

Summary in French

Introduction

Le domaine Terahertz (THz), qui s'étend approximativement entre 0.1 THz et 10 THz, entre les ondes micro-ondes et infrarouges du spectre électromagnétique est le domaine de fréquence le moins utilisé. Les ondes THz possèdent des propriétés spécifiques : elles sont peu énergisantes, non ionisantes, et très peu ou très fortement absorbées par l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Jusqu'à maintenant, les ondes THz sont relativement peu étudiées et leurs applications dans le domaine public sont pratiquement inexistantes. Ceci s'explique par la difficulté d'appliquer les méthodes traditionnelles de l'électronique ou de l'optique pour réaliser les émetteurs et les récepteurs dans le domaine THz. Cependant, de nombreuses applications potentielles des ondes THz existent tant en science qu'en technologie : citons par exemple l'imagerie pour reconnaître et détecter la présence de molécules ou de corps étrangers dans les applications industrielles, médicales ou de sécurité. En effet, contrairement aux lumières visibles ou infrarouges, les ondes THz pénètrent des matériaux comme le bois, les plastiques, les vêtements ou le papier. Les rayonnements THz peuvent détecter des réactions chimiques et la présence de contaminants, reconnaître spécifiquement des gaz et des molécules. Ces propriétés sont dues à la présence de nombreuses résonances rotationnelles et vibrationnelles dans cette gamme de fréquence, en particulier pour les molécules organiques. Le rayonnement THz est aussi intéressant pour les applications de télécommunication sans fil très large bande, l'utilisation d'une porteuse à des fréquences plus élevées que celles des micro-ondes permettant un débit plus élevé. Pour permettre ces applications, des émetteurs THz puissants, des détecteurs sensibles et une instrumentation performante sont nécessaires. C'est pourquoi de nombreuses recherches récentes tentent de faire progresser cette technologie dans les domaines de la génération et de la détection des ondes. Elles ont surtout porté sur la montée en fréquence des dispositifs électroniques, sur l'extension vers les grandes longueurs d'ondes des dispositifs optiques et sur le développement de dispositifs optoélectroniques ultrarapides. De nombreuses recherches portent sur la recherche de nouveaux concepts et de nouveaux matériaux pour ces fonctions de génération et détection.

Pour faciliter l'essor de système Thz moderne, il faut développer des sources THz puissantes, compactes, réglables en fréquence et fonctionnant à la température

ambiante. Les superréseaux semi-conducteurs soumis à un champ électrique continu suscitent beaucoup d'intérêt puisque les oscillations de Bloch dans ces matériaux peuvent fournir du gain et permettre une émission THz. La fréquence d'émission est facilement ajustable avec l'amplitude du champ électrique continu appliqué. Des résultats théoriques et expérimentaux précédents ont démontré l'existence d'oscillations de Bloch et de gain à température ambiante dans des superréseaux semiconducteurs. Dans ce mémoire, j'ai utilisé une conception avancée, la fabrication et les mesures de superréseaux semi-conducteurs pour étudier les oscillations de Bloch et le gain associé.

Suivant la manière d'injecter les électrons dans le superréseau, deux dispositifs différents ont été développés : 1) des dispositifs utilisant des superréseaux dopés, où les électrons sont fournis par les dopants ; 2) des dispositifs utilisant des superréseaux non dopés avec création de paires électron-trou photoexcités par des impulsions optiques femtosecondes. Bien que ces deux dispositifs utilisent les oscillations de Bloch, la mécanique quantique décrivant ces effets est différente : les électrons dans un superréseau dopé n'ont aucune relation de phase entre eux tandis que les électrons photogénérés le sont de façon cohérente avec une relation de phase fixe.

Des superréseaux semiconducteurs dopés pour la réalisation d'émetteurs THz

Avec les superréseaux semiconducteurs dopés, nous avons conçu, fabriqué et testé des structures en cascade quantique utilisant des couches AlGaAs/GaAs. Cette structure utilise un injecteur électronique basé sur la résonance des phonons LO : les électrons se déplacent dans un superréseau fin en oscillant (Oscillation de Bloch) puis relaxe vers le superréseau suivant à travers l'injecteur. La région de l'injecteur contient trois ou quatre puits quantiques dans lesquels un puits large permet la relaxation par émission de phonons LO et les deux ou trois autres puits permettent un alignement des niveaux énergétiques assurant l'extraction des électrons de la structure précédente et l'injection dans la structure suivante. La Figure 1 détaille la réalisation de ce superréseau.

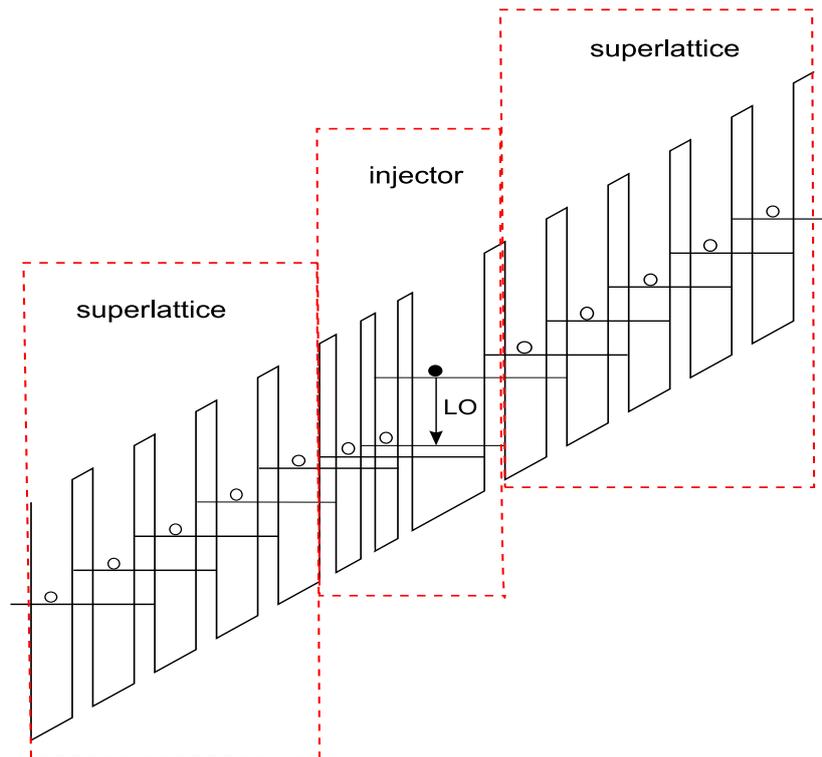


Figure 1: Schéma de la structure utilisant un injecteur basé sur la résonance des phonons LO

Le superréseau fin associé à l'injecteur forme un module élémentaire qui est répliqué soixante-dix fois pour former une région active de $10\ \mu\text{m}$ d'épaisseur. Ce module est ensuite inséré dans trois types de guides d'onde pour effectuer les mesures. Le premier est un guide d'onde avec une surface semi-isolante supportant des plasmons de surface et une émission par la tranche. Le second est un guide d'onde à émission de surface grâce à un réseau sous longueur d'onde gravé sur la surface semi-isolante. Le dernier est un guide d'onde à émission de surface avec deux surfaces métalliques gravées avec des réseaux sous longueur d'onde.

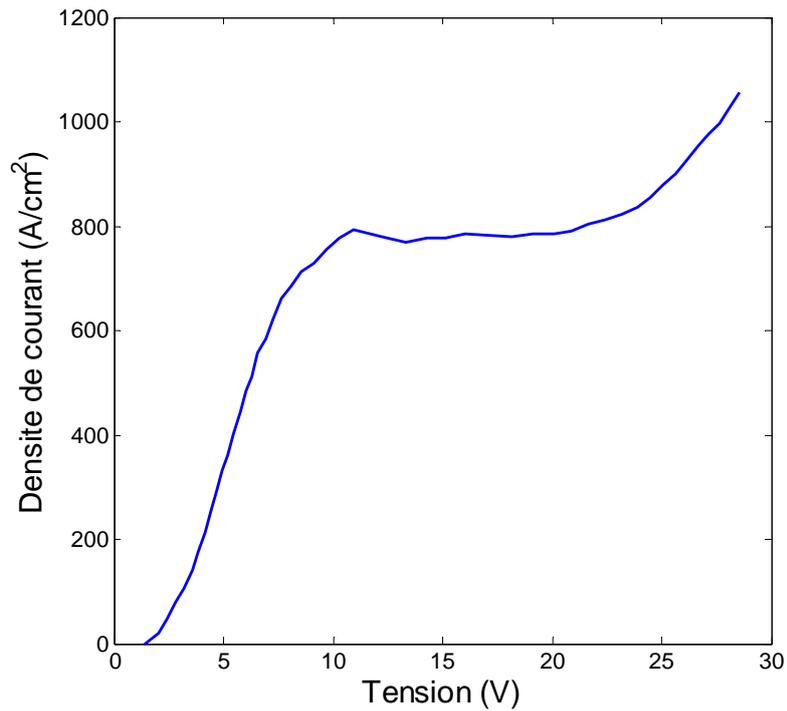


Figure 2: caractéristique courant-tension du composant L527

La Figure 2 présente la courbe courant-tension du composant L527. Le courant commence à croître avec la tension appliquée au fur et à mesure que les bandes d'énergies s'alignent. Puis, pour des tensions comprises entre 10V et 20V, le courant se stabilise et décroît même à 11V, traduisant l'apparition d'une résistance différentielle négative (RDN), comme attendu par la conception. La présence d'une RDN et l'absence d'oscillation de courant confirme l'absence de la formation de domaine électrique, conformément à la conception.

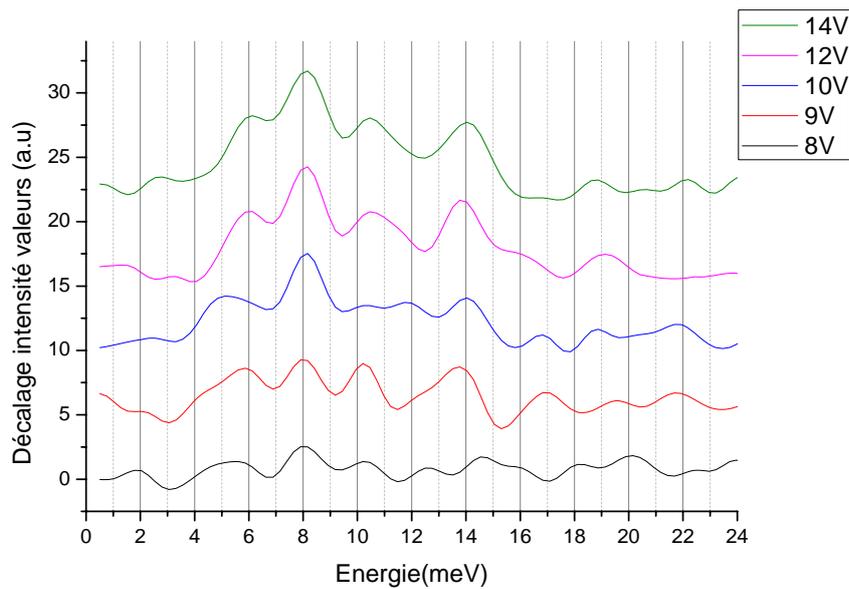


Figure 3: spectre d'électroluminescence de l'émission à 10K en fonction de la tension du dispositif L527 : guide d'onde à deux surfaces métalliques émettant par la surface.

La Figure 3 montre le spectre d'électroluminescence du dispositif L527 ayant un guide d'onde à deux surfaces métalliques munies d'un réseau sous-longueur d'onde pour émettre par la surface. Un pic d'électroluminescence situé autour de 10 meV (2.4 THz) est observé. Cependant, contrairement aux prédictions théoriques, la fréquence d'émission ne dépend pas de la tension appliquée. Des études complémentaires d'émission du corps noir et de l'émission liée au courant latéral circulant dans le substrat AsGa dopé N⁺ présentent un spectre très proche, indiquant que le signal observé peut être lié à l'émission du corps noir ou à des transitions liées aux impuretés.

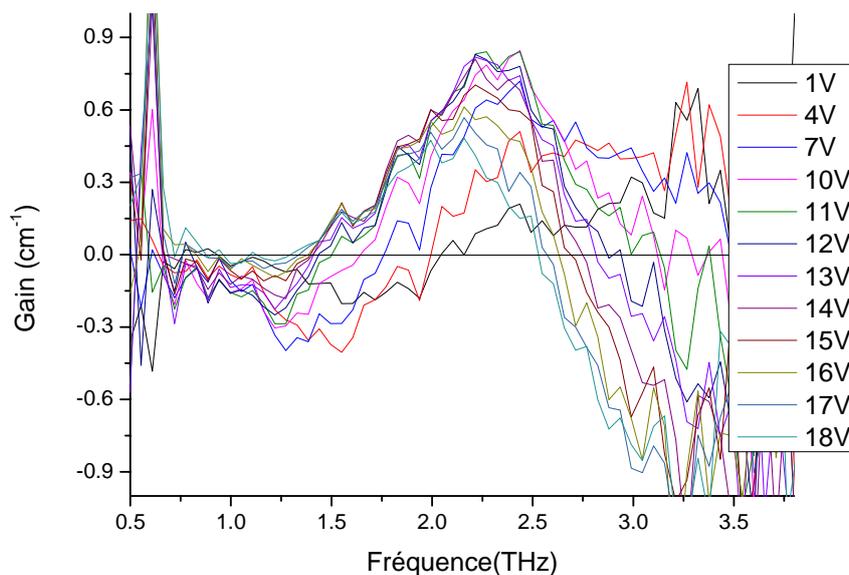


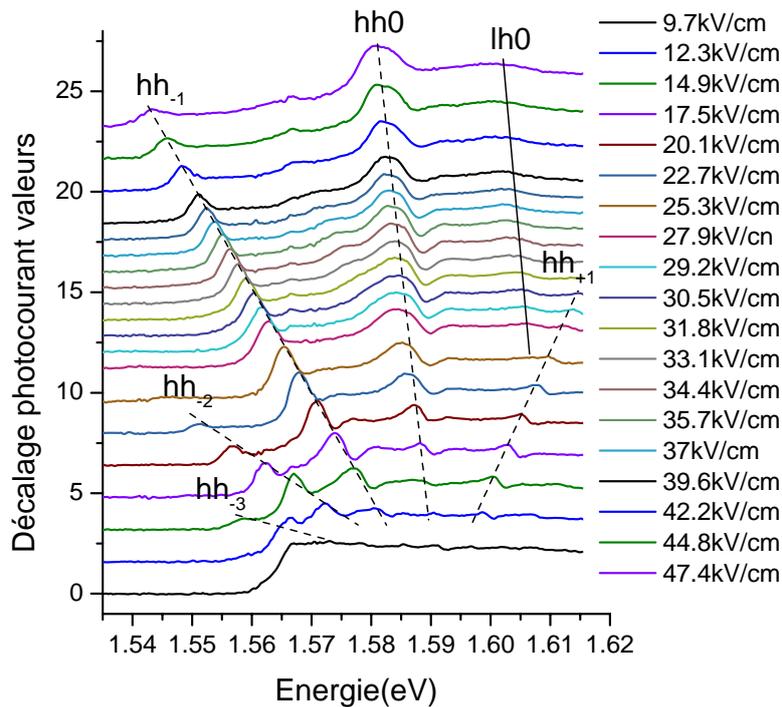
Figure 4 mesure du gain du dispositif L358

Le dispositif est muni d'un guide d'onde avec une surface semi isolante supportant des plasmons de surface. L'étude du gain est faite par spectroscopie THz dans le domaine temps. Comme illustré dans la Figure 4, le passage des pertes au gain s'effectue autour de 3 THz, mais la fréquence de cette transition décroît avec l'augmentation du champ électrique appliqué contrairement aux prédictions théoriques. Comme ces résultats ne dépendent pas de la conception des couches du superréseau, les transitions électroniques entre états résonants et états localisés sur les impuretés, ainsi que les transitions électroniques dans les sous-bandes contribuent certainement au résultat obtenu.

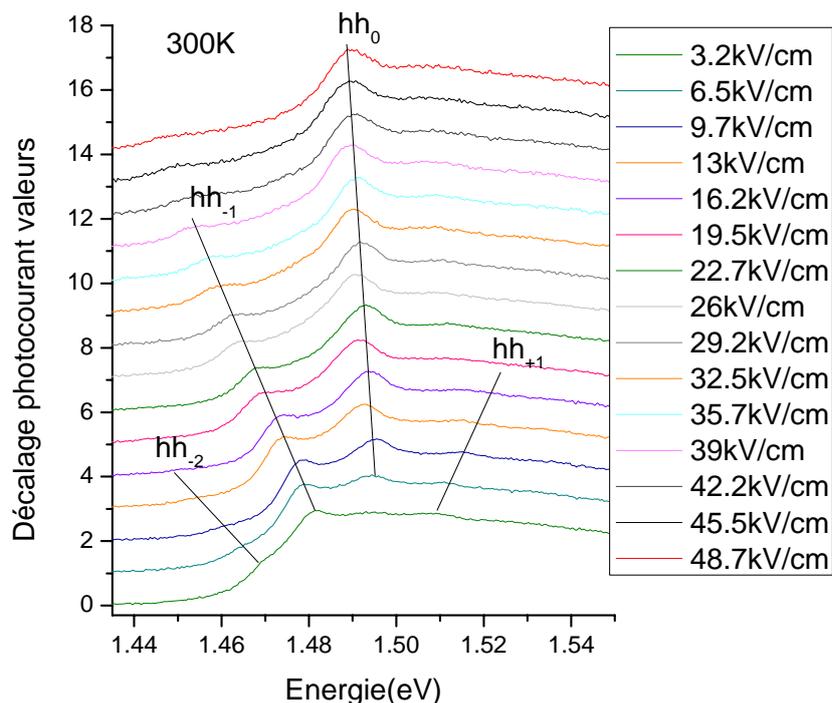
Pour résoudre ce problème des transitions sur les états d'impuretés, il faudra concevoir de nouveaux dispositifs opérant à des fréquences plus élevées, entre 12 meV (3THz) et 24 meV (6THz). Dans cette gamme de fréquence, les oscillations de Bloch devraient être à des fréquences supérieures à celles des transitions entre états d'impuretés, permettant de séparer les deux contributions. Comme cette gamme de fréquence reste inférieure de 12 meV à la fréquence de résonance de la diffusion sur les phonons LO dans le GaAs, cette diffusion devrait rester marginale permettant à une large part du transport électronique de continuer à contribuer au gain de Bloch.

Spectroscopie dans le domaine temps de l'émission de Bloch

Les oscillations de Bloch sont étudiées dans des superréseaux non dopés excités par des impulsions laser femtosecondes. Dans cette étude, l'épaisseur de la structure reste inférieure à $1.5 \mu\text{m}$ et l'excitation optique ne crée qu'un courant faible, aussi la formation de domaine électrique devrait être évitée. Les paquets d'électrons créés par l'impulsion optique devrait osciller et émettre des ondes THz dans l'espace libre. Les premières mesures de photocourant avec un spectromètre à Transformée de Fourier permettent de vérifier l'existence d'Echelle de Wannier Stark (EWS) dans ces dispositifs non dopés. L'existence d'EWS à basse température et à température ambiante a été observée pour le dispositif B9R231 comme le montrent les résultats de la figure 5.



a) Spectroscopie du photocourant à 10K



b) Spectroscopie du photocourant à température ambiante

Figure 5 Spectroscopie du photocourant

Les oscillations de Bloch sont ensuite mesurées par spectroscopie THz dans le domaine temps. La figure 6 présente le signal transitoire dans le domaine temps ainsi que sa transformée de Fourier pour différents champs électriques appliqués. Les résultats expérimentaux montrent une croissance de la fréquence linéairement avec le champ appliqué, en bon accord avec les prédictions théoriques. Comme les échelles de Wannier Stark ont été observées à température ambiante dans un échantillon, un nouveau système de spectroscopie THz dans le domaine temps, fonctionnant à température ambiante, va être développé pour étudier les oscillations de Bloch. Le système expérimental utilisera des impulsions optiques de 15 fs et un fin cristal électro-optique de ZnTe ou de GaP pour effectuer une détection THz cohérente jusqu'à 30 THz. Nous prévoyons également d'étudier le gain des oscillations de Bloch par une technique de pompe optique sonde THz. Comme il n'y a encore jamais eu d'observation directe du gain dans des structures non dopées, cette expérience

apportera de nouvelles connaissances sur la physique des oscillations de Bloch et sur leurs applications potentielles.

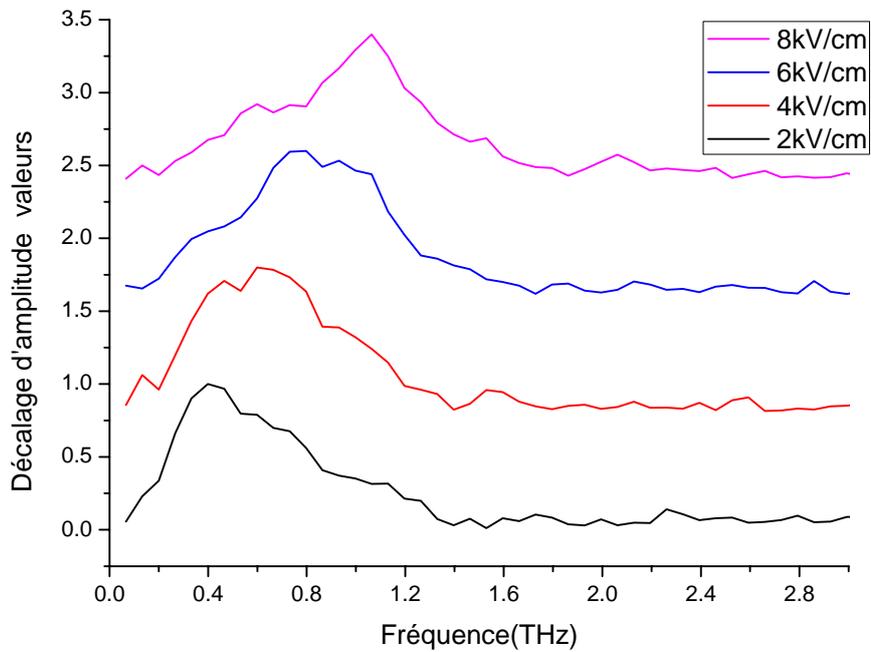
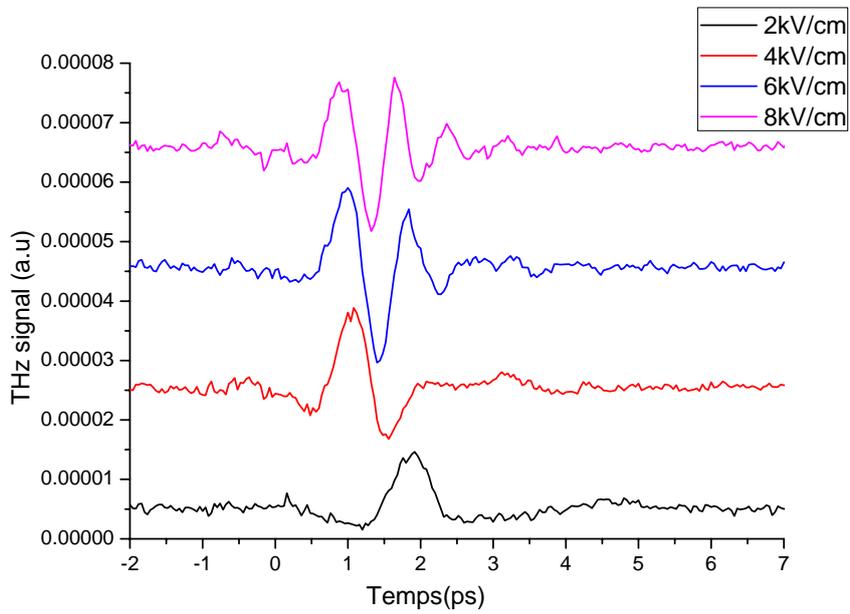


Figure 6: oscillations de Bloch mesurés :
a) dans le domaine temps b) dans le domaine fréquentiel

Etude par photocourant des échelles de Wannier Stark

Le mémoire aborde ensuite l'étude du photocourant dans le superréseau en fonction de la tension appliquée quand l'énergie des photons de la pompe optique laser est inférieure à la transition intrapuits électron-trou lourd des superréseaux non dopés. En fait, en fixant l'énergie des photons d'excitation à une valeur inférieure à celle de la transition électron-trou lourd (hh_0), les indices négatifs dans l'échelle de Wannier Stark se traduisent par des pics de photocourant en fonction du champ électrique appliqué. Les résultats expérimentaux mesurés avec une puissance optique de $6 \mu\text{W}$ sont présentés dans la Figure 7.

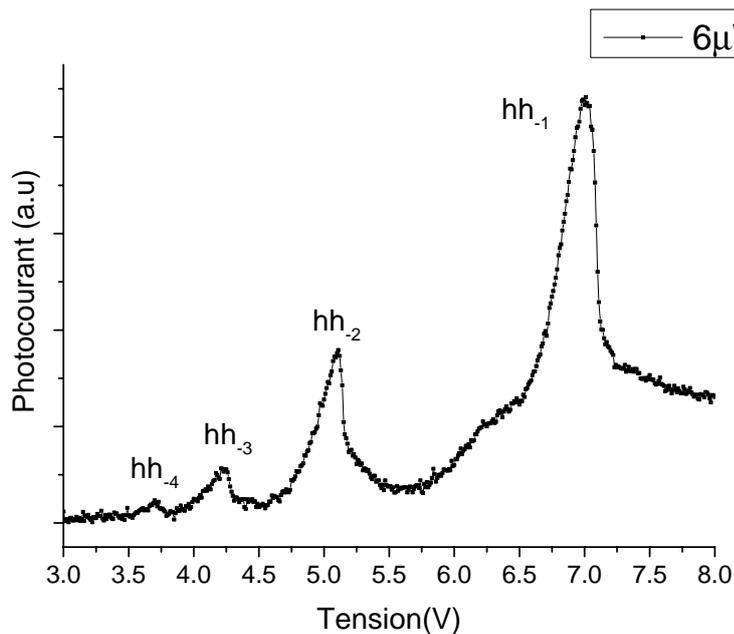


Figure 7: photocourant en fonction de la tension mesurée pour une puissance optique de $6 \mu\text{W}$

L'évolution du photocourant en fonction de la tension se comporte de manière inattendue lorsque la puissance optique augmente : l'amplitude des pics de

photocourant associés à une transition résonante entre états de l'échelle de Wannier Stark évolue linéairement avec la puissance optique alors que la transition se déplace vers des tensions plus élevées et que la forme du pic, qui était une lorentzienne symétrique, devient asymétrique jusqu'à présenter une zone de résistance différentielle négative (RDN). On obtient une résistance différentielle négative contrôlable par la puissance du pompage optique. Les résultats sont présentés dans la Figure 8. Ces résultats peuvent s'interpréter par l'accumulation de porteurs photogénérés avec l'augmentation du pompage optique. Cette accumulation dans les puits quantiques proches de la couche tampon écran le champ électrique ce qui entraîne l'apparition d'une résistance différentielle négative et permet son contrôle par la puissance optique de pompe.

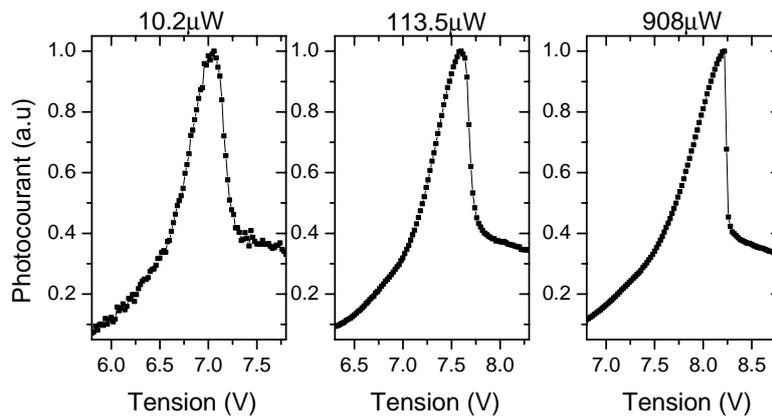


Figure 8: apparition d'une résistance différentielle négative pour les forts pompages optiques

De plus, en augmentant et en diminuant la tension alternativement, une bistabilité du photocourant est observée. Les résultats expérimentaux correspondant aux transitions hh-1 et hh-2 sont présentés dans la Figure 9.

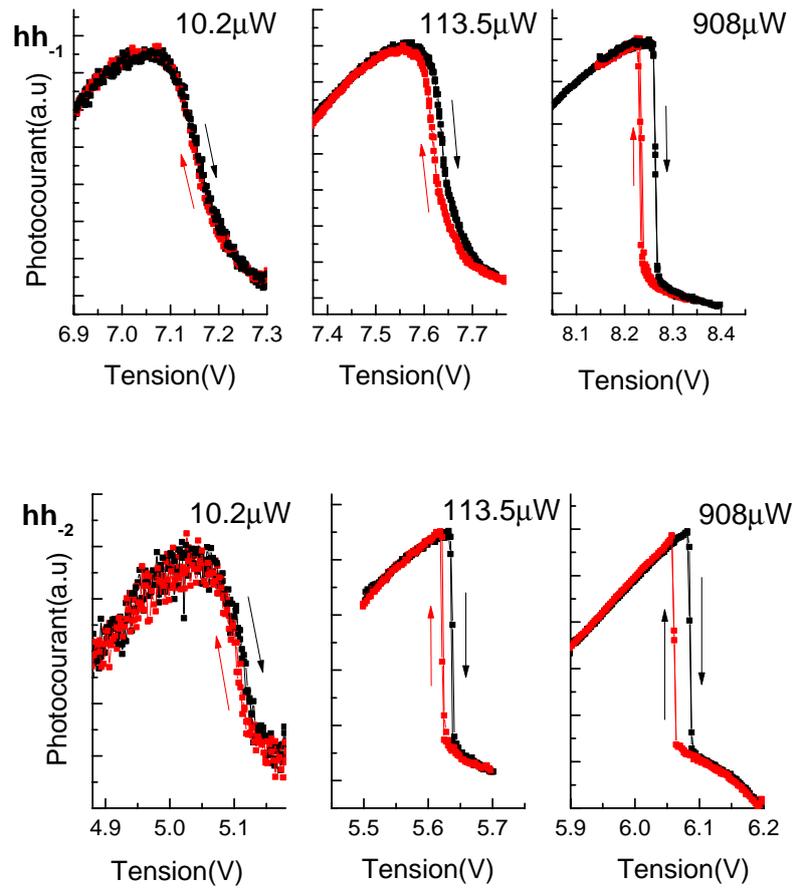


Figure 9: mesure de la bistabilité du photocourant pour les transitions hh_{-1} et hh_{-2}