

Diseño de un transistor de efecto campo empleando resina fotosensible como dieléctrico de compuerta

MARTÍN, Balthazar ¹; ZAPATA, Cecilia ²; FIGUEROA, Cristian ³; BRIDOUX, German ²; VILLAFUERTE, Manuel ²; JIMÉNEZ, Gustavo ⁴

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán (4000). R. Argentina.

² Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-UNT). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán, R. Argentina.

³ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-UNT). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán, R. Argentina.

⁴ CONICET. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-TUCUMÁN). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán, R. Argentina.

Resumen

Se presenta la fabricación y caracterización de un transistor de efecto de campo (FET) utilizando una resina polimérica fotosensible (RPF) como dieléctrico de compuerta. Esto se llevó a cabo en tres etapas. En primer lugar, se caracterizó la RPF para determinar su constante dieléctrica mediante un circuito RC, diseñando y fabricando capacitores sobre películas de ITO con técnicas de recubrimiento por rotación (*spin coating*), tratamiento térmico y fotolitografía. En la segunda etapa, se fabricaron FETs con láminas de ZnO/Si y BaSnO₃/SrTiO₃, empleando grabado químico (*chemical etching*) para definir el canal semiconductor y contactos de indio e hilos de oro para las terminales. Finalmente, se realizaron estudios eléctricos midiendo la corriente de drenaje en función de la tensión de drenaje y compuerta, ajustando los resultados a modelos MOSFET para determinar movilidad, tensión de umbral y otros parámetros característicos. Los FETs de ZnO presentaron comportamiento esperado, validando su potencial para aplicaciones electrónicas. En las láminas de BaSnO₃ se identificaron desafíos en la caracterización, lo que sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de fabricación. Este trabajo demuestra la viabilidad de la RPF de bajo costo para litografía óptica, como también su aplicación en la producción de dispositivos semiconductores en el rango nanométrico.

Palabras clave: Transistor, Semiconductores, Dieléctrico.

Design of a field-effect transistor using photosensitive resin as gate dielectric

Abstract

This work presents the fabrication and characterization of a field-effect transistor (FET) using a photosensitive polymer resin (PPR) as the gate dielectric. The research was conducted in three stages. First, the PPR was characterized to determine its dielectric constant using an RC circuit, designing and fabricating capacitors on ITO films with spin coating, thermal treatment, and photolithography. Then, FETs were fabricated using films of ZnO/Si and BaSnO₃/SrTiO₃, employing chemical etching to define the semiconductor channel and indium and gold contacts for the gate, source, and drain. Finally, electrical studies were performed by measuring the drain current as a function of drain and gate

voltages, fitting the results to MOSFET models to determine mobility, threshold voltage, and other key parameters. The ZnO-based FETs exhibited expected behavior, validating their potential for electronic applications. In contrast, BaSnO₃ devices faced characterization challenges, suggesting improvements in fabrication conditions. This work demonstrates the feasibility of low-cost PPR for optical lithography and its application in semiconductor device production with nanometric-scale resolution.

Keywords: Transistor, Semiconductors, Dielectric.

Introducción

El desarrollo de dispositivos electrónicos basados en nuevos óxidos semiconductores ha emergido como una alternativa prometedora para la fabricación de transistores de efecto de campo (FET), ya que presentan propiedades eléctricas y ópticas atractivas, como una alta movilidad electrónica y una banda prohibida amplia. En particular, el ZnO (Özgür y Morkoç, 2009) y el BaSnO₃ (Aggoune et al., 2022) han sido objeto de estudio debido a su potencial aplicación en la electrónica transparente y de alta potencia.

Por otro lado, la implementación de materiales dieléctricos alternativos en la compuerta de los FETs es un aspecto clave para optimizar su rendimiento. Las resinas poliméricas fotosensibles (RPF) han demostrado ser una opción viable y de bajo costo para la fabricación de capas dieléctricas en dispositivos electrónicos mediante técnicas de litografía óptica. Sin embargo, su caracterización y desempeño en transistores aún requieren un análisis detallado para determinar su efectividad y viabilidad en aplicaciones prácticas.

El objetivo de este trabajo es fabricar y caracterizar un FET empleando una RPF comercial como dieléctrico de compuerta, explorando su influencia en el rendimiento del dispositivo.

Para ello, se llevaron a cabo estudios experimentales en tres etapas: (i) caracterización de la RPF mediante la determinación de su constante dieléctrica, (ii) fabricación de FETs con ZnO/Si y BaSnO₃/SrTiO₃, y (iii) análisis eléctrico de los dispositivos obtenidos. Se emplearon técnicas avanzadas como *spin coating*, tratamiento térmico, *etching* químico y fotolitografía para la fabricación y caracterización de los dispositivos.

Investigaciones previas han demostrado que el ZnO es un material ampliamente estudiado en la industria de los semiconductores (Figueroa,

2021), mientras que el BaSnO₃ se presenta como una alternativa emergente con propiedades eléctricas favorables (Hyung et al., 2012), aunque su integración en dispositivos electrónicos aún enfrenta desafíos técnicos. Asimismo, diversos estudios han explorado el uso de polímeros fotosensibles en procesos de litografía, resaltando su capacidad para generar estructuras con resolución en el rango nanométrico.

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de dispositivos electrónicos híbridos mediante la combinación de nuevos materiales semiconductores y técnicas de fabricación accesibles, evaluando el impacto de la RPF como dieléctrico de compuerta en FETs experimentales.

Desarrollo

Caracterización de la resina polimérica fotosensible

Para determinar la viabilidad de la resina polimérica fotosensible (RPF) como dieléctrico de compuerta en un transistor de efecto de campo (FET) (Choi y Yoo, 2023), se caracterizaron sus propiedades dieléctricas. Se fabricaron capacitores utilizando RPF depositada sobre una película de óxido de indio y estaño (ITO) en un sustrato de vidrio de 5mm x 5mm como se observa en la Fig. 1.

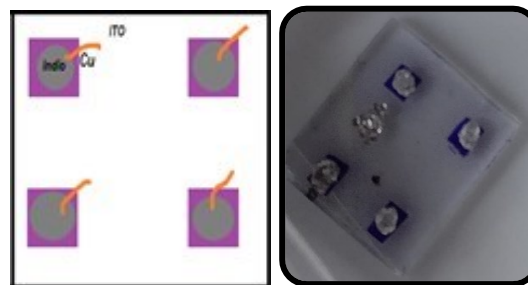


Figura 1: Capacitores diseñados. Izq: Esquema del capacitor. Der: Vista superior del dispositivo.

El depósito de la RPF sobre la lámina se realizó con un pincel y luego se empleó la técnica *spin*

coating con una velocidad de giro de 6000 rpm y aceleración de 20 rpm/min. Con ello se logró obtener una película uniforme de RPF.

Posteriormente, se aplicó un tratamiento térmico (Zapata, 2016) a una temperatura de 50 °C por 30 minutos para mejorar la adherencia de la resina al ITO. La fotolitografía se utilizó para definir el área del capacitor, exponiendo la resina a luz UV por 2 minutos a través de una máscara de aluminio y revelándola con una solución química proporcionada por el fabricante.

La constante dieléctrica de la RPF se determinó midiendo la capacitancia del dispositivo con un circuito RC. Se utilizó un generador de señales para cargar y descargar el capacitor, mientras que un osciloscopio registró la constante de tiempo, permitiendo calcular la capacitancia. Se obtuvo una constante de tiempo $\tau = 96[\mu s]$.

Las dimensiones de los contactos fueron medidas con las capturas fotográficas de un microscopio metalográfico. Se midió un largo $l = 1,44 [mm]$ y ancho $w = 0,97 [mm]$ con un programa de medición de dimensiones desarrollado en el LAFISO y el espesor de la capa dieléctrica se obtuvo mediante las técnicas inclusión y pulido, cuya medición fue $d = 8,31[\mu m]$.

Empleando las ecuaciones (1) y (2) se obtuvo la constante dieléctrica relativa ϵ del RPF:

$$C = \frac{\tau}{R} = 28,8[pF] \quad (1)$$

$$\epsilon_{RPF} = \frac{C d}{\epsilon_0 A} = 19,3 \quad (2)$$

Fabricación de los transistores de efecto de campo

Los FETs fueron fabricados a partir de láminas delgadas de ZnO sobre un sustrato de Si (ZnO/Si) y BaSnO₃ sobre un sustrato de SrTiO₃ (BSO/STO) (Sanchela et al., 2017). Dichos films poseen espesores de 100 [nm] aproximadamente. Con el propósito de mejorar el control de la compuerta se implementó *etching* químico (Villarroya, 2005) para definir un canal delgado de aproximadamente 1[mm] en la película semiconductora (ver Fig. 2):



Figura 2: Canal definido por el *etching* químico.

El proceso de fabricación inició con el depósito del RPF mediante *spin coating*, seguida de tratamiento térmico para mejorar la calidad de la interfase entre el RPF y el semiconductor.

La geometría del canal fue definida mediante fotolitografía (Gray et al., 2017) y *etching* químico, empleando una solución selectiva para cada material. Para el ZnO se utilizó un volumen de 1ml de ácido ortofosfórico en 25 ml de agua destilada y para el BSO se utilizó 7,5 ml de ácido fluorhídrico en ese mismo volumen de agua destilada (Lee et al., 2024). Las láminas se sumergieron, en sus correspondientes soluciones ácidas durante 2 segundos y 30 segundos, respectivamente. Los contactos eléctricos de drenador, compuerta y fuente fueron realizados con indio (In) e hilos de oro (Au), asegurando con ello una baja resistencia de contacto.

Caracterización eléctrica de las láminas ZnO/Si

Se realizaron mediciones de corriente de drenaje (I_{DS}) en función de la tensión de drenaje (V_{DS}) para diferentes valores de tensión de compuerta (V_{GS}), que variaban entre 0V y 20V. Los experimentos se llevaron a cabo empleando una fuente de tensión programable, un nanovoltímetro Keithley 2260B-80-1, y una resistencia patrón para tomar mediciones indirectas de corriente.

Las curvas obtenidas fueron ajustadas a la ecuación característica de un MOSFET (Ec. 3), lo que permitió determinar la movilidad electrónica (μ) (Ec. 4) y la tensión de umbral (V_{th}) de cada dispositivo.

$$I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - \frac{\beta}{2}V_{DS}^2 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu W \epsilon_{RPF}}{L d} \quad (4)$$

Donde: L es el largo del canal, W es el ancho del canal, d es el espesor del dieléctrico y β es un parámetro de fabricación.

Para el ZnO se utilizaron dos láminas diferentes fabricadas con distintos parámetros de crecimiento, denominadas láminas A y B. Ambas se crecieron a una presión de oxígeno de $1\text{E-}3$ [mTorr], aunque existieron ligeras diferencias en dicha condición, como también en el espesor de las películas, a factores geométricos y a la fluencia del láser utilizada, que fue superior a 2 [J/cm²]. De esta manera, la lámina A presenta una mayor resistencia de canal entre drenador y fuente (R_{DS}) que la lámina B.

Para la lámina A se obtuvo la curva de la Fig. 3:

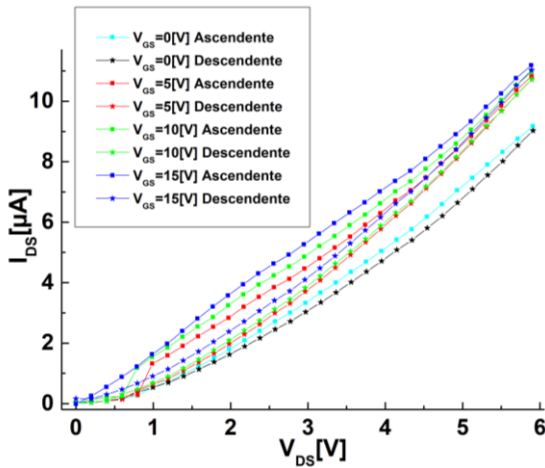


Figura 3: Curvas I-V con $V_{GS} > 0$ [V].

Se observa un correcto comportamiento de I_{DS} con variaciones de V_{GS} , verificando el comportamiento de un FET. Sin embargo, las curvas resultaron parabólicas con concavidad positiva, lo cual no corresponde al comportamiento de un MOSFET. Se decidió extender el rango de V_{DS} para identificar la zona de saturación, pero fue sin éxito, ya que la corriente seguía incrementando para V_{DS} mayores. Además, pudo observarse que las curvas para V_{GS} descendentes, tendían a encontrarse por debajo de las ascendentes. En la sección de Resultados se explica el motivo de este comportamiento.

A la lámina B se le aplicó el mismo ensayo sin emplear tratamiento térmico y se obtuvo lo siguiente (ver Fig. 4):

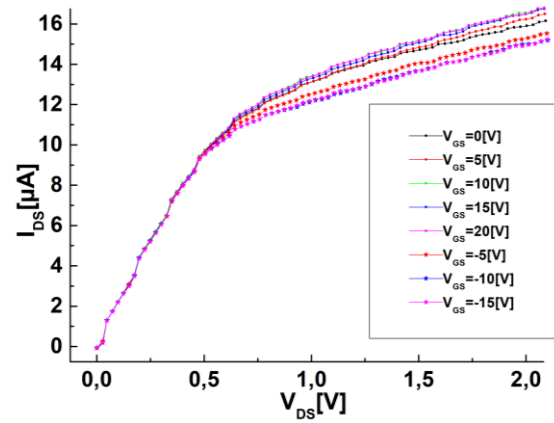


Figura 4: Curvas I-V sin tratamiento térmico.

Se observa que la lámina presentaba el comportamiento de un MOSFET para diferentes tensiones de V_{GS} lográndose identificar la zona de saturación y la zona óhmica del dispositivo.

Luego se aplicó tratamiento térmico y se obtuvo lo siguiente (ver Fig. 5):

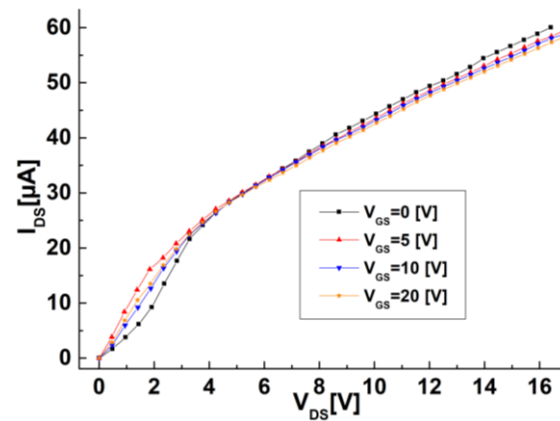


Figura 5: Curvas I-V con tratamiento térmico.

Se observa que las curvas no varían para diferentes V_{GS} . Se realizaron ajustes con un polinomio de 2º, Ec. (5), para relacionarlas con la Ec. (3) de un MOSFET. Se ajustan en un rango corto de V_{DS} (0 a 6 v) y en un rango largo de V_{DS} (0 a 20v). Los parámetros b_1 , b_2 y b_3 se modificaban manual o automáticamente para encontrar el mejor ajuste.

$$y = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot x^2 \quad (5)$$

Las curvas medidas no ajustaron correctamente con la Ec. (5) como era de

esperarse. Sin embargo, se tomaron los parámetros obtenidos considerando las Ec. (6), (7) y (8), los cuales se volcaron en la Tabla 1.

$$\beta = b_3 \cdot 2 \quad (6)$$

$$V_{th} = V_{GS} - \frac{b_2}{\beta} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\beta L d}{W \varepsilon_{RPF}} \quad (8)$$

Tabla 1: Resultados de los ajustes cuadráticos, en rango corto de V_{DS} (0[V] a 6[V]) y en un rango largo de V_{DS} (0[V] a 20[V]).

V_{GS} [V]	β [$\frac{A}{V^2}$]	V_{th} [V]	μ [$\frac{m^2}{V.s}$]	Ajuste
0	3.26E-7	-19	2.08E-3	Largo
5	2.94E-7	-15.40	1.88E-3	Largo
5	8.67E-7	-4.5	5.55E-3	Corto
10	2.86E-7	-10.65	1.83E-3	Largo
10	7.11E-7	-0.7	4.55E-3	Corto
20	2.36E-7	-2.98	1.51E-3	Largo
20	1E-6	11.65	6.41E-3	Corto

Al observar la Tabla 1 se destaca que la movilidad es coherente con los valores experimentales reportados para el ZnO (Acovic, Larosa y Sun, 1996), el parámetro β es constante y se obtiene un V_{th} negativo pero variable. Al observar que la tensión V_{GS} no tiene efecto sobre las curvas, se concluyó que el V_{th} del dispositivo es el que se obtiene para $V_{gs} = 0$ [V]. Esto es porque se debe recordar que el V_{th} se calcula con la Ec. 7. En esta ecuación el V_{GS} siempre resulta nulo por lo que se mencionó anteriormente. La justificación teórica de esta decisión se verá con más detalle en la sección de Resultados.

Para mejorar la correlación de los ajustes se realizaron ajustes con un polinomio de 3º, Ec. (9).

$$y = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot x^2 + b_4 \cdot x^3 \quad (9)$$

Se puede observar en la Fig. 6 que el ajuste mejoró.

Si bien la Ec. (9) no se aproxima a la ecuación I_{DS} de un MOSFET, consideramos que el término cúbico es quien afecta nuestra aproximación a dicha ecuación y que tiene un significado físico. Por lo tanto, a partir de los parámetros de los ajustes, se construyó la siguiente Tabla 2:

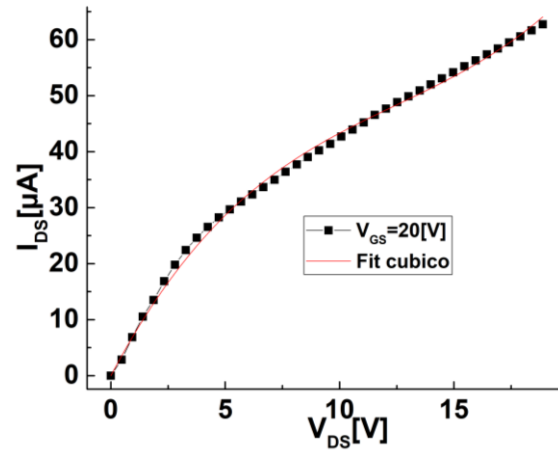


Figura 6: Ajuste cúbico para $V_{GS} = 20$ [V].

Tabla 2: Resultados de los ajustes cúbicos.

V_{GS} [V]	β [$\frac{A}{V^2}$]	V_{th} [V]	μ [$\frac{m^2}{V.s}$]
0	7.39E-7	-9.76	4.79E-3
5	9.71E-7	-3.23	6.29E-3
10	8.53E-7	1.13	5.53E-3
20	9.27E-7	11.67	6.01E-3

A partir de la Tabla 2 se obtiene la movilidad que posee el FET $\mu = 47,9$ [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] y la tensión de umbral $V_{th} = -9,8$ [V]. Los valores resultantes son comparables con los reportados en la literatura (Borysiewicz, 2019), validando su funcionamiento como FET.

Para justificar el término cúbico, se consideró que la corriente I_{DS} es afectada por una corriente que circula en el sustrato de Silicio. Esto es debido a que el sustrato no es totalmente un aislante y por ende forma una juntura con el ZnO. Por lo tanto, se pudo estimar que en nuestro FET hay una corriente adicional causada por la juntura ZnO/Si. Dicha corriente fue ajustada con la Ec. (10), corresponde a la corriente directa de un diodo (Millman y Halkias, 1983).

$$I_{DS} = I_s e^{\frac{V_{DS}}{\eta V_T}} \quad (10)$$

Donde: I_s la corriente de saturación inversa, V_T es la tensión térmica de la juntura, K es la constante de Boltzmann, T la temperatura, q la carga elemental del electrón y η es un factor de corrección de la corriente.

Esta ecuación fue correlacionada con el coeficiente cubico b_4 de la curva con $V_{GS} =$

20[V]. Para ello se graficó el coeficiente cúbico en función de V_{DS} con la Ec. (11):

$$y = b_4 V_{DS}^3 \quad (11)$$

Luego de graficar la Ec. (11), la misma fue ajustada con la Ec. (12) como se observa en la Fig. 7:

$$y = y_0 + A e^{\frac{-x}{\tau}} \quad (12)$$

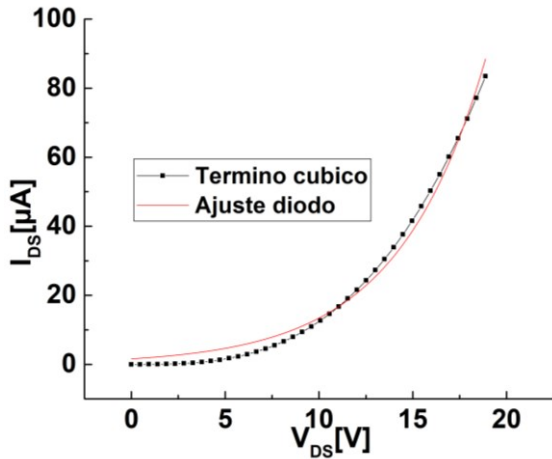


Figura 7: Ajuste del coeficiente cúbico.

A partir de este ajuste se obtuvo $\tau = 5,7[V]$ y al relacionar las Ec. 10-12, se obtiene:

$$\eta = \frac{\tau}{V_T} = \frac{\tau q}{KT} = 218,7$$

Este valor de η confirma que el término cúbico incorporado en el modelo puede interpretarse como una contribución asociada a la juntura ZnO/Si.

Análisis eléctrico de la lámina BSO/STO

Ahora, para el caso de BaSnO_3 se obtuvieron las curvas de la Fig. 8.

Se observa en la Fig. 8 que las curvas descienden para valores positivos de V_{GS} . Para comprobar de otra forma el funcionamiento del FET, se llevó a cabo un análisis de R_{DS} para observar si la resistencia de la lámina cambiaba para diferentes valores de V_{GS} manteniendo un V_{DS} constante (Fig. 9).

Puede observarse q la resistencia de la lámina se comporta como la de un FET, ya que $R_{DS} \propto V_{GS}^{-1}$. Pero también se aprecia que su resistencia asciende constantemente lo cual no resulta algo usual para este tipo de dispositivos. Consideramos que este efecto ascendente

resta a las curvas y esto provoca que las curvas I_{DS} vs V_{DS} no respondan de forma correcta a diferentes tensiones de V_{GS} .

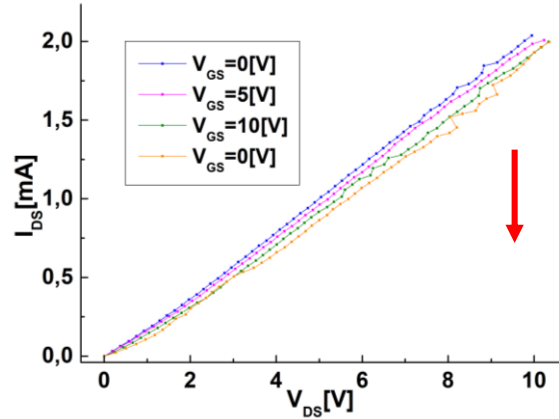


Figura 8: Curvas I-V del BSO con tratamiento térmico.

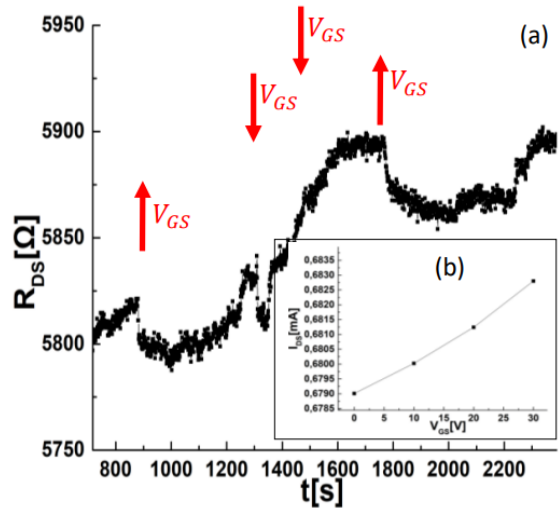


Figura 9: Análisis de resistencia del canal. (a) Ensayo eléctrico de R_{DS} en función del tiempo. (b) Inset: Curva I_{DS} vs V_{GS} con $V_{DS} = 4 [V]$.

Se graficó la corriente I_{DS} en función de V_{GS} a partir de la curva anterior como se observa en la Fig. 9. Aquí la corriente I_{DS} tiende a ascender en los momentos en que se incrementa la tensión V_{GS} , lo cual corresponde al comportamiento de un FET al considerar su curva I_{DS} vs V_{GS} . Por lo tanto, los resultados muestran una respuesta no completamente satisfactoria, pero se aprecia que la resistencia R_{DS} del canal responde correctamente al comportamiento de un FET, sugiriendo la

necesidad de optimizar el proceso de fabricación.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en función de la caracterización dieléctrica de la resina polimérica fotosensible (RPF), la fabricación de los transistores de efecto de campo (FET) y su análisis eléctrico.

En la caracterización de la RPF, se obtuvo una constante dieléctrica de $\epsilon \approx 19,3$ determinada mediante mediciones de capacitancia en un circuito RC. La técnica de *spin coating* permitió obtener capas uniformes con espesores en el rango de 5 – 10 $[\mu\text{m}]$, verificadas mediante microscopía metalográfica.

Los transistores fabricados con ZnO y BaSnO_3 presentaron diferencias significativas en su respuesta eléctrica. En el caso del ZnO, la lámina B presentó curvas $I_{DS}-V_{DS}$ que mostraron una clara modulación de corriente al aplicar diferentes voltajes de compuerta, permitiendo obtener una movilidad de $\mu \approx 47,9 [\text{cm}^2/\text{Vs}]$ y una tensión de umbral de $V_{th} \approx -9,8 [\text{V}]$, valores comparables con la literatura.

Discusión

Para la lámina A, se observó una clara influencia del efecto de campo de la compuerta a pesar de la ausencia de un tratamiento térmico previo. Este hecho puede atribuirse a la elevada resistencia del canal, que limita la densidad de corriente y reduce significativamente la generación de portadores calientes (Acovic, Larosa y Sun, 1996). La disminución en la inyección de portadores en el dieléctrico minimiza su efecto en las características eléctricas del dispositivo. Las curvas I-V observadas sugiere que el efecto de inyección podría estar presente especialmente en la región de corriente decreciente.

Para el BaSnO_3 , se examinó que la resistencia del canal R_{DS} del dispositivo respondía correctamente a diferentes V_{GS} . Se contempló una variabilidad en la respuesta eléctrica, lo cual puede deberse al efecto de Inyección de Portadores Calientes en la RPF. Como la muestra posee un R_{DS} bajo, esto permite que circule una mayor corriente I_{DS} y por lo tanto aumente el número de portadores calientes. Algunos de estos portadores, que contribuyen a la corriente I_{DS} , poseen mucha energía por el

campo eléctrico aplicado entre Drenador y Fuente y quedan atrapados en la RPF, causando que la resistencia R_{DS} aumente y por lo tanto no sea posible apreciar una variación de las curvas ante diferentes V_{GS} . Ello sugiere que el proceso de fabricación aún requiere ajustes para garantizar un funcionamiento óptimo del dispositivo.

El desempeño del ZnO como canal semiconductor en los FETs coincide con lo reportado en estudios previos, evidenciando su capacidad para operar de manera estable en estructuras experimentales con dieléctricos alternativos. El ajuste de los parámetros eléctricos a modelos MOSFET confirma que la RPF puede emplearse como dieléctrico de compuerta, aunque su influencia en la movilidad de portadores debe ser analizada con mayor profundidad.

Por otro lado, los resultados obtenidos para el BaSnO_3 evidencian que su integración en dispositivos electrónicos sigue siendo un desafío. Se sugiere optimizar las condiciones de fabricación del semiconductor y mejorar las técnicas de diseño para reducir imperfecciones que afecten la conducción eléctrica.

El uso de RPF en litografía óptica de bajo costo demuestra ser una alternativa viable para la fabricación de dispositivos, alcanzando resoluciones en el orden de los cientos de nanómetros. Sin embargo, su estabilidad a largo plazo y su compatibilidad con diferentes semiconductores requieren estudios adicionales para evaluar su aplicabilidad en tecnologías más avanzadas.

Conclusiones

Este trabajo presenta la fabricación y caracterización de FETs empleando una RPF como dieléctrico de compuerta. Ello se logró, íntegramente por primera vez, en el Laboratorio de Física del Sólido (LAFISO - FACET/UNT), mediante varios procesos avanzados de micro fabricación. Los principales hallazgos fueron:

- Se determinó experimentalmente que la RPF presenta propiedades dieléctricas adecuadas y es compatible con técnicas de fotolitografía, *spin coating*, tratamiento térmico y *etching* químico en la fabricación de dispositivos electrónicos.
- Los FETs basados en ZnO exhibieron un comportamiento acorde con la teoría, lo que permitió extraer parámetros eléctricos clave

como la movilidad electrónica y la tensión de umbral.

- En el caso del BaSnO_3 , se logró observar su funcionamiento como un FET, pero no fue posible caracterizarlo completamente debido a limitaciones en el proceso de su fabricación y diseño como FET.

Estos resultados sugieren que la RPF es una alternativa viable para su uso como dieléctrico en dispositivos electrónicos experimentales, aunque se requieren optimizaciones en la fabricación para garantizar su desempeño en distintas configuraciones de semiconductores

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología por el acceso a sus instalaciones y recursos que hicieron posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acovic, A., Larosa, G. & Sun, Y.C. (1996). "A review of hot-carrier degradation mechanisms in MOSFETs". *Microelectron. Reliab.*, Vol. 36. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(96\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0026-2714(96)00022-4)

Aggoune, W., Eljarrat, A., Nabok, D. et al. (2022). "A consistent picture of excitations in cubic BaSnO_3 revealed by combining theory and experiment". *Communications Materials*. <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00234-6>

Borysiewicz, M.A. (2019). "ZnO as a Functional Material, a Review". *Crystals*. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>.

Choi, J. & Yoo, H. (2023). "Combination of Polymer Gate Dielectric and Two-Dimensional Semiconductor for Emerging Field-Effect Transistors". *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym15061395>

Figueroa, C.A., et al. (2021). "The role of polarization in the threshold voltage of field effect transistors based on ZnO/MgO ". *Appl. Phys. Lett.* <https://doi.org/10.1063/5.0065968>

Gray, P.R., et al. (2017). *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. University of California. 5th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Estados Unidos.

Hyung, K. et al. (2012). "High mobility in a stable transparent perovskite oxide". *Applied Physics Express*, 5(6), 061102. <https://doi.org/10.1143/APEX.5.061102>.

Lee, J. et al. (2024). "Micron-scale FETs of fully epitaxial perovskite oxides using chemical etching". *Materials Today Quantum*. <https://doi.org/10.1016/j.mtquan.2024.100002>

Millman, J. & Halkias, C.C. (1983). *Electrónica Integrada: Circuitos y Sistemas Analógicos y Digitales*. Columbia University. Editorial Hispano Europea, Barcelona, España.

Özgür, Ü. & Morkoç, H. (2009). *Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KaA.

Sanchela, A.V. et al. (2017). "Thermopower modulation clarification of the intrinsic effective mass in transparent oxide semiconductor BaSnO_3 ". *Phys. Rev. Materials*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.034603>

Villarroya, M. (2005). "Diseño y fabricación de sistemas micro/nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores biológicos con palancas como elementos transductores". Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.

Zapata, M.C. (2016). "Fabricación y Caracterización de nano y microestructuras de óxidos semiconductores". Tesis doctoral. Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina.

Este trabajo representa un resumen del Trabajo de Graduación del Ingeniero Electrónico Balthazar Martín, defendido en diciembre de 2024, en la FACET-UNT.

AUTORES

MARTÍN, Balthazar

Ingeniero Electrónico (2024). Docente Auxiliar de 2^{da} Categoría Catedra Materiales Eléctricos, Dispositivos Electrónicos Y Materiales y Dispositivos Electrónicos en el DEEC. Operador Técnico y Responsable de Área Laboratorio de Instrumentación Industrial, Red INTI-SAC, FACET.

balthazarm8@gmail.com. ORCID  0009-0004-3881-5536

ZAPATA, Cecilia

Bachiller Universitario en Física, Ingeniera Electrónica, Dra. en Ciencias Exactas e Ingeniería, títulos obtenidos en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología FACET - UNT. Profesora Adjunta con dedicación exclusiva en el Dpto. de Física de la FACET. Investigadora categoría IV.

czapata@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0009-0008-3610-6989

FIGUEROA, Cristian

Ingeniero Electrónico. Profesor Asociado con dedicación exclusiva en la Cátedra de Materiales Eléctricos, Dispositivos Electrónicos y Materiales y Dispositivos Electrónicos en el Departamento Eléctrica, Electrónica y en Computación de la FACET - UNT. Estudiante Avanzado de Posgrado, Actualmente escribiendo el manuscrito de la tesis, para obtener el título de Doctor de la carrera del Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería de la UNT.

cafigueroa@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0009-0000-1091-0962

BRIDOUX, Germán

Dr. en Físico, investigador del CONICET adscripto al Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFINOA-CONICET-UNT). Docente en el Laboratorio de Física Experimental I y II de la FACET. Se ha especializado en el estudio de materiales condensados, particularmente películas delgadas y nanoestructuras de óxidos, explorando fenómenos como la transición metal-aislante, transporte eléctrico y térmico, ferromagnetismo y orden de carga, bajo condiciones de temperatura, campo eléctrico y estructura de las muestras.

gbridoux@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0002-0505-9613

VILLAFUERTE, Manuel

Licenciado en Física de la FACET - UNT, magister en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional De Gral. San Martín. Doctor en Física de la FACET - UNT. Prof. Titular Dedicación Exclusiva en el Departamento. de Física de la FACET-UNT. Investigador Independiente de CONICET. Responsable del Laboratorio de Física del Sólido y del laboratorio de Física Experimental I y II.

mvillafuerte@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0002-1799-0595

JIMENEZ, Gustavo

Personal de Apoyo en INFINOA-CONICET-UNT. Desarrollo de electrónica.

gejimenez@gmail.com