

Nanotecnología

Fotorrespuesta de transistores de grafeno pasivados con Al_2O_3

Benjamín Briceño¹

¹benjaminbriceno@ug.uchile.cl.

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

12 de agosto de 2022

Resumen: Se estudió la respuesta de transistores de grafeno (GFET) pasivados con una capa de Al_2O_3 a un láser incidente. Se varió la longitud de onda del láser, el voltaje Drain Source y el voltaje Gate, modelando la señal de respuesta como una corriente RC de dos tiempos característicos. Se obtuvo la relación entre las variables de control y los tiempos característicos de respuesta.

Palabras clave: grafeno, GFET, transistor, láser, histéresis, voltaje, corriente.

1. Introducción

El grafeno ha ganado atracción en los últimos años gracias a sus propiedades, como su alta rigidez y conductividad. Sin embargo, el estudio de sus capacidades fotodetectoras ha sido de mayor interés en los últimos años, pues una sola capa es capaz de detectar hasta el 2,3 % de la luz infrarroja a visible incidente [1], superando a otros materiales, como Si y GaAs [2]. Esto ubica al grafeno como un material prometedor para la fabricación de dispositivos fotoeléctricos.

Los transistores de efecto campo basados en grafeno (GFET) muestran una densidad de portadores de carga y sintonización de polaridad excepcionales [3], así como una alta movilidad de cargas. Sin embargo, en un GFET simple el grafeno se encuentra expuesto al ambiente, produciendo desorción al agua y oxígeno, exhibiendo desplazamientos del voltaje de Dirac (DP) y un gran efecto de histéresis [4], así como una disminución gradual en la fotocorriente y un aumento en los tiempos característicos de respuesta [2]. Una solución para esto es la cobertura del grafeno con una capa de Al_2O_3 , la cual elimina el contacto directo con el grafeno, además de interactuar con la luz incidente [2].

La fabricación de dispositivos fotovoltaicos con grafeno requeriría de una fotorrespuesta del GFET con un voltaje Drain-Source nulo. Sin embargo, esto aún no ha sido observado en este tipo

de dispositivos.

En este trabajo se estudió la respuesta a un láser incidente de GFETs cubiertos con una capa de Al_2O_3 , depositada por ALD. Se analizó el fenómeno para distintas longitudes de onda del láser, y voltajes Drain Source y Gate del transistor, donde se modeló la señal de respuesta como un sistema RC de dos tiempos característicos. Finalmente, se obtuvieron relaciones entre las variables de medición y los tiempos característicos de respuesta.

2. Metodología

2.1. Montaje

En esta instancia de laboratorio se utilizaron GFETs fabricados por Kaj Dockx en la Universidad Técnica de Delft, Holanda. Estos dispositivos poseen una capa de Al_2O_3 depositada por ALD, así como múltiples largos (120-300 μm) y anchos (30-150 μm) del canal de grafeno. Sin embargo, en este trabajo se ignoraron los largos y anchos de los canales.

La figura 1 muestra el montaje realizado. Dos multímetros Keithley controlan los voltajes Drain-Source (V_{DS}) y Gate (V_G), además de medir la corriente I_{DS} . Un láser comercial controlado por un Arduino envía luz hacia el GFET a una distancia de ~ 20 cm.

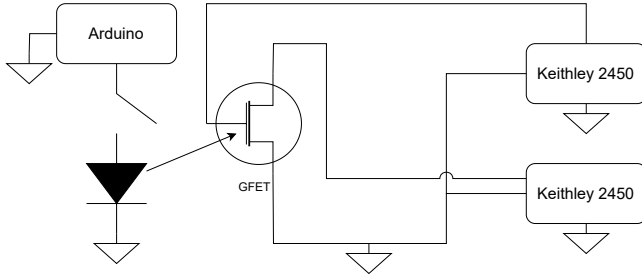


Figura 1: Diagrama eléctrico del montaje experimental.

2.2. Desarrollo experimental

En primera instancia, se realiza un *Gate Sweep* a la muestra. En éste se fija V_{DS} a 75 mV y se varía V_G comenzando en 0 V, aumentando hasta 25 V, disminuyendo hasta -25 V, volviendo a aumentar a 25 V y, finalmente, variando a 0 V. La elección de este recorrido permite encontrar el efecto de histéresis en la corriente. El V_G para el cual la corriente I_{DS} es mínima, correspondiente al voltaje de Dirac (DP), es utilizado para futuras mediciones.

Posteriormente, se inicializa el Arduino, comenzando los ciclos de on/off del láser. Para esta instancia se fija V_{DS} y varía V_G de forma escalonada. Se utilizaron láseres de tres colores; rojo (650 nm, 11 mW), verde (532 nm, 15 mW) y azul (405 nm, 20 mW). Debido a los largos tiempos de respuesta del sistema, se utilizó un on/off de 180 s. Además, se escogieron V_{DS} entre 1 y 50 mV, realizando barridos en V_G para $DP \pm 35$ V. Para cada V_{DS} y V_G se tomaron datos durante aproximadamente 3 períodos (*on* + *off*).

3. Resultados

La figura 2 muestra algunos barridos de V_G a lo largo del tiempo para una sola muestra, escogidos aleatoriamente. Éstos fueron realizados previo a mediciones con láser. En un principio, el DP se encuentra cercano a 2 V, además de haber una histéresis mínima. Sin embargo, las últimas mediciones muestran un $DP \approx 15$ V, así como una mayor histéresis y ruido, logrando una tendencia al deterioro con la exposición a la luz.

Por otro lado, la respuesta de las muestras a luz láser posee tiempos característicos del orden de los segundos. Se logra observar fotocorriente para voltajes Drain-Source tan pequeños como 1

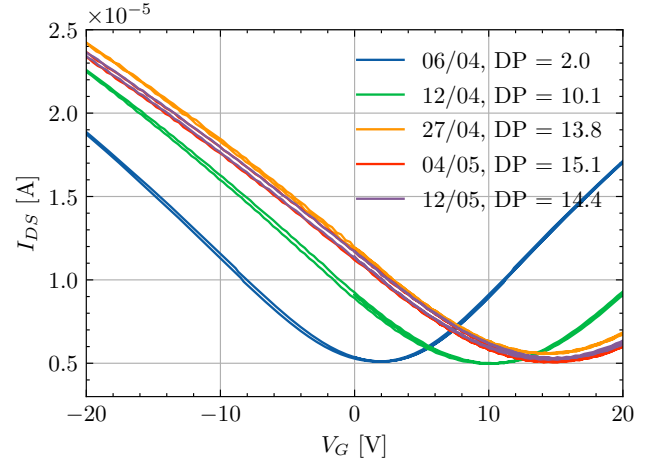


Figura 2: *Gate Sweeps* a lo largo del tiempo para una muestra. Se observa el desplazamiento del DP hacia la derecha, y un leve aumento de tanto la corriente mínima como la histéresis y el ruido. Estos valores parecieran tender a un límite.

mV, como es el caso de la figura 3. Para distintas muestras existe cierto desplazamiento de la corriente media o *drift* a lo largo del tiempo. Estos fueron eliminados al restar un modelo de primer orden a la señal de respuesta. Por otro lado, existen asimetrías en las señales de carga y descarga, como se observa en la figura 3. Éstas varían según $V_G - DP$, invirtiéndose al cruzar $V_G - DP = 0$, donde se comienzan a transportar huecos en vez de cargas.

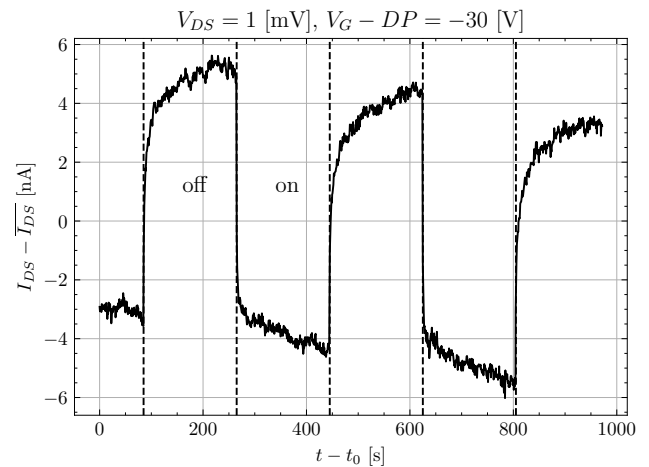


Figura 3: Fotocorriente para una muestra con $V_{DS} = 1$ mV y $V_G - DP = -30$ V.

Con lo anterior, se midieron las respuestas para

distintos colores de láser y V_{DS} . Para la luz roja no se logró medir fotocorriente, sin embargo, se logró medir la señal de respuesta de las muestras a luz verde y azul. A estas señales se les aplicó un modelo de dos tiempos característicos, de la forma $I_C(t) = I_0 + I_1 e^{-t/\tau_1} + I_2 e^{-t/\tau_2}$ para la señal de carga, y similar para la corriente I_D de descarga.

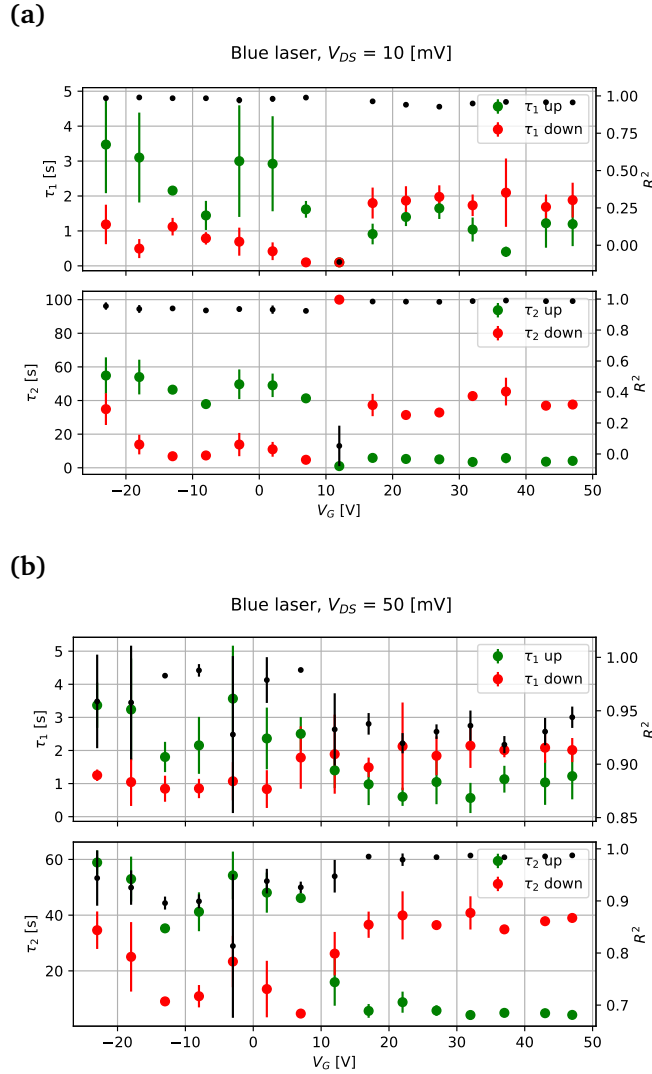


Figura 4: Tiempos característicos modelados para las señales de subida y bajada de una muestra, utilizando láser azul y $V_{DS} =$ (a) 10 mV y (b) 50 mV. En negro se muestra el R^2 del modelo.

Las figuras 4 y 5 muestran los tiempos característicos modelados para la señal de respuesta. Para todos los casos, el comportamiento de los tiempos es similar, pues se mantienen relativamente constantes para V_G alejados del DP. Cer-

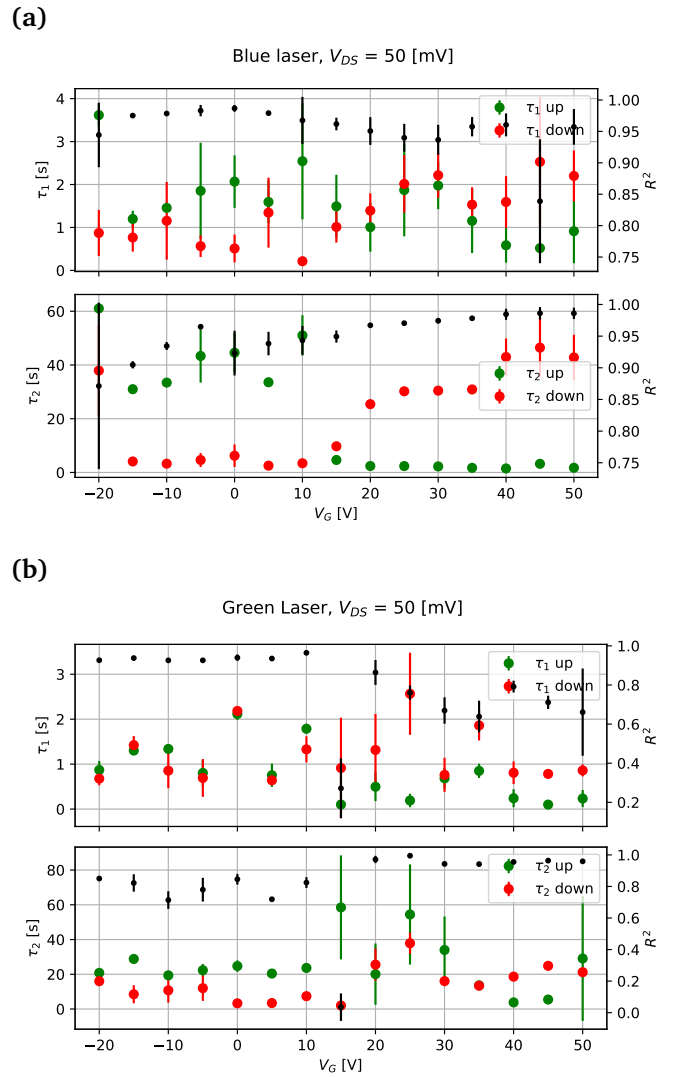


Figura 5: Tiempos característicos modelados para las señales de subida y bajada de una muestra, utilizando láser (a) azul y (b) verde, y $V_{DS} = 50$ mV. En negro se muestra el R^2 del modelo.

ca de este punto, los tiempos de subida y bajada se invierten rápidamente. Además, se observa que los tiempos característicos son de magnitudes distintas, del orden de segundos y decenas de segundo respectivamente. En el V_G central, correspondiente a un valor cercano al DP, se puede apreciar un R^2 pequeño. En este punto la fotocorriente es mínima, por lo que el ruido apantalla otros comportamientos.

La figura 4 compara para la misma muestra la medición de los tiempos característicos usando dos voltajes Drain-Source distintos. A pesar de

esto, los tiempos característicos no parecen verse afectados por V_{DS} , resultando similares en ambos casos ((a) y (b)). Sin embargo, existe una aparente relación directa entre V_{DS} y la intensidad de la fotocorriente, que escapa del análisis realizado.

La figura 5, en cambio, compara para $V_{DS} = 50$ mV la incidencia de un láser azul y verde en otra muestra. En este caso, sí parece afectar el color a los tiempos característicos, pues el tiempo de carga es menor para el láser más energético. Esto solo ocurre en el tiempo característico mayor τ_2 , mientras que para τ_1 se mantienen similares.

4. Discusión y Conclusiones

El deterioro de la muestra evidenciado por el desplazamiento del DP, aumento de histéresis, ruido y corriente mínima puede deberse a un almacenamiento de cargas en el dispositivo, así como una desorción en el grafeno producto del láser, que desplaza el estado neutro del GFET. Exposiciones a un láser más energético o durante un tiempo más prolongado podrían modificar el GFET de forma más rápida e irreversible. Cabe destacar la baja histéresis y alta simetría del *Gate Sweep* para estos dispositivos en particular, posiblemente debido a un mayor grosor de la capa de óxido de aluminio. Además, el desplazamiento del DP y fotocorriente mínima parecieran tener cierto valor como límite, llevando a la muestra a un estado estable.

La observación de fotocorriente a 1 mV es un hito para el desarrollo de este tipo de dispositivos, pues se acerca al límite de 0 V deseado para exhibir comportamiento fotovoltaico. Esto demuestra la efectividad de la capa de óxido de aluminio al evitar la desorción. Por otro lado, el comportamiento distinto de las señales de carga y descarga es de interés para esta investigación. y requiere de un análisis posterior.

La diferencia en los tiempos característicos podría indicar que el transporte de cargas dentro del dispositivo es afectado por múltiples fenómenos, sin embargo, la precisión de su estimación es limitada por la baja cantidad de ciclos on/off de exposición al láser. Exposiciones más prolongadas podrían dañar al GFET.

El comportamiento de la fotocorriente para estos dispositivos es distinto a lo observado en la literatura, por lo que los modelos actuales no se

adaptan correctamente a las mediciones de este estudio. Un análisis más profundo, tanto teórico como experimental, es requerido en este tipo de sistemas.

5. Agradecimientos

A la académica Diana Dulic, por su buena disposición y su ayuda en el desarrollo teórico de esta investigación.

Al estudiante Tomás Rojas, por su apoyo en el diseño y montaje experimental, además del procesamiento de los datos.

Referencias

- [1] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. Peres, and A. K. Geim, "Fine structure constant defines visual transparency of graphene," *Science* 320(5881), 1308 (2008). <https://doi.org/10.1126/science.1156965>
- [2] Chang Goo Kang, Sang Kyung Lee, Sunhee Choe, Young Gon Lee, Chang-Lyoul Lee, and Byoung Hun Lee. (2013). Intrinsic photocurrent characteristics of graphene photodetectors passivated with Al₂O₃. *Opt. Express* 21, 23391-23400 <https://doi.org/10.1364/OE.21.023391>
- [3] Gosling, J.H., Makarovskiy, O., Wang, F. et al. Universal mobility characteristics of graphene originating from charge scattering by ionised impurities. *Commun Phys* 4, 30 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00518-2>
- [4] Xu, H., Wu, J., Chen, Y., Zhang, H., & Zhang, J. (2013). *Substrate Engineering by Hexagonal Boron Nitride/SiO₂ for Hysteresis-Free Graphene FETs and Large-Scale Graphene p-n Junctions*. <https://doi.org/10.1002/asia.201300505>
- [5] Geim, A.K, & Novoselov, K.S. (2007). *The rise of graphene*. *Nature materials*, 6(3), 183-191. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat1849>
- [6] Buscema, M., Island, J. O., Groenendijk, D. J., Blanter, S. I., Steele, G. A., van der Zant, H. S. J., & Castellanos-Gomez, A. (2015). "Photocurrent generation with two-dimensional van

der Waals semiconductors". *Chemical Society Reviews*, 44(11), 3691–3718. <https://doi.org/10.1039/C5CS00106D>

- [7] Woessner, A., et al. (2016). Near-field photocurrent nanoscopy on bare and encapsulated graphene. *Nature Communications*, 7(1), 10783. <https://doi.org/10.1038/ncomms10783>