure AFM après caractérisation électrique (soudure + désoudure)**

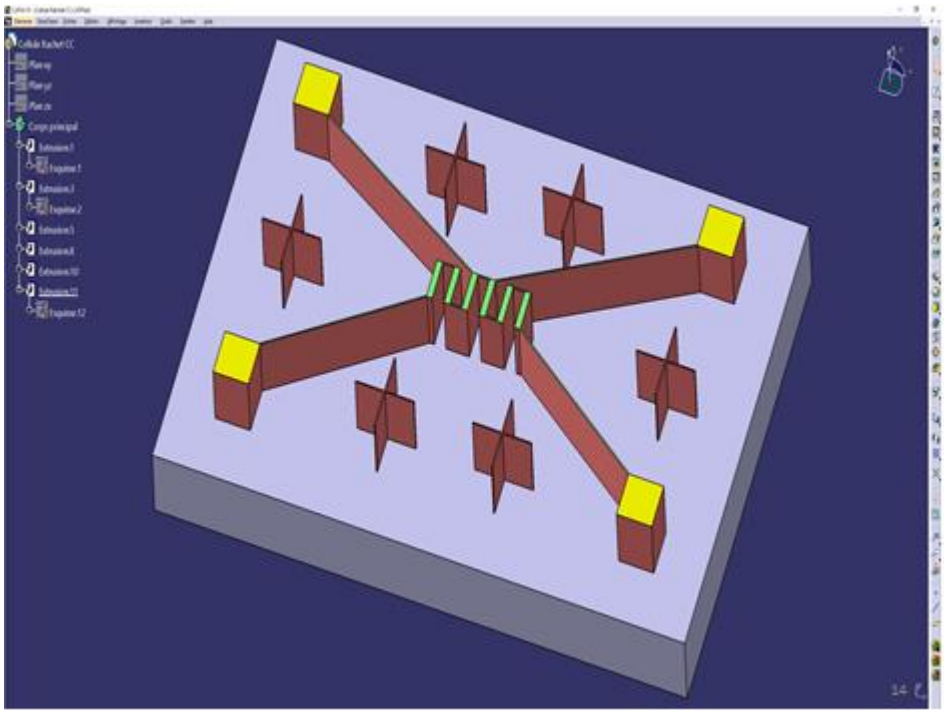
Après gravure / Nettoyage / Stripping



→ *Profondeur gravée 30 à 32 nm*
→ *Diamètre des trous 410 nm et période de l'ordre de 580 nm*

12





Polarisation MW parallèle

Mesures longitudinales

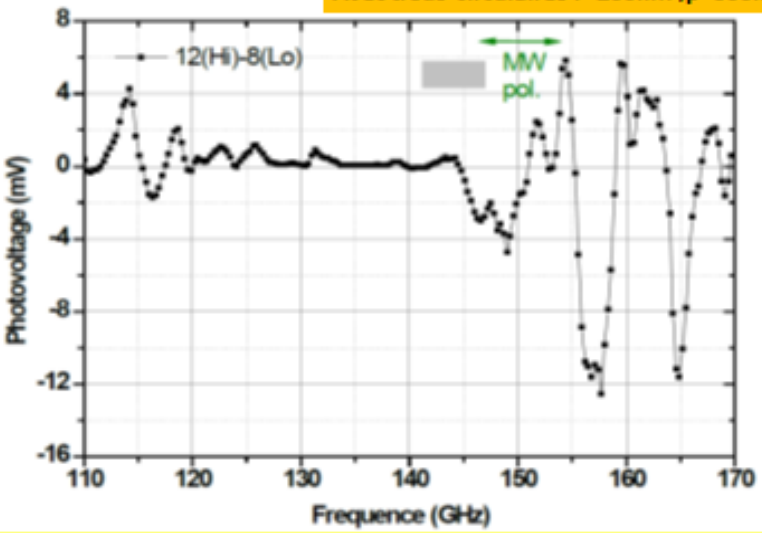
Gamme: 110 - 170 GHz

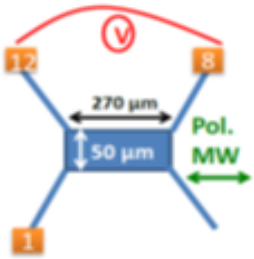
With WR 6

Avec trous circulaires r=200nm ,p=600nm

Partenaire 2

GaInAs/ AlInAs





Temperature ambiante

p 27

Oscillating modes of the plasmonic conduction of surface of the cell (with network of circular antidots) with series of beatings status-enhancing force and dependent on the relationship wavelength / geometry of the cell

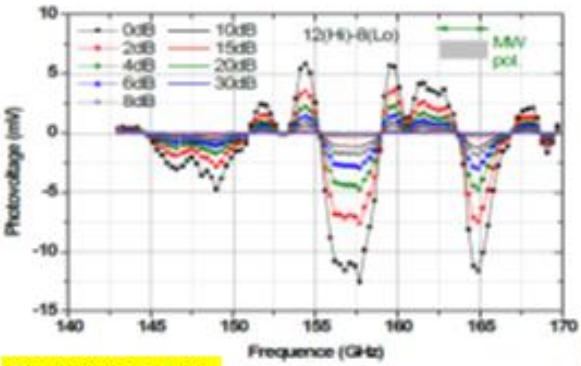
Autonomous detection of THz radiation with a sensibility of 10 microwatt has room temperature

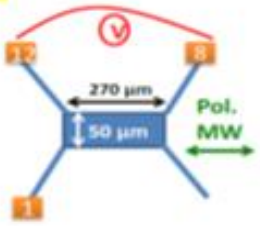
Polarisation MW parallèle

Mesures en puissance entre 143 et 170 GHz

With WR 6 Gamme: 110 - 170 GHz

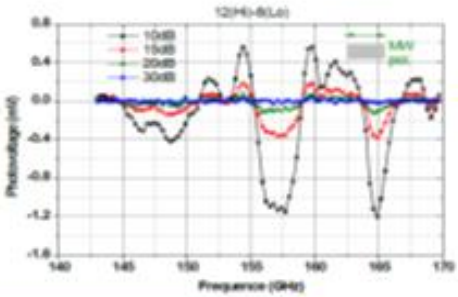
GaInAs/ AlInAs





Temperature ambiante

Zoom sur les plus basses puissances micro-ondes



Impossible d'afficher l'image.

- In zero dB, the average power detected is 320 uW.
- With a mitigation of power of 30 dB, the limit power detected is of 10uW (WR 6)

P 30

Quelques exemples de résultats avec cellules ratchet THz *

1—Faisabilité d' imagerie démontrée: 1ère image d'une fourchette plastique réalisée par transmission à 601 GHz avec une cellule ratchet (III-V)

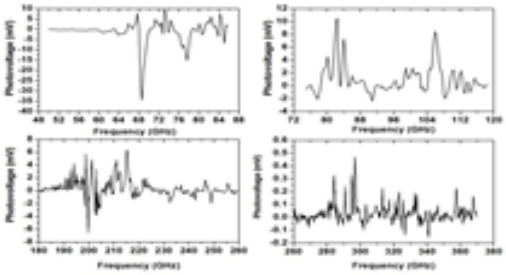
Cette image permet de detecter une vision interne du materiau, soumis aux contraintes mecaniques de la fabrication des 4 fourches ,a travers une embase Initiale plane,apres avoir ete soumise a une forte pression d'une matrice de formage en temperature .Les effets internes des multiples contraintes mecaniques sont visibles sur l'image,grace aux effets des radiations THz.

On a utilise une cellule ratchet (III-V) de 230um X 50 um, detectrice a temperature ambiante GaInAs /AlInAs

Nouveaux nano détecteurs autonomes de radiations électromagnetique *(cellule ratchet allant du GHz à plusieurs centaines de GHz et vers le THz)*

* En cours de valorisation

2--Photovoltage mesure , en fonction de la fréquence, à température ambiante avec source BWO THz en fonction de la fréquence (48 a 370 GHz) à température ambiante,avec guide d'ondes WR approprie (cellule ratchet III-V,s ***GaInAs /AlInAs)***



Heterostructures a semiconducteurs: Type III-V ,IV,...
Le seul appareil de mesure necessaire est un voltmetre electronique

Sans reseau de trous

3--Energy free microwave based signal communication using ratchet effect Si/SiGe

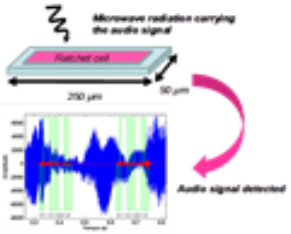
Sound of Beethoven's 5th symphony modulated PWM 50 kHz,with microwaves at 45 GHz (Si/SiGe)

THz Imagerie

Sans reseau de trous

Responsivité and sensibilité calculées pour les differents maxima de photovoltage

Frequency (GHz)	Power (mW)	Voltage (mV)	Responsivity (V/W)	Sensitivity (V/W)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]



THz Technologies de l'information

17

1 Responsivity et NEP pour Si/SiGe microdetecteur a basse temperature

Avec reseau de trous (r=120nm ,p=600nm)

E.S.Kannan et al, Energy free microwave based signal communication using ratchet effect
APPL. PHYS.LETT. : 101 ,14 ,143504 (2012)

- The ratchet based microwave detectors are implemented as receivers of amplitude, frequency, and pulse width modulated signals.
  *The detector has a peak responsivity of 994 V/W
- and has excellent signal to noise ratio in the measurement bandwidth with its noise equivalent power of about 0.01 **pico W/Hz

and 6.3 x 10* 7 cmHz/W detectivity.

Cette mesure a ete faite en 2012 sur une heterostructure Si/SiGe (cellule ratchet electronique 230 um X 50 um, sur une barre de Hall)avec trous fabriques **(r=120nm ,p=600nm)**

Resume

The ratchet based microwave detectors are implemented as receivers of amplitude,frequency, and pulse width modulated signals. ***The detector has a peak responsivity of 994 V/W and has excellent signal to noise ratio in the measurement bandwidth with its noise equivalent power of about 0.01 pico W/Hz and 6.3 .10*7 cmHz/W detectivity.***
The frequency limit of detection can be tuned by a suitable choice of the antidot parameters. The advantages of the utilizing ratchet based active antennas are simple circuitry, controllable spectral range, no power consumption, and natural rejection of tray electromagnetic radiations. © *2012 American Institute of Physics. [http://dx.doi.org/10.1063/1.4756786]*

18

INNOVATION !

.-Ces nouveaux microdetecteurs THz (250 microns X 50 microns), sont adaptes avec guide d'ondes type WR et ils sont autonomes,

-sans transistors ,
-sans antennes,
-sans alimentations exterieures.

Ils sont passifs et ne deviennent actifs et operant qu' en presence d'une excitation THz,
avec polarisation,(modulee par des signaux transportes et a extraire: *technologie de l'information, imagerie,.,*)

Cette excitation THz active le microdetecteur , « joue le role d'un interrupteur»
et le photovoltage produit, en fonction de la frequence (de 32 a 380 GHz) est mesure directement **avec un voltmetre electronique**, entre des dizaines de microvolts et des dizaines de mV (c'est le seul appareil de mesure necessaire)