

Problem 1

Investiga las etapas de formación de una película delgada.

Solution: Como sabemos existen dos grupos de técnicas de deposito para películas delgadas que son por métodos físicos (PVD) y químicos (CVD) cada una tiene sus peculiaridades pero ambos parten de la formación del vapor de algún material a depositar, con la finalidad de que el vapor se condense sobre la superficie de un sustrato formando una capa delgada.

- **Para PVD:** Se denomina Deposito físico de vapor (**PVD**), al recubrimiento de superficies solidas con 'capas' (películas) delgadas mediante la condensación de un cierto vapor proveniente de un solido; en estos procesos solo están involucrados procesos físicos.[1]

Existe el caso en el que el proceso de crecimiento de la película delgada involucra reacciones físicas, pero se trata de un caso particular de *evaporación reactiva*. En cualquier método físico, el crecimiento de una película delgada se lleva acabo en tres etapas:[2]

1. **Generación** de las especies a depositar. Aquí se involucra la transición de fases condensadas en forma de solidos o líquidos a fases en vapor-gas.

En esta **primera fase**, se aumenta la temperatura de fusión y desde luego la de evaporación, que depende de la presión total del medio. Este proceso se puede llevar acabo por distintos métodos como la evaporación térmica al vacío, cañón de electrones Sputtering, que como ya hemos mencionado, consiste en la eyección de átomos, moléculas o cúmulos debido a la interacción de partículas de alta energía que inciden sobre la superficie del material solido.[3]

2. **Transporte** de partículas en su fase de vapor, desde el material solido hasta el sustrato.

En esta **segunda fase**, una vez que se ha generado el vapor a partir del solido las partículas poseen cierta energía cinética con la que se desplazan a través del medio en el que están inmersas, por supuesto, si este medio tiene baja concentración de moléculas, el camino libre medio de las partículas es mucho mayor a sus dimensiones lo que asegura que un numero mayor de partículas alcance el sustrato.

Los átomos eyectados del solido viajan para aproximarse al sustrato, donde caen para su posterior nucleación y crecimiento de la película delgada. La mayoría de las propiedades de las películas delgadas se define en esta etapa, debido a que existe una disipación de energía de los átomos provocada por la movilidad de estos sobre el sustrato a través del fenómeno de difusión superficial. Esta disipación de energía puede aumentar la migración de atomos.

3. **Condensación** del vapor para producir la estructura solida sobre la superficie del sustrato.

En la **tercera fase**, las especies en fase de vapor ya han alcanzado el sustrato, han sido absorbidas y se difunden superficialmente para iniciar el proceso de recubrimiento, en este punto la formación de la película se resume en las siguientes etapas:

- **Nucleación:** Consiste en la formación de pequeños núcleos de materia a partir de dobletes y tripletes que resultan de la movilidad de la partículas que se desorben y se desplazan sobre la superficie del sustrato debido a su energía térmica y a su energía de amarre a la temperatura del sustrato.
- **Coalescencia temprana:** En esta etapa, los pequeños núcleos se unen para formar cúmulos de mayores dimensiones y que se denominan pequeñas islas. Las islas son estructuras cuasi-estables, cada una contiene decenas o cientos de átomos cuya densidad típica es de $10^{10} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2}$. La formación de nuevos núcleos y nuevas islas continua con la incidencia de nuevas partículas.

- **Coalescencia Tardía:** Las pequeñas islas se unen para formar grandes islas que solo están separadas por pequeños canales que se van llenando con las partículas que continúan incidiendo. En algunas observaciones “in situ” se ha notado que dichas islas en la fase de coalescencia se comportan de manera semejante a los líquidos, presentando además cierta reorientación cristalográfica, que depende principalmente de la temperatura del sustrato que es alta. [3]

Posteriormente la superficie del sustrato se cubre por completo y las partículas incidentes aumentan el espesor de la película. Es importante destacar que la calidad de la película producida depende entre otras cosas de las condiciones de temperatura, limpieza y estructura del sustrato.

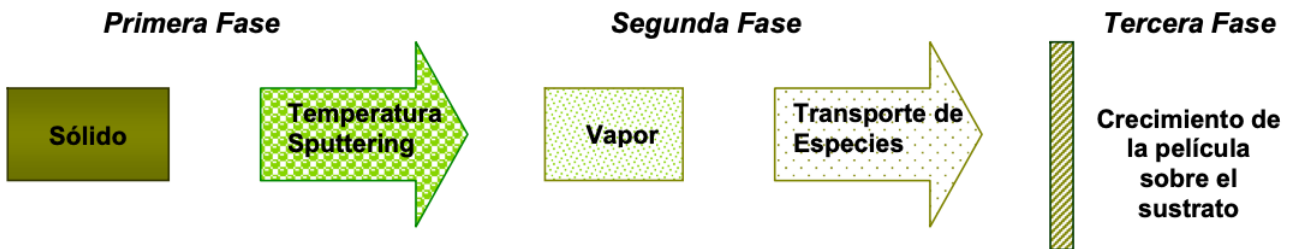


Figura 1: Diagrama del proceso de depósito de películas delgadas y recubrimientos. *Imagen tomada de la tesis [3]*

- **Para CVD:** Se denomina Depósito químico de vapor (CVD), ya que están involucradas reacciones químicas sobre el sustrato utilizando dos o más gases, o bien vapores reactivos, que son denominados precursores o promotores. En la mayoría de estos procesos, es a través de una fuente externa que se inicia y que mantiene la reacción química y es precisamente; a partir del tipo de fuente, que se nombran los diferentes métodos existentes.

A diferencia de como lo hice con los métodos de depósito PVD para el caso de los CVD no entrare en peculiaridades en sus etapas ya que muchas de sus etapas son idénticas a las de PVD (véase la figura: 2). A continuación se describe de manera general el proceso para llevar a cabo un Depósito químico de vapor.

Los procesos químicos, a diferencia de los procesos físicos (PVD), se originan en reactores, que tienen una presión base que oscila en el intervalo de presión cercano a la presión atmosférica, una vez que se estabiliza la presión base, se procede a inyectar los precursores, lo que origina que se tenga una nueva presión estable que esta por encima de la presión atmosférica. En la mayoría de los procesos químicos se tiene una temperatura alta sin embargo, en el caso de los gases reactivos, la temperatura es cercana a la temperatura ambiente.

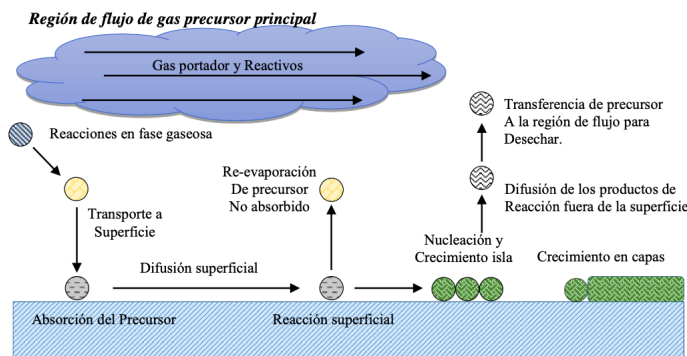


Figura 2: Diagrama esquemático de la metodología de crecimiento de películas delgadas Mediante la técnica CVD. *Imagen tomada de la pagina web: <http://ri.iberio.mx/handle/iberio/923>*

Problem 2

Buscar en línea las gráficas de reflectancia para distintas longitudes de onda y para distintos materiales.

Solution: Los materiales se comportan selectivamente con respecto a la radiación incidente esto significa que la cantidad de energía que absorben, reflejan y transmiten es diferente para cada longitud de onda y para la dirección que incide esta energía. Por supuesto depende también de la naturaleza y superficie de los materiales.

Por lo anterior podemos decir que la reflectancia se define como el valor porcentual de la energía radiante que es reflejada por un material, del total de energía radiante que incide su superficie.

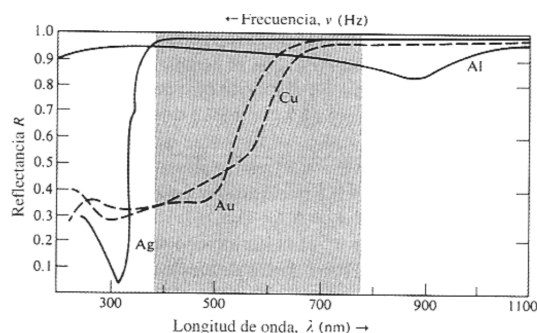


Figura 3: Reflectancia frente a longitud de onda para plata, oro, cobre y aluminio. *Imagen tomada del libro: [4]*

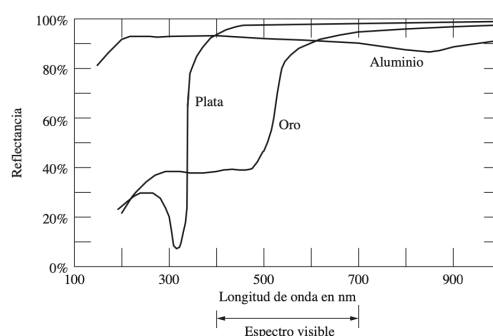


Figura 4: Reflectancia con incidencia normal de plata, oro y aluminio recientemente depositados por evaporación. *Imagen tomada del libro: [5]*

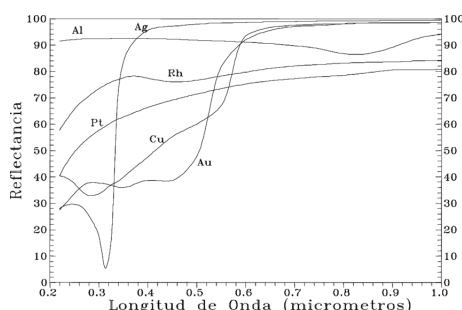


Figura 5: Reflectancia con incidencia normal de plata, oro, aluminio, Rodio, Cobre y platino recientemente depositados por evaporación. *Imagen tomada de la pagina web: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Peral/publication/267974985/figure/fig1/AS:646109823238144@1531055994128/*

Figura-6-Reflectancia-espectral-de-diferentes-metales-electro-depositados-al-vacio. png

Problem 3

A su vez, deben de investigar las características generales de los siguientes métodos de caracterización

Solution:

- **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** En el microscopio electrónico de barrido, un haz de electrones, es generado por un filamento incandescente.[6] Los electrones emitidos son acelerados por una rejilla cercana polarizada positivamente. Este haz de electrones, en su viaje a través del vacío, tiende a separarse debido a las fuerzas de repulsión electrostáticas que actúan entre ellos. Un campo eléctrico, generado por unas placas, se encargara de focalizar el haz y condensarlo. Por ultimo, en su camino hacia la muestra, el haz deflactado hacia un punto mediante bobinas electromagnéticas, de manera que estas permiten realizar un barrido en la zona que queremos estudiar.

La energía de los electrones secundarios emitidos es inferior a los 100 eV, y su rendimiento es muy alto, es decir, por cada electrón incidente podemos obtener varios electrones secundarios. Estos electrones son los que se utilizan normalmente para la formación de la imagen, aunque también se puede formar con cualquiera de los otros productos de la interacción. Así pues, una parte del haz de electrones incidente es absorbido por el material y la otra es expulsada como electrones secundarios y elásticos. De este balance se genera una corriente eléctrica a tierra que repone (o elimina) ese defecto (o exceso) de electrones y que en algunos casos también se pueden utilizar para crear la imagen.[7]

Todos estos procesos tienen lugar en una pequeña zona de unos 50 Å. El tamaño de esta región, y por tanto el contraste de la imagen, se deriva directamente del proceso que detectemos. Así, la resolución de los microscopios electrónicos viene dada esencialmente por dos factores: el tamaño de haz de electrones y la extensión de la zona donde tiene lugar la interacción haz-objeto.[8]

Ambos factores dependen a su vez de otros, como la energía del haz electrónico incidente. Esta es seleccionable por el usuario y oscila entre 1 y 40 keV. A mayor energía, mayor penetración del haz en la muestra y mayor focalización del mismo.[9]

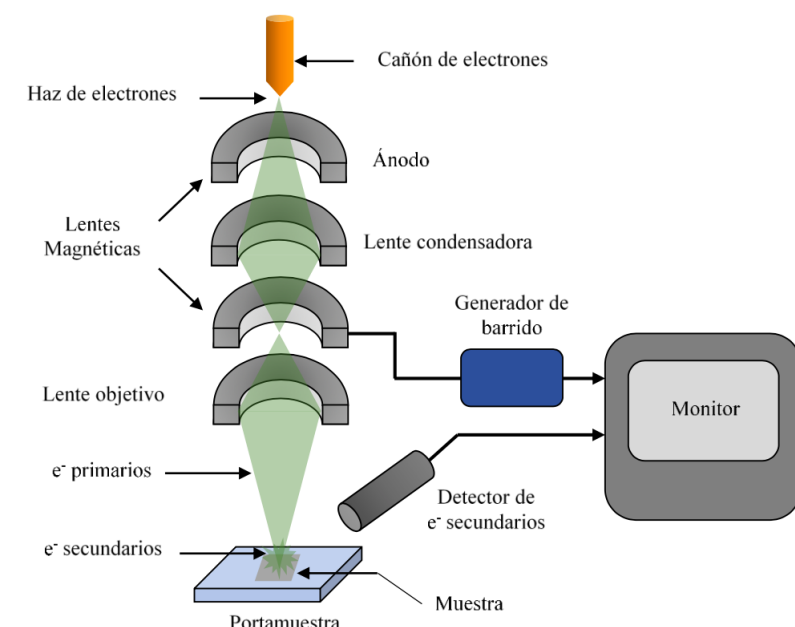


Figura 6: Esquema del funcionamiento del microscopio electrónico de barrido. Imagen tomada de la pagina web: <http://www.biologia.edu.ar/microscopia/microscopia1.htm>

- **Microscopía de Fuerza Atómica (AFM):** Esta técnica de caracterización proporciona una mapa cuantitativo de la topografía superficial de los materiales con una resolución micro-manométrica. A

diferencia de otras técnicas de microscopía, utilizando **AFM** se pueden estudiar una amplia variedad de materiales, tanto, conductores, no conductores, biológicos o no, polvos, cerámicas y películas.

Su funcionamiento se basa en la interacción de fuerzas entre una punta, con un radio de entre 5 y 30 nm, y la superficie a caracterizar. La punta se soporta sobre una ménsula (*cantiléver*) de constante elástica k_c , y cuando esta se posiciona a una distancia z de la muestra, la ménsula se flexiona hacia la superficie de la muestra, como resultado de la fuerzas atractivas entre la punta y la muestra.

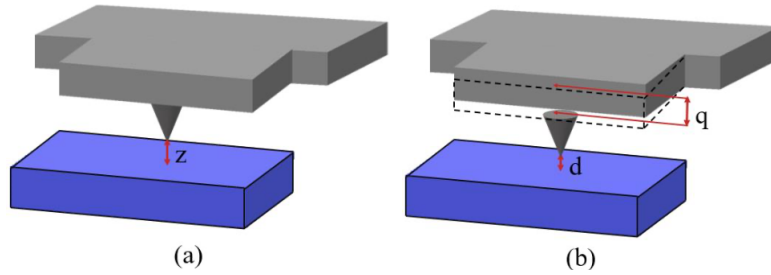


Figura 7: Aproximación del *cantiléver* hacia la muestra. a) El vértice de la punta se coloca a una distancia z por arriba de la muestra. b) Deflexión q del cantiléver como resultado de las fuerzas atractivas. *Imagen tomada de la tesis: [10]*

Cada deflexión de las ménsulas ocurre hasta que el sistema entra en equilibrio nuevamente, y su movimiento puede aproximarse en términos de la Ley de Hooke, la cual predice que una fuerza restauradora ascendente es proporcional a la deflexión q :

$$F_{\text{restauradora}} = -k_c q \quad (1)$$

En equilibrio, la fuerza restauradora es equivalente y de signo contrario a la fuerza de interacción entre la punta y la muestra que causó la deflexión. Estas fuerzas de interacción pueden ir desde el orden de decenas de pN hasta decenas de μN .

El registro de las deflexiones mientras la punta barre la muestra se lleva a cabo en un sistema como el mostrado en la figura 8.

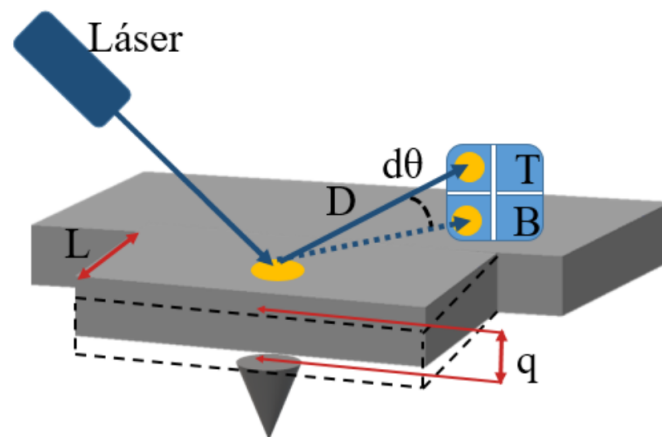


Figura 8: Configuración empleada para medir deflexiones del cantiléver. *Imagen tomada de la tesis: [10]*

En la figura 8 se observa que el láser se enfoca en la superficie del cantiléver y se refleja en un fotodiodo segmentado. El fotodiodo monitorea los voltajes producidos cuando el láser incide en su parte superior (T) e inferior (B), de manera que, dependiendo la respuesta que recibe el fotodiodo

se puede inferir la deflexión del cantiléver bajo la relación (2):

$$\Delta s \approx q \frac{D}{L} \quad (2)$$

Donde Δs es el desplazamiento del láser registrado por el fotodiodo, D es la distancia del borde del cantiléver al fotodiodo, L la longitud del cantiléver y q la deflexión.

Así también, cabe considerar que las deflexiones pueden ser del tipo atractivo o repulsivo y dependen además de la naturaleza de la punta.

En general, la técnica de **(AFM)** tiene tres modos de trabajo: contacto, no contacto y contacto intermitente (véase la figura 9).

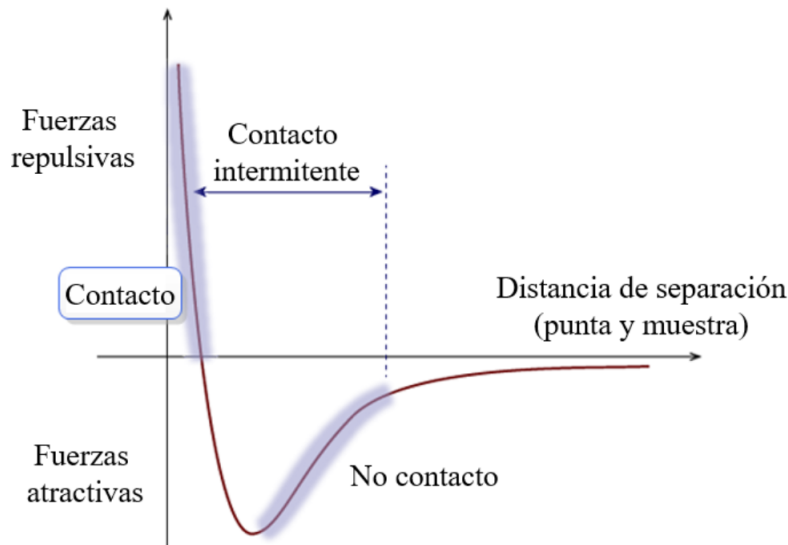


Figura 9: Esquema de la interacción de fuerzas entre la punta y la muestra en función de la distancia de separación. *Imagen tomada de la tesis: [10]*

- * El **modo contacto** se utiliza en el régimen de las fuerzas repulsivas entre la punta y la muestra, por lo que, la técnica consiste en contrarrestar la repulsión aplicando una fuerza de la misma magnitud sobre el cantiléver. De esta manera, el cantiléver se flexiona hacia la muestra, la cual se encuentra soportada por un piezoeléctrico. Una vez establecida la deflexión del cantiléver, esta se mantiene constante, mientras que la muestra se mueve en el eje z a lo largo del barrido en (x, y) . El registro del movimiento del soporte de la muestra es lo que genera la imagen topográfica de la superficie de la muestra.
 - * El **modo no contacto** se utiliza cuando las fuerzas de interacción son débiles y, por lo tanto, las deflexiones son mínimas. Bajo estas circunstancias, la punta realiza un barrido de manera sinusoidal a una frecuencia cercana a su resonancia mecánica y, de esta manera los cambios en la amplitud, fase o frecuencia del cantiléver otorgan información de los gradientes de fuerzas de la muestra.
 - * El **modo contacto intermitente** la punta realiza un movimiento sinusoidal el cual es monitoreado por el control electrónico del AFM. De esta manera, la punta toca la superficie periódicamente. En esta caso, la interacción entre la punta y la muestra presentan fuerzas repulsivas como atractivas[11].
- **Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS):** El efecto fotoeléctrico se puede aprovechar para caracterizar materiales. La luz ultravioleta y los rayos X tienen una energía para extraer electrones ligados a los átomos, moléculas o sólidos. Al irradiar el material de interés con rayos

X de frecuencia ν , los fotoelectrones expulsados tendrán energías cinéticas obedeciendo la relación $E_i = h\nu - IP_i$, donde IP_i son las energías potenciales de ionización características, correspondientes a los distintos niveles de energía de los electrones ligados del material[12]. Si se miden las energías cinéticas de los fotoelectrones desprendidos se podrá caracterizar un material irradiado, si se conocen las energías de ionización. Las siglas **XPS** abrevian "X-ray Photoelectron Spectroscopy".

Debido a la baja energía que poseen los electrones y a su fuente de interacción con la materia, solo aquellos que han sido emitidos suficientemente cerca de la superficie de la muestra escapan del material y pueden ser por tanto detectados, por lo cual el análisis solo proporciona información de la superficie del material (*generalmente hasta unos 12nm de profundidad*). Mediante **XPS** se obtiene información no sólo de los elementos presentes en el material, sino que en ocasiones la técnica es lo suficientemente sensible como para discriminar el estado químico del átomo, debido a que la energía que cede el electrón en un determinado orbital varía ligeramente dependiendo del entorno de dicho átomo. Así es posible obtener información sobre el estado de oxidación y del tipo de coordinación del átomo.

- **Espectroscopía Raman:** Las moléculas consisten de átomos, los cuales tienen una cierta masa y están conectados por enlaces elásticos. Como resultado, ellos pueden desarrollar movimientos periódicos, teniendo grados de libertad vibracional y rotacional. Todos los movimientos de los átomos en una molécula relativa a otra, son una superposición de las también llamadas vibraciones normales, en las cuales todos los átomos vibran con la misma fase y frecuencia normal. Sus amplitudes son descritas por coordenadas normales.

Los espectrómetros Infrarrojo y Raman son las herramientas más importantes que permiten observar fenómenos de vibración. Dependiendo de la naturaleza de la vibración, la cual es determinada por la simetría de la molécula, las vibraciones pueden ser activas o prohibidas en el espectro Raman o infrarrojo.[13]

Como una primera aproximación, la energía de la molécula puede ser separada en tres componentes, las cuales están asociadas con (1) el movimiento de los electrones en la molécula, (2) las vibraciones de los átomos que la constituyen, y (3) la rotación de la molécula, lo anterior está expresado en la ecuación 3.

$$E_{total} = E_{el} + E_{vib} + E_{rot} \quad (3)$$

El fundamento para esta representación matemática reside en el hecho de que las transiciones electrónicas se producen en un tiempo mucho más corto, y las transiciones rotacionales se producen en una escala de tiempo mucho más largo, esto si lo comparáramos con 10 transiciones vibracionales. La energía de traslación de la molécula puede ser ignorada en este argumento dado que su energía no es esencialmente cuantizada.

Cabe mencionar que, las transiciones rotacionales empiezan a ocurrir en la región $1 - 10^2 cm$ (región de las microondas) porque los niveles de rotación son relativamente cerca uno del otro, mientras que las transiciones electrónicas se observan en la región $10^4 - 10^6$ (región UV- visible) debido a que sus niveles de energía están muy separados. Sin embargo, esta división es algo arbitraria, para los espectros de rotación pura pueden aparecer en la región de infrarrojo lejano si están involucradas transiciones a los estados excitados más altos, y las transiciones electrónicas puras pueden aparecer en la región del infrarrojo cercano si los niveles electrónicos están estrechamente espaciados.

La figura 10 muestra las regiones del espectro electromagnético donde la energía es indicada en términos de la longitud de onda λ .

En la espectroscopía Raman se produce un fenómeno de dispersión de la luz. Cuando un haz de luz monocromática incide sobre la muestra, la luz se dispersa con frecuencias diferentes a la original, sin embargo, una pequeña parte de la luz se dispersa conservando la misma frecuencia, así, encontramos frecuencias con valores más bajos y más altos que la frecuencia original. Estas frecuencias son llamadas frecuencias Raman[14].

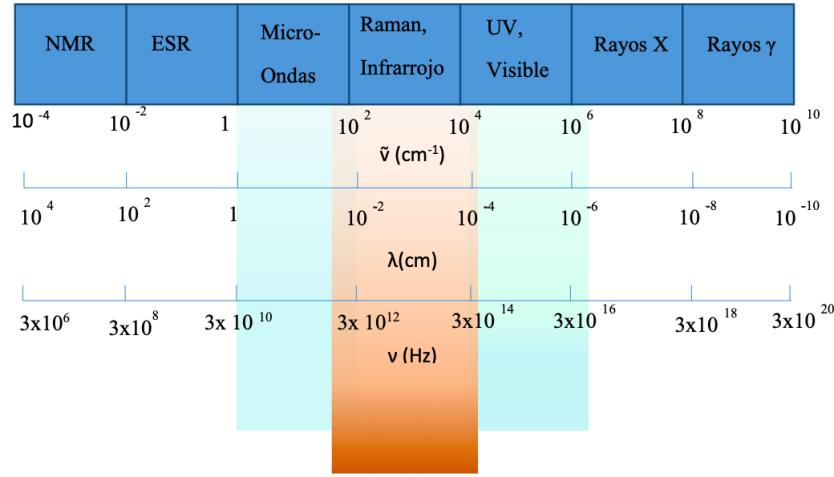


Figura 10: Regiones del espectro electromagnético y sus unidades de energía. *Imagen tomada de la la pagina web: <https://www.astrofiscayfisica.com/>*

La teoría de dispersión Raman, que en la actualidad se conoce perfectamente, demuestra que el fenómeno está relacionado con el mismo tipo de cambios vibracionales cuantizados que se producen en la absorción infrarroja. El espectro de dispersión Raman y el espectro de absorción infrarrojo, con frecuencia, suelen ser muy similares. Sin embargo, existen diferencias entre los modos vibracionales que son activo en el infrarrojo y los que lo son en Raman, como para que ambas técnicas no resulten competitivas sino complementarias. Los espectros Raman se obtienen al irradiar una muestra con una potente fuente laser de radiación monocromática visible o infrarroja. Durante la irradiación, se registra el espectro de la radiación dispersada un cierto ángulo (por lo general 90 grados) con un espectrómetro adecuado [15]. El diagrama de niveles de energía de la figura 11 proporciona una visión cualitativa del origen de la dispersión Raman y Rayleigh.

En el análisis mediante espectroscopía Raman se hace incidir un haz de luz de frecuencia 0 sobre una muestra, la mayor parte de la luz dispersada presenta la misma frecuencia que la luz incidente pero una fracción muy pequeña presenta un cambio de frecuencia, resultado de la interacción de la luz con el material. La luz dispersada que mantiene la misma frecuencia 0 que la luz incidente se conoce como dispersión Rayleigh, y no aporta ninguna información sobre la composición de la muestra analizada. La porción de la luz dispersada inelásticamente, es decir, que presenta frecuencias distintas a la de la radiación incidente es la que proporciona información sobre la composición de la muestra

y es conocida como dispersión Raman. Las nuevas frecuencias $+\nu_r$ y $-\nu_r$, son las 2 frecuencias

Raman características de la naturaleza química y el estado físico de la muestra e independientes de la radiación incidente si el fotón dispersado tiene una frecuencia menor a la incidente se produce una transferencia de energía de la molécula al fotón, el cual es dispersado con frecuencia $\nu_0 + \nu_r$ originando una dispersión de Raman-Anti-Stokes.

Cada material tiene un conjunto de valores r característicos de su estructura poli atómica y de la naturaleza de los enlaces químicos que la forman. El espectro Raman recoge estos fenómenos representando la intensidad de la luz dispersada en función del número de onda normalizado v al que se produce (ec. 4), siendo este una magnitud proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda, tal y como se mencionó anteriormente:

$$v = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} [cm^{-1}] \quad (4)$$

Puesto que el desplazamiento de las frecuencias Raman respecto a la frecuencia ν_0 es independiente

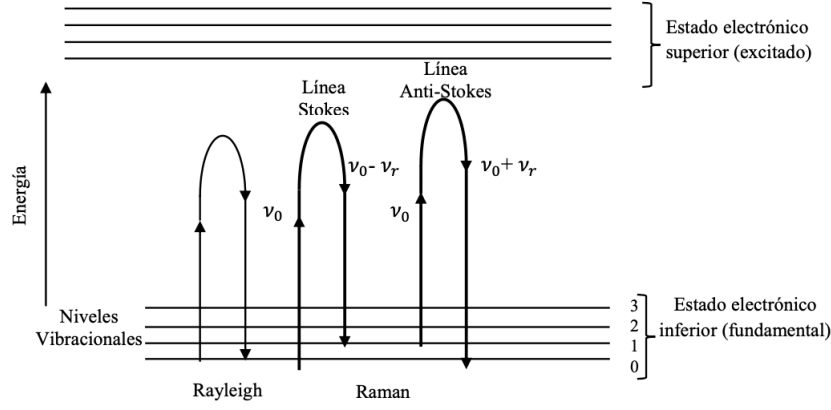


Figura 11: Diagrama de transiciones entre estados energéticos para dispersión Raman.

de esta, suele tomarse como abscisa la diferencia entre la frecuencia Raman y la frecuencia incidente, normalizada respecto a la velocidad de la luz, como se muestra a continuación:

$$v = \frac{v - v_0}{c} [cm^{-1}] \quad (5)$$

- **Espectrometría de Retrodispersión de Rutherford:** El nombre de esta técnica de análisis de materiales proviene de las investigaciones realizadas por el físico Ernest Rutherford a principios de este siglo, y con las cuales llegó a establecer su modelo atómico. Por las características del método también se le conoce como retrodispersión de iones.

Básicamente, el principio consiste en colocar un blanco frente a un haz monoenergético de iones de hidrógeno, helio o cualquier otro elemento, normalmente ligeros. Los iones retrodispersados provenientes del blanco como resultado de la interacción son detectados y analizados.

Para los iones que son dispersados por la superficie de la muestra se tendrá la siguiente expresión de la energía E :

$$E = kE_0 \quad (6)$$

donde E_0 es la energía de incidencia del ion y k es llamado *factor cinemático de dispersión*. Este factor proporciona información acerca de la masa del átomo blanco.

La forma de estudiar dicha energía consiste en contar el número de partículas que son retrodispersadas con energías que están dentro de intervalos que cubren a su vez todo el intervalo de energías esperadas como resultado de esa retrodispersión. Por su relación con el espectro en un analizador multicanal, a los pequeños intervalos de energía en adelante se les denominará canales. La forma y la altura del espectro encierran información cuantitativa del blanco.

Dispositivo experimental para RBS

El dispositivo experimental para aplicar la Retrodispersión de Rutherford se puede apreciar en la figura 12. En ella, el acelerador provee un haz (generalmente de iones de He con una energía de alrededor de 2 MeV) para hacerlo incidir sobre un blanco que se encuentra en la cámara de dispersión, que debe hallarse al vacío. La corriente del haz puede integrarse mediante un digitalizador de corriente y un escalador. En la cámara, y a un ángulo lo más aproximado posible a 180° , se coloca un detector de barrera superficial. A éste se le conecta un preamplificador, el cual envía la señal al amplificador, que a su vez transfiere la señal al analizador multicanal. Aquí finalmente se obtiene el espectro de RBS de la muestra de interés. Normalmente, el analizador multicanal ya se encuentra conectado a una computadora, con la cual es posible hacer el análisis del espectro mediante programas adecuados, para así obtener las características de la muestra, tanto en concentración como en profundidad.

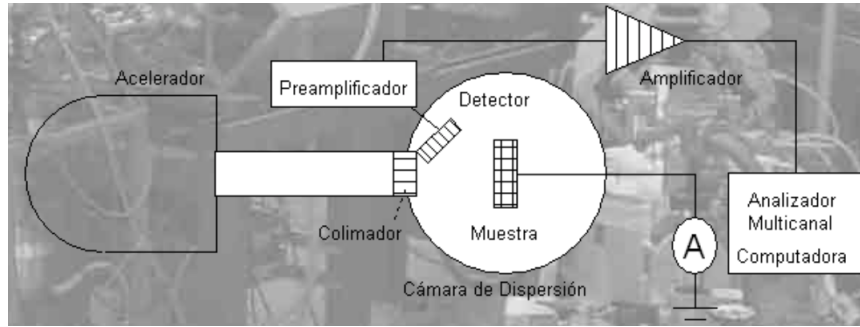


Figura 12: Diagrama del dispositivo experimental para RBS. Imagen tomada de la la pagina web: https://www.fisica.unam.mx/peletron/INVESTIGACION/tecnica_RBS.html

- **Difracción de Rayos X (XRD):** Su funcionamiento, como el nombre lo indica, se basa en el fenómeno de difracción, por lo que, consiste en la dispersión coherente de radiación al interactuar con la materia. En un arreglo periódico, la dispersión interfiere constructiva y destructivamente a determinados ángulos generando un patrón de difracción.

Tratándose de un arreglo periódico en el orden de angstroms, como lo es el ordenamiento de los átomos en una red cristalina, los efectos de interferencia sólo se observan cuando la radiación incidente corresponde a la región de rayos X en el espectro. Así, para cada conjunto de átomos se produce un patrón de difracción de difracción único y característico.

La difracción de los rayos X provocada por los arreglos cristalinos puede describirse matemáticamente por la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta_{hkl} \quad (7)$$

Donde, n es el número entero llamado orden de difracción, λ es la longitud de onda incidente, d es la distancia entre planos y θ es el ángulo en que inciden y se dispersan los rayos X. En la figura 13 se ve representada la expresion anterior.

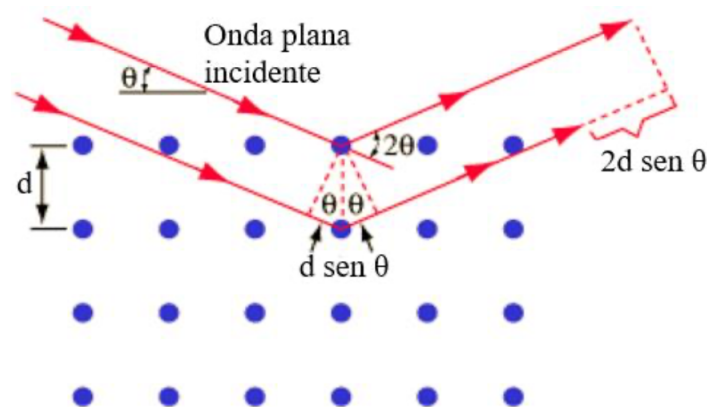


Figura 13: Representación de la ley de Bragg. Imagen tomada de la la pagina web: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/bragg.html>

Como se observa, dos rayos inciden en átomos de planos cristalinos continuos, separados por una distancia d . Y, sólo forman interferencia constructiva si la diferencia del camino óptico entre dichos rayos es un múltiplo n de la longitud de onda de los rayos X. De esta manera, las posibles direcciones de difracción dependen de la forma y a tamaño de la celda unitaria del material.

No obstante, la mayoría de los materiales no son monocristalinos, sino que se componen de cristales en diferentes orientaciones, tal como es el caso de los polvos y los solidos policristalinos. Al caracterizar

estos materiales por difracción de rayos X, se requiere de una configuración especial que permita que la radiación incida en torno a la muestra para colectar las señales a partir de diferentes ángulos.

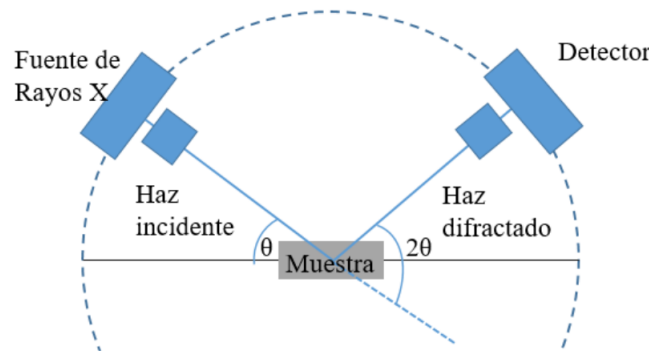


Figura 14: Representación de la ley de Bragg. Imagen tomada de la la pagina web: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/bragg.html>

El arreglo más común es el difractómetro con geometría Bragg-Brentano (véase figura 14), en donde la muestra se coloca en el centro y, la fuente de rayos X y el detector tienen movimiento alrededor de la esfera de difracción. El haz incidente y difractado tienen el mismo ángulo con respecto a la superficie de la muestra, no obstante, la detección de $\frac{\theta}{2\theta}$ puede entenderse como la variación del ángulo de salida determinado por la expresión del haz incidente[16].

Referencias

- [1] W Th Pawlewicz and R Busch. Reactively sputtered oxide optical coatings for inertial confinement fusion laser components. *Thin Solid Films*, 63(2):251–256, 1979.
- [2] Brian N Chapman. *Glow discharge processes: sputtering and plasma etching*. Wiley, 1980.
- [3] Hernandez Colorado Perla Patricia. *Elaboracion y optimizacion de espejos concentradores dobles (Al/-SiO₂/Al/SiO₂) de primera superficie para el sistema hibrido solar-geotermico*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingenieria, None 2006.
- [4] Eugene Hecht et al. *Optics*, volume 4. Addison Wesley San Francisco, 2002.
- [5] Daniel Malacara. *Óptica básica*. Fondo de cultura económica, 2015.
- [6] Michèle Gupta, Arthur J Freeman, and Donald E Ellis. Electronic structure and lattice instability of metallic v o 2. *Physical Review B*, 16(8):3338, 1977.
- [7] Rointan F Bunshah. Deposition technologies: an overview. *Deposition technologies for films and coatings: developments and applications*, pages 1–18, 1982.
- [8] J Cao, Yijia Gu, W Fan, Long-Qing Chen, DF Ogletree, K Chen, N Tamura, M Kunz, C Barrett, J Seidel, et al. Extended mapping and exploration of the vanadium dioxide stress-temperature phase diagram. *Nano letters*, 10(7):2667–2673, 2010.
- [9] Rene Lopez, TE Haynes, LA Boatner, Leonard C Feldman, and RF Haglund Jr. Size effects in the structural phase transition of vo 2 nanoparticles. *Physical Review B*, 65(22):224113, 2002.
- [10] Villareal Brito Mariela. *Síntesis y caracterización de Películas Delgadas de BiFeO₃ Depositadas por Ablación Láser*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de nanociencias y nanotecnología, None 2019.

- [11] Ronald Reifenberger. *Fundamentals of Atomic Force Microscopy: Part I: Foundations*. World Scientific Publishing Company Pte. Limited, 2016.
- [12] Fajardo Peralta Alejandro. *Síntesis y caracterización de Películas Delgadas de NiO y TiO₂ crecidas por ablación láser*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de nanociencias y nanotecnología, None 2015.
- [13] RT Kivaisi and M Samiji. Optical and electrical properties of vanadium dioxide films prepared under optimized rf sputtering conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 57(2):141–152, 1999.
- [14] ZP Wu, A Miyashita, S Yamamoto, I Nashiyama, K Narumi, and H Naramoto. Optical properties of vanadium dioxide thin film as a windows thermochromic coating. *Materiales De Construccion*, 50 (258):5–10, 2000.
- [15] JC Alonso, R Diamant, E Haro-Poniatowski, M Fernández-Guasti, G Munoz, I Camarillo, M Jouanne, and JF Morhange. Raman characterization of bi₁₂sio₂₀ thin films obtained by pulsed laser deposition. *Applied surface science*, 109:359–361, 1997.
- [16] Ron Jenkins, Robert L Snyder, et al. *Introduction to X-ray powder diffractometry*, volume 138. Wiley New York, 1996.