

Reporte práctica 3: Microscopía por emisión de campos

Eduardo Esquivel Ramírez, Jonathan Lozano Mayo* and Profesores: M. en C. Laura Helena González Trueba, Dr. Juan López Patiño, Dr. Rodolfo Ezequiel López Romero. Ayudante: Miguel Ángel Campos González
Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México
(Dated: May 12, 2018)

Resumen: Usando la técnica de microscopía de emisión de campo se observó la proyección de una celda unitaria de monocristal de tungsteno de tipo cúbica centrada en el cuerpo en el plano cristalográfico (110), además se caracterizó la imagen obtenida en la pantalla de fósforo del microscopio a través de la identificación de direcciones cristalográficas, esto se hizo midiendo de forma experimental la distancia que corresponde a la proyección en un plano de dos puntos que se encuentran en la superficie del monocristal de tungsteno que a su vez se pueden identificar con dos direcciones cristalográficas [110] y [100], de esta forma se identificaron las direcciones: [101], [10 $\bar{1}$],[010],[011],[111],[11 $\bar{1}$] y [01 $\bar{1}$].

PACS numbers:

I. INTRODUCCIÓN

Emisión de campo

La emisión de campo, es la emisión de electrones cuando un campo eléctrico muy fuerte es aplicado a un emisor. Cuando se aplica el campo una barrera de potencial en la interfaz del sólido se convierte en un barrera cuyo grosor depende del campo aplicado, de modo que algunos electrones no excitados pueden penetrar la barrera mediante túnelaje cuántico, generando una corriente cuya densidad es característica del proceso. Clásicamente el fenómeno puede explicarse en términos de la función de trabajo del metal, veamos que podemos escribir un nuevo potencial efectivo para los electrones en la superficie

$$U_{eff}(x) = U_0 - eEx - \frac{e^2}{4x} \quad (1)$$

donde el segundo término del lado derecho de la ecuación (1) corresponde a la influencia del campo eléctrico aplicado, mientras que el tercer término se debe al surgimiento de una carga imagen en el metal, o una fuerza de polarización. El potencial efectivo tiene un máximo en el punto $x_0 = \sqrt{e^3 E}$, siendo el valor máximo de la energía potencial

$$U_{max}(x) = U_0 - \sqrt{e^3 E} \quad (2)$$

por lo que podemos observar que la imposición de un campo eléctrico reduce la función de trabajo. En este sentido para que los electrones sean libres de dejar el metal tan solo necesitamos que se cumpla la siguiente condición

$$\sqrt{e^3 E} \geq \Phi \quad (3)$$

donde Φ es la función de trabajo. Si bien el modelo anterior predice la disminución de la función de trabajo debido a

la imposición de un campo eléctrico, se ha observado que se pueden tener átomos libres de escapar del metal con campos aún más pequeños que los estimados con la teoría clásica, es por eso que es necesaria la descripción cuántica del fenómeno. El estudio cuántico del fenómeno de emisión de campos fue realizado por Fowler-Nordheim quienes haciendo uso de la aproximación WKB encontraron que la penetrabilidad de la barrera está dada por

$$\mathcal{D} = \exp \left[-2 \sqrt{\frac{8\pi^2 m}{\hbar^2}} \int_{x_1}^{x_2} \left| \left[\mathcal{E} - \left(-eEx - \frac{e^2}{4x} \right) \right] \right|^{\frac{1}{2}} dx \right] \quad (4)$$

Con esta descripción se han estimado valores más aproximados a los medidos experimentalmente para el campo eléctrico necesario para permitir el escape de los electrones de la superficie del metal[1].

Microscopio de emisión de campos

El microscopio de emisión de campos (FEM) fue inventado en 1936 por Erwin Wilhelm Müller, este fue el primer microscopio capaz de resolver a una escala atómica. El FEM es básicamente compuesto por una muestra metálica en forma de punta y una pantalla fluorescente, ambas encerradas al vacío. De manera simple el microscopio funciona mediante la aplicación de un voltaje a la punta o emisor, luego cuando el campo aplicado alcanza el valor adecuado los electrones en la superficie de la punta son emitidos fuera de la misma mediante el efecto de tunelaje cuántico. Los electrones emitidos son proyectados en una pantalla de fósforo en la cual se forma una imagen de la superficie. Ya que la densidad de corriente de electrones depende de la variación de la función de trabajo, la imagen de la proyección radial de los electrones emitidos representa un mapeo de la variación de la función de trabajo en la superficie. La mayoría de los electrones emitidos se encuentran en una vecindad del nivel de Fermi, por otra parte la gran energía cinética de los electrones combinada con los efectos de difracción debido a los límites de la longitud de onda de de Broglie imponen un límite para la resolución del microscopio de emisión de campo.

En la figura 1 podemos ver el circuito básico de un microscopio de emisión de campo clásico. En el microscopio

*Electronic address: edy'95fis@ciencias.unam.mx, jonathanloz.m@gmail.com

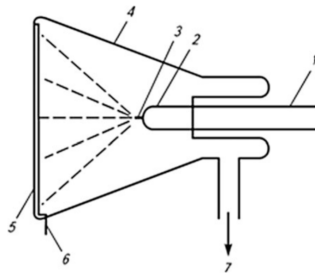


Fig. 1: 1 cables de corriente; 2 Arco; 3 Muestra; 4 Bulbo; 5 Pantalla luminiscente; 6 Cable de corriente.

se soldan cables de corriente (1) a un arco de molibdeno o tungsteno en (2) y a la vez la muestra (3) está unida a este arco. Luego el bulbo (4) tiene una pantalla (5) donde la imagen de los electrones emitidos por la superficie es formada, esta pantalla usualmente es de una pequeña capa de fósforo. Se aplica un voltaje alto en (5) a través del cable (6) de manera que los electrones emitidos bombardean la pantalla causando su luminiscencia.[2]

En la imagen que se forma en la pantalla se presentan contrastes debido a las variaciones de la función de trabajo de los electrones, en este sentido los planos atómicamente "planos" tienen una función de trabajo alta lo que se refleja en la imagen de la pantalla como espacios oscuros en la misma, mientras que los planos atómicamente "rugosos" tienen una función de trabajo de los electrones menor manifestándose como regiones brillantes en la imagen formada. Debido a la naturaleza radial de los caminos de los electrones la simetría de la muestra se preserva en la imagen, por lo que puede relacionarse con la proyección estereográfica de la superficie original.[3]

Estructura Cristalina

Hay dos aspectos de la descripción de la estructura cristalina que suponen una cierta dificultad, las nociones geométricas que esperamos sean fáciles de superar y por otro lado se tiene que establecer un lenguaje para describir estructuras de una forma inteligente. La descripción de las estructuras cristalinas se puede hacer en cualquier dimensión, por ahora nos limitaremos a las estructuras tres dimensionales que podemos ver experimentalmente y las que nos interesan para el desarrollo de esta práctica. Primero estableceremos unas definiciones que en general son lo menos rigurosas posibles, pero que nos funcionan para darnos una idea básica de lo que vamos a trabajar.

Una *red* es un conjunto discreto infinito de puntos donde los alrededores de cada punto dado es equivalente a los alrededores de cualquier otro punto. De esta forma una estructura periódica puede ser representada como una red donde cada punto es ocupado por un objeto repetido, estos objetos repetidos son llamados *base*. Es en este sentido que un *cristal* es una estructura periódica Fig. 2.

Una vez que sabemos lo que es un cristal, podemos plantear algunos conceptos útiles para caracterizarlos. Una *celda unitaria* es el bloque de construcción básico que se repite en la estructura periódica. Más aún, una *celda unitaria primitiva*

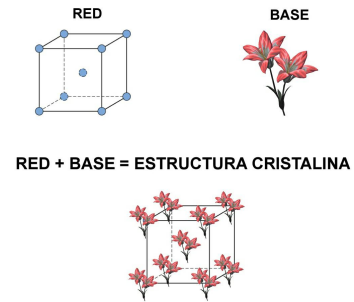


Fig. 2: Un cristal es una estructura periódica con una red y base definidas.

para un cristal periódico es la celda unitaria que contiene exactamente un punto de la red.

La diferencia de estos dos conceptos es que la primitiva solo contiene un punto de la red, mientras que la unitaria puede contener más de un punto. La noción geométrica juega un papel importante para darnos cuenta de lo que estamos hablando, por ejemplo, imaginemos una esfera centrada en el origen en tres dimensiones, si imaginamos que el espacio está dividido por cada eje coordenado tendremos ocho divisiones u ocho "octantes" y la esfera quedaría partida en ocho partes iguales. Si ahora pensamos en un cubo, donde en cada vértice hay una esfera, tendremos que cada esfera se divide exactamente como antes lo habíamos planteado. Se tienen ocho vértices y dentro del cubo quedarán ocho octantes, lo que significa que esta celda cúbica contiene exactamente una unidad de la red, es una primitiva. En general se pueden utilizar las dos definiciones para describir a un cristal.

El *parámetro de red* es la distancia entre dos puntos de la red que se encuentran sobre los ejes coordenados, en este sentido la red más simple en tres dimensiones es aquella formada por celdas unitarias cúbicas (cúbica simple), es decir que tiene parámetros de red iguales en las 3 direcciones, existen otras más complejas donde cada lado de la celda unitaria varía en tamaño pero dejando los ángulos entre las aristas rectos, y algunas otras donde cambia el tamaño de las aristas y el ángulo entre las mismas, sin embargo, en todos los casos se utiliza una convención para representar direcciones dentro de la celda unitaria, se escribe:

$$[uvw] = ua_1 + va_2 + wa_3 \quad (5)$$

donde u, v, w son enteros y a_1, a_2, a_3 son vectores, para los casos donde la celda unitaria de la red tiene ángulos rectos entre todas sus aristas se asume que a_1, a_2, a_3 se encuentran en las direcciones x, y, z del sistema coordenado cartesiano.

Una red de nuestro interés es aquella que tiene una celda cúbica centrada en el cuerpo (bcc) (body-centered cubic, por sus siglas en inglés) Fig. 3.

Es una celda cúbica simple donde hay un punto adicional de la red centrada justo en el medio del cubo es decir que tiene en total dos unidades de la base dentro de la celda.

El siguiente concepto a definir es el *plano cristalográfico*, es un plano que contiene al menos 3 puntos de la red no colineales, y así una *familia de planos cristalográficos* es un

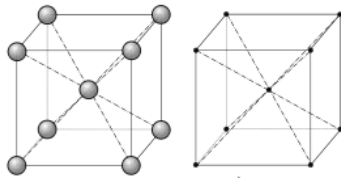


Fig. 3: Celda unitaria cúbica centrada en el cuerpo

conjunto infinito de planos paralelos que como conjunto contienen a todos los puntos de la red. Hay una notación útil para referirse a un plano cristalográfico conocido como índices de Miller, primero se seleccionan los vectores a_i con $i=1,2,3$ para la celda unitaria en cuestión luego se toma el recíproco de cada entero que multiplica a cada vector de dirección (como en la ecuación 1) para obtener:

$$(hkl) = ha_1 + la_2 + ka_3 \quad (6)$$

donde h, l, k son los recíprocos de u, v, w que nos van a indicar en qué puntos el plano cruza a la red, por ejemplo (111) nos indica que el plano cruza en 1 en a_1 , 1 en a_2 y 1 en a_3 , de esta forma, como el procedimiento para encontrar los planos en cada celda unitaria es exactamente el mismo, los índices de Miller nos van a dar familias de planos.

Dentro de las estructuras cristalinas en tres dimensiones se pueden presentar defectos de 3 tipos, de línea, de plano o de volumen no nos detendremos en la descripción de cada uno, lo importante es señalar que existen y que estos defectos interrumpen o rompen la simetría del cristal. En este sentido tenemos dos clasificaciones de los cristales, de largo y corto alcance. Un cristal de *corto alcance* es un cristal que tiene muchos defectos y por lo tanto su simetría se rompe constantemente lo que implica que su estructura periódica sólo se presenta en una región pequeña del espacio. Un cristal de *largo alcance* presenta pocos defectos y su estructura periódica se repite a lo largo de una región mucho más grande del espacio, un *monocristal* es un cristal de largo alcance.

II. MATERIAL

- Microscopio de emisión de campos. Leybold Didactic GMBH
- Fuente de Energía. Daedalon Corporation Kilovolt Power Supply
- Cámara Fotográfica. Fujifilm Finepix S
- Tripie
- Mesa elevadora
- Vernier
- Soportes universales con nuez (2)
- Pinzas para soporte
- Resistencia de $5.24 \text{ M}\Omega$

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Montaje Experimental Primero se montó el circuito requerido por el microscopio para funcionar, para esto se requiere una fuente de poder que nos pueda proporcionar voltajes del orden de 5kV, la terminal positiva de la fuente se debe conectar en serie con una resistencia de $5.24 \text{ M}\Omega$ y esta a su vez conectarse al ánodo del microscopio, la terminal negativa se conecta al cátodo. ver Fig. 4. Es muy importante colocar la resistencia ya sea del valor mencionado o de uno diferente, de tal forma que la corriente no supere 1.9 A , pues corrientes mayores a eso destruirán instantáneamente el microscopio, nosotros estamos manejando corrientes de $9.54 \times 10^{-4} \text{ A}$. Se debe tener cuidado al manejar y trasladar de un lado a otro el microscopio, pues el interior del mismo se encuentra al vacío y un ligero golpe o un poco de presión pueden provocar que estalle, además, se debe tener cuidado de no hacer un corto circuito con la fuente de voltaje ni tocar con las manos las terminales una vez que se ha empezado el experimento pues los voltajes alcanzados son extremadamente altos y pueden ocasionar un accidente severo.

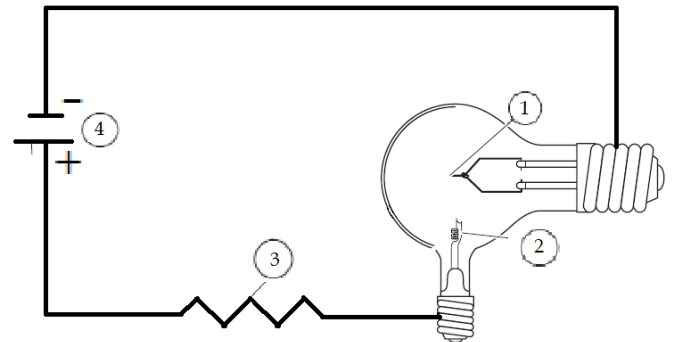


Fig. 4: Montaje esquemático del circuito. 1: Cátodo, 2: Anodo, 3: Resistencia de $5.24 \text{ M}\Omega$ 4: Fuente de poder.

Para capturar las imágenes formadas por el microscopio vamos a utilizar una cámara fotográfica, para evitar paralaje se debe colocar a la misma altura que el microscopio, colocamos el microscopio en un soporte universal y la cámara montada sobre un tripie y una mesa elevadora. Finalmente se agrega un vernier sujetado por las pinzas colocadas con una nuez a el segundo soporte universal de tal forma que sea paralelo al plano de la imagen del microscopio, esto se hace para tener una referencia de longitud dentro de las imágenes capturadas por la cámara y poder analizarlas posteriormente. Fig. 5.

Después de varias pruebas se determinó que las mejores imágenes se obtienen con un ISO 100, $6''$ de tiempo de obturación y un foco F2.9. Se deben obtener varias fotos con la finalidad de poder escoger las mejores para ser analizadas.

Microscopio de Emisión de Campos

El microscopio contiene en la punta del cátodo un monocristal de tungsteno cuya celda unitaria es una celda cúbica centrada en el cuerpo (Fig. 3) con parámetro de red $a = 0.316 \text{ nm}$, el monocristal es de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$

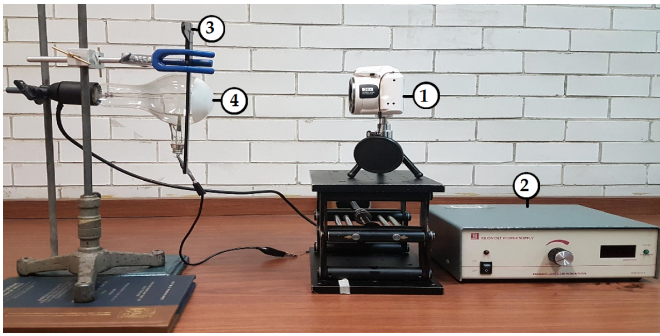


Fig. 5: Montaje experimental. 1: Cámara fotográfica, 2: Fuente de Voltaje, 3: Vernier 4: Microscopio de emisión de campos.

a $0.2\mu\text{m}$ de radio y esta orientado de tal forma que el plano (110) es perpendicular a la dirección del cátodo, es decir, la dirección [110] es paralela al cátodo.

El microscopio contiene una pantalla fluorescente de fósforo, en la cual se obtendrán las imágenes magnificadas, de la estructura cristalina del monocristal de tungsteno. Para lograr obtener imágenes se debe aplicar una diferencia de potencial de 5kV, este voltaje se debe aplicar muy suavemente partiendo siempre desde 0V, esto es para cuidar el microscopio y no dañarlo pues la punta del cátodo se calienta y cambios bruscos de temperatura pueden dañar el monocristal de tungsteno.

Por otra parte, en el ánodo se cuenta con depósito de bario, que al calentarlo desprende átomos y se pueden observar en la pantalla como destellos luminosos, esta parte del experimento no se llevará a cabo, pues el bario evaporado se deposita en el monocristal de tungsteno contaminándolo y su limpieza es muy difícil, por lo que no sobrepasaremos los 5kV y por ende no calentaremos el ánodo hasta la temperatura en que se empieza a evaporar el bario.

Amplificación

Para obtener la amplificación del microscopio podemos hacer un análisis geométrico muy simple (Fig. 6), si tenemos dos circunferencias concéntricas de radios r y R tal que $R > r$, dos puntos en la circunferencia con radio r estarán separados una distancia lineal $s = r\theta$, si pasamos dos rayos desde el centro hasta cada uno de los puntos y los extendemos hasta la circunferencia de radio R , la distancia lineal entre los mismos puntos ahora será $S = R\theta$ por lo que la amplificación será la razón entre estas dos longitudes:

$$A = \frac{S}{s} = \frac{R\theta}{r\theta} = \frac{R}{r} \quad (7)$$

De manera teórica el manual del microscopio nos da un intervalo sobre el radio más pequeño $r = 0.1\mu\text{m}$ a $r = 0.2\mu\text{m}$, este radio corresponde a el radio del monocristal de tungsteno que se encuentra depositado en la punta del cátodo, experimentalmente no tenemos forma de corroborar este dato por lo que lo asumiremos como cierto. Además el manual asegura que el radio mayor, que es el radio del bulbo en el cual está contenido el cátodo, mide 5cm lo que les da una $A=500,000$

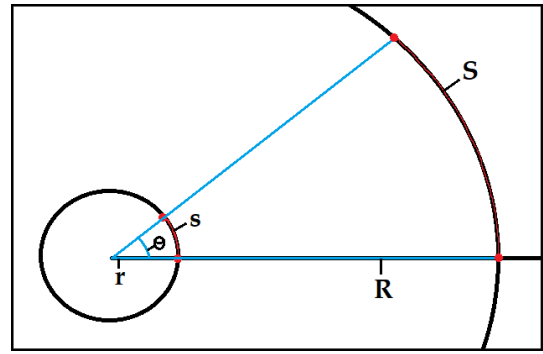


Fig. 6: Dos círculos concéntricos de radios r y R , la distancia lineal "s" entre dos puntos sobre la circunferencia más pequeña se ve amplificada por un factor $A = \frac{R}{r}$

aproximadamente, este dato se tiene que verificar experimentalmente midiendo con un vernier el radio del bulbo.

Se debe de determinar de forma teórica la imagen que se espera observar para poder hacer un análisis significativo de las imágenes ya que esta práctica consiste en identificar las direcciones cristalográficas del monocristal de tungsteno a través de la imagen que obtendremos del microscopio y para lograr este objetivo necesitamos estimar algo que podamos medir, es decir una distancia, en este sentido se determinó lo siguiente: se sabe que el monocristal esta orientado de tal forma que el plano cristalográfico (110) es perpendicular a la aguja del cátodo, en tres dimensiones corresponde a lo que se presenta de forma esquemática en la Fig. 7.

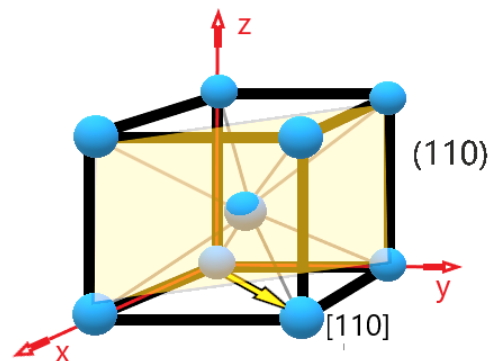


Fig. 7: Modelo en 3D de la celda unitaria del monocristal de tungsteno, se muestra en color amarillo el plano cristalográfico (110) que es perpendicular la punta del cátodo y con una flecha se muestra la dirección cristalográfica correspondiente

Podemos imaginar la imagen que aparecerá en la pantalla de una forma esquemática si hacemos una proyección de la celda unitaria sobre el plano (110), la razón por la que podemos hacer esto, es debido a que podemos imaginar que los electrones que se desprenden del monocristal viajarán en una línea recta hasta llegar a la pantalla de fósforo, los puntos que aparezcan en la imagen tendrán distintas intensidades dependiendo de las variaciones de la función de trabajo sobre el monocristal de tungsteno. Esta imagen debemos de recalcar

que la estamos proyectando en un plano, mientras que el microscopio la proyecta sobre una esfera, así que la distribución de los puntos será la que se muestra en la Fig. 8, sin embargo la distancia entre los mismos será diferente si se proyecta sobre una esfera.

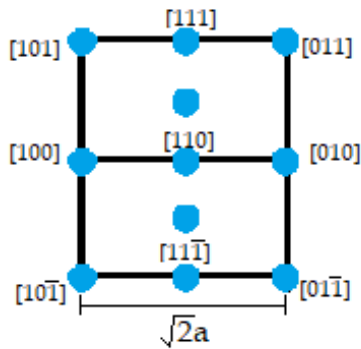


Fig. 8: Proyección de dos celdas unitarias contiguas sobre el plano (110), además se muestra la distancia entre dos puntos de la imagen que son los puntos más alejados dentro de la celda unitaria, donde a es el parámetro de la red. La celda de arriba es la celda original que teníamos en el modelo 3D, la celda de abajo es directamente la celda contigua

Hemos de darnos cuenta que si la dirección [110] es paralela a la aguja, veremos dos celdas unitarias, pues justo esa dirección está en el límite de dos celdas unitarias contiguas. Además como se analizarán imágenes que son proyecciones planas de un mundo tres dimensional, necesitamos traer eso en cuenta a la hora de medir distancias en las imágenes, pues no mediremos arcos de circunferencias, mediremos las proyecciones de esos arcos en un plano, es decir, la distancia que veremos es $r \sin \theta$ Fig. 9, donde θ es el ángulo que forma el punto en la superficie de la circunferencia y una recta que consideraremos como la dirección [110] de la primer celda unitaria que se encuentra inmediatamente después de la aguja del cátodo.

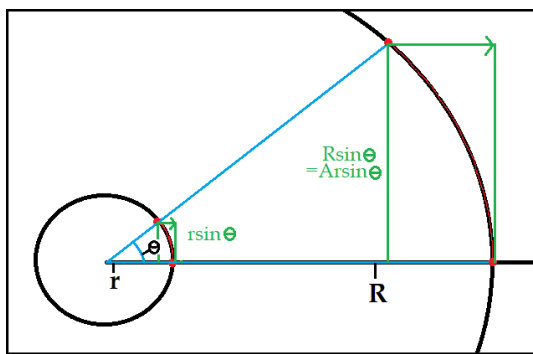


Fig. 9: El análisis geométrico correspondiente a la corrección que debemos hacer para poder medir distancias en las imágenes recolectadas.

Teóricamente se pueden considerar dos casos extremos, o bien la imagen que aparecerá es la imagen de la celda que se

encuentra más cerca del centro de la esfera o semiesfera del monocristal, o bien aparecerá la celda que se encuentra en la superficie de la esfera. Lo que se determina teóricamente es el ángulo que forman tres puntos: el centro y dos puntos de la red tal que los puntos son colineales en la proyección en la celda unitaria en dos dimensiones, en este caso tomaremos los puntos de la red que caen en las direcciones [110] y [100], para la celda más cercana al centro será $\theta = \tan^{-1}(\frac{\sqrt{2}a}{2} / \frac{\sqrt{2}a}{2})$ mientras que para la celda más alejada será $\theta = \tan^{-1}(r - \frac{\sqrt{2}a}{2} / \frac{\sqrt{2}a}{2})$ Fig. 10

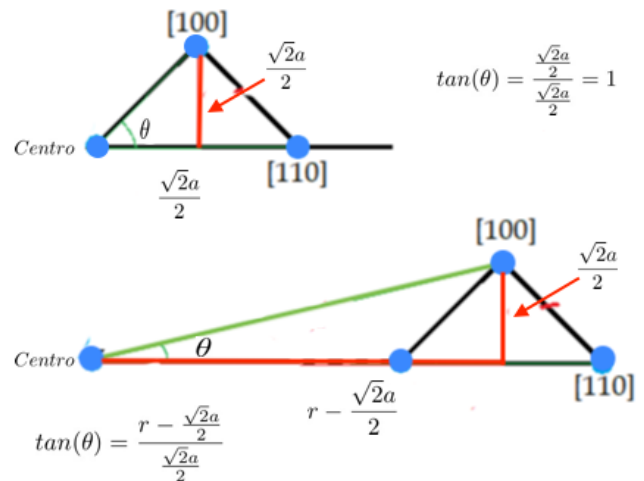


Fig. 10: En este diagrama se muestra geoméricamente el cálculo que hay que seguir para hallar el ángulo que forman las direcciones cristalográficas [110] y [100] respecto al centro de la circunferencia menor de radio r , en el primer caso se calcula dicho ángulo de la celda unitaria más cercana al cátodo, mientras que en el segundo se calcula el ángulo de la celda más alejada del centro, esta celda corresponde a la celda unitaria que se encuentra sobre la superficie de la circunferencia menor.

por lo que en un caso tenemos $\theta = 45^\circ$ y en otro caso $\theta = 5.7 \times 10^{-6}$ grados lo que implica que teóricamente una distancia $r \sin(45)$ en la superficie del monocristal se verá de un tamaño de 3.53 cm en nuestra imagen, mientras que una distancia $r \sin(5.7 \times 10^{-6})$ se verá de un tamaño igual a 5.0×10^{-9} m algo que experimentalmente es imposible de detectar con las herramientas que disponemos, por lo que este último caso, donde la imagen que observemos proviene de una celda prácticamente en la superficie del monocristal queda completamente descartado y por consiguiente estaremos buscando distancias del orden de la primera suposición. Estos valores que hemos calculado no son los valores teóricos que vamos a utilizar para contrastarlos con nuestras mediciones, simplemente nos sirven para estimar dos cosas, de qué celda viene nuestra imagen y qué ordenes de magnitud esperamos medir en la pantalla. Los valores teóricos correctos se obtendrán una vez que se conozca la amplificación correcta a partir de medir el radio R del bulbo.

IV. ANÁLISIS DE DATOS

Se midió el diámetro de la esfera más grande correspondiente a el bulbo del microscopio, entontrando que tiene un diámetro de $10\text{cm} \pm 0.05\text{mm}$ lo que nos da un radio de $5\text{cm} \pm 0.025\text{mm}$ como se menciona en el manual, sin embargo, el monocristal de tungsteno se encuentra a una distancia de $4\text{cm} \pm 0.05\text{mm}$ de la pantalla de fosforo, por lo que esto supone una primera complicación pues ahora la forma de encontrar o estimar las imágenes cambia y en principio se tendría que poner una corrección porque se esta proyectando a una esfera y si los centros no coinciden, el análisis previo necesita algunas correcciones, sin embargo geométricamente no es fácil encontrar las correcciones que se deben hacer. La forma en que lo solucionamos es simplemente considerar que el radio real de la esfera es el medido y en base a eso se calcula una nueva amplificación, ahora sería:

$$A = \frac{4\text{cm} \pm 0.05\text{mm}}{0.15\mu\text{m} \pm 0.05\mu\text{m}} = 266,666.66 \pm 89,222.22 \quad (8)$$

Esto nos da una amplificación corregida y de acuerdo a nuestros cálculos anteriores presentados en el desarrollo experimental y la Fig. 10, la distancia que mediremos desde el punto asociado con $[110]$ hasta un segundo punto de la imagen que asociaremos con la dirección cristalográfica $[100]$ es:

$$r \sin(45)A = 2.82\text{cm} \pm 0.26\text{cm} \quad (9)$$

esta distancia es nuestro valor teórico que debemos contrastar con nuestras mediciones.

Análisis de Fotografías

Se tomaron 32 imágenes con distintos focos, tiempos de obturación e ISO, seleccionando tan solo 10 de ellas que se consideraron eran las mejores para el análisis. Viendo la imagen y comparando con nuestro diagrama de la Fig. 8 Se examinó muy por encima las distancias que teníamos a cada punto para decidir con cual de los puntos trabajaríamos y contrastaríamos su distancia al centro con el valor teórico calculado anteriormente. En este sentido, identificando $[100]$ y el centro que es $[110]$ todos las demás direcciones cristalográficas que aparecen en el diagrama de la Fig. 8, quedan determinados automáticamente, nuestra identificación se muestra en la Fig. 11.

Nos damos cuenta que nuestra propuesta y la imagen que obtuvimos coinciden si se hace una rotación de nuestro diagrama por un ángulo de 90 grados.

Una vez identificados los puntos con las direcciones cristalográficas se procedió a medir con el programa computacional la distancia que hay entre el centro del punto $[110]$ y $[100]$ pues esta distancia es lo que debe corresponder al resultado obtenido en la ecuación 9 y que validará o desmentirá nuestra identificación de las direcciones cristalográficas con los puntos de la imagen del microscopio. Cabe mencionar que la forma de determinar el "centro" de cada punto es totalmente arbitraria, pues distinguir donde empieza y donde termina un punto es imposible, solo podemos distinguir entre zonas menos luminosas y más luminosas.

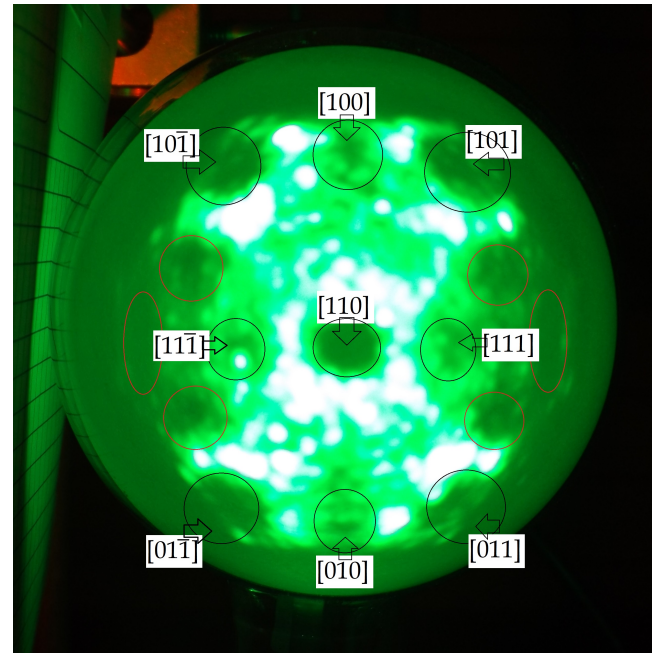


Fig. 11: Fotografía muestra de la imagen que se obtiene en la pantalla de fósforo, cada circulo negro encierra una zona menos luminosa que estamos asociando a un átomo de la celda unitaria más próxima al centro del monocristal, a través de la dirección cristalográfica que coincide con su posición. Los círculos rojos deberían corresponder a otras direcciones cristalográficas que pueden ya no estar dentro de la primera celda unitaria.

Para la medición se utilizó el software: Tracker versión 5.0.4. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 1.

Distancias Medidas entre los puntos $[110]$ y $[100]$	
Fotografía	Distancia (cm) $\pm (0.005 \text{ cm})$
1	2.662
2	2.722
3	2.651
4	2.673
5	2.681
6	2.733
7	2.724
8	2.704
9	2.740
10	2.695
Promedio	$2.698\text{cm} \pm 0.005\text{cm}$

Tabla I: Mediciones realizadas entre los puntos $[100]$ y $[110]$ referentes a la Fig. 11

Comparando el valor teórico ($r \sin(45)A = 2.82\text{cm} \pm 0.26\text{cm}$) y el valor experimental ($2.698\text{cm} \pm 0.005\text{cm}$) tenemos un error porcentual de 4.6 por ciento, además de que el valor experimental está dentro de la incertidumbre del valor teórico.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtuvimos un valor corregido de la amplificación $A=266,666.66 \pm 89,222.22$, la importancia de encontrar este valor de forma experimental y no simplemente confiar en lo que nos dice el fabricante es que este valor es altamente determinante para el éxito de esta práctica y el fabricante nos da un valor de casi el doble del que encontramos de forma experimental, calcular las estimaciones teóricas con el valor que se encuentra en el manual nos llevaría a un error absurdo y eventualmente no podríamos identificar con veracidad ninguna dirección cristalográfica en la imagen del microscopio.

Una vez que encontramos la amplificación y que encontramos el valor teórico correcto a comparar ($r \sin(45)A = 2.82 \text{ cm} \pm 0.26 \text{ cm}$), vemos que nuestras mediciones ($2.698 \text{ cm} \pm 0.005 \text{ cm}$) tienen un error porcentual de 4.6 por ciento, además de que el valor experimental está dentro de la incertidumbre del valor teórico, esto nos permite asegurar que nuestras deducciones en el desarrollo experimental y nuestra identificación en la Fig. 11 son correctas, por lo que hemos logrado identificar las siguientes direcciones cristalográficas: $[100]$, $[100]$, $[10\bar{1}]$, $[0\bar{1}0]$, $[011]$, $[111]$, $[11\bar{1}]$ y $[110]$.

Cabe destacar que el parámetro de red de una celda unitaria del monocristal de tungsteno no es posible de determinar en este experimento midiendo ninguna distancia, recordando un poco, experimentalmente se determina $rA \sin \theta$ que solo depende del ángulo θ , no hay forma posible de determinar cuales dos puntos que pasan por las dos rectas que forman este ángulo en el espacio son los que forman parte de la primera celda unitaria, dicho de otra forma, dado un ángulo hay un número infinito de triángulos rectángulos semejantes asociados al mismo ángulo, y no hay ningún punto de partida que nos permita determinar el parámetro de red sin suponer 1 de dos cosas, la celda unitaria es cúbica, que sería erróneo, pues si medimos un ángulo diferente de 45° entonces no podemos asumir ese hecho, o asumir una amplificación interna del

monocristal de tungsteno, pero para determinar esa amplificación tendríamos que utilizar el valor del parámetro de red, que es lo que queremos encontrar experimentalmente. Por lo que ninguno de los dos enfoques es correcto.

VI. CONCLUSIONES

Se determinó que la amplificación de el microscopio de emisión con el que trabajamos tiene una amplificación $A=266,666.66 \pm 89,222.22$, siendo la determinación de este factor un paso fundamental en el cálculo teórico de las distancias que deberíamos medir para poder asociar puntos en la imagen de dicho microscopio con direcciones cristalográficas de un monocristal de tungsteno.

Utilizando un valor teórico calculado con un análisis geométrico y a través de un análisis computacional de las imágenes obtenidas que corresponden a un grupo de puntos distribuidos no uniformemente se lograron determinar las siguientes direcciones cristalográficas de una celda unitaria de un monocristal de tungsteno correspondiente a una celda de tipo cúbica centrada en el cuerpo: $[110]$, $[100]$, $[101]$, $[10\bar{1}]$, $[010]$, $[011]$, $[111]$, $[11\bar{1}]$ y $[01\bar{1}]$.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1]Tsong,T.(2017) *Atom-Probe field ion Microscopy*.New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- [2]Lifshitz,V.G.(2003) *Surface Science*. Vladivostok, Rusia: Springer.
- [3]Nicolay,E.(2017) *Field emission electronics*. St.Petersburg, Rusia: Springer.
- [4] Steven, H. S. (2013) *The Oxford Solid State Basics*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.