



---

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Facultad de Ciencias

---



# Estudio de las propiedades superficiales de CdTe y HgCdTe por medio de técnicas ópticas

TESIS

Que para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Aplicadas

PRESENTA

Cutberto Balderas Noyola

Asesor

Dr. Luis Felipe Lastras Martínez

Sinodales

Dr. Alfonso Lastras Martínez

Dr. Jorge Ortega Gallegos

Dr. José Manuel Flores Camacho

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. MÉXICO

OCTUBRE 2023

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>III</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación del trabajo . . . . .	2
1.2 Aislantes Topológicos . . . . .	2
1.3 Técnicas Ópticas de Caracterización . . . . .	3
<b>2 Muestra y técnicas experimentales.</b>	<b>4</b>
2.1 Descripción de la muestra. . . . .	5
2.1.1 Diagrama de bandas de CdTe y HgTe . . . . .	5
2.2 Espectroscopia de Reflectancia Diferencial . . . . .	7
2.3 Espectroscopia Raman . . . . .	8
2.4 Microscopia de Fuerza Atómica . . . . .	9
2.5 Microscopía Óptica de Campo Cercano . . . . .	10
<b>3 Caracterización y resultados experimentales</b>	<b>11</b>
3.1 Experimentos sobre $CdTe(001)$ y $CdTe(001)/Ag$ . . . . .	12
3.1.1 Evolución de la deposición de Ag sobre $CdTe(001)$ . . . . .	12
3.1.2 Espectroscopia Raman . . . . .	12
3.1.3 AFM y NSOM . . . . .	14
3.1.3.1 Zona 1 . . . . .	14
3.2 Experimentos sobre $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ . . . . .	16
3.2.1 $RDS$ sobre superficies talladas mecánicamente . . . . .	16
3.2.1.1 Análisis de la tensión superficial . . . . .	18
3.2.2 Espectroscopia Raman sobre superficies talladas mecánicamente . . . . .	20
<b>4 Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>22</b>
4.1 Conclusiones y trabajo a futuro . . . . .	23
<b>A Programas de control</b>	<b>24</b>
A.1 Código en Arduino del monocromador HR60 . . . . .	25
<b>Bibliografía</b>	<b>31</b>

# RESUMEN

---

Los aislantes topológicos son materiales que tienen un comportamiento de aislantes en el bulto y de metal en su superficie. Actualmente, existe un gran interés en el estudio de sus propiedades físicas tanto superficiales y de bulto de los aislantes topológicos. Los sistemas formados por heteroestructura basadas en materiales como el  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  han mostrado tener propiedades topológicas y por lo tanto han despertado un gran interés para su aplicación en este campo. Dentro de las técnicas más adecuadas para caracterizar aislantes topológicos se cuenta con las técnicas ópticas. En particular con la Espectroscopia de Reflectancia Diferencial la cual como es sabido, es sensible al estado de la superficie o interface del sistema bajo estudio. En el presente trabajo de tesis, se realizaron estudios por medio de las técnicas Espectroscopia de Reflectancia Diferencial, Espectroscopia Raman, Microscopia de Fuerza Atómica y Microscopia Óptica de Campo Cercano a los cristales  $CdTe(001)$  y  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  bajo diferentes condiciones de su superficie. De igual forma se desarrollaron la instrumentación electrónica y de programación para la implementación y realización de los experimentos.

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1	(a) Diagrama de bandas para los semiconductores $CdTe$ y $HgTe$ . (b) Diagrama de bandas para el pozo bidimensional $CdTe/HgTe/CdTe$ para diferentes casos de $d = d_c$ . . . . .	6
2.2	Configuración utilizada para obtener los espectros de $RDS$ dentro de una Cámara de Ultra Alto Vacío ( $UHVC$ ). . . . .	7
2.3	Posibles resultados cuando un fotón choca contra la muestra, podemos observar la dependencia de energía y el tipo interacción obtenida. . . . .	8
2.4	Diagrama esquemático de la interacción entre la punta de un sistema de AFM con una muestra, donde el contorno $B$ representa el recorrido de la punta. [4] . . . . .	10
3.1	Espectro Raman obtenido para la muestra $CdTe(001)$ y $CdTe(001)/Ag$ , donde se puede notar la presencia de la fluorescencia causada por $Ag$ mientras mas nos acercamos al final del espectro. . . . .	13
3.2	Espectro Raman obtenido para la muestra $CdTe(001)$ y $CdTe(001)/Ag$ , uno de ellos fue trasladado para observarlo mejor. . . . .	13
3.3	Imágenes de las zonas de la muestra $CdTe(001)/Ag$ estudiadas en AFM y NSOM. . . . .	14
3.4	Resultados de la medición para la Zona 1. . . . .	15
3.5	Representación tridimensional para las mediciones de AFM y NSOM de la Zona 1. . . . .	15
3.6	Espectros $RDS$ obtenidos para $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ ( <i>azul</i> ) y $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ tallado mecánicamente ( <i>rojo</i> ), además de observar la diferencia entre ambos ( <i>negro</i> ). . . . .	17
3.7	Espectros $RDS$ obtenidos para $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ modelado ( <i>azul</i> ) y $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ tallado mecánicamente ( <i>negro</i> ), para obtener el calculo del estrés promedio $X$ . . . . .	19
3.8	Espectros Raman obtenidos para $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ y $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ tallado mecánicamente. . . . .	20

# 1

## INTRODUCCIÓN

---

*En la presente sección se hablara a grandes rasgos sobre el tema de interés de la tesis y las técnicas para estudiarlo.*

### Contenido

1.1	Motivación del trabajo . . . . .	2
1.2	Aislantes Topológicos . . . . .	2
1.3	Técnicas Ópticas de Caracterización . . . . .	3

---

## 1.1 Motivación del trabajo

---

Este trabajo tiene como finalidad entender las propiedades de los semiconductores  $CdTe(001)$  y  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ , estos siendo sometidos a un estrés o tensión, en el caso del primero la deposición de una película delgada de Ag y del segundo, el tallar mecánicamente su superficie con una pasta de diamante. Esto con la finalidad de establecer un *estándar* para comprender las propiedades de los materiales llamados *aislantes topológicos*, aunque ninguno de los materiales estudiados están en este grupo, sus compuestos y heteroestructuras si presentan las propiedades exóticas. Además se realizó la implementación de programas de control para el monocromador HR60.

## 1.2 Aislantes Topológicos

---

Los aislantes topológicos se caracterizan por estados exóticos metálicos, en las cuales los electrones viajan insensibles a las colisiones producidas por las impurezas [15] [9]. La idea sobre los aislantes topológicos surgió del trabajo del efecto Hall Cuántico. Este efecto que se presenta en estructuras semiconductoras de dos dimensiones bajo un campo magnético externo [18]. Una traza de este efecto debe de observarse aun sin la presencia de un campo magnético externo considerando que en un semiconductor los electrones al moverse dentro del mismo, sentirán un campo magnético efectivo producido por los núcleos positivos del cristal (el llamado acople espín-orbita o *SOC*, por sus siglas en ingles). Las interfaces metal/semiconductor de materiales con un fuerte *SOC* presentan el *efecto Rashba* que aunque no son aislantes topológicos como tal, presentan algunos fenómenos de los mismos, como la formación de corrientes Hall en su superficie. [14] [3]

La forma mas simple de describir un aislante topológico es como un aislante cuya frontera con el vacío siempre permanece metálica. Para que un aislante topológico se forme, la interacción espín-orbita debe ser fuerte y modificar significativamente la estructura electrónica. Esto sugiere que los semiconductores de brecha fundamental muy pequeña sean muy adecuados para configurar aislantes topológicos. Dentro de los materiales con fases topológicas podemos mencionar la aleación  $Bi_xSb_{1-x}$  y el semimetal  $HgTe$  [9] [15].

## 1.3 Técnicas Ópticas de Caracterización

Las técnicas ópticas de caracterización, utilizan la luz como sonda para obtener diferentes propiedades de los materiales, que van desde su morfología y estructura molecular, hasta de carácter electrónico, de forma segura, ya que son técnicas no destructivas que pueden aplicarse tanto *in-situ* o *ex-situ*. En el presente trabajo, se busca entender las propiedades de los materiales de interés antes mencionados, por medio de las siguientes técnicas.

- Reflectancia diferencial espectroscópica (*RDS*). Esta técnica es sensible al rompimiento de simetría. En semiconductores o estructuras cubicas la RDS da información del estado de la superficie o de las interfaces. Esta técnica es una herramienta potencial para el estudio de las interfaces aislante/metal que se produce en los aislantes topológicos.
- Espectroscopia Raman. En este trabajo, se utilizara para caracterizar las interfaces metal/semiconductor, ya que esta técnica sondea la estructura del material utilizando un haz de luz monocromático. Además de darnos una idea del estrés relativo al que esta sometido el material, siendo un parámetro importante para el estudio de los aislantes topológicos.
- Microscopia de Fuerza Atómica (*AFM*) y Microscopia Óptica de Campo Cercano (*NSOM*). La unión de ambas técnicas nos da una idea de la morfología por medio de *AFM*, utilizando las fuerzas atractivas y repulsivas en la interaccion sistema/muestra y la respuesta óptica del material por medio de *NSOM*, por lo que podemos caracterizar superficies y complementar las otras técnicas.

# 2

## MUESTRA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.

---

*En este capítulo discutiremos los principales aspectos de la muestra estudiada y las técnicas utilizadas para la caracterización de la misma.*

### Contenido

<b>2.1</b>	<b>Descripción de la muestra.</b>	<b>5</b>
2.1.1	Diagrama de bandas de CdTe y HgTe	5
<b>2.2</b>	<b>Espectroscopia de Reflectancia Diferencial</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>Espectroscopia Raman</b>	<b>8</b>
<b>2.4</b>	<b>Microscopia de Fuerza Atómica</b>	<b>9</b>
<b>2.5</b>	<b>Microscopía Óptica de Campo Cercano</b>	<b>10</b>

---



## 2.1 Descripción de la muestra.

Las muestras utilizadas son cristales de  $CdTe(001)$  y  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ . En el caso del  $CdTe$  es una muestra no dopada intencionalmente ( $5,6 \times 10^{16} cm^{-3}$ ). En el caso del cristal de  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$ , este consiste de una capa de  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  de  $1 \mu m$  de espesor crecida sobre un sustrato de  $CdTe(001)$ . Las propiedades ópticas de ambos cristales han sido detalladamente estudiadas en los laboratorios del IICO por medio de Elipsometría Espectroscópica [7] [11]. El análisis y obtención de los parámetros ópticos han sido realizados tanto en el espacio directo como en el espacio inverso [7] [11].

Es importante mencionar la importancia que estos materiales tiene en la configuración de sistemas que presentan fases de aislante topológico. Básicamente dos configuraciones han mostrado ser muy importantes, los pozos bidimensionales de  $CdTe/HgTe/CdTe$  y el  $HgTe$  bajo tensión.

### 2.1.1 Diagrama de bandas de CdTe y HgTe

El  $CdTe$  es un semiconductor directo cuya brecha fundamental a una temperatura de  $300K$  es  $E_g = 1,44eV$  [8] [6]. Se muestra en la 2.1 (a) el diagrama simplificado de bandas en el punto  $\Gamma$  del centro de la zona de Brillouin [6]. La banda de valencia de los huecos ligeros y pesados tiene una simetría  $\Gamma_8$  y esta degenerada por 4. La banda *Split-off* es de simetría  $\Gamma_7$  y degeneración 2. La banda de conducción tiene una simetría  $\Gamma_6$  y degeneración 2. En la misma figura se muestra las bandas para  $HgTe$  [6].

Es importante notar, que el orden energético de las bandas  $\Gamma_6$  y  $\Gamma_8$  no es el mismo para  $CdTe$  y  $HgTe$ . Mientras que para  $HgTe$  la energía de la banda  $\Gamma_6$  es menor que para la banda  $\Gamma_8$ , para el  $CdTe$  el orden de las bandas es el contrario.

Lo anterior tiene consecuencias muy importantes en el caso de las estructuras de pozos basados en  $CdTe/HgTe$ . Para comprender esta importancia se muestra en la 2.1 (b) un diagrama de las bandas de una estructura de pozos bidimensionales de  $CdTe/HgTe/CdTe$  [2]. Para un cierto espesor  $d$  del  $HgTe$  por debajo de un espesor crítico  $d_c$ , los niveles de los estados de los portadores  $E_1$  y  $H_1$  atrapados en el pozo tiene valores como los que se muestran, es decir  $E_1 > H_1$ . Al incrementar  $d$  por encima del valor crítico  $d_c$ , las energías de los portadores evolucionan hasta llegar a la relación  $E_1 < H_1$  en sus energías, es decir se produce una *inversión* de las energías. Es evidente que en la condición  $d = d_c$  se cumple que  $E_1 = H_1$ .

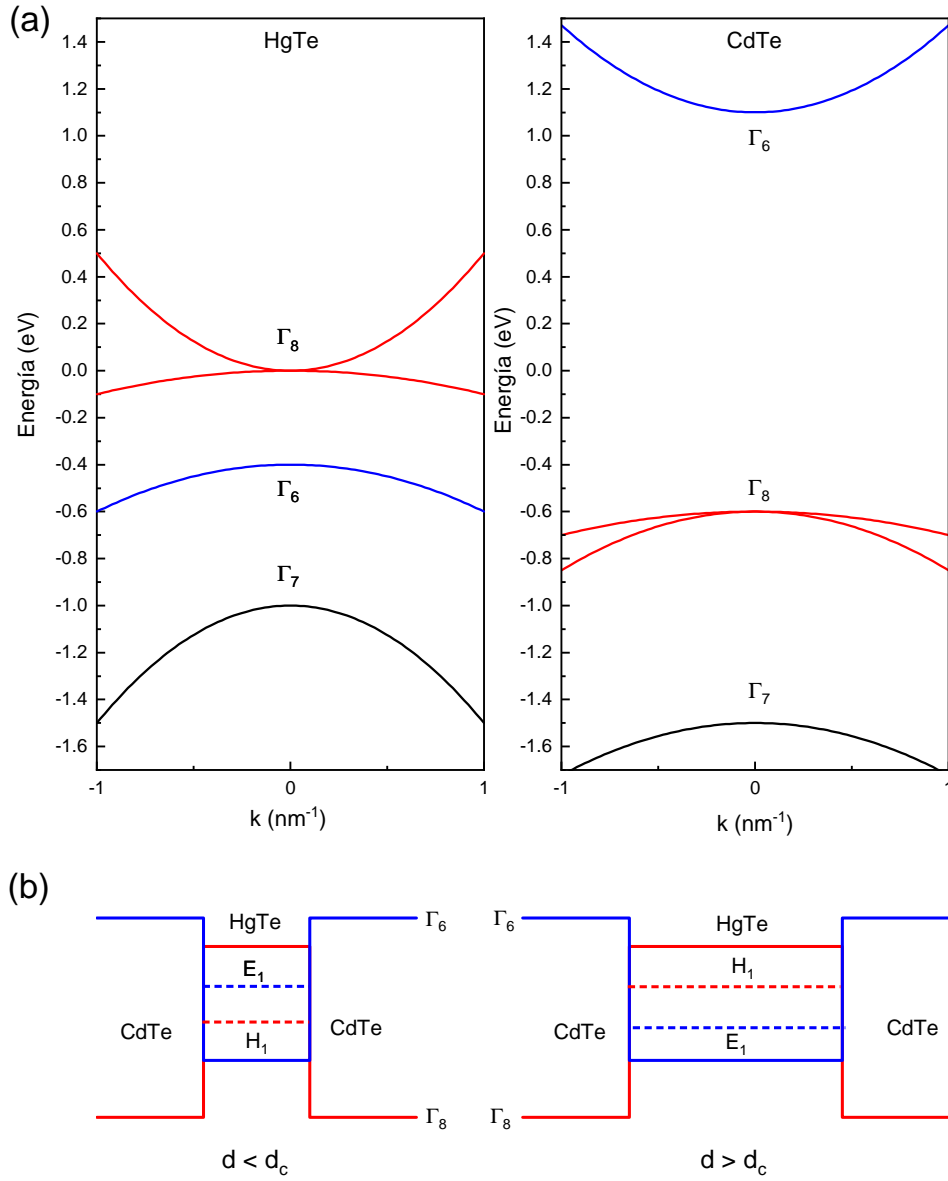


Figura 2.1: (a) Diagrama de bandas para los semiconductores  $CdTe$  y  $HgTe$ . (b) Diagrama de bandas para el pozo bidimensional  $CdTe/HgTe/CdTe$  para diferentes casos de  $d = d_c$ .

Este punto de inversión de las energías es también el punto de conversión entre un aislante convencional y un aislante topológico. Es decir, para  $d > d_c$  el sistema presenta una fase topológica [2]. Otra forma de manipular las bandas de energía en el  $HgTe$  y lograr fases topológicas, es por medio de la aplicación de una tensión. La tensión puede generarse a través del sustrato de  $CdTe$  sobre el que se crece el  $HgTe$  o aplicando la tensión externamente. En ambos casos, la degeneración de la banda  $\Gamma_8$  es removida eliminando el carácter de semimetal del  $HgTe$  y produciendo una fase de aislante topológico [5] [20].

Otra forma de manipular las bandas de energía en el  $HgTe$  y lograr fases topológicas, es por medio de la aplicación de una tensión. La tensión puede generarse a través del sustrato de CdTe sobre el que se crece el  $HgTe$  o aplicando la tensión externamente. En ambos casos, la degeneración de la banda  $\Gamma_8$  es removida eliminando el carácter de semimetal del  $HgTe$  y produciendo una fase de aislante topológico [5] [20].

## 2.2 Espectroscopia de Reflectancia Diferencial

La técnica de Espectroscopia de Reflectancia Diferencial (**RDS**) es utilizada en el estudio de dispositivos y materiales, haciendo uso de la *anisotropía*, la cual es la propiedad que describe como un material puede tener diferentes respuestas dependiendo de la dirección en la que es examinada, en este caso se debe a la *anisotropía óptica*, donde observamos los cambios en la respuesta óptica del sistema estudiado, utilizando las propiedades de simetría y la polarización de la luz, para obtener una diferencia en la reflectancia del sistema observándolo de diferentes direcciones.

En el caso de los materiales semiconductores, nos aprovechamos de las propiedades de simetría de los cristales observando dos direcciones cristalográficas, se elimina la contribución del bulto o el cuerpo principal del semiconductor provocando que sea *isotrópica*, obteniendo que la respuesta dependa solamente la superficie, haciendo que la **RDS** sea una técnica utilizada para el estudio de superficies. [1] La respuesta o espectro de la **RDS** tiene la siguiente forma:

$$\Delta R = \frac{R_\alpha - R_\beta}{2} \quad (2.1)$$

Siendo  $\alpha$  y  $\beta$  las direcciones cristalográfica para las cuales se obtuvo la reflectancia del material, siendo la diferencia de estos la que nos da la información de solamente la superficie.

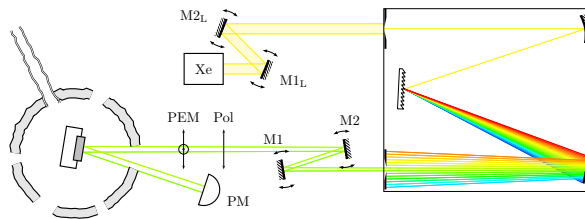


Figura 2.2: Configuración utilizada para obtener los espectros de *RDS* dentro de una Cámara de Ultra Alto Vacío (*UHVC*).

El sistema utilizado para las mediciones tiene como fuente de iluminación una lámpara de Xenón la cual es enfocada hacia el monocromador con el uso de un arreglo de espejos, del cual sale la luz difractada dirigida a otro arreglo de espejos los cuales dirigen la luz a la parte del sistema que controla su polarización, un prisma polarizador y un modulador fotoelástico que al pasar por ellos, obtenemos un haz de luz con una cierta polarización y que se estará modulando entre dos estados perpendiculares entre si, incidiendo sobre la muestra para reflejarse hacia un tubo fotomultiplicador. [13]

## 2.3 Espectroscopia Raman

La Espectroscopia Raman es una técnica que se aprovecha del *efecto Raman*, el cual describe la interacción entre los fotones, el material que estamos estudiando y la forma en el que este vibra cuando los fotones incidan sobre una molécula, pudiéndose presentándose algún modo vibracional, siendo característico de la muestra, ya que esta estrechamente relacionado con la estructura molecular del material, resultando en la dispersión de fotones con diferentes frecuencias. [16]

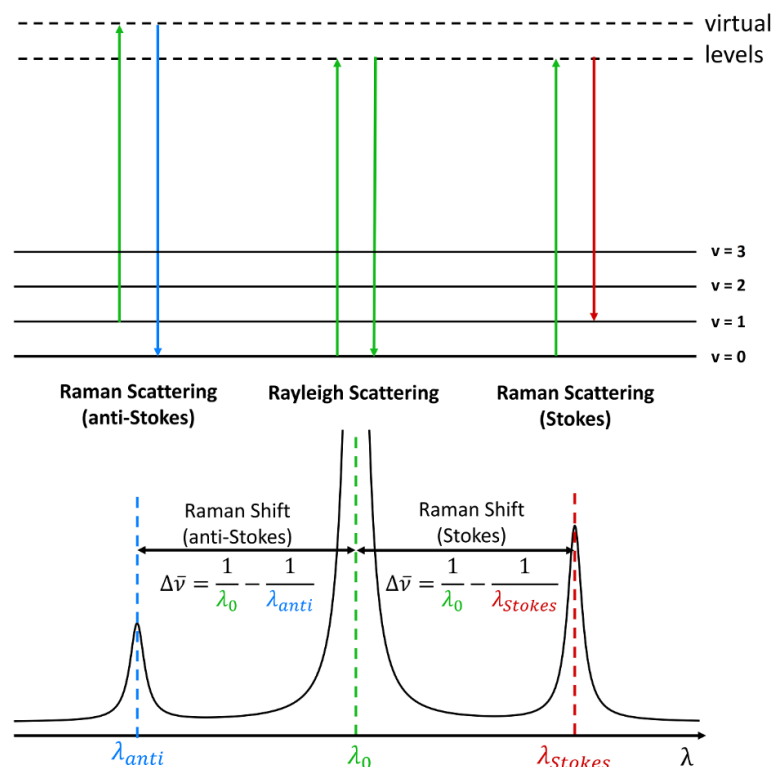


Figura 2.3: Posibles resultados cuando un fotón choca contra la muestra, podemos observar la dependencia de energía y el tipo interacción obtenida.

Cuando un fotón choca contra una molécula puede ocurrir alguno de los siguientes casos:

- Que el resultado sea un choque elástico, queriendo decir que no perderá energía por medio de efectos vibracionales, dando como resultado un fotón dispersado con la misma frecuencia. Esto se conoce como efecto Rayleigh.
- Que el choque resultante sea inelástico, lo que provoca que el fotón dispersado tenga una frecuencia diferente a la del incidente, teniendo el caso de una mayor frecuencia, provocando una ganancia en la energía con respecto al incidente y donde el fotón dispersado tiene menor frecuencia que el incidente, indicando que ocurrió una pérdida de la energía por procesos vibracionales. Estos son nombrados efecto Anti-Stokes y efecto Stokes respectivamente.

Por consecuencia, el efecto Stokes es utilizado para observar el *efecto Raman*, siendo mas probable que este suceda porque sus fotones dispersados tienen una energía menor que su contraparte del efecto Anti-Stokes.

En el caso de los semiconductores, debido a la existencia de la red cristalina, el efecto Raman nos puede dar información sobre la cristalinidad de la muestra, debido a que cada modo vibracional tiene una frecuencia para los fotones dispersados entre estos mas se alejen o apeguen de este valor nos da una noción de que tan cristalina es la muestra. Otra propiedad importante es el entender el estrés al que esta sometido la muestra, por el desplazamiento de la respuesta del material en contraste con que no presente estrés. [19]

En esta técnica, se utilizo el sistema comercial \*\*\*Nombre y marca del sistema\*\*\*, el cual utiliza un laser de 633 nm de potencia variable, con diferentes objetivos de 10x, 50x y 100x.

## 2.4 Microscopia de Fuerza Atómica

La Microscopia de Fuerza Atómica (AFM), es una técnica que es capaz de medir la superficie de un material a nivel nanométrico utilizando como principio las fuerzas de interaccion atractivas y repulsivas entre la punta del instrumento con el material. Para que la medición sea correcta, la punta debe tener una terminación en una cantidad de átomos pequeña, que al momento de experimentar una fuerza, esta provocara una deflexión en el cantiléver sobre el cual esta montada. [4]

La configuración utilizada en este trabajo es conocida como *modo tapping*, en el cual el cantiléver esta oscilando una cierta frecuencia, muy cercana a la de resonancia del mismo la cual es generada por un piezoeléctrico el cual genera vibraciones al aplicársele una corriente (*piezoshaker*). El cantiléver esta oscilando en frecuencia y amplitud constantes

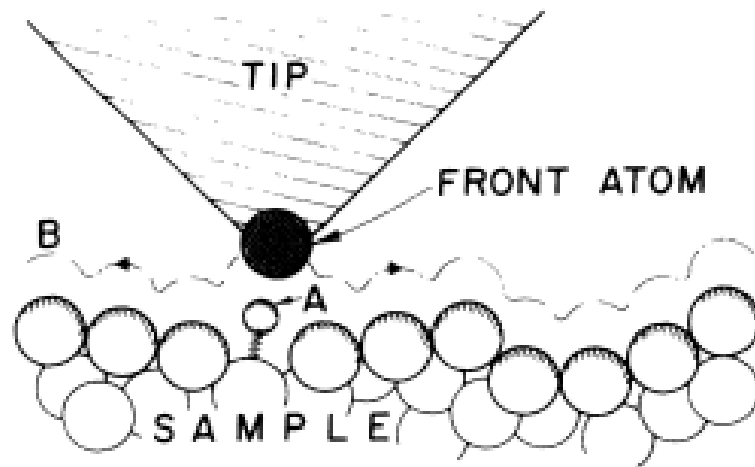


Figura 2.4: Diagrama esquemático de la interacción entre la punta de un sistema de AFM con una muestra, donde el contorno  $B$  representa el recorrido de la punta. [4]

cuando interactúa con la muestra, censando así los cambios en estos dos parámetros para dar información sobre la muestra. [17]

## 2.5 Microscopía Óptica de Campo Cercano

\*\*\*Pegar texto de Word\*\*\*

# 3

## CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

### Contenido

<b>3.1 Experimentos sobre <math>CdTe(001)</math> y <math>CdTe(001)/Ag</math></b>	<b>12</b>
3.1.1 Evolución de la deposición de Ag sobre $CdTe(001)$	12
3.1.2 Espectroscopia Raman	12
3.1.3 AFM y NSOM	14
3.1.3.1 Zona 1	14
<b>3.2 Experimentos sobre <math>Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)</math></b>	<b>16</b>
3.2.1 <i>RDS</i> sobre superficies talladas mecánicamente	16
3.2.1.1 Análisis de la tensión superficial	18
3.2.2 Espectroscopia Raman sobre superficies talladas mecánicamente	20

---

### 3.1 Experimentos sobre $CdTe(001)$ y $CdTe(001)/Ag$

La muestra  $CdTe(001)/Ag$  fue sometida a tres evaporaciones de Ag dentro de una Cámara de Ultra Alto Vacío (*UHVC*) por medio de la técnica Deposición Física por Haz de Electrones (*EBPVD*), con el fin de entender la interfaz metal/semiconductor y sus propiedades, intentando simular el comportamiento de superficie conductora/metálica y bulto aislante/semiconductor, el cual esta presente en los aislantes topológicos. La deposición de un material sobre otro con diferente parámetro de red, causa tensión en la interfaz de los materiales, provocando un cambio en el diagrama de bandas del semiconductor. En esta sección se discuten los espectros de *RDS* a través de los procesos a los que se fue sometida la muestra, además de la caracterización de la misma por medio de Espectroscopia Raman para observar la interfaz y la tensión relativa, *AFM* y *NSOM* para observar la morfología de la superficie.

#### 3.1.1 Evolución de la deposición de Ag sobre $CdTe(001)$

$e^X$

#### 3.1.2 Espectroscopia Raman

Para comenzar con el análisis de los espectros Raman, cabe recalcar que dependiendo de la simetría del material puede o no ser *Raman Activo*, esto quiere decir que no todos los materiales presentaran una respuesta al ser estudiados. Un ejemplo es la plata (*Ag*), la cual por la simetría que presenta, es un material *inactivo*, pero aun así, tiene efectos sobre el espectro cuando se presenta como una película delgada, como el presentar *fluorescencia*, que es la propiedad de absorber la energía proveniente del espectro electromagnético y emitirla con una frecuencia diferente. Además que Ag siempre se comporta como un potenciador de la respuesta óptica, por lo que debemos trabajar con baja potencia para poder obtener una respuesta del material y no solo fluorescencia.

El fenómeno que nos interesa observar esta dentro del rango de  $0-250\text{ cm}^{-1}$ , donde podemos observar los principales picos de la muestra. Debido a la tensión a la que esta sometida la muestra  $CdTe(001)/Ag$ , por la diferencia de parámetro de red entre ambos materiales existen dos fenómenos que vemos en el siguiente espectro Raman.



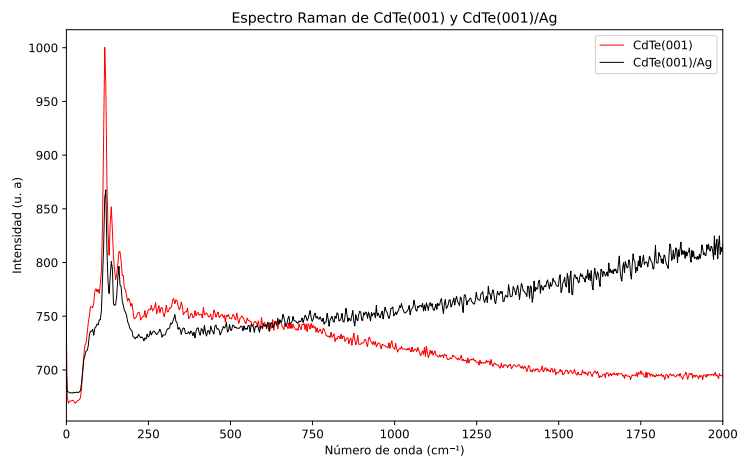


Figura 3.1: Espectro Raman obtenido para la muestra  $CdTe(001)$  y  $CdTe(001)/Ag$ , donde se puede notar la presencia de la fluorescencia causada por Ag mientras mas nos acercamos al final del espectro.

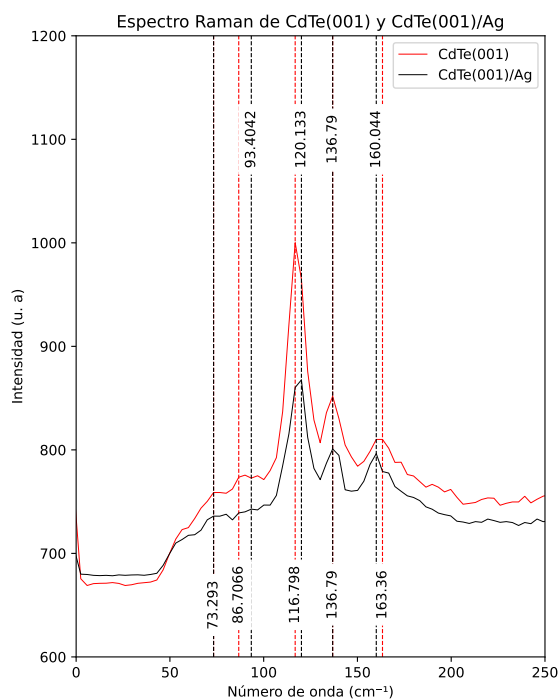


Figura 3.2: Espectro Raman obtenido para la muestra  $CdTe(001)$  y  $CdTe(001)/Ag$ , uno de ellos fue trasladado para observarlo mejor.

En este espectro, podemos apreciar el corrimiento de algunos picos, lo cual indica la presencia de estrés o tensión. En la Tabla ?, se condensa la información importante, que

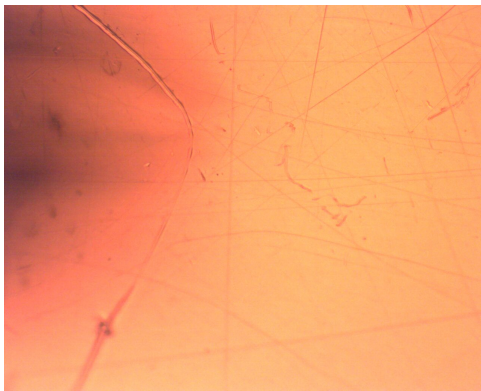
es la posición y el FWHM, que nos da una idea sobre la cristalinidad de la interfaz.

---

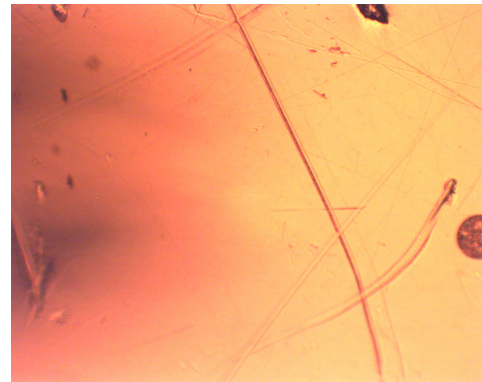
### 3.1.3 AFM y NSOM

---

Para la medición de estas dos técnicas se observaron dos zonas diferentes, las cuales se muestran en la Figura 3.3.



(a) Zona 1 donde se realizó la medición de AFM y NSOM.



(b) Zona 2 donde se realizó la medición de AFM y NSOM.

Figura 3.3: Imágenes de las zonas de la muestra  $CdTe(001)/Ag$  estudiadas en AFM y NSOM.

Podemos observar que las muestras tienen gran cantidad de ralladuras y detalles, los cuales pueden influir de manera negativa a la hora de calcular la rugosidad de la zona. Primero analizaremos la Zona 1, tomando algunos perfiles de línea para comparar su rugosidad con su respuesta óptica.

---

#### 3.1.3.1 Zona 1

---

En esta zona, podemos observar en la Figura 3.4, que aunque la escala en (a) muestra una variación de 0 a 55.6 nm, en (c) no presenta una gran variación en su rugosidad, siendo este gran intervalo ocasionado por las ralladuras presentes en la muestra.

Si comparamos (c) y (d), que están en el mismo perfil, vemos que aunque no exista una variación importante en la altura de la superficie, si existe un cambio en la respuesta óptica del material, esto solo puede deberse a que en esa zona, el índice de refracción varíe porque la morfología es diferente.

Este fenómeno se puede apreciar mejor si observamos la respuesta de NSOM y AFM de forma tridimensional, como se aprecia en la Figura 3.5, en donde podemos distinguir que en zonas planas vemos clústeres o islas en la respuesta óptica del material.

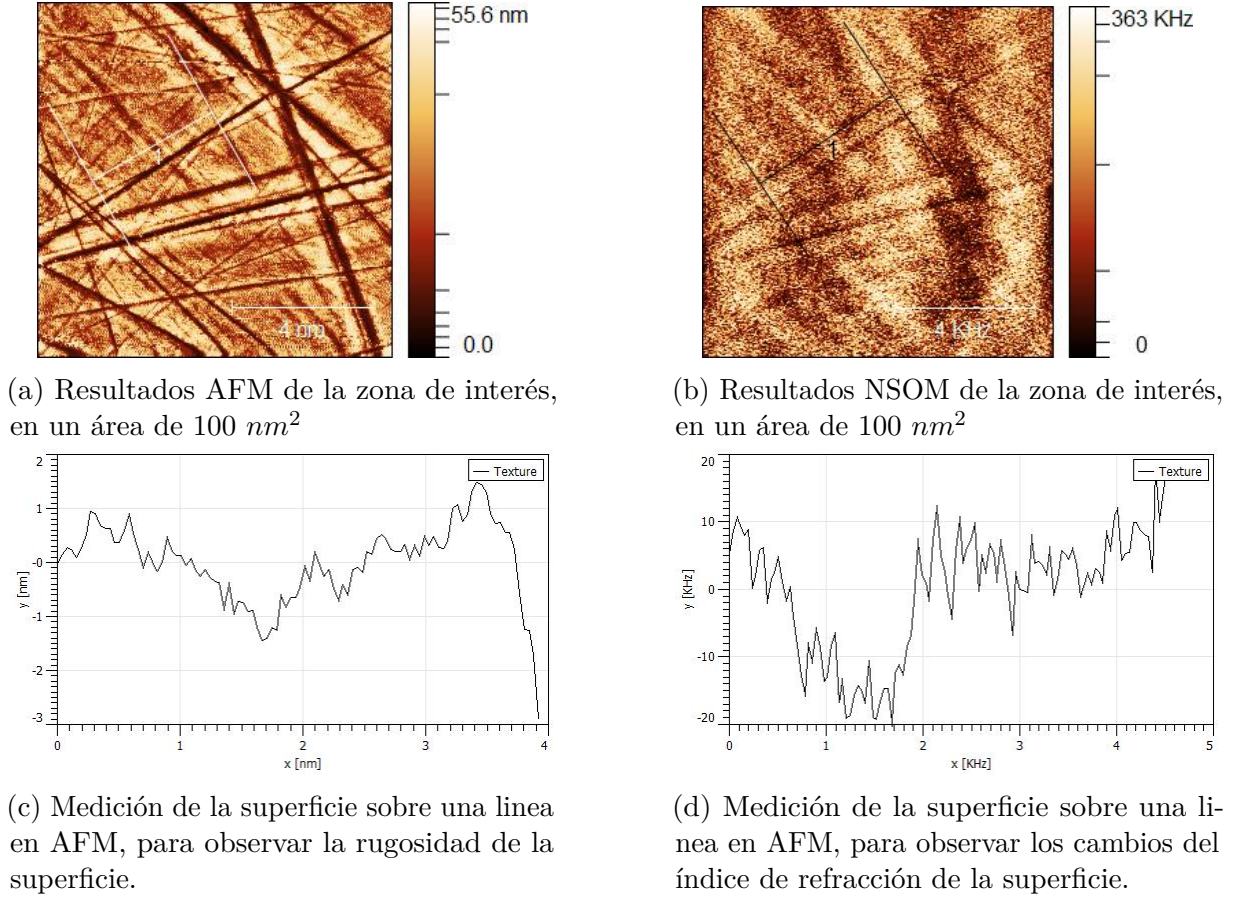


Figura 3.4: Resultados de la medición para la Zona 1.

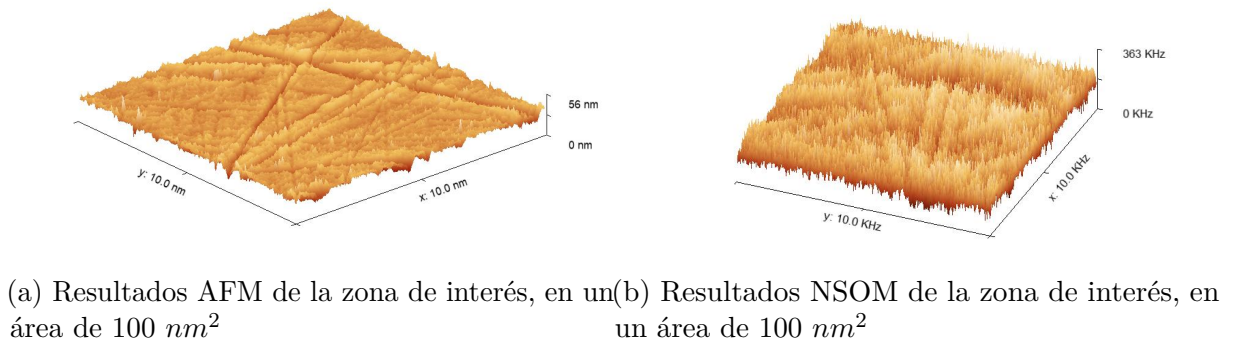


Figura 3.5: Representación tridimensional para las mediciones de AFM y NSOM de la Zona 1.

### 3.2 Experimentos sobre $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$

En esta sección se discuten los espectros de *RDS* realizados sobre una muestra de  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  sin y con daño superficial y sus espectros de la Espectroscopia Raman. Como se ha mencionado el  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  es un material semimetálico y su brecha fundamental es muy pequeña. Una de las formas para romper la degeneración de la brecha fundamental es reduciendo la dimensionalidad del material, ya sea en estructuras de pozos o puntos cuánticos o aplicando una tensión. Esta tensión puede ser aplicada externamente por medio de un esfuerzo mecánico o generando defectos superficiales, como las dislocaciones.

En el último caso, la tensión estará localizada en los primeros micrómetros por debajo de la superficie. De esta forma la superficie pierde su carácter semimetálico, mientras que el bulto seguirá siendo un semimetal. La idea fundamental de estos experimentos es identificar los componentes de la *RDS* inducidas por la tensión superficial y diferenciarlos de los inducidos por una superficie semimetálica.

#### 3.2.1 *RDS* sobre superficies talladas mecánicamente

Con el objeto de romper la degeneración de las bandas de energía en el punto  $\Gamma$  y abrir la brecha fundamental del  $Cd_{0.18}Hg_{0.82}Te$ , se realizó un ligero tallado superficial con abrasivo de diamante de tamaño de grano de  $0,25\mu m$  a lo largo de la dirección  $[110]$ . Es bien sabido que este procedimiento genera defectos lineales paralelos a la superficie y por tanto un campo de tensión cercano a la superficie que se extiende algunas micras hacia su interior [12]. La tensión cambia la simetría del cristal y por tanto rompe la degeneración de los niveles.

De esta forma, se tiene una superficie menos metálica respecto al bulto del material. En la 3.6 se presentan los resultados experimentales de *RDS* obtenidos para la muestra sin tallado superficial (puntos azules), con tallado (puntos rojos) y la diferencia numérica entre ambos (puntos negros) en el rango espectral de 2.0-4.5 eV. Este rango corresponde a las transiciones  $E_1$  y  $E_1 + \Delta_1$  del  $Cd_{0.18}Hg_{0.82}Te$  [7]. Obsérvese que el espectro sin tallar es suave y no tiene estructuras evidentes alrededor de  $E_1$  y  $E_1 + \Delta_1$ . Esto puede estar relacionado al carácter metálico del  $Cd_{0.18}Hg_{0.82}Te$  que apantalla la contribución de las transiciones  $E_1$  y  $E_1 + \Delta_1$  al espectro de *RDS*.

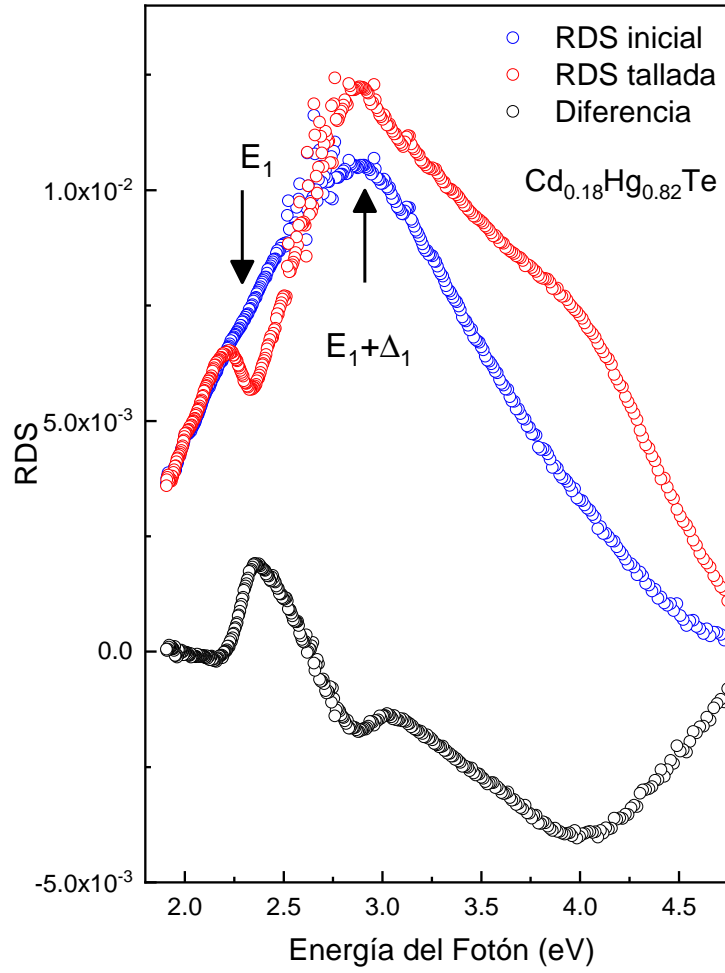


Figura 3.6: Espectros  $RDS$  obtenidos para  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  (azul) y  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  tallado mecánicamente (rojo), además de observar la diferencia entre ambos (negro).

Al tallar la muestra se genera un incremento en la anisotropía y se rompe la degeneración del punto  $\Gamma$ . El espectro de puntos rojos en la Figura 3.6 corresponde a la muestra tallada. Obsérvese como se incrementa notablemente la estructura alrededor de las transiciones  $E_1$  y  $E_1 + \Delta_1$ . Para aislar la componente inducida por el tallado en la  $RDS$ , se muestra el espectro obtenido restando numéricamente los espectros rojo y azul. Este resultado se muestra en el espectro negro. En este último, las estructuras de las transiciones  $E_1$  y  $E_1 + \Delta_1$  son muy evidentes.

### 3.2.1.1 Análisis de la tensión superficial

Con el objetivo de cuantificar la tensión promedio en la superficie inducida por el tallado, se realizó un ajuste al modelo de tensión en RDS. La forma de línea de RD bajo tensión  $X$ , está dada por [10]:

$$\frac{\Delta R}{R} = Re[\frac{1}{rn} \frac{\partial r}{\partial E} (df_1 + df_2)] \quad (3.1)$$

Donde  $n$  es el índice complejo de refracción del material (la función dieléctrica está dada por  $\varepsilon = n^2$ ) y  $r = \frac{1-n}{1+n}$  es la reflexión a incidencia normal. Los factores  $df_1$  y  $df_2$  están dados por:

$$df_1 = \frac{4\gamma}{\Delta_1} \varepsilon^{(1)} + \Delta E_s \frac{\partial \varepsilon^{(1)}}{\partial E} \quad (3.2)$$

$$df_2 = -\frac{4\gamma}{\Delta_1} \varepsilon^{(2)} + \Delta E_s \frac{\partial \varepsilon^{(2)}}{\partial E} \quad (3.3)$$

Siendo  $\varepsilon^{(1)}$  y  $\varepsilon^{(2)}$  son las contribuciones a la función dieléctrica compleja de los puntos  $E_1$  y  $E_1 + \Delta_1$  respectivamente,  $\gamma = \frac{S_{44}D_3^5 X}{2\sqrt{6}}$  y  $\Delta E_s = \frac{S_{44}D_1^5 X}{4\sqrt{3}}$ . El parámetro  $S_{44}$  es el módulo elástico de compliancia (*elastic compliance moduli*) y  $D_1^5$  y  $D_3^5$  son los potenciales de deformación.

Para realizar el cálculo de la forma de línea del espectro de RDS, se ajustaron con curvas Lorentzianas las formas de línea de las funciones dieléctricas de  $Cd_{0.18}Hg_{0.82}Te$  obtenidas por medio de elipsometría [7]. Las formas de línea y los parámetros utilizados para ajustar la RDS se muestran en la Tabla ? y Tabla ? respectivamente [11] [10].

La Fig. 3.8 se muestra la contribución de la tensión superficial al espectro de RDS y el ajuste obtenido con el modelo y los parámetros de las Tablas ? y ?. Obsérvese como el modelo describe excelentemente la forma de línea reafirmando el origen de tensión de la RDS. Del ajuste se encuentra que el valor medio de  $X = -0,24 \times 10^9 \frac{dyn}{cm^2}$ .

Este valor esta en el orden de magnitud de los típicos valores de tensión mecánica externa aplicados en experimentos de materiales como el  $CdTe$  [10]. De esta forma, podemos establecer que la técnica de RDS nos permite distinguir entre el carácter semimetálico del material y el producido por un rompimiento de simetría, como el de los defectos lineales generados. Este resultado es importante, ya que abre la posibilidad de contar con una herramienta óptica para la caracterización de superficies de  $CdHgTe$  bajo tensión o

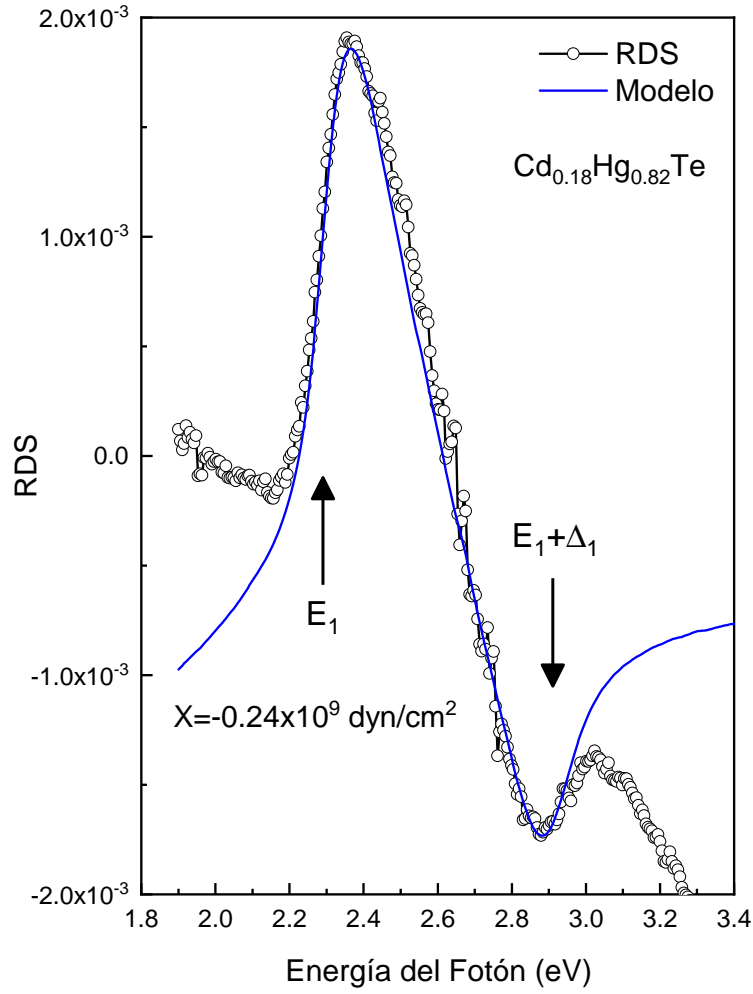


Figura 3.7: Espectros  $RDS$  obtenidos para  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  modelado (*azul*) y  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  tallado mecánicamente (*negro*), para obtener el calculo del estrés promedio  $X$ .

interfaces de CdTe/CdHgTe dentro de una estructura de pozos con carácter de aislante topológico.

### 3.2.2 Espectroscopia Raman sobre superficies talladas mecánicamente

Se obtuvo los siguientes espectros Raman para  $HgCdTe(001)$  y  $HgCdTe(001)$  tallado mecánicamente.

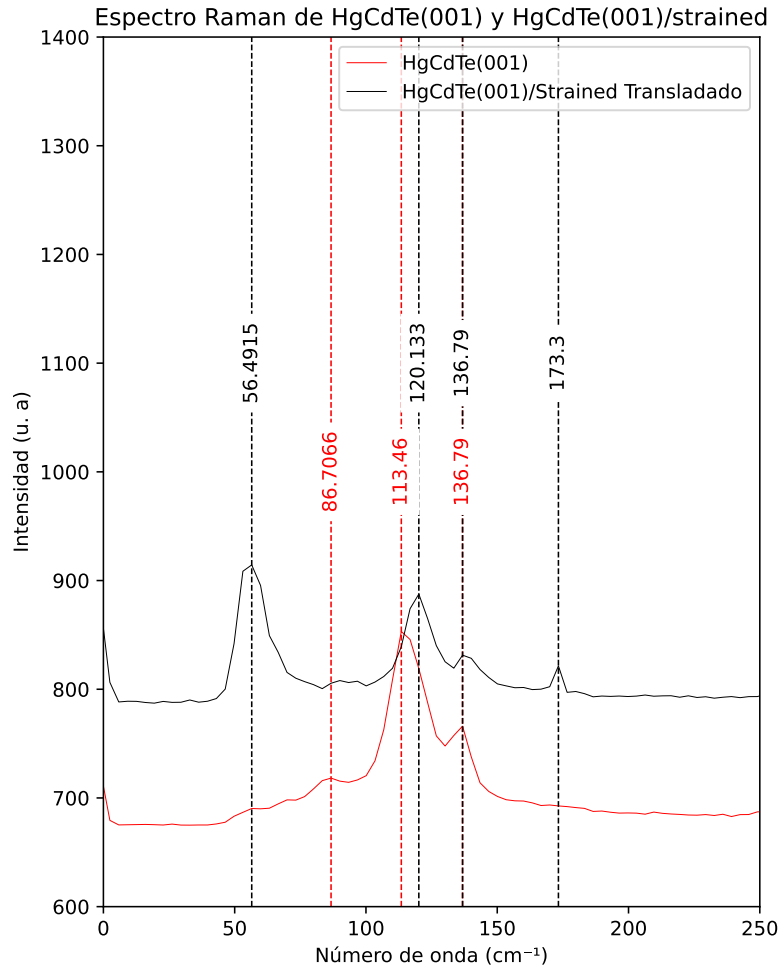


Figura 3.8: Espectros Raman obtenidos para  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  y  $Hg_{0,18}Cd_{0,82}Te(001)$  tallado mecánicamente.

En la Figura 3.6, podemos observar que al contrario del sistema  $CdTe(001)/Ag$ , donde la tensión solo parecía afectar la posición de los picos, su altura relativa y su FWHM, aquí cambia totalmente *la simetría* de la superficie, obteniendo dos estructuras mas en 56.4915



y  $173.3\text{ cm}^{-1}$ ). En la Tabla ?, podemos apreciar el cambio entre los semianchos de los picos que comparten ambos espectros.

Cabe destacar que al ser parte de la aleación HgCdTe, el CdTe comparte un pico en el espectro Raman que parece imperturbable a los cambios que se someta en su superficie, aunque su Semancho si varié. \*\*\*Checar paper nuevo, significado To y Lo cada peak\*\*\*

# 4

## CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

---

### Contenido

4.1 Conclusiones y trabajo a futuro . . . . .	23
---	----

---

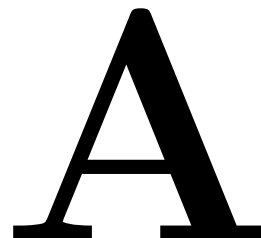
## 4.1 Conclusiones y trabajo a futuro

Se implementaron y realizaron experimentos de reflectancia diferencial (RD) sobre cristales de CdTe(001) y Cd<sub>0.18</sub>Hg<sub>0.82</sub>Te(001). En el caso de CdTe se realizaron evaporaciones de Ag con el objetivo de caracterizar la respuesta óptica de una interfaz de Ag/CdTe. Esto tiene el objetivo de poder identificar las componentes y evolución de la RD de una interfaz metal/semiconductor y probar que con la RD es posible identificar la respuesta metálica de la superficie. Adicionalmente, se realizaron mediciones de Raman para la caracterización de la capa de Ag depositada y se contrastaron contra un sustrato sin deposición, donde se observó un estrés causado por la diferencia entre los parámetros de red de los materiales, también fue posible determinar que la interfaz metal/semiconductor es de buena calidad y no presenta daños o gran desorden. Usando AFM y NSOM se observó que aunque las muestras no eran rugosas, teníamos una diferencia en la respuesta óptica del material, debido a la diferencia en la morfología del mismo.

De igual forma se midió RD a superficies de Cd<sub>0.18</sub>Hg<sub>0.82</sub>Te(001) con tensión y sin tensión superficial. Esta tensión fue generada por medio del tallado mecánico de la superficie con pasta de diamante. Considerando que el Cd<sub>0.18</sub>Hg<sub>0.82</sub>Te(001) tiene propiedades de semimetal en bulto, la tensión superficial que se extiende algunas micras al bulto, rompe la degeneración abriendo la brecha fundamental produciendo una interface aislante/metal que puede ser caracterizada por RD. Se demuestra la gran sensibilidad que la RD tiene en la caracterización de las interfaces bajo estudio.

En el presente trabajo, se contribuyó a la identificación y comportamiento de algunas componentes de la RD fundamentales en el entendimiento de las interfaces metal/semiconductor. Como trabajo a futuro se planea realizar más experimentos de RD sobre el Cd<sub>0.18</sub>Hg<sub>0.82</sub>Te y heteroestructuras de este material, con el objetivo de poder establecer una relación entre los espectros de RD y el comportamiento topológico de estos materiales.

Se implementaron programas de control para el monocromador HR60, para recibir instrucciones desde el equipo de control, para el control del motor principal que controla el cambio en la longitud de onda, el movimiento de las cuatro slits y el cambio de la resolución desde 1 nm hasta 0.1 nm.



## PROGRAMAS DE CONTROL

---

*En este apartado se colocaran programa desarrollados para el control de los equipos del laboratorio de Elipsometria Espectroscopia.*

### Contenido

A.1 Codigo en Arduino del monocromador HR60 . . . . .	25
---	----

---

## A.1 Codigo en Arduino del monocromador HR60

En este apartado dejaremos constancia del programa de Arduino para el control del monocromador HR60 discutido en la seccion ??.

```
1 // Para mas informacion sobre las librerias utilizadas consultar
2 // https://learn.adafruit.com/adafruit-motor-shield-v2-for-arduino/
3 // overview ,
4 // libreria oficial del Stepper Motor Shield proporcionado por Adafruit
5
6 #include <Wire.h>
7 #include <Adafruit_MotorShield.h>
8 #include "utility/Adafruit_MS_PWM_ServoDriver.h"
9
10 Adafruit_MotorShield AFMS1(0x60); // Creamos el shield de los motores
11 // de las slits , bottom shield.
12 Adafruit_MotorShield AFMS2(0x61); // Creamos el shield de los motores
13 // de las slits , top shield.
14
15 Adafruit_StepperMotor *myMotor_SIRF = AFMS1.getStepper(200, 2); //
16 // Creamos el objeto para mover la slit SIRF
17 Adafruit_StepperMotor *myMotor_SELF = AFMS2.getStepper(200, 2); //
18 // Creamos el objeto para mover la slit SELF
19
20 Adafruit_StepperMotor *myMotor_SILF = AFMS1.getStepper(200, 1); //
21 // Creamos el objeto para mover la slit SILF
22 Adafruit_StepperMotor *myMotor_SELL = AFMS2.getStepper(200, 1); //
23 // Creamos el objeto para mover la slit SELL
24
25 void setup() {
26     AFMS1.begin(); // Inicializamos ambas shields que controlan las
27     // slits del monocromador.
28     AFMS2.begin();
29
30     // Definiremos las entradas y salidas logicas para el control del
31     // motor.
32
33     pinMode(2, OUTPUT); // pin de salida para el control de la
34     // direccion del motor, DIR
35     pinMode(3, OUTPUT); // pin de salida para el control del
36     // movimiento del motor, STEP
37     pinMode(4, OUTPUT); // pin de salida para el control del paso del
38     // monocromador, MS1
39     pinMode(5, OUTPUT); // pin de salida para el control del paso del
```

```

monocromador, MS2
    pinMode(6, OUTPUT); // pin de salida para el control del paso del
monocromador, MS3

29
    pinMode(7, INPUT); // pin de entrada para el limit switch en el
motor del espejo.

31
    // Definiremos la configuracion del motor en la fraccion de paso
utilizado, para esto,
33
    // debemos colocar los pines como se muestra a continuacion,
    // siendo H – High y L – Low en el estado digital.

35
    // MS1 MS2 MS3 Microstep Resolution
37
    // L  L  L  Full Step
    // H  L  L  Half Step          Estamos trabajando en esta
resolucion!
39
    // L  H  L  Quarter step
    // H  H  L  Eighth step
41
    // H  H  H  Sixteenth step

43
    digitalWrite(4, HIGH);
    digitalWrite(5, LOW);
45
    digitalWrite(6, LOW);

47
    myMotor_SIRF->setSpeed(20); // Definimos la velocidad de los
motores que controlan las slits, esta esta en revoluciones
    myMotor_SELF->setSpeed(20); // por minuto, lo que equivaldria a
4000 pasos por minuto.
49
    myMotor_SILF->setSpeed(20);
    myMotor_SELL->setSpeed(20);

51
    // Iniciaremos la comunicacion serial a 9600 bits/s
53
    Serial.begin(9600);
}

55

57
void loop() { // Definimos el tamano del paso que tomara el motor

59
    // Primero debemos checar comunicacion entre el Arduino y la PC
    String lectura;
61
    float lecturai;
    int i;
63
    int j;
    int f_r = 10;

65
    if (Serial.available() != 0){
67
        switch(Serial.read()){
            case 'F': //Movimiento del
monocromador, este tiene una resolucio
n de Full step ~0.1 mm

```

```
69         lectura = Serial.readString();
70         lectura.replace(String(char(13)), "");
71         lectura.trim();
72
73         lecturai = 0;
74         lecturai = lectura.toFloat();
75
76         Serial.print('M');    // Indicamos que el monocromador esta
77         en movimiento.
78
79         // Definimos la direccion en la que el monocromador se movera
80         .
81         if(lecturai > 0){
82             lecturai = abs(lecturai);
83             digitalWrite(2, HIGH);
84         }
85         else{
86             lecturai = abs(lecturai);
87             digitalWrite(2, LOW);
88         }
89         // Hacemos los pasos en el motor del monocromador, hasta que
90         cumplamos
91         // el numero de pasos requerido o topemos con el limit
92         switch.
93
94         i = 1;
95         while(f_r*lecturai >= i){
96             j=0;
97             while(j < 2){
98                 digitalWrite(3, HIGH);
99                 delayMicroseconds(450);
100                 digitalWrite(3, LOW);
101                 delayMicroseconds(450);
102                 delay(5);
103                 Serial.print(j);
104                 Serial.write(';');
105                 j++;
106             }
107             i++;
108             Serial.print(i);
109             Serial.print('\n');
110         }
111         Serial.write('o');
112         break;
113
114         case 'A':
115             // Inicializacion del
116             monocromador, lo mandamos hasta el extremo y vemos cuando topa con
117             // el limit switch.
118
119         Serial.print('M');    // Indicamos que el motor esta en
120         movimiento
```

```
113         i = 1;
114         while(digitalRead(7) == LOW){
115             digitalWrite(2, HIGH);
116
117             digitalWrite(3, HIGH);
118             delayMicroseconds(500);
119             digitalWrite(3, LOW);
120             delayMicroseconds(500);
121             delay(5);
122
123             i++;                // Verificar el numero de pasos dados
124             // durante la iteracion.
125             Serial.print(i);
126             Serial.print('\n');
127         }
128     Serial.write('o'); //Mandamos la senal que el motor termino su movimiento y
129     // esta listo para el siguiente.
130     break;
131
132     //Codigo para el movimiento de las slits. Dependiendo cuales se
133     //busca mover, utilizaremos:
134     // SILR: 'G', SIFR: 'H', SEFL: 'K', SELL: 'J',
135
136     case 'H':                // SIFR: 'H'
137         lectura = Serial.readString();
138         lectura.replace(String(char(13)), "");
139         lectura.trim();
140
141         lecturai = 0;
142         lecturai = (lectura.toInt())/5;
143
144         Serial.print('S');    // Indicamos que las slits esta en
145         // movimiento
146
147         // Definiremos el movimiento de las slits y su direccion.
148         if (lecturai > 0){
149             myMotor_SIRF->step(lecturai, FORWARD, SINGLE);
150         }
151         else{
152             myMotor_SIRF->step(abs(lecturai), BACKWARD, SINGLE);
153         }
154     Serial.write('o');
155     break;
156
157     case 'K':                // SEFL: 'K'
158         lectura = Serial.readString();
159         lectura.replace(String(char(13)), "");
160         lectura.trim();
```



```

157         lecturai = 0;
158         lecturai = (lectura.toInt())/5;
159
160         Serial.print('S');    // Indicamos que las slits esta en
movimiento
161
162         // Definiremos el movimiento de las slits y su direccion.
163         if (lecturai > 0){
164             myMotor_SELF->step(lecturai, FORWARD, SINGLE);
165         }
166         else{
167             myMotor_SELF->step(abs(lecturai), BACKWARD, SINGLE);
168         }
169         Serial.write('o');
170         break;
171
172     case 'G':    // SILR: 'G'
173         lectura = Serial.readString();
174         lectura.replace(String(char(13)), "");
175         lectura.trim();
176
177         lecturai = 0;
178         lecturai = (lectura.toInt())/5;
179
180         Serial.print('S');    // Indicamos que las slits esta en
movimiento
181
182         // Definiremos el movimiento de las slits y su direccion.
183         if (lecturai > 0){
184             myMotor_SILF->step(lecturai, FORWARD, SINGLE);
185         }
186         else{
187             myMotor_SILF->step(abs(lecturai), BACKWARD, SINGLE);
188         }
189         Serial.write('o');
190         break;
191
192     case 'J':    // SELL: 'J'
193         lectura = Serial.readString();
194         lectura.replace(String(char(13)), "");
195         lectura.trim();
196
197         lecturai = 0;
198         lecturai = (lectura.toInt())/5;
199
200         Serial.print('S');    // Indicamos que las slits esta en
movimiento
201         // Definiremos el movimiento de las slits y su direccion.
        if (lecturai > 0){

```

```
203         myMotor_SELL->step(lecturai , FORWARD, SINGLE);
204     }
205     else{
206         myMotor_SELL->step(abs(lecturai), BACKWARD, SINGLE);
207     }
208     Serial.write('o');
209     break;

211     case 'R':        // La resolucio del paso del monocromador es 0.1 mm,
// usando half step estamos dando dos pasos de 0.05 mm
        lectura = Serial.readString();
213        lectura.replace(String(char(13)), "");
        lectura.trim();

215        if(lectura.toInt() == 1){ // Es el caso para la resolucio de
1 mm, repetiremos el paso 10 veces.
217            f_r = 10;
        }
219        if(lectura.toInt() == 2){ // Es el caso para la resolucio de
0.5 mm, repetiremos el paso 5 veces.
221            f_r = 5;
        }
223        if(lectura.toInt() == 3){ // Es el caso para la resolucio de
0.2 mm, repetiremos el paso 2 veces.
225            f_r = 2;
        }
227        if(lectura.toInt() == 4){ // Es el caso para la resolucio de
0.1 mm, repetiremos el paso 1 veces.
229            f_r = 1;
        }
        Serial.write('o');
        break;
    }
231 }
```

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] D. E. Aspnes and A. A. Studna. Anisotropies in the above—band-gap optical spectra of cubic semiconductors. *Physical Review Letters*, 54(17):1956–1959, Apr. 1985. (Cited on page 7.)
- [2] B. A. Bernevig, T. L. Hughes, and S.-C. Zhang. Quantum spin hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells. *Science*, 314(5806):1757–1761, Dec. 2006. (Cited on pages 5 and 6.)
- [3] G. Bihlmayer, O. Rader, and R. Winkler. Focus on the rashba effect. *New Journal of Physics*, 17(5):050202, May 2015. (Cited on page 2.)
- [4] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber. Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56(9):930–933, Mar. 1986. (Cited on pages III, 9, and 10.)
- [5] C. Brüne, C. X. Liu, E. G. Novik, E. M. Hankiewicz, H. Buhmann, Y. L. Chen, X. L. Qi, Z. X. Shen, S. C. Zhang, and L. W. Molenkamp. Quantum hall effect from the topological surface states of strained bulk HgTe. *Physical Review Letters*, 106(12), Mar. 2011. (Cited on pages 6 and 7.)
- [6] D. J. Chadi, J. P. Walter, M. L. Cohen, Y. Petroff, and M. Balkanski. Reflectivities and electronic band structures of CdTe and HgTe. *Physical Review B*, 5(8):3058–3064, Apr. 1972. (Cited on page 5.)
- [7] J. Flores-Camacho, O. Núñez-Olvera, G. Rodríguez-Pedroza, A. Lastras Martínez, and L. Lastras-Martínez. Lock-in amplifier-based rotating-analyzer spectroscopic ellipsometer with micro-controlled angular frequency. *Revista Mexicana de Física*, 51(3):274–0, Jan. 2005. (Cited on pages 5, 16, and 18.)
- [8] C. Kittel. *Introduction to solid state physics*. John Wiley & Sons, Nashville, TN, 8 edition, Oct. 2004. (Cited on page 5.)
- [9] M. König, S. Wiedmann, C. Brune, A. Roth, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, X.-L. Qi, and S.-C. Zhang. Quantum spin hall insulator state in HgTe quantum wells. *Science*, 318(5851):766–770, Nov. 2007. (Cited on page 2.)
- [10] L. Lastras-Martínez, R. Balderas-Navarro, R. Castro-García, R. Herrera-Jasso, M. Chavira-Rodríguez, and A. Lastras-Martínez. Polarization contrast linear spectroscopies for cubic semiconductors under stress: macro- and micro-reflectance difference spectroscopies. *Annalen der Physik*, 523(1-2):121–128, Nov. 2010. (Cited on page 18.)

- [11] L. F. Lastras-Martínez, R. E. Balderas-Navarro, J. Ortega-Gallegos, A. Lastras-Martínez, J. M. Flores-Camacho, and K. Hingerl. One electron and discrete excitonic contributions to the optical response of semiconductors around  $e_1$  transition: analysis in the reciprocal space. *Journal of the Optical Society of America B*, 26(4):725, Mar. 2009. (Cited on pages 5 and 18.)
- [12] L. F. Lastras-Martínez and A. Lastras-Martínez. Reflectance anisotropy of GaAs(100): Dislocation-induced piezo-optic effects. *Physical Review B*, 54(15):10726–10735, Oct. 1996. (Cited on page 16.)
- [13] L. F. Lastras-Martínez, A. Lastras-Martínez, and R. E. Balderas-Navarro. A spectrometer for the measurement of reflectance-difference spectra. *Review of Scientific Instruments*, 64(8):2147–2152, Aug. 1993. (Cited on page 8.)
- [14] C.-H. Lin, T.-R. Chang, R.-Y. Liu, C.-M. Cheng, K.-D. Tsuei, H. T. Jeng, C.-Y. Mou, I. Matsuda, and S. J. Tang. Rashba effect within the space-charge layer of a semiconductor. *New Journal of Physics*, 16(4):045003, Apr. 2014. (Cited on page 2.)
- [15] J. E. Moore. The birth of topological insulators. *Nature*, 464(7286):194–198, Mar. 2010. (Cited on page 2.)
- [16] R. P. Prasankumar and A. J. Taylor, editors. *Optical Techniques for Solid-State Materials Characterization*. CRC Press, Apr. 2016. (Cited on page 8.)
- [17] R. Reifenberger. *Fundamentals of atomic force microscopy*. World Scientific Publishing Company, Sept. 2015. (Cited on page 10.)
- [18] K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance. *Physical Review Letters*, 45(6):494–497, Aug. 1980. (Cited on page 2.)
- [19] W. H. Weber and R. Merlin, editors. *Raman Scattering in Materials Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2000. (Cited on page 9.)
- [20] S.-C. Wu, B. Yan, and C. Felser. Ab initio study of topological surface states of strained HgTe. *EPL (Europhysics Letters)*, 107(5):57006, Sept. 2014. (Cited on pages 6 and 7.)