

Medida de Tensión Residual en Multicapas de TiN/TaN recubiertas por Pulverización Catódica por Magnetron con Voltaje de Polarización en Sustrato de Silicio (100)

Stress Measurement on TiN/TaN Multilayers coated by Magnetron Sputtering with Bias on Silicon Substrate (100)

Jaime E. Diaz¹ ; Luís M. Angelats² ; Junior Asencios³ 

¹ Facultad de Ingeniería. Departamento Académico de Ciencias Básicas y Aplicadas. Universidad Nacional Jaén.

² Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo. Perú.

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 15333.

*Autor correspondiente: jaime.diazc@unj.edu.pe (J. Díaz)

DOI: [10.17268/scien.inge.2025.02.06](https://doi.org/10.17268/scien.inge.2025.02.06)

RESUMEN

En el presente estudio se investigó el comportamiento del stress en películas multicapa de TiN/TaN, recubiertas en obleas de silicio (100) de 0,3 mm de espesor mediante la técnica de Pulverización Catódica por Magnetron reactivo. El objetivo principal fue analizar la influencia del voltaje de polarización aplicado al sustrato y del número de bicapas en la tensión residual de las películas delgadas, manteniendo un espesor total constante. Los recubrimientos se produjeron en una atmósfera de Ar/N₂, con una temperatura de sustrato de 400 °C y voltajes de polarización de -50 V y -250 V. La estructura nanocristalina y la morfología de las multicapas se caracterizaron mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM), respectivamente. El stress se determinó midiendo la curvatura del sustrato mediante desviación láser, utilizando la fórmula de Stoney. Se observó una transición en el comportamiento del stress de tensivo a compresivo al incrementar el voltaje de polarización de -50 V a -250 V. Específicamente, para un voltaje de polarización de -50 V, la tensión residual fue tensivo y su valor absoluto aumentó ligeramente con el número de bicapas. En contraste, para un voltaje de polarización de -250 V, la tensión residual fue compresivo, y su magnitud absoluta tendió a disminuir al pasar de 2 a 4 bicapas, estabilizándose luego para un mayor número de bicapas. Estos hallazgos demuestran la posibilidad de modular el estado de tensión residual en sistemas multicapa TiN/TaN mediante el control del voltaje de polarización, lo cual es crucial para optimizar la adhesión y el rendimiento mecánico de los recubrimientos protectores y otras aplicaciones de ingeniería de superficies.

Palabras Clave: Películas Delgadas; Pulverización Catódica por Magnetron; Multicapa; Voltaje de Polarización; Tensiones Residuales; Nitruro de Titanio; Nitruro de Tantalio.

ABSTRACT

In the present study, the stress behavior in TiN/TaN multilayer films, coated on 0.3 mm thick silicon (100) wafers using the reactive Magnetron Sputtering technique, was investigated. The main objective was to analyze the influence of the substrate bias and the number of bilayers on the residual stress of the thin films, while maintaining a constant total thickness. The coatings were produced in an Ar/N₂ atmosphere, with a substrate temperature of 400 °C and bias of -50 V and -250 V. The nanocrystalline structure and morphology of the multilayers were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), respectively. The stress was determined by measuring the substrate curvature via laser deflection, using the Stoney formula. A transition in the stress behavior from tensile to compressive was observed as the bias voltage was increased from -50 V to -250 V. Specifically, for a bias of -50 V, the stress was tensile, and its absolute value increased slightly with the number of bilayers. In contrast, for a bias of -250 V, the residual stress was compressive, and its absolute magnitude tended to decrease when going from 2 to 4 bilayers, subsequently stabilizing for a higher number of bilayers. These findings demonstrate the possibility of modulating the stress state in TiN/TaN multilayer systems by controlling the bias, which is crucial for optimizing the adhesion and mechanical performance of protective coatings and other surface engineering applications.



Keywords: Thin Films; Magnetron Sputtering; Multilayer; Bias Voltage; Residual Stress; Titanium Nitride; Tantalum Nitride.

1. INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos duros basados en nitruros de metales de transición, como el nitruro de titanio (TiN), son ampliamente utilizados en la industria desde la década de 1980 (Sundgren, 1982), para proteger componentes contra el desgaste, gracias a su elevada dureza, que ronda los 20 GPa. Más allá de estas aplicaciones tribológicas, las películas delgadas de TiN también han captado un gran interés para usos en microelectrónica como barreras de difusión (Tao et al., 1995) y en el campo de la fotónica como materiales plasmónicos (Patsalas et al., 2015). Paralelamente, los recubrimientos de nitruro de tantalio (TaN) se investigan por sus prometedoras propiedades para diversas aplicaciones tecnológicas (Leng et al., 2001). En las últimas décadas, la investigación se ha intensificado en los sistemas multicapa del tipo TiN/MeN (donde Me = Ta, Si, Nb, etc.), ya que se ha demostrado que esta arquitectura puede producir una mejora significativa en la dureza en comparación con los recubrimientos de una sola capa (Arturo Talledo et al., 2015), (Lukaszewicz et al., 2006)

Un factor fundamental que determina la integridad y el rendimiento de cualquier recubrimiento es la tensión residual que se genera durante el proceso de recubrimiento (Stoney, 1909). El conocimiento y control de la tensión residual son de suma importancia, dado que si son excesivamente compresivas favorecen la delaminación, mientras que estados tensivos pueden promover la nucleación de grietas; de ahí la importancia de controlar su magnitud y su signo (Contreras Romero, Hurtado Macías, et al., 2019), (Aouadi et al., 2021). El estado de la tensión residual no solo afecta la adhesión (Contreras Romero, Cortínez Osorio, et al., 2019), sino que también mantiene una estrecha relación con la dureza final del recubrimiento (Hernández-Navarro et al., 2019), (Bahce & Cakir, 2019).

Las propiedades de las películas depositadas mediante técnicas de pulverización catódica (Sputtering) dependen directamente de los parámetros del proceso, como la temperatura, la presión y, de forma destacada, la energía de los iones que bombardean el sustrato (Wang et al., 2022). La aplicación de un voltaje de polarización (bias) en el sustrato es una estrategia comúnmente utilizada para incrementar la energía de los iones incidentes, lo que permite obtener películas más densas y uniformes (Dai & Shi, 2021). Esta manipulación de la energía iónica influye directamente en la microestructura y, por consiguiente, en el estado de stress del material. Adicionalmente, el espesor individual de las capas y, por ende, el número total de periodos depositados, condicionan la relajación de tensiones a través de mecanismos de reconformación atómica e interacción interfacial (Huff, 2022), (Liu et al., 2019).

A pesar de que la relación entre el voltaje de polarización y la tensión residual está bien documentada, existe la necesidad de comprender cómo evoluciona dicha tensión residual en sistemas multicapa complejos cuando se modifica su arquitectura interna manteniendo un espesor total constante. El presente trabajo busca abordar este aspecto, investigando sistemáticamente el stress residual en recubrimientos multicapa de TiN/TaN. Para ello, se fabricaron películas con un número variable de bicapas (2, 4, 8 y 16) bajo dos condiciones de voltaje de polarización (-50 V y -250 V). Se eligió el sistema TiN/TaN por su relevancia como recubrimiento duro avanzado, y se emplearon sustratos de silicio (100) por sus propiedades mecánicas bien definidas, ideales para la cuantificación precisa de la tensión residual mediante la técnica de curvatura de oblea, basada en la ecuación de Stoney (G. Gerald Stoney, 1909). El objetivo es determinar cómo la combinación del número de interfaces y la energía iónica, controlada por el voltaje de polarización, modula el estado de tensión residual, pasando de un régimen tensivo a uno compresivo. Los resultados obtenidos permiten establecer directrices de fabricación orientadas a sintonizar el signo y la magnitud de la tensión residual, lo cual resulta clave para optimizar la adhesión y la vida útil de estos recubrimientos en aplicaciones de ingeniería de superficies avanzadas.

2. METODOLOGIA

Para la fabricación de los recubrimientos, se utilizaron como sustratos obleas de silicio con orientación cristalográfica (100) y un espesor de 0.3 mm. Antes del recubrir, los sustratos se sometieron a una secuencia de limpieza por ultrasonido de diez minutos en alcohol isopropílico. El proceso de deposición se realizó en un sistema de Pulverización Catódica por Magnetron (Magnetron Sputtering), como se muestra en la figura 1, empleando blancos de titanio (Ti) y tantalio (Ta) con 75 mm de diámetro, 4 mm de espesor y una pureza superior al 99.99%. Se produjeron recubrimientos monocapa de nitruro de titanio (TiN), nitruro de tantalio (TaN) y sistemas multicapa de TiN/TaN. La deposición se efectuó en una atmósfera reactiva que consistía en una mezcla de Argón (Ar) y Nitrógeno (N₂), donde la presión parcial del N₂ fue de 1.3×10^{-4} mbar y la presión total de trabajo en la cámara se mantuvo en 6.6×10^{-3} mbar. Durante todos los procesos, la temperatura del sustrato se estabilizó

en 400 ± 5 °C mediante control de termopar y la potencia de pulverización catódica por magnetrón se mantuvo con una corriente de 600 mA y un voltaje de 400 V.

Se prepararon series de muestras multicapa con 2, 4, 8 y 16 bicapas de TiN/TaN. Para cada una de estas configuraciones, se crearon dos conjuntos de muestras aplicando voltajes de polarización (bias) distintos al sustrato: uno a -50 V y otro a -250 V⁹. Con el fin de mantener un espesor total de recubrimiento constante en todas las muestras, se ajustaron los tiempos de deposición. Todas las muestras iniciaron con una capa de adhesión de Ti depositada durante un minuto. Para la muestra de 2 bicapas, el tiempo fue de 16 minutos para TiN y 2 minutos para TaN por bicapa; para 4 bicapas, fue de 8 minutos de TiN y 1 minuto de TaN; para 8 bicapas, 4 minutos de TiN y 30 segundos de TaN; y finalmente, para 16 bicapas, 2 minutos de TiN y 15 segundos de TaN. Para el tratamiento de los resultados, los espesores reales medidos por SEM se introdujeron en la ecuación de Stoney afinando los valores de tensión residual (σ). Los datos de cada serie se expresaron como media \pm desviación estándar. De este modo, las tasas de crecimiento, monitorizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), fueron de $48 \pm 0,3$ nm min⁻¹ para TiN y $36 \pm 0,2$ nm min⁻¹ para TaN.

Una vez fabricados los recubrimientos, se procedió a su caracterización. La morfología de la sección transversal y el espesor de las capas se verificaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando una tensión de aceleración de 3.0 kV. La estructura cristalina fue analizada por difracción de rayos X (DRX) con un equipo Bruker D8 Focus que emplea radiación Cu-K α con una longitud de onda de 0.15406 nm, permitiendo identificar las fases cristalinas y su orientación. Se adquirieron difractogramas θ -2 θ con un paso de 0,02° y un tiempo de conteo de un segundo por paso.

Las tensiones residuales se determinaron mediante el método de curvatura en un equipo que se encuentra en la figura 2, que emplea un láser de 633 nm y una base de 30 mm entre haces. Se midió la curvatura de cada oblea antes y después del recubrimiento. Este método calcula el cambio en el radio de curvatura (R) de la oblea de silicio antes y después del recubrimiento. Sólo se aceptaron series de datos con coeficiente de determinación $R^2 > 0,995$ en el ajuste polinómico de segundo orden. La tensión residual media (σ) se calculó con la ecuación de Stoney:

$$\sigma_{av} = \frac{M_s h_s^2}{6 h_f R}, \quad (1)$$

donde, σ_{av} es el stress medio, R el radio de curvatura del sustrato plano inicial después del recubrimiento, M_s el módulo biaxial del sustrato, h_s el espesor del sustrato y h_f el espesor del recubrimiento. Usamos el valor numérico $M_s = 1.803$ Nm⁻², de acuerdo con la literatura (Janssen et al., 2009). Sólo se aceptaron series de datos con coeficiente de determinación $R^2 > 0,995$ en el ajuste polinómico de segundo orden. La tensión residual media (σ) se calculó con la ecuación de Stoney. La propagación de errores correspondiente que incluye la incertidumbre instrumental y la variación en el espesor efectivo de la película arrojó una exactitud global de $\pm 0,05$ GPa (1σ).



Figura 1. Vista externa de la cámara de vacío.

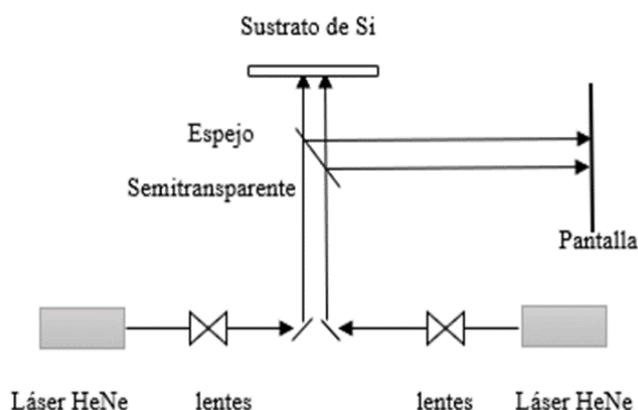


Figura 2. Dibujo esquemático de equipo para la medición de esfuerzos

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1. Morfología y Estructura de los Recubrimientos

Los recubrimientos deben mantener un solo espesor final. Para ello la primera bicapa TiN/TaN se recubrió con una capa de TiN durante 16 minutos y de TaN durante 2 minutos, asimismo la segunda bicapa fue 8 minutos de TiN y 1 minuto de TaN, luego la tercera bicapa estuvo recubierta durante 4 minutos de TiN y 30 segundos de TaN y finalmente la última bicapa fue de 2 minutos de TiN y 15 segundos de TaN. Todas estas bicapas tienen una capa de adherencia de Ti de un minuto. Los espesores de las bicapas se muestran en la tabla 1 respectivamente.

Tabla 1. Lista de recubrimientos de las bicapas TiN/TaN

Material	Nº de Capas	Espesor de TiN (nm)	Espesor de TaN (nm)	Espesor de la película (µm)
TiN/TaN	2	770	72	1,75
TiN/TaN	4	574	56	1,77
TiN/TaN	8	183	24	1,78
TiN/TaN	16	82	19	1,78

La producción de recubrimientos multicapa de TiN/TaN con un espesor total constante se logró mediante el ajuste sistemático de los tiempos de deposición para las series de 2, 4, 8 y 16 bicapas. La verificación de la estructura y el espesor se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en modo de sección transversal. Las micrográficas revelaron un espesor total de aproximadamente 1695 nm, que incluye una capa de adhesión de titanio de 79 nm, como se ve en la figura 3.

El análisis morfológico muestra diferencias notables en función del número de bicapas. En la muestra con 2 bicapas (Figura 3), se observa una clara estructura de crecimiento columnar que se atenúa conforme disminuye el espesor individual de bicapa, donde los granos se extienden a través de las gruesas capas individuales de TiN. En contraste, para la muestra con 16 bicapas (Figura 4), donde las capas individuales son significativamente más delgadas, esta estructura columnar se ve interrumpida repetidamente por las interfaces TiN/TaN, resultando en un refinamiento microestructural y una disminución del carácter columnar pronunciado. El ancho de columna cae de 80 ± 5 nm (2 bicapas) a 35 ± 3 nm (16 bicapas). La mayor densidad concuerda con el descenso de esfuerzo tensivo. Las interfaces entre las capas de TiN (zonas oscuras) y TaN (zonas claras) son distinguibles en ambas configuraciones. La interfaz TaN/TiN permanece nítida en profundidad aun en las muestras de 16 bicapas. No se detectan microgrietas ni vacancias, indicando integridad estructural.

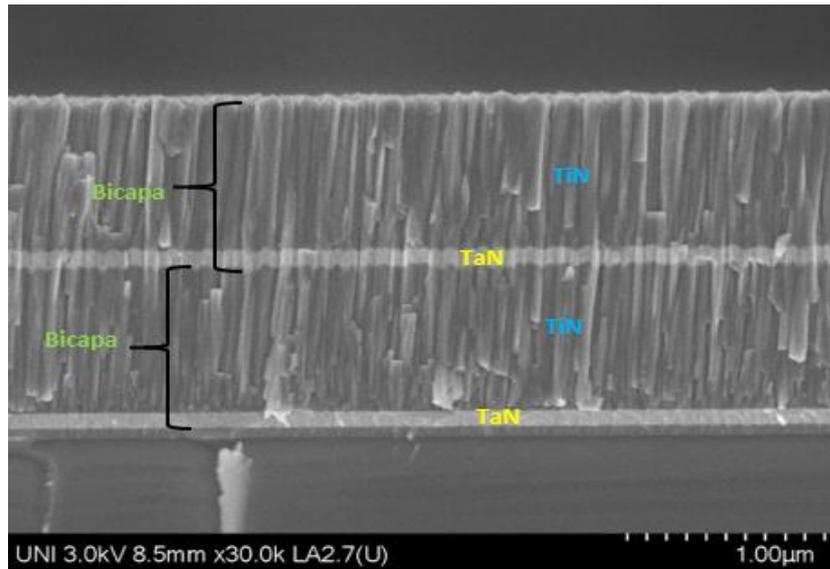


Figura 3. Micrografía de un sistema multicapa TiN – TaN, con 2 bicapas

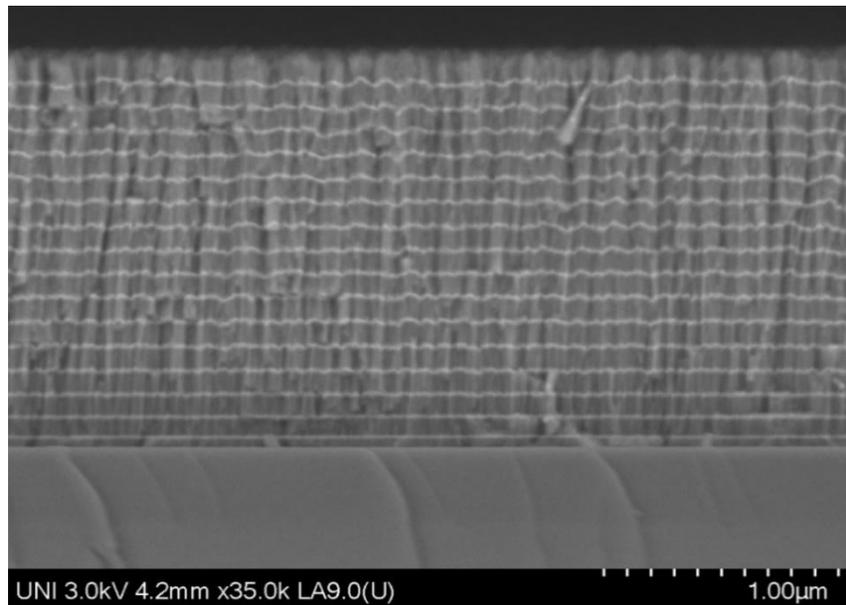


Figura 4. Micrografía de un sistema multicapa TiN – TaN, con 16 bicapas

3.1.2. Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)

Los difractogramas muestran picos característicos de TiN-fcc (111) y TaN-fcc (100), cuya intensidad relativa evoluciona con el número de bicapas. Los difractogramas de rayos X (Figura 5) confirman la naturaleza nanocristalina de los recubrimientos. El pico intenso a $2\theta \approx 69^\circ$ corresponde al plano (400) del sustrato de silicio monocristalino. En las muestras de 2 y 4 bicapas, se observa un pico de difracción predominante alrededor de $2\theta = 36.7^\circ$, correspondiente al plano (111) del TiN, con un parámetro de red calculado de aproximadamente $a = 0.42$ nm.

A medida que el número de bicapas aumenta a 8, emerge un segundo pico a $2\theta \approx 35.98^\circ$, identificado como el plano (100) del TaN con parámetro de red 0,25 nm. En la muestra de 16 bicapas, este pico del TaN (100) se vuelve predominante, mientras que la intensidad relativa del pico de TiN (111) disminuye. Esta evolución indica un cambio en la textura cristalográfica preferencial del sistema multicapa al reducirse el espesor de las capas individuales. Adicionalmente, se observa una disminución general de la intensidad de los picos de difracción de los nitruros al aumentar el número de bicapas, lo cual es consistente con la reducción del volumen de difracción de cada capa individual y refinamiento del tamaño de grano (Xi et al., 2017). Aplicando la

ecuación de Scherrer nos da como resultado 25 ± 2 nm para la bicapa TiN/TaN; ambos descienden a $\approx 13 \pm 3$ nm en 16 bicapas.

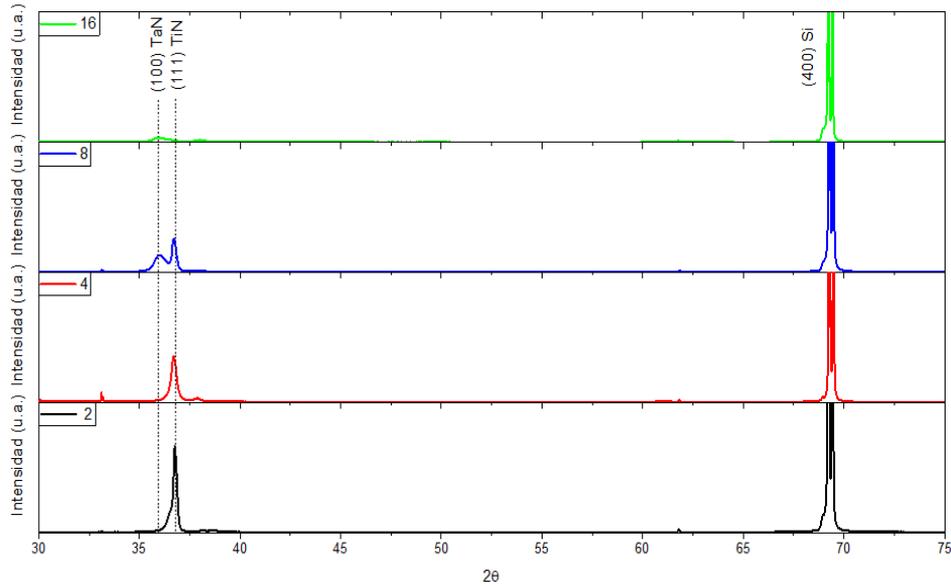


Figura 5. Difractograma de Rayos X para TiN/TaN de distinto número de capas. a) 2 capas, b) 4 capas, c) 8 capas y d) 16 capas.

3.1.3. Medidas de Tensión Residual. La Figura 6 resume las mediciones de tensión residual para todas las configuraciones de multicapas, mostrando una fuerte dependencia con el voltaje de polarización (bias) aplicado al sustrato. **Para -50 V de polarización:** Todos los recubrimientos exhiben una tensión residual tensiva (valores positivos). El valor del stress se incrementa ligeramente desde $+0.1 \pm 0,05$ GPa para 2 bicapas hasta aproximadamente $+0.3 \pm 0,05$ GPa para 8 y 16 bicapas (Ponce et al., 2020). **Para -250 V de polarización:** Se produce una transición a una tensión residual fuertemente compresiva (valores negativos) (Lee et al., 2012). La magnitud del stress es máxima para la muestra de 2 bicapas ($-1.7 \pm 0,05$ GPa), disminuye a $-1.8 \pm 0,05$ GPa para 4 bicapas y luego se mantiene relativamente estable para 8 y 16 bicapas.

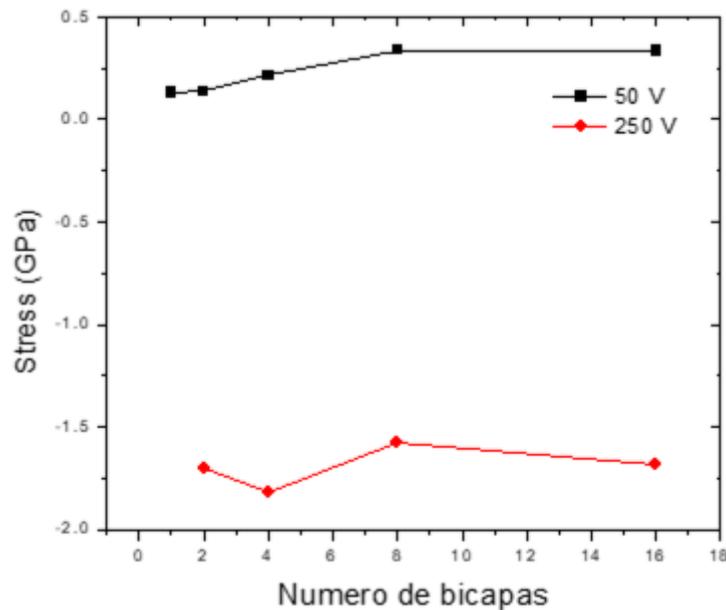


Figura 6. Stress compresivo en función del número de bicapas de TiN/TaN de sistema de multicapas para bias de -50 V y -250 V.

3.2 Discusión

La discusión integra los resultados para explicar cómo los parámetros del proceso influyen en la microestructura y las propiedades mecánicas. La interrupción del crecimiento columnar al aumentar el número de bicapas es un resultado directo del diseño experimental (Valdez et al., 2021). Este refinamiento del grano, causado por la renucleación en cada nueva interfaz, es un mecanismo conocido para el endurecimiento en sistemas multicapa (Pogrebnyak et al., 2019). El cambio en la textura cristalográfica, pasando de una orientación TiN (111) a una con mayor presencia de TaN (100), sugiere que la energía superficial y las cinéticas de crecimiento se ven alteradas cuando las capas son extremadamente delgadas (Valdez et al., 2021), (Aouadi et al., 2021).

La transición del stress de un estado tensivo a uno fuertemente compresivo al aumentar el voltaje de polarización de -50 V a -250 V es el hallazgo más significativo y es consistente con reportes previos en la literatura¹⁶. Este comportamiento se explica por el mecanismo de "atomic peening" (bombardeo atómico). A bajo voltaje de polarización (-50 V), la energía de los iones de argón y de la especie depositada es insuficiente para causar una densificación significativa, y la tensión residual resultante puede originarse por la unión de islas durante el crecimiento o por la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre el recubrimiento y el sustrato. Sin embargo, a -250 V, el bombardeo de iones energéticos sobre la película en crecimiento es mucho más intenso. Estos iones desplazan átomos de la superficie y los introducen en sitios intersticiales de la red, generando una alta densidad de defectos y, como consecuencia, una elevada tensión residual compresiva. Este efecto es también responsable de la densificación de la película.

El leve corrimiento de los picos de difracción mencionado en el trabajo puede interpretarse como una manifestación de estas tensiones internas a nivel de la red cristalina, como se ha reportado en otros estudios. La variación no monotónica de la tensión compresiva con el número de bicapas (disminución de 2 a 4 bicapas) sugiere una compleja interacción entre la tensión residual generada dentro de las capas y posibles mecanismos de relajación en las interfaces. Un mayor número de interfaces podría proporcionar vías para la disipación parcial de la tensión residual, compitiendo con la generada por el bombardeo iónico.

En conclusión, el estudio demuestra que el voltaje de polarización es una herramienta dominante para modular el estado de la tensión residual en multicapas de TiN/TaN, permitiendo pasar de un régimen tensivo a uno compresivo. Esta capacidad de ingeniería de la tensión residual es crucial para optimizar la adhesión y el rendimiento funcional de los recubrimientos.

4. CONCLUSIONES

El voltaje de polarización aplicado al sustrato resultó el factor determinante sobre la naturaleza y magnitud de la tensión residual en las multicapas de TiN/TaN, para (-50 V) generaron tensiones tensivas moderadas (+0,14 a +0,33 GPa), mientras que un voltaje de polarización elevado (-250 V) indujo un régimen compresivo controlado (-1,70 a -1,68 GPa).

Las micrografías SEM mostraron refinamiento columnar de 80 ± 5 nm (2 bicapas) a 35 ± 3 nm (16 bicapas) y densificación progresiva en la serie de alto voltaje de polarización, favoreciendo la reducción de porosidad y, en consecuencia, el incremento de compresión interna. El número de bicapas, si bien influye en el refinamiento de la microestructura columnar de los recubrimientos, tiene un efecto secundario sobre la magnitud de la tensión residual en comparación con la fuerte influencia del voltaje de polarización. Una configuración de 8–16 bicapas depositada a -250 V ofrece un balance favorable: compresión moderada ($\approx -1,6$ GPa) que inhibe grietas radiales sin comprometer la adhesión, junto con interfaces densas que elevan la tenacidad.

Los resultados confirman que la ingeniería de interfaces no sólo es necesario el ajuste de espesor total como estrategia para controlar tensiones residuales en superredes nitruradas. La investigación demuestra que combinar un control preciso del voltaje de polarización con un diseño multicapa ajustado proporciona una vía adecuada para sintonizar las tensiones residuales y, por ende, el desempeño mecánico de recubrimientos TiN/TaN destinados a aplicaciones de alta exigencia tribológica y térmica. Este hallazgo confirma que es posible modular e ingeniar el estado mecánico de las películas delgadas, lo cual es fundamental para optimizar la adhesión y prevenir fallos como la deslaminación en aplicaciones prácticas.

5. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Dr. Arturo Talledo, director del Laboratorio de Sputtering de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo en la realización de los recubrimientos del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aouadi, K., Nouveau, C., Besnard, A., Tlili, B., Montagne, A., & Chafra, M. (2021). The Effect of Bilayer Periods and Their Thickness in Magnetron Sputtering Protective Multilayer Coatings for Tribological Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(4), 2526–2535. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05587-6>
- Arturo Talledo, Junior Asencios, Karin Paucar, Alcides López, Carsten Benndorf, Rolando Nuñez, & an Petersen. (2015). Hardness Enhancement and Corrosion Current of Multilayer Coatings Based on Titanium Nitride. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 5(8), 257-268. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2015.7-8.002>
- Bahce, E., & Cakir, N. (2019). Tribological investigation of multilayer CrN/CrCN/TaN films deposited by close field unbalanced magnetron sputtering. *Reviews on Advanced Materials Science*, 58(1), 271–279. <https://doi.org/10.1515/rams-2019-0036>
- Contreras Romero, E., Cortínez Osorio, J., Talamantes Soto, R., Hurtado Macías, A., & Gómez Botero, M. (2019). Microstructure, mechanical and tribological performance of nanostructured TiAlTaN-(TiAlN/TaN)_n coatings: Understanding the effect of quaternary/multilayer volume fraction. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124875. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.086>
- Dai, W., & Shi, Y. (2021). Effect of bias voltage on microstructure and properties of tantalum nitride coatings deposited by rf magnetron sputtering. *Coatings*, 11(8), 911. <https://doi.org/10.3390/coatings11080911>
- Stoney, G. (1909). The tension of metallic films deposited by electrolysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(553), 172–175. <https://doi.org/10.1098/rspa.1909.0021>
- Hernández-Navarro, C., Rivera, L. P., Flores-Martínez, M., Camps, E., Muhl, S., & García, E. (2019). Tribological study of a mono and multilayer coating of TaZrN/TaZr produced by magnetron sputtering on AISI-316L stainless steel. *Tribology International*, 131, 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.034>
- Huff, M. (2022). Review Paper: Residual Stresses in Deposited Thin-Film Material Layers for Micro- and Nano-Systems Manufacturing. In *Micromachines* 13(12), 2084. <https://doi.org/10.3390/mi13122084>
- Janssen, G. C. A. M., Abdalla, M. M., van Keulen, F., Pujada, B. R., & van Venrooy, B. (2009). Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers. In *Thin Solid Films*. 517, 1858–1867. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.07.014>
- Lee, C. Te, Cho, W. H., Shiao, M. H., Hsiao, C. N., Tang, K. S., & Jaing, C. C. (2012). Effects of DC bias on the microstructure, residual stress and hardness properties of TiVCrZrTaN films by reactive RF magnetron sputtering. *Procedia Engineering*, 36, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.046>
- Leng, Y. X., Sun, H., Yang, P., Chen, J. Y., Wang, J., Wan, G. J., Huang, N., Tian, X. B., Wang, L. P., & Chu, P. K. (2001). Biomedical properties of tantalum nitride films synthesized by reactive magnetron sputtering. In *Thin Solid Films*. 398–399, 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01448-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01448-1)
- Liu, H., Tang, J.-F., Wang, X., Li, W., & Chang, C.-L. (2019). Effects of nitrogen-argon flow ratio on the microstructural and mechanical properties of TiAlSiN/CrN multilayer coatings prepared using high power impulse magnetron sputtering. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 37(5), 51501. <https://doi.org/10.1116/1.5100340>
- Lukaszkoicz, K., Dobrzański, L. A., Zarychta, A., & Cunha, L. (2006). Mechanical properties of multilayer coatings deposited by PVD techniques onto the brass substrate. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 15(1–2), 47–52. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e4f404585ecce4ac320380426f076f69602918c4>

- Patsalas, P., Kalfagiannis, N., & Kassavetis, S. (2015). Optical properties and plasmonic performance of titanium nitride. *Materials*, 8(6), 3128–3154. <https://doi.org/10.3390/ma8063128>
- Pogrebnyak, A., Smyrnova, K., & Bondar, O. (2019). Nanocomposite multilayer binary nitride coatings based on transition and refractory metals: Structure and properties. In *Coatings* 9(3), 155. <https://doi.org/10.3390/coatings9030155>
- Ponce, S., Calderon, N. Z., Ampuero, J. L., La Rosa-Toro, A., Talledo, A., Gacitúa, W., & Pujada, B. R. (15-17 August 2020). Influence of the substrate bias on the stress in Ti-DLC films deposited by dc magnetron sputtering. *Journal of Physics: Conference Series*, 1558(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1558/1/012009>
- Sundgren, J.-Eric. (1982). Formation and characterization of titanium nitride and titanium carbide films prepared by reactive sputtering. Department of Physics and Measurement Technology, Linköping University, issue 79. ISBN 91-7372-531-5
- Tao, J., Cheung, N. W., & Hu, C. (1995). Electromigration Characteristics of TiN Barrier Layer Material. In *Ieee Electron Device Letters* 16(6), 230-232. <https://doi.org/10.1109/55.790718>
- Valdez, K. P., Castillo, H. A., Quintero-Orozco, J. H., Restrepo-Parra, E., & de la Cruz, W. (2021). Influence of bilayers period on mechanical properties of TaNx/TaCx multilayers obtained by direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 734, 138845. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138845>
- Wang, Y., Shi, X., Liu, M., Yang, Y., Gao, Q., Zhu, B., & Xu, L. (2022). Structure and properties of Ta doped TiN films prepared using different sputtering powers for Ta target. *Processing and Application of Ceramics*, 16(3), 191–200. <https://doi.org/10.2298/PAC2203191W>
- Xi, Y., Gao, K., Pang, X., Yang, H., Xiong, X., Li, H., & Volinsky, A. A. (2017). Film thickness effect on texture and residual stress sign transition in sputtered TiN thin films. *Ceramics International*, 43(15), 11992–11997. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.050>