

# Caracterización de microondas y sus aplicaciones en el análisis estructural de cristales 2D en el laboratorio de enseñanza

J. Nieto Pérez

*Escuela de Ciencias Físicomatemáticas "Luis Manuel Rivera Gutiérrez", UMSNH,  
Apartado Postal 2-71, 58040 Morelia, Mich., México,  
e-mail: jnieto@zeus.umich.mx*

Recibido el 13 de septiembre de 2001; aceptado el 14 de agosto de 2003

En nuestro ambiente cotidiano, con la manipulación de los controles de TV, en las alarmas para autos, los teléfonos celulares y aun en la cocina, utilizamos las tecnologías del ultrasonido, infrarrojo y de las microondas; no obstante, los estudiantes universitarios no siempre tienen la oportunidad de estudiar estas frecuencias en el laboratorio de enseñanza. En este trabajo las microondas se presentan como un fenómeno susceptible de mostrar dispersión, polarización, difracción, absorción, etc., al igual que ocurre para la luz visible. Y reconociendo el poder de la imagen, como un recurso didáctico en el proceso de enseñanza, buscamos la visualización de los patrones de difracción de microondas, en analogía a las placas fotográficas utilizadas para luz visible y los rayos X. Las imágenes se obtuvieron a partir de la medición de las intensidades y utilizando un *software* apropiado para representar gráficamente la radiación. Las dificultades que se presentan en las ejecuciones experimentales, se reportan y se proponen algunas técnicas y procedimientos para superarlas. Emulando los métodos de difracción de rayos X y del análisis estructural de cristales reales, hemos obtenido los espectros de difracción de modelos cristalinos bidimensionales expuestos a las microondas.

*Descriptor:* Microondas; absorción; difracción; análisis de cristales.

In our daily environment, manipulating TV controls, car alarms, cell telephones and even in the kitchen, we usually take advantage of infrared, ultrasonic and microwave technologies. Nevertheless university students do not always have the opportunity to study such frequencies in the teaching laboratory. In this work, we introduce microwaves to be studied experimentally just as an electromagnetic phenomenon capable to be scattered, polarized, diffracted, absorbed and so on. It is comparable to the way that visible light behaves. Recognizing the didactic power of image in teaching process, we decided to get an image of microwave diffraction patterns as they are observed for visible light and X-ray on photographic films. To get such images, measurements of intensities are made and a suitable software is used to obtain a pattern of the radiation. Difficulties in carry out proposed experiments are reported and some techniques and procedures are suggested to obtain best results on emulating X-ray diffraction and structural analysis methods used for actual crystals, we have obtained the analogous diffraction pattern from two dimensional crystalline models exposed to microwaves.

*Keywords:* Microwaves; absorption; diffraction; crystal analysis.

PACS: 01; 41.20; 42.25.F

## 1. Introducción

Una retrospectiva histórica del estudio del fenómeno electromagnético, nos muestra a la *luz visible* como uno de los primeros en ser investigado aún antes de ser reconocido como tal. Huygens (1629 - 1695) propuso el modelo ondulatorio para explicar su comportamiento, pero encontró poca aceptación, fue hasta la presentación del trabajo unificador de Maxwell (1874), con las previas mediciones de la velocidad de la luz y de las constantes dieléctricas de algunos medios, que se afianzó la *teoría ondulatoria y su naturaleza electromagnética*. Posteriormente, con el trabajo de laboratorio de H.R. Hertz (1857 - 1894) se logró producir tales ondas.

En la actualidad, la teratecnología ( $10^{10}$  Hz) ha desarrollado dispositivos generadores de longitudes de onda de aplicaciones muy amplias y didácticamente muy apropiadas para llevar a cabo algunos experimentos fundamentales de la óptica al nivel de la licenciatura [1], como son los de difracción de Fraunhofer, Fresnel y los de interferencia; el mismo estudio del fenómeno electromagnético, y su comportamiento a través de diversos medios, resulta de gran interés para iniciar a los estudiantes en la región no visible del espectro elec-

tromagnético [2], al menos a la frecuencia de las microondas [3]. Los experimentos que aquí se analizan, son presentados en dos grupos, el primero (Sec. 2), es dirigido a estudiar el comportamiento y la caracterización experimental de la radiación, y el segundo (Sec. 3) orientado a mostrar algunas aplicaciones de esta frecuencia en el análisis estructural [4, 5] de modelos cristalinos en dos dimensiones (2D).

Para caracterizar la radiación, sugerimos algunos experimentos orientados a reconocer algunas de las peculiaridades de la *radiación electromagnética*. En las aplicaciones, se recurre a la analogía entre el estudio experimental de las estructuras cristalinas con la *radiación X* y su correspondiente modelación con las microondas, específicamente se aborda el caso de cristales bidimensionales y se presentan los resultados experimentales obtenidos por estudiantes. Finalmente presentamos nuestras conclusiones.

## 2. Caracterización experimental de la radiación

Antes de iniciar el trabajo experimental con alguna radiación, es muy conveniente conocer aquellos aspectos que la identi-

fican. Por ejemplo, caracterizar la fuente emisora, su naturaleza, su distribución espacial de intensidades (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), su longitud de onda y su dispersión a través de diferentes medios. Lo anterior, nos permitirá optimizar sus aplicaciones y también, considerar algunos cuidados para su manipulación en el laboratorio.

## 2.1. Generación y detección de microondas. Alineación del sistema óptico

Actualmente para la generación y emisión de microondas se cuenta con una gran variedad de dispositivos de estado sólido como los comentados en la Ref. 3. Sin embargo, aunque el estudio de estos dispositivos generadores merecen un tratamiento más amplio, no es nuestro propósito abordarlo en este trabajo. Para los experimentos aquí presentados, utilizamos como fuente generadora un *Klystron* (Un tubo emisor que utiliza el principio de modulación de velocidad [3,6]), que emite a una frecuencia, a una fase y una polarización bien definidas.

En lo que respecta a la detección de la radiación, utilizamos un diodo Schottky (Recomendamos el uso de los diodos 1N415C, 1N23B, 1N415E, 1N416C, 1N416E) sensible en la banda X de microondas, alojado dentro de una cavidad metálica con una ventana rectangular de 1.0 cm  $\times$  2.3 cm. Sobre la ventana del emisor y la del receptor, se encuentran sujetas unas cornetas metálicas, muy útiles para la amplificación de la emisión y la detección, pero también pueden provocar reflexiones de la radiación desde sus superficies externas, y originar perturbaciones que alteran las medidas de las intensidades. Para disminuir este efecto perturbativo espurio, nos ha resultado muy útil remover la corneta del detector y cubrir su base metálica con una máscara de plastilina (material absorbente), aunque esto repercute en una disminución en la intensidad de recepción, basta aumentar la ganancia del receptor para compensarla.

Una vez optimizada la detección, puede procederse a la *alineación del sistema óptico*, advirtiendo de antemano, que de este proceso depende en gran parte el éxito de nuestros experimentos. En la alineación, se busca asegurar que los centros del detector  $D$  y del emisor  $E$  se encuentren sobre la recta que pasa por ellos (eje  $Z$ ) (Ver Fig. 9, sin la muestra) Para nuestro trabajo hemos encontrado muy práctico dirigir el haz en dirección de la vertical y hacia arriba (recomendable sólo si el techo no es bajo ni metálico); esto permite esquivar aquellas reflexiones provenientes de objetos metálicos ubicados a los lados.

Una vez alcanzada aquella alineación geométrica, se procede a alinear la dirección del campo  $\vec{E}$  de la onda emitida con la del diodo detector. Esto es, si las ventanas de  $E$  y  $D$  forman un cierto ángulo de giro relativo, el vector  $\vec{E}$  de la microonda polarizada también estará girado respecto del diodo detector el mismo ángulo, detectando solamente una componente del campo  $\vec{E}$ , y la correspondiente medida de intensidad, resultará alterada. La alineación de  $\vec{E}$  con el diodo detector, se logra girando alternativamente a  $D$  y  $E$  en torno a la línea que pasa por sus centros (*eje-Z*), en cada giro, debe ob-

servarse la intensidad medida. Cuando  $D$  se encuentra alineado con el plano de polarización de  $\vec{E}$ , la intensidad detectada debe ser máxima. Cuando  $D$  y  $E$  se encuentran perpendiculares, la lectura en el detector será mínima. En la práctica el mínimo de intensidad difícilmente será cero, debido a la presencia de ruido de fondo, pero un simple "ajuste a cero" de nuestro detector, eliminará a este error sistemático.

## 2.2. Distribución espacial de intensidades

Cuando proyectamos una luz láser visible sobre una pantalla plana perpendicular al haz, observamos una región circular iluminada con una intensidad máxima en su centro y desvaneciéndose radialmente al exterior. Sin embargo, dada la imposibilidad de visualizar y de imprimir las microondas sobre una placa fotográfica, nos propusimos, por motivos didácticos, conseguir su representación gráfica. Para esto, primeramente medimos las intensidades  $I_i(x_i, y_i)$  sobre los puntos  $P_i(x_i, y_i)$  de un plano ("pantalla") normal a la dirección del haz. Las mediciones se efectuaron colocando al detector sobre 529 puntos distribuidos sobre una retícula de 23 renglones  $\times$  23 columnas; la distancia de punto a punto de la malla fue de 1.5 cm  $\times$  1.5 cm (Datos obtenidos por el estudiante Arturo Godinez). La retícula se trazó sobre una placa de acrílico (Pueden usarse otros materiales como el vidrio, transparentes a las microondas) de 3mm de espesor y normal a la dirección del haz. El detector sin su corneta permitió una colocación más precisa sobre cada punto y minimizar las perturbaciones por reflexión. La Fig. 1 muestra las gráficas en 3 y 2 dimensiones, las cuales permiten formarnos una imagen de la radiación. La gráfica de la función  $I(x, y)$  en 2 dimensiones es similar a la observada para el láser proyectado sobre una pantalla o a la imagen impresa con rayos X sobre una placa fotográfica.

El procedimiento experimental, aunque sencillo, nos ocupó un tiempo de trabajo de casi 4 horas, debido a la captura manual de las medidas de las intensidades; en una segunda ocasión, conectando el detector a una computadora personal (Diseño y construcción propios de Misael Vieyra Rios), sólo nos llevó una hora.

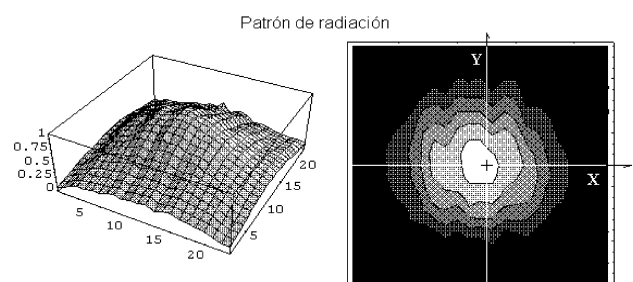


FIGURA 1. Distribución espacial de las intensidades sobre una superficie de 34.5 cm  $\times$  34.5 cm normal al vector  $\vec{k}$  de propagación y situada en  $z = 104$  cm del emisor con  $\lambda = 3.0$  cm. A la izquierda, la gráfica tridimensional y su correspondiente gráfica 2D (derecha) en apariencia de una "foto", tal como "verían unos ojos" sensibles a microondas.

**2.3. Ondas estacionarias en el aire. Determinación de la longitud de onda y la frecuencia**

De la misma manera que la luz visible se refleja desde un espejo, las microondas lo hacen desde superficies metálicas. Cuando un haz de microondas viaja en la dirección  $\vec{k}$  e incide normalmente sobre una placa metálica, la onda se refleja en dirección  $\vec{k}'$ , (Fig. 2).

La coherencia de las microondas permite la superposición de las ondas incidente y reflejada. La onda estacionaria (Las ondas estacionarias pueden producirse también utilizando guías de ondas, aquí solo nos ha interesado observarlas para una radiación abierta y al aire), aparece siempre y cuando la separación  $d$  (placa - detector) satisface la siguiente ecuación:

$$d = n \frac{\lambda}{2}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Por otra parte, tanto la absorción (Sec. 2.5) como la dispersión angular del haz, son mayores cuanto más grande sea  $d$ . Mientras la absorción amortigua la amplitud, la dispersión produce un cambio en  $\lambda$ , de tal manera que las ondas incidente y reflejada pueden originar una onda viajera [2]. Es este efecto el que puede evitar la formación de la onda estacionaria. El estudiante debe ponderar la influencia de la absorción y la dispersión angular por el aire, para determinar la distancia  $d$  apropiada, experimentalmente hablando. Esto significa que por una parte debe tomarse una distancia que satisfaga la Ec. (1) y por otra, que las magnitudes de la dispersión y absorción permitan el surgimiento de la onda estacionaria. Una vez que se consigan las distancias óptimas, los nodos y antinodos se detectan con nitidez.

Además de que el experimentador tiene la oportunidad de reconocer las condiciones para la producción de ondas estacionarias, y poder evitarlas cuando no las requiera, también puede determinar  $\lambda$ . En nuestro experimento, realizado con este objetivo, se efectuaron 100 mediciones de las distancias internodales, el valor más probable obtenido fue  $\lambda/2 = 1.50 \pm 0.08$  cm. La frecuencia estimada, suponiendo una velocidad en el aire similar a la del vacío ( $v_{aire} \sim c$ ), es de 10 Ghz, y corresponde a la banda X.

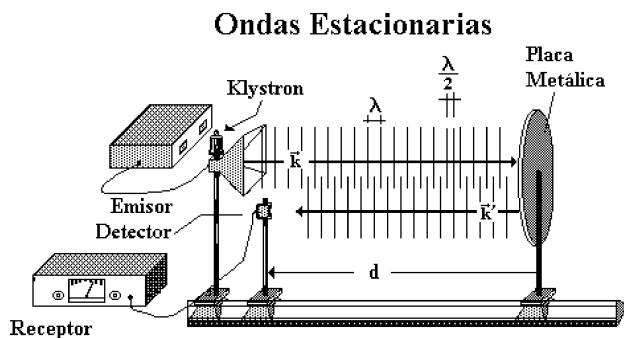


FIGURA 2. Superposición de las ondas incidente  $\vec{k}$  y reflejada  $\vec{k}'$  desplazadas verticalmente, solo para ilustrar su independencia. La facilidad con que surgen las ondas estacionarias, nos muestran la gran coherencia de la perturbación.

**2.4. Naturaleza electromagnética de la radiación. Difracción a través de aberturas**

La propagación rectilínea de la luz, como lo plantearon Pitágoras, Demócrito, Ptolomeo, Aristóteles y el mismo Euclides entre otros, fue cuestionada experimentalmente por José Ma. Grimaldi (1618 - 1663), al hacer pasar luz a través de un pequeño orificio y mostrar que el haz emergente iluminaba un área mayor. Desde entonces, cuando una radiación se difracta a través de una abertura, se reconoce su comportamiento ondulatorio.

*2.4.1. Carácter ondulatorio de la radiación*

Experimentalmente, las microondas manifiestan su carácter ondulatorio al pasar el haz por aberturas con geometrías y tamaños diversos. La fabricación de aquellas aberturas puede resultar impráctica si se recurre a las usuales láminas metálicas rígidas; pero, el trabajo se simplifica si usamos papel aluminio adherido a una placa de acrílico que le dé soporte y rigidez (Fig. 3).

Esta sencilla técnica, facilita el estudio de la difracción para formas muy variadas de las aberturas, rectangulares circulares, etc. No obstante, las mayores dificultades para realizar estos experimentos surgen de la presencia de las perturbaciones provenientes de los haces reflejados por superficies metálicas cercanas. Este aspecto, es tratado con amplitud en la Ref. 7, donde se propone el uso de placas paralelas a la salida del emisor para eliminar las interferencias no deseadas. Sin embargo, nuestra propuesta de ejecución experimental consiste en fabricar las aberturas de la manera antes descrita y utilizar el detector sin corneta y con máscara absorbente ( $\sim 0.5$  cm de espesor).

Cuando el experimento se planea bajo las condiciones que exige la difracción de Fresnel [2], la confrontación teórica con el resultado experimental resulta razonablemente satisfactoria. Por ejemplo, para una ranura rectangular con

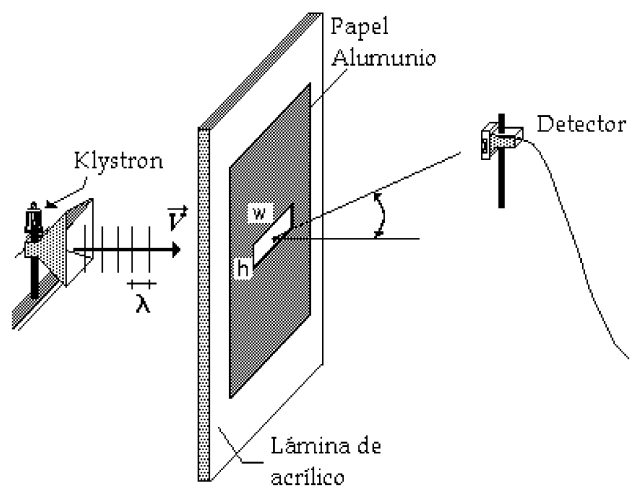


FIGURA 3. Un papel aluminio adherido a una placa de acrílico permite realizar una diversidad de aberturas para observar la difracción de las microondas.

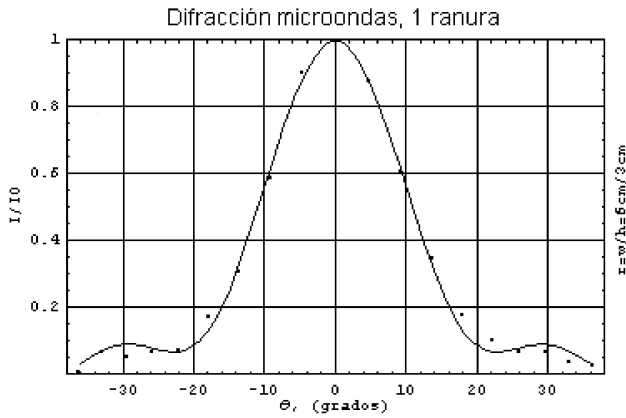


FIGURA 4. Distribución de intensidades de las microondas después de difractarse por una ranura rectangular de 6 cm de ancho ( $w$ ) por 3 cm de alto ( $h$ ).

una  $r = (6/3)[r \equiv (w/h)]$ , los puntos experimentales (Datos obtenidos por Misael Vieyra Rios y Tzihué Cisneros Pérez) correspondientes a las intensidades medidas en función del ángulo  $\theta$  (Fig. 3), se ajustaron a la curva del cálculo teórico de Fresnel como aprecia en la Fig. 4. En este experimento, la distancia entre los planos de la ranura y el de detección fue de 31 cm.

2.4.2. Naturaleza electromagnética. Polarización

El experimento de Etienne Malus (1775 - 1812) en su versión para microondas [2], permite al estudiante mostrar la naturaleza electromagnética de una radiación y, a diferencia de la luz visible, éste solamente requiere de un polarizador (Aunque también puede omitirse, pruebe girando el emisor respecto al receptor) que el estudiante también puede construir con el papel aluminio recortado en tiras de  $\sim 3.5$  mm de ancho, separadas igual distancia y de una longitud del orden de 15 cm sujetas a una placa de acrílico  $\sim 15$  cm  $\times$  15 cm (Fig. 5). Este sistema de conductores metálicos macroscópicos paralelos facilita el entendimiento de la relación entre la dirección del conductor y la dirección de oscilación del campo eléctrico  $\vec{E}$ .

La explicación del mecanismo de polarización resulta muy didáctico, al considerar sobre cada conductor una

Microondas

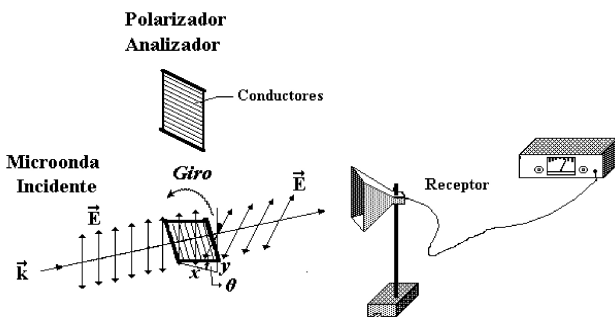


FIGURA 5. Montaje experimental para mostrar la polarización de microondas solo se requiere un polarizador.

Ley de Malus

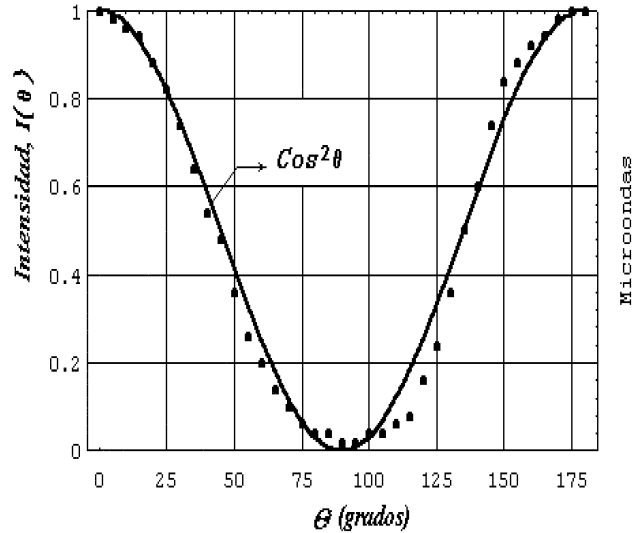


FIGURA 6. El carácter electromagnético de las microondas se manifiesta por su polarización a través de los conductores de la rejilla.

corriente inducida por acción del campo  $\vec{E}$  externo. La ley de Malus [Ec. (2)], se encuentra midiendo la intensidad relativa  $I/I_{max}$  en función del ángulo  $\theta$  entre el campo  $\vec{E}$  y la dirección de polarización de la rejilla (Fig. 6):

$$\frac{I(\theta)}{I_{max}} = \cos^2 \theta. \tag{2}$$

2.5. Absorción de microondas

La absorción de la energía de las microondas por el medio de propagación es y ha sido un tópico importante en el estudio teórico del fenómeno electromagnético, pero experimentalmente no siempre recibe el mismo énfasis, no obstante que ahora resulta muy útil para la tecnología relacionada con la cocción de alimentos.

El planteamiento que aquí se hace al estudiante es el de determinar experimentalmente la parte imaginaria del índice de refracción complejo  $n = n_R + in_I$  y, consecuentemente, inferir la existencia de una correspondiente función dieléctrica compleja [1]  $\epsilon = \epsilon_R + i\epsilon_I$  para explicar la mecánica de la absorción.

Un breve análisis teórico nos muestra que si una onda plana  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx)$  se propaga en una dirección  $x$ , su amplitud e intensidad decae exponencialmente [2] con la distancia  $d$  a la fuente emisora:

$$E = \left( E_0 \exp^{-\omega \frac{n_I}{c} d} \right) \exp^{i \omega \left( t - \frac{n_R}{c} d \right)}, \tag{3}$$

y en términos de las intensidades

$$I = I_0 \exp^{-\alpha d}, \tag{4}$$

donde  $\alpha$  es llamado coeficiente de atenuación [Modelo exponencial de Bougier (1698-1758) [2]], el cual depende de  $n_I$ ,

la parte imaginaria del índice de refracción

$$\alpha \equiv 2\omega \frac{n_I}{c} \quad (5)$$

En este experimento, después de alinear al emisor con el detector, se miden los máximos de intensidad en el aire en función de la distancia  $d$  que los separa. La gráfica y la expresión de comportamiento  $I = I(d)$  obtenidas se presentan en la Fig. 7 y la Ec. (6).

La curva de ajuste obtenida para el aire resultó

$$I = 2.15 e^{-0.06 d}; \quad I_0 = 2.15, \quad \alpha = 0.06/\text{cm}. \quad (6)$$

La llamada *profundidad de penetración*, definida como  $1/\alpha$  en este caso es de 16.6 cm. Y aunque en principio,  $\alpha$  puede involucrar tanto a los coeficientes de *absorción*  $\alpha_a$ , como de *dispersión*  $\alpha_d$ , una condición necesaria para que la dispersión ocurra es que la longitud de onda ( $\lambda \sim 3$  cm) y el objeto dispersante sean comparables en tamaño, podemos considerar  $\alpha_d \sim 0$ , dado que las microondas tienen una longitud de onda mucho mayor que las partículas suspendidas en el aire ( $\mu\text{m}$ ). Por tal razón, en las Ecs. (5) y (6)  $\alpha$  es reconocida como la  $\alpha_a$  de absorción. El índice  $n_I$  puede entonces evaluarse con la frecuencia ( $\omega = 2\pi\nu$ ) previamente obtenida para las microondas en la Sec. 2.3.

### 3. Aplicaciones. Análisis estructural de modelos cristalinos 2D

Con los experimentos anteriores se ha buscado la caracterización de la radiación. Ahora, vamos a considerar la utilización de las microondas para el estudio de la estructura de la materia con modelos cristalinos. En especial, abordaremos el análisis de cristales bidimensionales (2D), a partir de sus espectros de difracción; una modalidad prácticamente no abordada en el laboratorio de enseñanza. Aunque, por ser ineludible el ya clásico método de la difracción de Bragg, lo trataremos sólo muy someramente para cristales 3D.

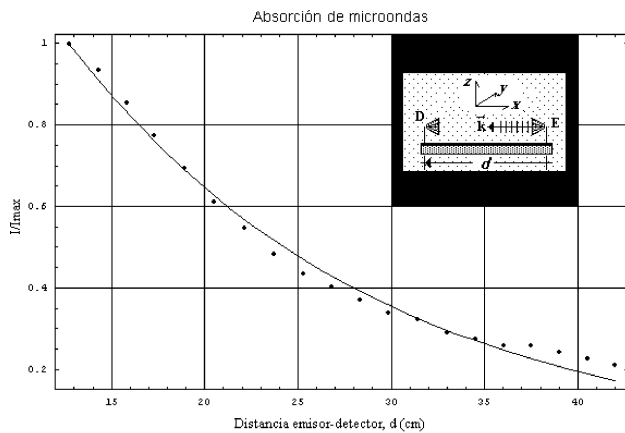


FIGURA 7. Absorción de la irradiancia  $I/I_{\text{máx}}$  de la microonda en el aire en función de la distancia emisor-detector.

### 3.1. Determinación de distancias interplanares en cristales. Experimento de Bragg

Como ya es conocido, William Henry Bragg (1862 - 1942) explicó la difracción en cristales 3D como una reflexión especular de la radiación X desde sus planos cristalinos. Los máximos de intensidad ocurren en puntos donde las reflexiones de los planos adyacentes interfieren en forma constructiva, *i.e.*, con diferencias de fase de  $2n\pi$  radianes (Ec. 7), donde  $n$  es un entero positivo que indica el orden de difracción:

$$\Lambda = n\lambda; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$\Lambda \equiv 2d \sin \theta$ , es la diferencia entre los *caminos ópticos*.

Una emulación experimental (EE) de la difracción de Bragg con las microondas, produce una experiencia didáctica muy interesante. Con ella el estudiante arma su propio “macrocristal” utilizando esferas metálicas (“balines”) y simula la “base cristalina”. Los balines dispersarán a las microondas de manera análoga a los átomos dispersores de la radiación X en un cristal real. Los balines son colocados en los puntos de una red predeterminada, separados una distancia  $d$ , obtenida mediante el escalamiento de la geometría del sistema nanométrico que se desea emular. La determinación del factor de escala se hace en términos de las longitudes de onda de los rayos X ( $\lambda_X$ ) y de las microondas ( $\lambda_{\text{micr}}$ ), por ser los referenciales comunes entre el sistema real y su modelo. Esto es,

$$\text{Factor de Escala} : \quad \frac{\lambda_{\text{micr}}}{\lambda_X} \sim \frac{10^{-2}}{10^{-9}} \sim 10^7. \quad (8)$$

De esta manera, si la separación interplanar en un cristal real es  $d_{\text{real}} \sim 10^{-9}m$ , la correspondiente distancia  $d_{\text{mod}}$  en el modelo será

$$\frac{d_{\text{mod}}}{d_{\text{real}}} \sim 10^7, \quad d_{\text{mod}} = 10^{-9}m \times 10^7 \sim 10^{-2}m. \quad (9)$$

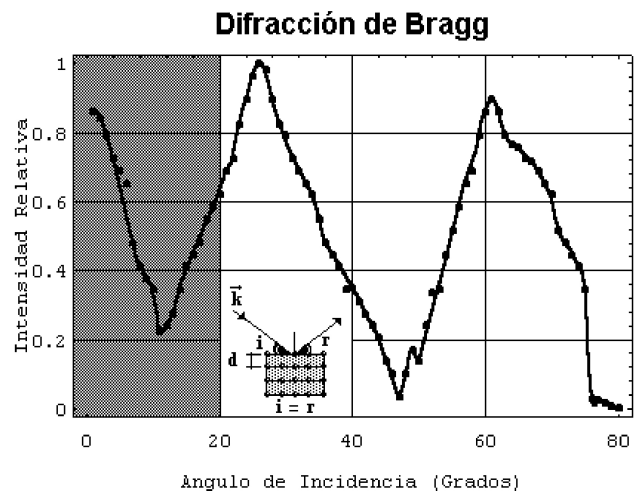


FIGURA 8. Difracción de microondas por un modelo de cristal cúbico, las intensidades máximas ocurren solo para aquellos ángulos que satisfacen la condición de Bragg.

El método de EE nos permite estudiar algunos sistemas físicos, como son los arreglos cristalinos en 2 y 3 dimensiones. En los laboratorios de enseñanza este experimento puede cubrir dos objetivos alternativos. Uno, para determinar  $\lambda$ , si se conoce la distancia interplanar  $d$ ; y otro, conocida  $\lambda$ , determinar  $d$ .

Nuestro modelo tridimensional, se armó con láminas de poliuretano, sobre ellas, se dibujó previamente la red de la estructura y se insertaron los balines en los puntos de ésta; cada placa, emula un plano cristalino, con cinco placas superpuestas conformamos un cristal 3D. Para la determinación experimental de la distancia interplanar, se desplazaban angularmente en intervalos de  $1^\circ$  (sobre el goniómetro), tanto al emisor como al detector, midiendo paso a paso la intensidad del haz reflejado en función del ángulo (Datos obtenidos por Alejandro Waldo Zalapa. La región sombreada ( $\theta < 20^\circ$ ), indica que en esos ángulos emisor y detector se encuentran muy próximos, y se generan interferencias espurias que empiezan a predominar, produciendo medidas dudosas). Los ángulos de Bragg de acuerdo a la Ec. (7), se reconocen en la Fig. 8. El primer ángulo ( $n=1$ ) se registró en  $\theta_i = 25.0^\circ$  correspondiente a una distancia interplanar  $d = 3.5$  cm; para ( $n=2$ ),  $\theta_i = 60.0^\circ$ ,  $d = 3.5$  cm, medidas que efectivamente correspondieron a las distancias interplanares del modelo cristalino. Los balines empleados tenían de diámetro  $\phi_b \sim 1$  cm.

El error experimental con  $\lambda$  constante, es calculado con la Ec.(10), obtenida por diferenciación de la Ec. (7).

$$\Delta\theta = \left| -\frac{n\lambda}{2d^2 \cos\theta} \right| \Delta d \quad (10)$$

El goniómetro empleado tenía una resolución de  $1^\circ$ , el cual produce un error en la distancia interplanar  $\Delta d$  de 1.4 mm, esto es, un error porcentual de 4%. Cuando se usan balines con  $\phi = 0.5$  cm, los picos de intensidades para los ángulos de Bragg resultan más definidos.

### 3.1.1. Patrones de difracción y defectos puntuales en cristales

La determinación de la distancia interplanar en modelos cristalinos no es suficiente para definir su geometría, se requiere complementar la caracterización con el análisis de su difractograma. Sin embargo, el no poder visualizar el espectro de difracción de las microondas, representaba una fuerte limitación. Ésta fue superada al medir las intensidades de la radiación difractada sobre los puntos de un plano, ubicado donde debiera colocarse la película fotográfica para una radiación X (Fig. 9). El modelo del cristal bidimensional fue armado sobre una placa de acrílico en la cual se trazó una malla rectangular, y sobre cada punto de ésta colocamos un "balín" (de diámetro 1.74 cm), la distancia centro a centro entre balines fue de 3 cm, las distancias emisor-cristal y cristal-detector fueron de 13.5 cm.

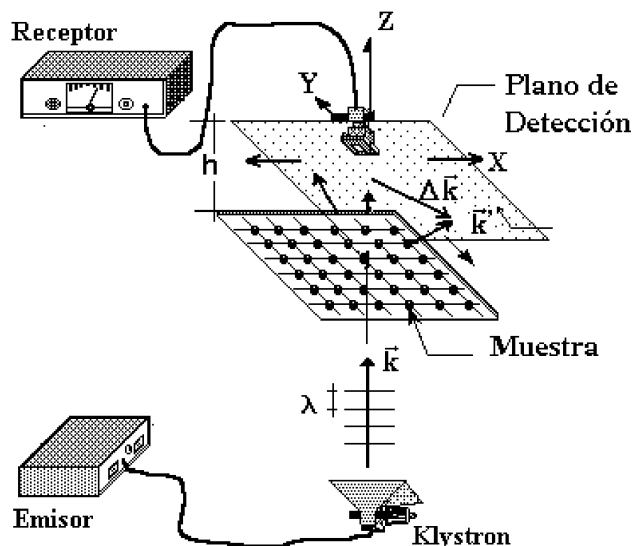


FIGURA 9. Montaje experimental para obtener el patrón de difracción de un modelo de cristal 2D. El detector se desplazó sobre el plano de detección paralelo al de la muestra.

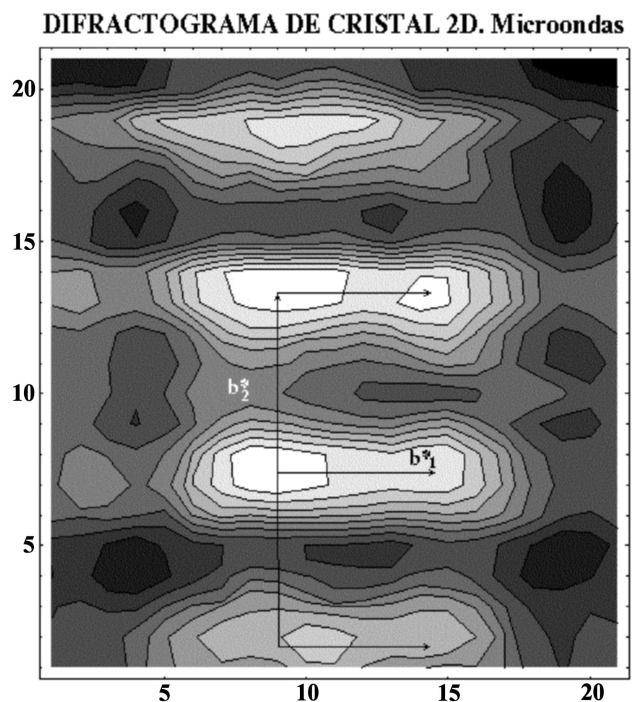


FIGURA 10. En el difractograma obtenido, pueden trazarse los vectores de la base recíproca  $\vec{b}_i^*$ .

El modelo fue irradiado con el haz de microondas y las medidas de las intensidades fueron procesadas con un *software* que nos permitió emular una fotografía del espectro de difracción (Las Figs. 10 y 11 se obtuvieron de los datos obtenidos por Gildardo J. Baca Silva) (Fig. 10).

El vector  $\Delta\vec{k}$  es la diferencia entre los vectores de la onda incidente  $\vec{k}$  y el emergente  $\vec{k}'$ . La máxima intensidad se observa cuando se satisface la condición de Bragg,  $|\Delta\vec{k}| = n\lambda$ .

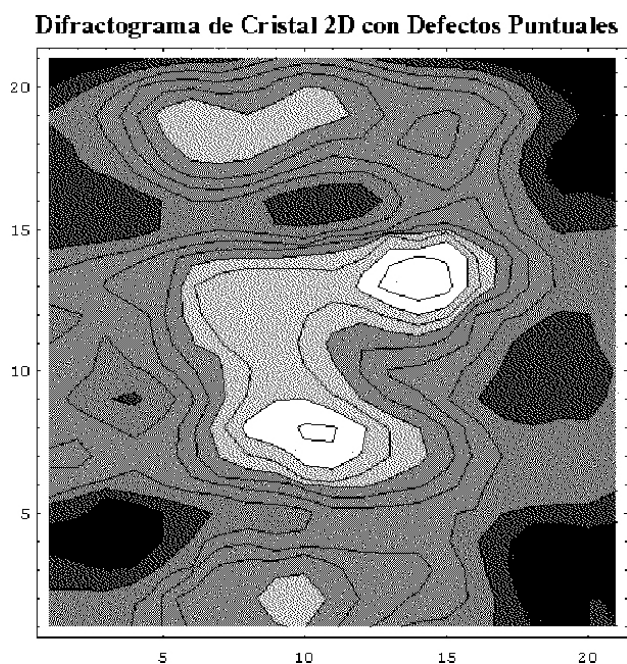


FIGURA 11. Nuevamente el patrón de difracción del cristal 2D, pero ahora con 3 vacancias provocadas. Nótese la pérdida de la simetría con respecto de la Fig. 10.

Con el espectro de difracción visible, se consigue un recurso didáctico muy valioso, ya que permite al estudiante trazar los *vectores base*  $\vec{b}_i^*$  *recíprocos* [4] sobre el mismo espectro (Fig.10), y a partir de éstos, encontrar los respectivos *vectores base directos*  $\vec{b}_i$ , para determinar la geometría del cristal.

Con el interés de conocer el patrón de difracción del mismo cristal, pero ahora con “defectos puntuales” (vacancias), se repitió el experimento anterior retirando tres balines del cristal original, obteniéndose el espectro de la Fig. 11. Obsérvese la pérdida de la regularidad de los máximos de intensidad.

#### 4. Conclusiones

Los experimentos introductorios al estudio del fenómeno electromagnético con microondas, como los de la determinación de la longitud de onda, la difracción a través de ranuras, de polarización y de absorción de energía por el medio de propagación, fueron realizados para reconocer y evidenciar

algunas de las peculiaridades que caracterizan a esta radiación.

En las aplicaciones didácticas de las microondas, se plantearon también técnicas alternativas o complementarias a las reportadas en la literatura, y los resultados obtenidos fueron muy congruentes con la expectación teórica respectiva; esto nos lleva a reconocer la importancia de no obviar los cuidados que para la realización experimental se recomiendan en este trabajo.

Particularmente, el experimento para estudiar la absorción de microondas fue enfocado a determinar la parte imaginaria del índice de refracción de un medio y no solamente al cálculo de la determinación del coeficiente de atenuación. Usualmente este tema es poco tratado con esta orientación.

El clásico experimento de la difracción de Bragg es presentado tanto para introducir al estudiante al tema de la difracción, como para advertir del error en la determinación de la distancia interplanar en cristales tridimensionales.

Bajo la estrategia didáctica de la EE para la obtención de patrones de difracción con rayos X, construimos el modelo de un cristal nanométrico, aplicando un factor de escala, calculado a partir de las longitudes de onda los rayos X y de las microondas; posteriormente, del modelo irradiado con microondas, logramos visualizar su difractograma, el cual nos permitió parodiar el proceso de análisis de los espectros de difracción en cristales reales. La visualización de aquellos espectros constituyen valiosos recursos didácticos para la práctica del análisis cristalográfico, ya que nos permiten el trazo de los vectores base recíprocos y, consecuentemente, la identificación de la geometría estructural del modelo. Finalmente, diremos que la ejercitación experimental de los métodos y técnicas propuestos, nos han dejado una experiencia didáctica muy interesante, al haber conseguido resultados muy congruentes con la teoría.

#### Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud a los estudiantes del curso de Laboratorio de Proyectos de la Escuela de Ciencias Físicomatemáticas que colaboraron en este trabajo. En especial, agradezco al Técnico Académico Misael Vieyra Rios por el desarrollo de la electrónica del detector de microondas. El financiamiento se obtuvo del Consejo de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo el proyecto de clave CIC 8.8.

1. E. Hetch y A. Zajac, *Óptica* (Fondo Educativo Interamericano, S.A. 1977).
2. C.L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1960).
3. A.W. Scott, *Understanding Microwaves* (John Wiley & Sons, Inc., 1993).
4. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley & Sons, Inc. Fourth edition. 1971).
5. L. Bragg. *The Crystalline State. Vol I* (G. Bell and Sons, LTD. London, 1966).
6. *Berkeley Physics Laboratory Part B* Mc Graw -Hill Book Company (Traducción al español, por Editorial Reverté, 1970).
7. M.J. Blair, “Using 3 cm microwaves for optics laboratory experiments” *Am. J. Phys. A* **60** (I), January (1992).