I TALLER INTERNACIONAL DE CIENCIA DE MATERIALES Puebla, México 10-14 de Enero de 2005

DETECTORES Y EMISORES DE TERAHERTZ



Angela Stella Camacho Beltrán Departamento de Física Universidad de los Andes

Transiciones Intersubbandas en pozos cuánticos

Proyecto financiado por COLCIENCIAS

- Angela S. Camacho B.
- Jaime Bohórquez
- Gustavo Ardila
- Miguel Angel Adames
- Mauricio Bedoya
- Hanz Yecid Ramírez
- > Universidad de los Andes

> Colombia

Rafael Gutiérrez Centro de Investigaciones de la Universidad Antonio Nariño México José Luis Carrillo Universidad Autónoma de Puebla

Entidades Participantes

> Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

> Universidad Antonio Nariño,
Bogotá, Colombia

> Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

Contenido

Motivación y Justificación La brecha de los THZ Detectores de ondas de THz Absorción óptica lineal y no lineal > Pérdidas de energía Interacción electrón –fonón LO > Emisores de Terahertz Resultados

Interés fundamental

Desde una perspectiva de estado sólido hay un creciente interés en la espectroscopia de los THz para investigación en:

- estructura de bandas fundamental
- física excitónica

estados de multipartículas tales como condensación de Bose-Einstein y líquidos cuánticos

Interés en aplicaciones

- En química y biología hay interés en fuentes de THz bajas (1THz=4meV) para:
- > detección molecular
- imágenes médicas y sensores biológicos
- En comunicaciones
- Nuevos sensores espectroscópicos se pueden usar para aumentar seguridad
 sensores militares tales como radares y espectroscopia

Un solo tipo de fuente no llena todas estas necesidades pero sobretodo se necesita una fuente coherente con potencia suficiente.

Aplicaciones de los THz

> Imágenes(U. de Delft)



Huevo de Pascua



Resaltador



Tornillo: amplitud (izq.) y fase (der.) Oscuro = más absorción



A.G. Davies, et. Al., Phys. Med.Biol. 47 (2002) 3679-3689



· AV

0.5

1.0

Forward bias -----

Desarrollo de las Telecomunicaciones

		Frecuencia		Longitud de onda		
	HF:	1940	3 MHz	100 m	RADIO	
	VHF:	1950	30 MHz	10 m	T.V.	
	UHF:	1965	300 MHz	1 m	T.V. (color)	
\triangleright	SHF:	1980	3 GHz	0,1 m	Celular	
	EHF:	2000	30 GHz	0,01 m	Satélites	

Técnicas electrónicas y técnicas fotónicas

ELECTRÓNICAS

OSCILADORES LOCK-IN TRANSISTORES

REGIÓN DE LOS TERAHERTZ

FOTÓNICAS

LÁSERES CONVENCIONALES DE ESTADO SOLIDO DE CASCADA CUÁNTICA La tecnología de los transistores cubre ondas hasta de 300 GHz

La tecnología laser cubre ondas desde los 30 THz



Cuáles son las dificultades para lograr emisores de longitudes de onda de 100 a 300 µm en la región de los THz?

- > Efectos intrínsecos de los materiales
- Las técnicas electrónicas dejan de ser eficientes cuando se aproximan las altas frecuencias porque se acelera el ritmo de pérdida de energía de electrones
- Las técnicas fotónicas fallan a estas bajas frecuencias porque sus anchos de línea relativos que son delgados a altas frecuencias crecen rápidamente a estas frecuencias de THz

Los sólidos presentan muchas resonancias en esta región, esto se nota en la opacidad de los materiales a la radiación de los THz

La emisión de Terahertz

En fuentes optolectrónicas de longitud de onda larga hay tres aspectos que deben abordarse:

- La región activa de longitud de onda larga
- Pérdidas en el régimen de longitud de onda ultralarga
- Materiales

Fabricación asociada con geometría de fuentes de longitud de onda larga

> Fuentes emisoras de THz

Hay disponibles dos posibles regiones activas de emisiónabsorción de THz: interbanda e intersubbanda.

Para transiciones interbandas de gap directo se necesitan materiales de gap muy delgado.

Para transiciones intersubbanda se pueden usar materiales convencionales de gap ancho pero se debe dopar el material

Transiciones inter e intrasubbanda



(via conduction states)

Fig. 1. Energy band diagram of interband transition (a), and intersubband transition (b) under carrier injection. Electrons and holes must be injected in the interband transition, and the ground state is the annihilation of carriers. Intersubband radiative transitions are unipolar, but the lower state of the transition is occupied by carriers which must be removed through another transition.

Transiciones inter e intrasubbanda



Fig. 2. Band structure of a direct bandgap semiconductor (a) and of a quantum well direct bandgap semiconductor (b). In (a) the direct transition is band to band, from the conduction band (CB) to the valance band (VB) with the emission of a photon (curly line). In (b) the direct transition is from intersubbands in the conduction band. While band to band emission (CB-VB in (a)) can be enhanced using a QW, quantum confinement is necessary in the intersubband transition of (b).

Coeficiente de absorción



Wavelength (log scale)

Fig. 3. Schematic of absorption as a function of wavelength indicating the increasing effect of free-carrier absorption at long wavelengths. E_c - E_v is the conduction-to-valence band transition (two bands are shown), while D, A are donor and acceptor levels. (Not to scale.)

Transiciones intersubbanda e intersubniveles



Fig. 7. Intersubband recombination processes and the band structure of a QW and QD are compared. (a) Radiative and nonradiative (phonon) relaxation processes in intersubband transitions (ISBT) in a QW. Because there is a distribution of energy differences between the two subbands, there is likely a match to the energy. (b) Because there is no momentum dispersion, the intersublevel transition (ISLT) has a fixed energy and is likely not to correspond to the phonon energy.

Funciones de onda y energias del sistema acoplado



Fig. 10. Simulation of the wavefunctions and energy levels for a coupled QD structure. Radiative emission is from the |3>-|2> transition (courtesy of Cun-Zheng Ning, NASA Ames)

Dispositivos de THz

Hay mucho interés en la fabricación de emisores y detectores de Terahertz y reportes recientes de láseres de cascada cuántica operando a 4,4 THz (aunque a temperaturas muy bajas) son muy motivantes para continuar el desarrollo de la fotónica de Thz en la próxima década.



Nature 417,156 (2002)

En este reporte nosotros mostramos dispositivos basados en pozos cuánticos dobles asimétricos diseñados para operar en la región de THz para los cuales hemos obtenido sus espectros de absorción lineal y no lineal y hemos logrado controlar con la geometría su interacción con el medio cristalino

Un pozo cuántico doble asimétrico b=40 A c=100A b а С 250 E3-200 E_2 E_n[meV] 150 100 50 E_1 0 -500 50 100 150 200 z[Å]

Niveles de energía vs. Ancho del pozo delgado



Resultados



Pozos Cuánticos Dobles Asimétricos



Perfil de potencial de un PCDA



Perfil de un PCDA con campo eléctrico

- Las propiedades ópticas de este sistema se sintonizan
- Geométricamente: ajustando los anchos de la barrera y de los pozos
- Eléctricamente: ajustando la intensidad de un campo eléctrico externo

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

$\alpha = \frac{No. \, of \, photons \, absorbed \, per \, unit \, volume \, per \, second}{No. \, of \, photons \, injected \, per \, unit \, area \, per \, second}$

Este coeficiente está relacionado con la susceptibilidad eléctrica

$$\alpha\left(\omega\right) = 2\pi \frac{\omega}{n_{r}c\epsilon_{0}} Im\left(\chi\left(\omega\right)\right)$$

$$\chi\left(\omega\right) = \chi^{\left(1\right)}\left(\omega\right) + \chi^{\left(2\right)}\left(\omega\right) \mathbf{E}\left(t\right) + \chi^{\left(3\right)}\left(\omega\right) \mathbf{E}^{2}\left(t\right)$$

Absorción lineal sin campo eléctrico



Absorción lineal



Absorción no lineal sin campo eléctrico



Absorción lineal y no lineal con campo externo

4



Absorción no lineal con campo eléctrico para diferentes campos de radiación



Barrier=40



Field 8kV/cm, rad 5.0kV/cm

Field 4kV/cm, rad 3.0kV/cm



Field 12kV/cm, rad 3.0kV/cm

Ritmo de pérdida de energía

Hamiltoniano electrón-fonón LO

- Sintonizar, con la variación de la geometría, las condiciones óptimas para obtener inversión de población en transiciones radiativas en pozos cuánticos
- Calcular los ritmos de pérdida de energía
 - Intra-e intersubband
 - para fonones interfaciales y fonones confinados
- > Analizar la región del anticruce

Ritmo de pérdida de energía intrasubbanda



Ritmo de pérdida de energía de la segunda subbanda



Ritmo de pérdida de energía intersubbanda



La matriz densidad intrabanda

El momento dipolar de los electrones en los dos estados superiores puede entenderse como distribuido entre 1 y 2 a través de su matriz densidad f_{ij} . La matriz densidad intrabanda

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}f_{12} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)f_{12} + d_{01}E^*(t)p_{01} - d_{02}E(t)p_{02}$$

Suponiendo un pulso de excitación tipo $\delta(t)$ –la polarización intrabanda está dada por

$$f_{12}(t) = d_{01} d_{02} \left(\frac{E_0^2 \tau_p^2}{\hbar^2}\right) \theta(t) e^{-\frac{i}{\hbar}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)t}$$

oscilando con la frecuencia $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/h$.

Variación de las poblaciones antes del anticruce inmediatamente después de la aplicación de un pulso



Variación de las poblaciones exactamente en el anticruce



Variación de las poblaciones después del anticruce



Absorción y emisión de Terahertz

• El diseño geométrico permite sintonizar la interacción entre los pozos y con ella las transiciones ópticas entre las subbandas

• El acoplamiento entre los dos gases 2D (subbandas) es máximo en el anticruce

• Se proponen detectores de THz en la región lineal sin campo eléctrico a frecuencias mayores de 10 THz

• A frecuencias por debajo de 10 THz se proponen dispositivos no lineales aunque con pozos muy delgados menores de 20 A

• Obtuvimos respuestas no lineales gigantes con campos de radiación muy pequeños cuando la tercera subbanda del pozo se acerca al tope del potencial de confinamiento

La absorción para subbandas de un ADQW se puede sintonizar usando los siguientes parámetros:

el ancho de la barrera que controla el acoplamiento entre los dos pozos

la relación de anchos de los pozo que controla la asimetría del dispositivo

la intensidad del campo DC

Efectos de interacción electrónfonón

- Se determinó la energía de transición intersubbandas óptima para un aumento de la tasa de desocupación del nivel inferior por pérdidas de energía debidas a interacción con fonones
- Se analizó toda la región alrededor del anticruce

 Mientras las tasas de pérdida de energía por fonones intrasubbanda muestran un cuello de botella, las tasas intersubbanda son un mecanismo eficiente para sintonizar la inversión de población

Molécula artificial como emisor de THz

Y

х

Ζ

280 260 ENERGIES (meV) 240 220 200 180 160 140 120 100 15 20 25 0 5 10 30 WIDTH DOT 1 (nm) **DELTA E vs BARRIER** GaAs

GaAl, As₁₋



DOUBLE QUANTUM DOT ENERGY LEVELS

-E1

E2

E3





Publicaciones

- Rafael M. Gutierrez and Angela S. Camacho, A MODEL FOR TERAHERTZ RADIATION FROM SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES, phys.stat sol. (a) 195,No3, 600,(2003)
- A.S.Camacho B., J.Bohorquez and R.M.Gutierrez, POLARONIC EFFECT IN THE CHARGE DYNAMICS OF QUANTUM WELLS, Physica E17,297 (2003)
- A.S.Camacho B, R.M. Gutiérrez and G. Ardila, INTERSUBBAND TRANSITIONS IN QUANTUM WELLS AS SOURCES OF THZ RADIATION, (submitted to Microelectronics Journal)
- A.S.Camacho B, J. Bohorquez, R.M. Gutierrez and J.L.Carrillo, OPTICAL EFFECTS BASED ON INTERSUB-BAND TRANSITION IN QUANTUM WELLS, Microelectronics Journal 35,27(2004)
- R.M.Gutiérrez, M.A.Camargo and A.S.Camacho, ENGINEERING SEMICONDUCTOR HETROSTRUCTURES FOR TERAHERTZ RADIATION enviada a Physica Scripta
- A.Camacho, R.M.Gutiérrez and J.L. Carrillo, SCALING RELATIONS OF TUNNELING RATES IN QUANTUM WELLS SYSTEMS, phys. stat. sol. (c) 1, No. S1, S46– S49 (2004)

Participación en eventos

- INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERLATTICES, NANO-STRUCTURES AND NANO-DEVICES, July, 22-26, 2002, Toulouse, FRANCE
- > XVI SLAFES, Merida Venezuela, Diciembre 2002
- > NANO 2003, Madrid, España, Marzo 24 al 28 de 2003
- > XX Congreso Nacional de Física, Armenia, Septiembre, 2003
- > CLACSA XI, Pucón, Chile, 6-12 Diciembre 2003
- SPRING COLLEGE ON SCIENCE AT THE NANOSCALE, ICTP, TRIESTE, 24 May-11 June (2004)
- INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERLATTICES, NANO-STRUCTURES AND NANO-DEVICES, Cancún. México, 19-23, Julio (2004)
- > 27th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMICONDUCTORS PHYSICS, Flagstaff, Arizona, Julio 25-30 (2004)

Tesis de Maestría

- MOMENTO DIPOLAR DINAMICO Y TUNELAMIENTO EN UN POZO CUANTICO DOBLE ASIMETRICO, Jaime Bohorquez B. Universidad de los Andes, Julio, 2003
- POLARONIC EFFECT OF CONFINED AND INTERFACE PHONONS IN AN UNIPOLAR DEVICE OF THREE LEVELS, Miguel A.Adames, Universidad de los Andes, Agosto, 2004
- NONLINEAR INTERSUBBANDS THz ABSORPTION IN ASYMMETRIC QUANTUM WELL STRUCTURES, Mauricio Bedoya, Universidad de los Andes, Agosto 2004



- Extensiones del proyecto en colaboración con grupos de Wright State University en Estados Unidos y con el Mads Clausen Institute, University of Southern Denmark (MCI) en Dinamarca y la Universidad Complutense de Madrid en España
- Formación de nuevos investigadores: desarrollo de tesis de Maestría y Doctorado (en la actualidad dos estudiantes inician su doctorado y uno su maestría)

Contar con la información de primera mano que nos lleve a una posición competitiva frente al tema de transferencia de tecnología en un futuro a corto plazo ya que indudablemente los dispositivos nanoelectrónicos son los que se están desarrollando aceleradamente en la actualidad y muy pronto se tendrá que negociar la transferencia de esta tecnología.