

EFFECTO DE LA POTENCIA DE LA FUENTE DC EN LA DENSIDAD Y TEMPERATURA ELECTRÓNICA DEL PLASMA DURANTE EL DEPÓSITO DE PELÍCULAS DELGADAS DE NITRURO DE TUNGSTENO

Effect of Dc power supply on electronic density and temperature of plasma during deposition of thin tungsten nitride films

Manuel Guevara-Vera¹, Roberto Machorro², Wilson Camacho-Mamani³

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el efecto sobre la densidad y temperatura electrónica del plasma debido a la variación de la potencia de la fuente de corriente continua durante el depósito de las películas delgadas de nitruro de tungsteno crecidas sobre sustratos de silicio. Se utilizó un difractómetro de rayos X, un espectrógrafo y una cámara ICCD. Los espectros fueron utilizados para determinar la densidad y temperatura electrónica del plasma con diferentes valores de potencia. En la medida que incrementa la potencia de la fuente de corriente continua, la temperatura electrónica y la densidad electrónica del plasma varían en forma curvilínea.

Palabras claves: Nitruro de tungsteno, densidad electrónica, temperatura electrónica, películas delgadas, potencia.

ABSTRACT

In this study we determined the effect on density and plasma electronic temperature due to the variation of the DC sputtering power during deposition of thin films of tungsten nitride grown on silicon substrates. To which we used a X-ray diffractometer, sputtering camera, a spectrograph and ICCD camera. The spectra were used to calculate the density and plasma electronic temperature for each value of power supply. When increased the DC sputtering power, the electron temperature and the plasma electron density have a curvilinear variation. Key words: Tungsten nitride, electronic density, electronic temperature, thin films, power

Dc.

¹Universidad Nacional de Trujillo, Departamento Académico de Física, Perú
²Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, México
³Universidad Nacional de Trujillo, Postgrado en Ciencias Físicas y Matemáticas, Perú.

Presentado el 28.10.2008, aprobado el 17.12.2008

INTRODUCCIÓN

Las películas delgadas hechas con nitruros a base de metales de transición tienen propiedades ventajosas. Estos materiales tienen elevada dureza, punto de fusión alto, buena inercia química y estabilidad termodinámica. Estas películas tienen numerosas aplicaciones en la electrónica para hacer capacitores MOS¹, para dar mayor dureza a las herramientas de corte y reducir la corrosión².

Entre la amplia variedad de nitruros metálicos tenemos al nitruro de tungsteno, el cual tiene aplicaciones en la microelectrónica³ y como electrodos en dispositivos semiconductores⁴. Además tiene aplicaciones en otros campos como en la ingeniería, en decoración y sensores electrónicos⁵. Películas de carburo de Tungsteno han sido extensamente investigadas por diferentes técnicas para efectuar el depósito^{6,7}. El nitruro de Tungsteno ha atraído poco la atención a los investigadores comparado con el nitruro de titanio o cromo. Los primeros estudios de películas delgadas de nitruro de tungsteno fueron depositadas con una cámara de desbastamiento magnético. En la década del 90 se inició el estudio de películas de WN para aplicaciones mecánicas⁸. Debido a las propiedades del tungsteno, a la industrialización de la técnica de desbastamiento (sputtering) y a la alta calidad de películas que se puede conseguir utilizando temperaturas de su trato bajas, se busco experimentalmente los valores de las presiones de los gases para los cuales genera la película requerida.

El desbastamiento o erosión catódica es el proceso de evaporación en vacío de parte de una sustancia llamada blanco y esta parte evaporada es depositada sobre una superficie de material llamado sustrato. Entre o técnicas de desbastamiento se tienen la DC⁹, RF¹⁰, PLD¹¹ y DC pulsada¹².

Durante la generación de las películas delgadas juega un papel muy importante la

potencia según sea el caso de la fuente de potencia de radiofrecuencia¹³ o de la intensidad de la radiación laser¹⁴ cuando se hace la respectiva deposición de película delgada y reportan que tanto la densidad y temperatura electrónica del plasma se incrementan con la potencia en forma curvilínea. Similarmente para el caso del plasma acoplado inductivamente tanto la densidad como temperatura electrónica del plasma tienen una variación curvilínea¹⁵. Haciendo uso de la espectroscopia óptica de emisión se logra obtener los espectros del plasma los cuales permitirán calcular la densidad y temperatura electrónica del plasma. Este tipo de espectroscopia que no altera al plasma, se dice que es no invasiva. Al generar la película se debe producir el plasma se usa para medir la densidad y temperatura electrónica usando la técnica reportada en^{16,17} donde han hecho dichas mediciones para el caso de generación del plasma usando como blanco aluminio con ablación laser.

Una vez generada la película delgada se debe caracterizar su estructura con difracción de rayos X¹⁸ para saber que realmente se esta formando nitruro de tungsteno. Para determinar la composición de la película se utiliza la técnica de espectroscopia de fotoelectrones producidos con rayos X y espectroscopia de electrones Auger¹⁹.

Se presentan en este trabajo la caracterización estructural de las películas delgadas de WN obtenidas.

El presente trabajo permitirá contribuir a dar explicación mediante el análisis de los resultados experimentales de lo que ocurre físicamente tanto en la generación del plasma como en la formación de las películas delgadas cuando la potencia de la fuente DC se incrementa lo que ocurre con los parámetros del plasma como son densidad y temperatura electrónica.

Problema.

¿Cuál es el efecto de la potencia de la fuente DC en la densidad y temperatura electrónica del plasma durante el depósito de las películas

delgadas de nitruro de tungsteno sobre un sustrato de silicio utilizando la técnica de desbastamiento iónico?

Hipótesis.

Las películas delgadas de nitruro de tungsteno que se depositan como consecuencia de la generación del plasma con potencia de la fuente DC, el gas argón y al agregar el gas reaccionante nitrógeno permitirá que se forme sobre el sustrato de silicio ubicado a una determinada posición del blanco (tungsteno) adquirirán una disposición o apilamiento del nitruro de tungsteno según la densidad y temperatura electrónica del plasma las cuales se incrementarán en forma curvilínea al aumentar la potencia de la fuente DC.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para generar las películas de nitruro de tungsteno utilizamos un blanco (target) de tungsteno de 5.08 cm de diámetro, espesor 0.64 cm y pureza 99.99% que es de un color gris acerado, este es colocado sobre el imán y la distancia de la superficie del blanco al sustrato de silicio fue de 6.5 cm, la oblea de silicio es del tipo n y el crecimiento en la dirección del plano (111). El sustrato de silicio tiene un diámetro de 10 cm, se corta en trozos la oblea teniendo en cuenta el tamaño del portasustrato, después limpiado utilizando acetona industrial y ultrasonidos durante 15 minutos, a continuación se seca y es colocado sobre el portasustrato. Se cierra la cámara de vacío de marca Kurt Lesker de diámetro 45.7 cm, altura 38.1 cm y una ventana de cuarzo cuyo diámetro es 16.5 cm. En la figura 1 se muestra la cámara de vacío utilizada a la cual se le conecta una bomba mecánica Alcatel pascal 2021SD para efectuar un pre-vacío de 2×10^{-2} torr, después se conecta la bomba turbomolecular Alcatel que llega a 27000 rpm para efectuar el alto vacío que se consigue cuando se llega al valor de 1.9×10^{-5} torr.



Figura 1. Cámara de vacío

Ahora para generar el plasma aplicamos el gas de Argón de alta pureza 99.999 % a la cámara haciendo uso de unos medidores de presión del gas y una PC a través de un programa hecho en LabVIEW, desde donde se controla el paso del gas del argón hasta lograr una presión de 4 mtorr en la cámara. Luego se aplica la tensión continua DC haciendo uso de la fuente US-Gun II, potencia máx. de salida de 1 KW entre el blanco y sustrato para una determinada potencia, después de un intervalo tiempo comprendido entre 0 a 5 segundos se observa dentro de la cámara la generación del plasma. Seguidamente se aplica el gas reaccionante que en este caso es el nitrógeno de pureza 99.998 % a través del denominado Shortcut to Control de presiones SPUTTER2.EXE elaborado en LabVIEW, los iones de nitrógeno al reaccionar con los iones de tungsteno forman el nitruro de tungsteno, los cuales son acelerados hacia el sustrato chocando contra él y conformando la película de nitruro de tungsteno, el tiempo de generación del plasma con gas reactivo empleado para obtener las películas de nitruro de tungsteno fue constante (11 minutos). Para generar las películas se utilizó la disposición experimental de los instrumentos como son: Computadora personal, balones de gases (Ar y N), fuente DC, bombas de vacío, medidores de Pre y alto vacío. Dentro de la cámara de vacío se coloca el sustrato de silicio y el blanco de tungsteno como se muestra en la figura 2.

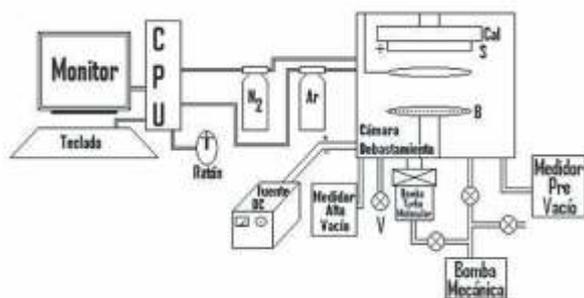


Fig. 2. Disposición experimental

Durante el depósito de la película, se efectúa la toma de los espectros del plasma que genera la película delgada utilizando para ello el sistema de monitoreo óptico mostrado en la figura 3, dichos espectros fueron utilizados para determinar la densidad y temperatura electrónica del plasma a la que se efectuó el depósito. El sistema consta de una lente macro que permite enfocar la radiación proveniente del plasma sobre el conjunto de fibras ópticas dispuestas verticalmente para hacer una captura del espectro entre el blanco y el sustrato. Las 16 Fibras ópticas poseen cada una 250 μm de diámetro externo y 200 μm de núcleo y separadas una distancia de 0.8 mm con la finalidad de evitar el solapamiento sobre la ICCD. Otra parte del sistema es el Espectrógrafo comercial f/8 CHROMEX 500IS/SM, de longitud focal 50 cm y rendija de entrada de 2 cm acoplada a una rejilla de 1200 líneas/mm con blaze en 500 nm. Su dispersión y resolución son 0.033 nm/píxel y 0.19 nm respectivamente.

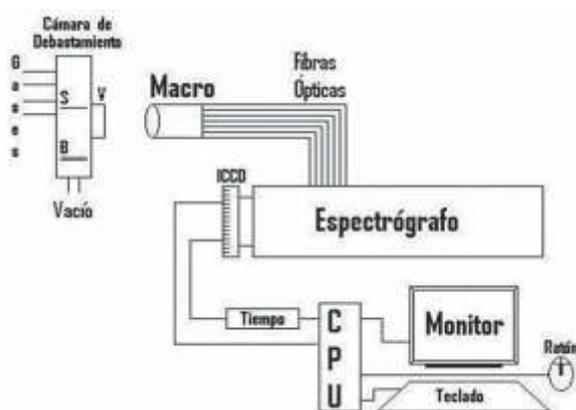


Fig. 3. Monitoreo óptico del plasma.

Este espectrógrafo utiliza el principio de funcionamiento Czerny-Turney. Acoplada al espectrógrafo para sensar el espectro se utilizó la cámara ICCD tecnología Andor, modelo DH523-18F-01 y serie ICCD-436, que es una cámara CCD con intensificador de imagen. Tiene una resolución de 256 filas x 1024 columnas. La cámara CCD está acoplada a la PC a través de un circuito de interface por medio del cual se puede efectuar la adquisición de los espectros y la temporización de cada barrido. La Computadora Personal acoplada al espectrógrafo es una Pentium® II, procesador Intel MMX(TM), 288 MB de RAM y disco duro de 10 GB. Monitor plano, ViewSonic VG700 de 17 pulgadas, de resolución 1280x1024 pixels.

Con la finalidad de determinar el valor de presión de nitrógeno para la cual se genera películas de nitruro de tungsteno, se generó películas iniciando con la presión de nitrógeno de 0 mTorr hasta 11 mTorr, manteniendo la presión del Argón a 4 mTorr, el sustrato se mantuvo a temperatura ambiente y la potencia de la fuente DC a 50 Watts. A las películas se le hizo pruebas de la estructura utilizando el Difractómetro de rayos X marca Philips X'Pert, Holland que usa la línea CuK α a 0.154 nm de longitud de onda, la velocidad de escaneo es 0.04 grados/s, el voltaje generador de rayos X es de 45 KV y corriente de 40 mA. Las fases de las películas delgadas fueron identificadas con los patrones de difracción contenidas en JCPDS (Joint Comité on Powder Diffraction Standards)²⁰. La morfología superficial y contenido de elementos de la películas se hizo con un microscopio electrónico de barrido (SEM) Marca JEOL Modelo JSM-5300. Para medir la densidad y temperatura de plasma se utilizaron los espectros ópticos adquiridos durante el depósito de las películas delgadas de nitruro de tungsteno. Para determinar la temperatura electrónica del plasma se hizo uso de la técnica de Boltzmann

y se consideró al plasma en equilibrio termodinámico (LTE) utilizando la distribución de Boltzmann para la población de estados excitados y la intensidad de la línea de emisión observada está dada por²¹

$$I_{nm} = A_{nm} n_n \frac{g_m hc}{Z} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right)$$

(1) Donde n_n es la población total de átomos neutros o iones; g_m es el peso estadístico del nivel superior de la transición, E_m es la energía de excitación superior, k constante de Boltzmann, h la constante de Planck, c la velocidad de la luz, Z función de partición, A_{nm} es la probabilidad de transición espontánea del estado m al n , λ_{nm} es la longitud de onda de la línea espectral de emisión cuando pasa del estado m al n . La expresión anterior se puede escribir como:

$$\ln\left(\frac{I_{nm}}{g_m A_{nm}}\right) = \ln\left(\frac{n_n hc}{Z}\right) - \frac{E_m}{kT}$$

(2) Considerando al plasma en equilibrio termodinámico local, una gráfica de $\ln(I_{nm}/A_{nm})$ contra E para las intensidades de varias líneas espectrales del mismo grado de ionización y cercanas, del ajuste lineal se tiene que la pendiente es igual $-1/kT$, de donde se puede calcular el valor de la temperatura electrónica del plasma.

Para determinar la densidad electrónica del plasma se usó la ecuación que es reportada en²², la cual está relacionada con el ensanchamiento de la línea espectral por efecto Stark.

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2C \frac{n_e}{10^{16}} \lambda^2$$

(3) Donde C es el parámetro de impacto del electrón que es seleccionado para diferente temperatura y sus unidades es en \AA , n_e es la densidad electrónica con unidades cm^{-3} y $\Delta\lambda_{1/2}$ es el ancho completo de la línea espectral a la mitad del máximo en unidades de \AA . Para determinar $\Delta\lambda_{1/2}$, se debe ajustar el pico con

un perfil de una curva Lorentziana, dicho parámetro de impacto se obtiene de la referencia²³ teniendo en cuenta la temperatura.

El espesor de la película se midió con un elipsómetro J.A. Wollam co. Inc el cual utiliza una fuente de luz de Xenon de 75 W con un programa denominado DBASE para efectuar la adquisición y procesamiento de datos y poder obtener el espesor de la película haciendo uso de las constantes ópticas (n índice de refracción y k constante de extinción).

RESULTADOS

Estructura y depósito de películas delgadas

En la figura 4 se muestra los espectros de difracción de rayos X (XRD) de las películas de WN y de W depositadas, utilizando potencia de la fuente DC de 50 Watts, sobre silicio. Se observa la fase α de W y conforme se varía la presión de nitrógeno cambia a la fase cúbica W_2N y a la fase hexagonal de WN, para la presión de nitrógeno 5 mtorr y presión de Argón 4 mtorr. El difractograma de la película de sólo tungsteno es decir es una película donde no se le agregó el gas reaccionante nitrógeno es el pico más intenso de todos, que se ubica en 2θ que equivale a 39.5° . También se observan dos picos del sustrato de silicio que son para posiciones de 2θ en 28.5° y 79.5° , correspondiendo a los planos de difracción (111) y (222) respectivamente.

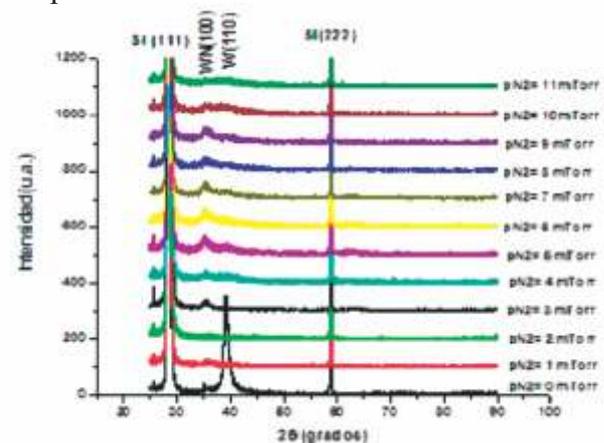


Fig. 4. Espectro de difracción de rayos X de la película de W y películas de nitruro de tungsteno para diferentes presiones de nitrógeno de 0 a 11 mTorr.

Variación de la potencia de la fuente DC.

En la tabla 1 se muestran los datos de potencia, voltaje y corriente utilizadas durante la generación de las películas de nitruro de tungsteno, manteniendo constantes la presión de nitrógeno 5 mTorr, presión de argón 4 mTorr y el sustrato a temperatura ambiente. Hay que hacer notar que también se efectuó la toma de los espectros del plasma mientras se generaba las películas. Para potencias de 20 Watts, y 40 watts, 60 Watts y 70 Watts no se obtiene la estructura WN, en cambio para la potencia de 50 Watts se obtiene bien conformadas las películas de nitruro de tungsteno. Cuando las películas se depositaron con potencias de la fuente 100 W a 200 W, no presentaban buena adhesión al sustrato, razón por la cuál no se hizo la prueba de difracción de rayos X.

Tabla 1. Tabla de datos experimentales para diferentes potencias y manteniendo constante la presión de argón 4 mtorr y nitrógeno 5 mtorr.

Potencia (Watt)	V (V)	I (mA)	Temperatura (C)
20	449	48	21.2
30	468	71	21.7
40	494	87	22.5
50	512	104	22.3
60	524	119	22.9
70	537	135	20.6
100	564	184	27.8
150	589	266	27.1
200	614	330	29.5

En la Fig. 5 se muestra los difractogramas de las películas obtenidas variando la potencia de la fuente DC y manteniendo constante las presiones de argón y nitrógeno que fueron 4 mtorr y 5 mtorr respectivamente.

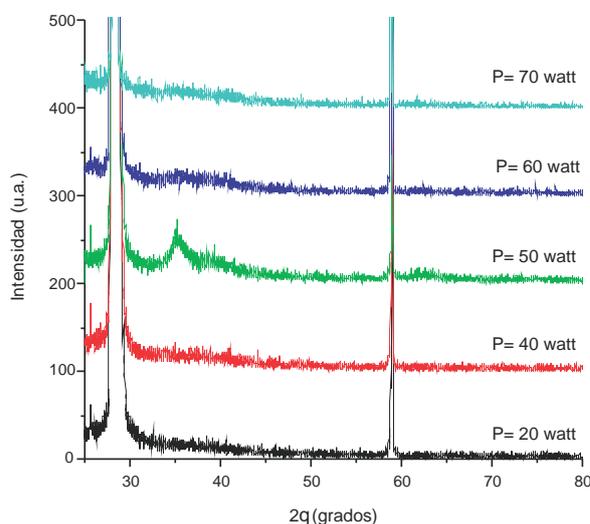


Figura 5. Difractogramas

Figura 6. Microfotografía SEM mostrando el proceso de levantamiento de la película sobre el sustrato de silicio.

Obtención de los espectros y la medición de densidad y temperatura

Captura del espectro óptico

Se calibró el espectrógrafo en el rango de 350 a 900 nm haciendo las tomas espectrales a intervalos de 25 nm, utilizando para esto, las lámparas de neón (Ne), argón (Ar) y mercurio (Hg).

La adquisición de espectros mediante la espectroscopia óptica de emisión se hizo una vez generado el plasma y después de agregar el gas reaccionante nitrógeno, en el rango de 375 nm a 900 nm en intervalos de 25 nm con la finalidad de determinar la longitud de onda de las componentes del plasma en cada rango.

También se registró los espectros del plasma al obtener películas de WN para diferentes potencias a la temperatura ambiente del sustrato.

En la figura 7 se muestra el espectro óptico tomado para centro de cámara del

espectrógrafo de 550 nm y potencia de la fuente DC de 50 Watts. El espectro óptico del plasma contiene líneas espectrales de N, W, Ar, según el rango espectral en I, II o III ionización de los elementos que conforman el plasma.

Medición de temperatura electrónica

Para medir la temperatura primero hay que identificar las líneas espectrales de interés así como las intensidades para efectuar la determinación de la temperatura electrónica en forma indirecta. En la figura 7, se muestra el espectro del plasma cuando la potencia aplicada de la fuente DC fue de 50 Watts. Con números arábigos del 1 al 4 se indican las líneas de Argón en primera ionización.

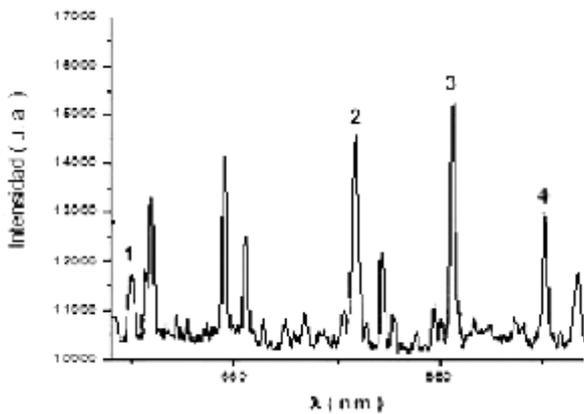


Fig. 7. Espectro óptico del plasma para potencia de la fuente DC de 50 Watts.

El resto de picos representan otras transiciones para el N en segunda ionización y transiciones para el W en primera ionización que no son utilizadas para los cálculos de densidad y temperatura electrónica del plasma.

En la tabla 2 se especifican los valores de las longitudes de onda correspondientes así como las intensidades de las líneas del Argón en el espectro y haciendo uso de las tablas de datos del Instituto Nacional de Normas y Tecnología NIST²⁴ donde se encuentran la especificación de la transición efectuada por los iones, el valor de g, E₂, ñ y A completamos los datos necesarios. Para determinar la temperatura del plasma se grafica log (Iñ/Ag)

vs E₂, luego la pendiente de la gráfica se iguala a -1/kT, en donde k es la constante de Boltzmann de donde se obtiene el valor de la temperatura electrónica del plasma.

Tabla 2. Datos para de las líneas del Ar (I) en primera ionización para determinar la temperatura electrónica del plasma para potencia de fuente DC de 50 Watts.

Línea	l (u.a)	ñ (nm)	E ₂ (cm ⁻¹)	g	A (s ⁻¹)
1	883	545.2	122400	5	4.7E+05
2	3796	555.9	122086	5	1.42E+06
3	4414	560.7	121932	3	2.20E+06
4	2500	565.1	121794	1	3.20E+06

En la figura 8 se tiene la gráfica de los datos de Ln (Iñ/Ag) vs. E₂, para el caso en que la potencia del plasma fue de 50 Watts.

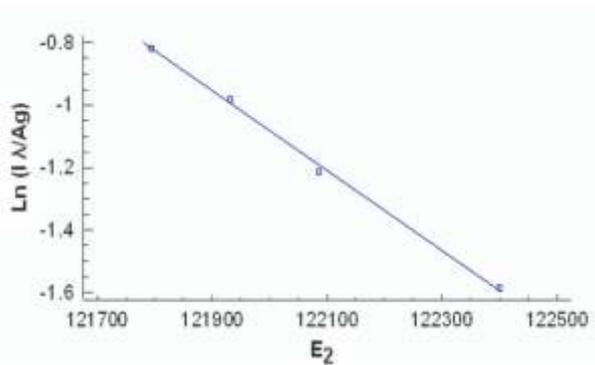


Fig. 8. Ploteo típico de Boltzmann para determinar la temperatura electrónica del plasma, usando el espectro de emisión. Te = (1.126 ± 0.035) x 10³ K

De manera similar se determina las temperaturas electrónicas del plasma para los diferentes valores de potencia, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla de valores de la densidad (n) y temperatura electrónica (Te) en función de las potencias.

Potencia (Watt)	Te x10 ³ (K)	n _e x10 ¹⁶ (cm ⁻³)
20	0.575	1.455
30	0.721	1.729
40	1.107	2.164
50	1.126	2.175
60	0.628	1.645
70	0.965	1.950
100	0.922	2.930
150	1.060	2.050
200	1.397	2.576

Haciendo uso de la tabla 3, se obtiene la grafica Te vs P mostrada en la figura 9, muestra una relación curvilínea donde el valor de F=35.59, regresión altamente significativa (p<0.001).

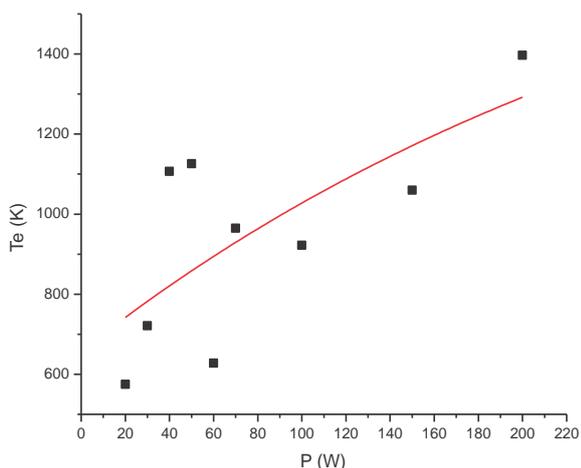


Fig. 9. Variación de la temperatura electrónica en función de la Potencia de la fuente DC.

Medición de la densidad electrónica

Los procesos colisionales de los átomos y iones perturban la emisión de luz lo cual gobierna al ancho y forma de las líneas espectrales. El principal mecanismo que contribuye al ensanchamiento de la línea espectral es el efecto Stark. Para determinar la densidad electrónica del plasma se hace uso del ensanchamiento de las líneas espectrales por efecto Stark según²⁵. La línea del Ar (I) de 560.7 nm fue utilizada para efectuar los cálculos de temperatura del

plasma y los valores de W se obtuvieron de la referencia²³ según la temperatura electrónica respectiva en cada caso y haciendo uso de la ecuación 3. Al graficar ne vs. la potencia de la fuente DC utilizada para generar el plasma, el valor de F=88.40, regresión altamente significativa (p<0.0001).

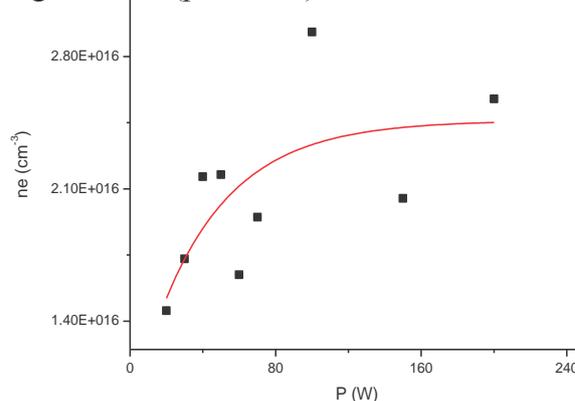


Fig. 10. Variación de la densidad electrónica en función de la Potencia de la fuente DC.

DISCUSIÓN

El espectro de difracción de rayos X de los depósitos de películas delgadas de W-N sobre las obleas de silicio (111) que se observan en la figura 4, muestran un espectro de la película delgada del puro Tungsteno donde aparecen un pico del Tungsteno en 2è = 39.3° con dirección del plano cristalográfico (110) del sistema cúbico (bcc) que se identificó según¹⁹, esto es concordante con lo reportado en²⁶ aunque las películas los obtuvieron por el método de arco catódico. Luego se muestran el espectro de las películas de nitruro de tungsteno (WN) para 2è = 35.3°, apareciendo el más intenso con dirección del plano cristalográfico (100) del sistema hexagonal según²⁰, que se han obtenido manteniendo la presión del argón constante, la potencia DC de 50 Watt y se ha efectuado la variación de la presión del nitrógeno observando que hasta la presión de nitrógeno de 5 mtorr el pico de WN ha ido en aumento esto quiere decir que para esas condiciones la película tiene una estructura WN y luego disminuye queriendo decir que la estructura de la película ha variado es decir la composición química de W

y Nya no es la misma.

Las variaciones de densidad como temperatura electrónica del plasma por efectos de potencia superiores a 50 watt, suben y bajan produciendo un estado inestable en el plasma que no permite generar buenas películas y hace variar las propiedades del plasma. Esto se confirma experimentalmente con el hecho de que las películas de nitruro de tungsteno generadas con potencias de 100 Watt a 200 Watt no se adhieren bien al sustrato de silicio mostrando un levantamiento de la película, esto es debido a que se generan tensiones internas compresivas en la película⁸. Las oscilaciones de la densidad se debe a la acumulación de iones de tungsteno y Argón, las colisiones entre ellos no permite la adhesión estable al sustrato. Estos resultados son concordantes con los reportados en la literatura¹⁴.

Las películas delgadas de nitruro de tungsteno fueron obtenidas en una cámara de erosión iónica con imán sobre una oblea de silicio (111). Las películas son obtenidas para potencia DC de 50 Watts, tiempo de 11 minutos y presión de Argón 4 mTorr, el valor encontrado para formar una película de WN es con presión de nitrógeno 5 mTorr, argón 4 mtorr y el valor del espesor de la película fue de 1150.

CONCLUSIONES

Se concluye que tanto la temperatura electrónica como la densidad electrónica del plasma con la potencia tienen una relación curvilínea. El aumento de la potencia de la fuente afecta a la generación de la película produciendo falta de adherencia al sustrato deduciéndose que la potencia es una variable importante a controlar. La película estable y características óptimas de estructura se obtuvo a una potencia de 50 watt.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a:
OGPRODEIN por su apoyo económico para pasajes y la compra de materiales necesarios

para el desarrollo del presente trabajo de investigación en Ensenada- México.

Al Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el apoyo de sus instalaciones para desarrollar el presente trabajo de investigación y a los investigadores y técnicos especialistas:

Dr. Gerardo Soto, por sus sugerencias en cuanto a la mejora de la erosión iónica de las películas delgadas y fundamentos sobre los nitruros.

Lic. Javier Hernández Landa, técnico electromecánico por su apoyo en el laboratorio de Películas Delgadas.

Mg. Eloisa Aparicio Ceja por su apoyo con el manejo y obtención de los difractogramas con el difractómetro de rayos x.

Tec. Alejandro Tiznado del taller mecánico del CCMC-UNAM por su apoyo en la adecuación del blanco de Tungsteno al magnetrón.

Al Centro Latinoamericano de Física (CLAF) por su apoyo económico que permitió realizar una estancia en el CNyN en Ensenada-México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Huang, C.F., B.Y. Tsui, and C.H. Lu. Thermal stability and electrical characteristics of tungsten nitride gates in metal-oxide-semiconductor devices, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47 (2): 872-878. 2008.
2. Cheng, H.E. and M.H. Hon. Influence of TiN coating thickness on the wear of Si₃N₄-based cutting tools, *Surface and Coating Technology* 81: 256-261. 2006.
3. Lee, C.W and Y. T. Kim. High temperature thermal stability of plasma-deposited tungsten nitride Schottky contacts to GaAs, *Solid-State Electronics*, 38 (3): 679-682. 1995.
4. Chatterjee, S., Y. Kuo and J. Lu. Thermal annealing effect on electrical properties of metal nitride gate electrodes with hafnium oxide gate dielectrics in nanometric MOS devices, *Microelectronis Engineering* 85 (1): 202-209. 2008.

5. Bäuerle, D. Laser Processing and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin, Germany. 1996.
6. Abdelouahdi, K., C. Sant, C. Legrand-Buscema, P. Aubert, J. Perrière, G. and Ph. Houdy. Microstructural and mechanical investigations of tungsten carbide films deposited by reactive RF sputtering, *Surface and Coatings Technology*, 200 (22-23): 6469-6473. 2006.
7. Kovaè, J., P. Panjan and A. Zalar. XPS analysis of WxCy thin films prepared by sputter deposition, *Vacuum*, 82 (2):150-153. 2007.
8. Polcar, T., N. Parreira and A. Cavaleiro. Tribological characterization of tungsten nitride coatings deposited by reactive magnetron sputtering, *Wear* 262: 655-665. 2007.
9. Shen, Y., Y. Mai, W. McBride, Q. Zhang and D. McKenzie. Structural properties and nitrogen-loss characteristics in sputtered tungsten nitride films, *Thin Solid Films* 372: 257-264. 2000.
10. Hones, P., N. Martin, M. Regula and F. Lévy. Sctructural and mechanical properties of chromium nitride, molybdenum nitride, and tungsten nitride thin films, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36: 1023-1029. 2003.
11. Soto, G., W. De la Cruz, F. F. Castillon, J. A. Días, R. Machorro, and M.H. Farías. Tungsten nitride films grown via pulsed laser deposition studied in sity by electron spectroscopies. *Applied Surface Science*, 214(1-4): 58-67. 2003.
12. Lange, S., H. Bartzsch, P. Frach, and K. Goedicke. Pulse magnetron sputtering in a reactive gas mixture of variable composition to manufacture multilayer and gradient optical coatings, *Thin Solid Films* 502: 29-33. 2006.
13. Restrepo, E., A. Devia, R. Cogollo, A. Mariño y H. Sánchez. Espectroscopía óptica de un sistema de magnetron sputtering, *Revista Colombiana de Física*, 34 (2): 488-492. 2002.
14. Harilal, S.S., et al, Electron density and temperature measurements in a laser produced carbon plasma. *J. Appl. Phys.* 82 (5): 2140-2146. 1997.
15. Nam, S. and Young K. Excitation temperature and Electron number density measured for end-on-view inductively coupled plasma discharge. *Bull Korean Chem. Soc.*, 22(8): 827-832. 2001.
16. Pérez-Tijerina, E., J. Bohigas and R. Machorro. Density and temperature sensitive line ratios in plasma generated by laser ablation, *J. Appl. Phys.* 90 (7): 3192-3199. 2001.
17. Pérez-Tijerina, E., J. Bohigas and R. Machorro. Density and temperature maps of an aluminium plasma produced by laser ablation, *Revista Mexicana de Física* 51 (2): 153-156. 2005.
18. Glusker, J.P., M. Lewis and M. Rossi. *Crystal Structure Analysis for Chemists and Biologists*, VCH Publisher, New York, USA. 1994.
19. Soto, G., W. De la Cruz and M. Farías. XPS, AES, and EELS characterization of nitrogen-containing thin films, *Journal of Electrón Spectroscopy and Related Phenomena*, 135: 27-39. 2004.
20. International Centre for Diffraction data. *Powder Diffraction File*, 2003.
21. Harilal, S.S. Spatial and temporal evolution of argon sparks, *Applied Optics*, 43 (19): 3931-3937. 2004.
22. Harilal, S.S., B. O'Shay and M.S. Tillack. Spectroscopic characterization of laser-induced tin plasma, *J. Appl. Phys.* 98: 013306-1, 013306-7. 2005.
23. Griem, H.R. *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill, New York, USA. 1964.
24. http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
25. Bekefi, G. 1976. *Principles of Laser Plasmas*, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
26. Yamamoto, T., M. Kawate, H. Hasegawa and T. Suzuki, 2005. Effects of nitrogen on microstructures of WN_x films synthesized by cathodic arc method, *Surface & Coatings technology*, 193: 372-374.