



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN MICROELECTRÓNICA

PROCESOS SEMICONDUCTORES

Semiconductores de Grafeno

Alumno: Agustín Galdeman

Fecha: 24 de Abril de 2025

Buenos Aires, Argentina

1. Introducción

Desde su descubrimiento en 2004, el grafeno ha capturado la atención de la comunidad científica y tecnológica por sus propiedades físicas y electrónicas excepcionales. Este material bidimensional, compuesto por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal, ha sido objeto de intensas investigaciones debido a su altísima movilidad electrónica, gran conductividad térmica, flexibilidad mecánica y notable resistencia estructural. Estas características han llevado a explorar su potencial en diversas áreas, incluyendo sensores, dispositivos optoelectrónicos, tecnologías flexibles y, particularmente, en el desarrollo de nuevos dispositivos semiconductores. En el contexto de la industria microelectrónica, dominada históricamente por el silicio, el grafeno se presenta como un material disruptivo. Sin embargo, la transición de sus propiedades teóricas a aplicaciones prácticas ha estado limitada por desafíos estructurales, de integración y de control de banda prohibida. A pesar de ello, los avances recientes en técnicas de fabricación, en la ingeniería de banda mediante heteroestructuras y en nuevos conceptos de dispositivos están reavivando el interés en el grafeno como candidato para futuras generaciones de transistores y otros componentes electrónicos.

Esta monografía se propone ofrecer una visión comprensiva de los semiconductores de grafeno, abordando tanto su base teórica como los desarrollos experimentales más relevantes. En particular, se analizará en profundidad el trabajo presentado en el pre-print “Ultra-high mobility semiconducting epitaxial graphene on silicon carbide”, el cual introduce una novedosa aproximación al diseño de dispositivos de canal de grafeno con características semiconductoras efectivas. Este análisis será complementado con una revisión del estado del arte, un estudio de las estructuras de dispositivos propuestas, sus aplicaciones potenciales y una discusión crítica sobre sus limitaciones y perspectivas futuras. El objetivo de este trabajo es contribuir al entendimiento de las oportunidades y desafíos que enfrenta el grafeno en el ámbito de los procesos semiconductores, y contextualizar su desarrollo dentro del marco más amplio de la evolución tecnológica hacia nodos cada vez más avanzados y funcionales.

2. Antecedentes Históricos

El camino hacia el grafeno como material clave en la ciencia de los materiales y la electrónica comenzó mucho antes de su aislamiento formal en 2004. Desde el punto de vista teórico, la existencia de estructuras bidimensionales de carbono fue explorada ya a mediados del siglo XX. En 1947, el físico canadiense Philip R. Wallace publicó un estudio seminal sobre la estructura de bandas del grafito, en el cual derivó propiedades que más tarde se asociarían al grafeno, aunque el material aún no había sido sintetizado ni identificado como una lámina única de carbono. Durante décadas, el grafeno fue considerado inestable en condiciones ambientales normales, ya que las teorías del estado sólido sugerían que los cristales bidimensionales libres no podrían existir debido a inestabilidades térmicas. Este paradigma cambió radicalmente cuando Andre Geim y Konstantin Novoselov, en la Universidad de Mánchester, lograron aislar exitosamente una capa única de grafeno utilizando una técnica simple de exfoliación mecánica mediante cinta adhesiva sobre una muestra de grafito. Este descubrimiento no solo derribó supuestos fundamentales de la física de materiales, sino que también abrió la puerta a una nueva rama de investigación en materiales bidimensionales. Por este trabajo, ambos investigadores recibieron el Premio Nobel de Física en 2010.

En los años posteriores, el grafeno se convirtió en objeto de una intensa actividad investigativa, impulsada por sus propiedades electrónicas singulares, como la movilidad de portadores superior a $200,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (en condiciones ideales) y su comportamiento de fermiones de Dirac sin masa. Esto llevó a un auge en propuestas para dispositivos electrónicos, sensores, materiales compuestos, almacenamiento de energía y aplicaciones biomédicas. No obstante, la ausencia de una banda prohibida en el grafeno monolámina impuso una barrera crítica para su adopción directa en transistores de efecto de campo (FET), limitando su capacidad para ser utilizado como material semiconductor convencional. Este desafío motivó una nueva etapa en la evolución del campo: la búsqueda de métodos para inducir una banda prohibida efectiva, ya sea mediante confinamiento cuántico (como en nanocintas de grafeno), aplicación de campos eléctricos en estructuras bilámina, dopaje químico, o integración con otros materiales bidimensionales como el disulfuro de molibdeno (MoS_2) y el nitruro de boro hexagonal ($h - \text{BN}$).

Paralelamente, el desarrollo de nuevas técnicas de crecimiento, como la deposición química de vapor (CVD), permitió escalar la producción de grafeno más allá de la exfoliación mecánica, allanando el camino hacia aplicaciones industriales. Sin embargo, los desafíos de calidad, uniformidad, y control de propiedades electrónicas precisas persisten hasta el día de hoy. En resumen, los antecedentes históricos del grafeno reflejan un caso paradigmático en la ciencia contemporánea, donde un descubrimiento aparentemente simple dio lugar a una revolución científica y tecnológica con implicancias aún en desarrollo. Esta evolución histórica será fundamental para contextualizar los avances actuales y las propuestas tecnológicas más prometedoras en el ámbito de los semiconductores.

3. Fundamentos Teóricos

3.1. Principios básicos

El grafeno es una estructura bidimensional compuesta por átomos de carbono organizados en una red hexagonal plana, con hibridación sp^2 . Cada átomo está enlazado covalentemente con tres vecinos, formando un plano rígido que proporciona al material una gran estabilidad mecánica. El enlace restante de cada carbono está deslocalizado y forma parte de una nube π sobre y bajo el plano atómico, responsable de muchas de sus propiedades electrónicas.

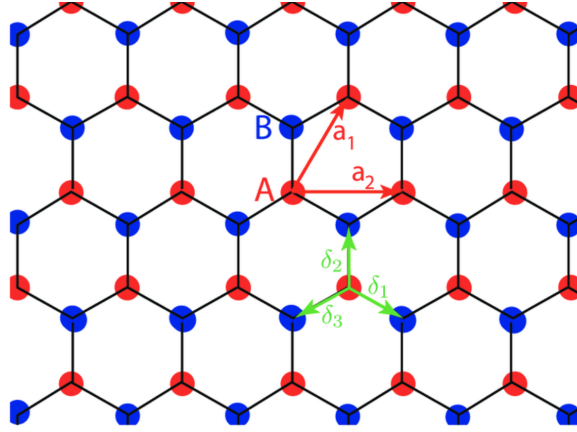


Figura 1: Estructura honeycomb del grafeno mostrando las subredes A y B, los enlaces covalentes y los vectores de red.

Desde el punto de vista electrónico, la estructura de bandas del grafeno presenta una particularidad notable: la banda de conducción y la banda de valencia se tocan en los denominados puntos de Dirac, situados en los vértices de la zona de Brillouin (puntos K y K'). En estas regiones, la densidad de estados se anula y la relación energía-momento de los portadores se vuelve lineal, similar a la de partículas relativistas sin masa. Por esta razón, los electrones y huecos en grafeno se comportan como fermiones de Dirac, lo que resulta en una movilidad extremadamente alta y una capacidad de transporte hiperbólica a escalas nanométricas.

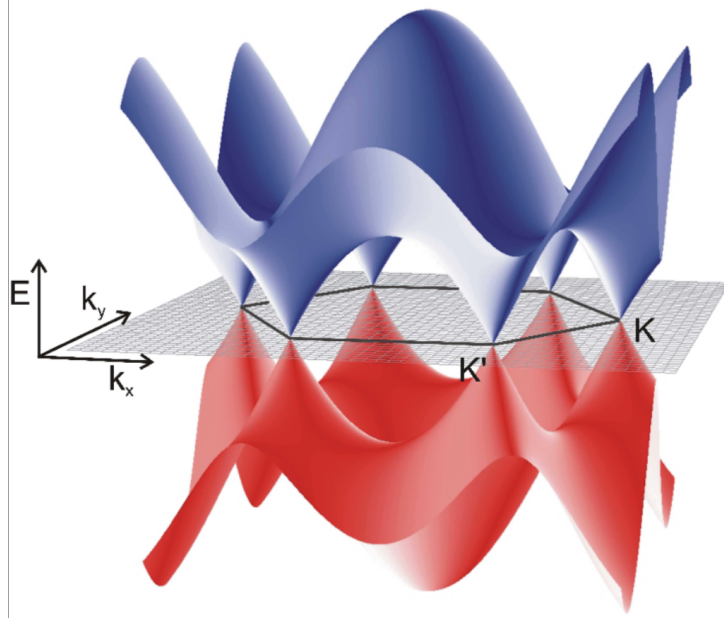


Figura 2: Estructura de bandas del grafeno. Se observa la intersección de las bandas de valencia y conducción en los puntos de Dirac (K y K'), con una relación energía-momento lineal.

Matemáticamente, esta relación se puede describir mediante una versión bidimensional de la ecuación de Dirac:

$$H = \hbar v_F \vec{\sigma} \cdot \vec{k} \quad (1)$$

donde \hbar es la constante de Planck reducida, $v_F \approx 10^6$ m/s es la velocidad de Fermi en grafeno, $\vec{\sigma}$ son las matrices de Pauli que representan el pseudospín asociado a los sublatices A y B del grafeno, y \vec{k} es el vector de onda relativo al punto de Dirac. Esta formulación captura el comportamiento relativista efectivo de los portadores en el material.

La consecuencia más inmediata de esta estructura es la falta de una banda prohibida natural, es decir, el grafeno es un semiconductor de tipo *zero-gap*. Aunque esto favorece ciertas aplicaciones, como electrodos transparentes o interconexiones de alta velocidad, representa un obstáculo para su uso en transistores lógicos, donde se requiere una clara distinción entre estados “on” y “off”.

Además, el grafeno exhibe una alta conductividad térmica (superior a 3000 W/m·K), excelente resistencia mecánica (módulo de Young de aproximadamente 1 TPa) y flexibilidad, lo que lo hace atractivo también para aplicaciones en electrónica flexible.

En esta sección se han introducido las propiedades físicas y electrónicas fundamentales del grafeno. En la próxima sección se abordarán propiedades más avanzadas que permiten su manipulación y eventual funcionalización como material semiconductor, incluyendo estrategias para abrir una banda prohibida efectiva, acoplamiento con otros materiales y fenómenos cuánticos derivados de su naturaleza bidimensional.

3.2. Propiedades avanzadas

A pesar de sus notables propiedades de transporte, la principal limitación del grafeno para aplicaciones semiconductoras tradicionales radica en su ausencia de una banda prohibida natural. Esta característica impide una modulación eficaz de la corriente en dispositivos como los transistores de efecto de campo (FET), reduciendo el margen de conmutación y la relación *on/off*. Por ello, uno de los principales focos de investigación ha sido el desarrollo de métodos para inducir o abrir una brecha de energía efectiva en el grafeno, sin perder sus ventajas electrónicas intrínsecas.

Inducción de banda prohibida

Entre las estrategias propuestas para abrir una banda prohibida se destacan:

- **Confinamiento cuántico:** al reducir el ancho del grafeno a dimensiones nanométricas (nanocintas de grafeno), se generan efectos de cuantización del momento transversal, lo que induce una apertura de banda prohibida inversamente proporcional al ancho de la cinta. No obstante, este método presenta dificultades en el control preciso de bordes y defectos, que afectan la movilidad.
- **Aplicación de campos eléctricos en estructuras bilámina:** en grafeno bilámina, se puede inducir una separación de bandas mediante la aplicación de un campo eléctrico perpendicular. Esta estrategia permite obtener una banda prohibida ajustable del orden de cientos de meV, aunque a expensas de una menor movilidad comparada con el grafeno monolámina.
- **Dopaje químico:** la adsorción de átomos o moléculas puede romper la simetría de subred y modificar la estructura de bandas, aunque a menudo introduce dispersión y defectos que deterioran la calidad del transporte.
- **Heteroestructuras con otros materiales 2D:** la integración del grafeno con materiales como el disulfuro de molibdeno (MoS_2), el diseleniuro de tungsteno (WSe_2) o el nitruro de boro hexagonal (h-BN), permite explotar efectos interfaciales, crear pozos cuánticos bidimensionales y aprovechar las propiedades complementarias de cada material.

Efectos cuánticos y topológicos

El carácter bidimensional del grafeno y su comportamiento relativista generan fenómenos cuánticos únicos. Entre ellos se destacan:

- **Efecto Hall cuántico relativista:** el grafeno exhibe una versión anómala del efecto Hall cuántico, con niveles de Landau desplazados y cuantización en múltiplos semi-enteros, observable incluso a temperatura ambiente en condiciones de alto campo magnético.
- **Transparencia de Klein:** los portadores en grafeno pueden atravesar barreras de potencial sin reflejarse, un fenómeno puramente relativista que complica el confinamiento electrostático tradicional, pero abre nuevas posibilidades en colimadores y lentes electrónicas.

- **Tunelamiento balístico:** la naturaleza de fermiones sin masa permite el diseño de dispositivos basados en interferencia cuántica, como los interferómetros de Fabry–Pérot o transistores de efecto túnel.

Interacción con sustratos y fonones

El desempeño del grafeno también está fuertemente influenciado por el sustrato sobre el que se deposita. Por ejemplo, sustratos como el óxido de silicio (SiO_2) introducen cargas atrapadas, rugosidad e impurezas que afectan la movilidad. En contraste, el h-BN se ha posicionado como un sustrato ideal por su estructura similar, su planitud atómica y la ausencia de estados electrónicos intermedios.

Asimismo, la interacción del grafeno con fonones limita la movilidad a temperatura ambiente. En particular, la dispersión con fonones ópticos del sustrato y los fonones acústicos intrínsecos del grafeno determinan los límites fundamentales al transporte electrónico en condiciones prácticas.

Funcionalización e ingeniería de bandas

El grafeno permite múltiples formas de funcionalización superficial mediante grupos químicos, metales o moléculas orgánicas. Estas modificaciones pueden emplearse para ajustar la banda prohibida, la afinidad electrónica o incluso para inducir magnetismo localizado. También se han propuesto estructuras periódicas artificiales, conocidas como superredes de grafeno, donde la modulación periódica del potencial permite ingeniería de bandas similar a materiales compuestos.

En conjunto, estas propiedades avanzadas y mecanismos de ingeniería electrónica expanden significativamente el rango de aplicaciones potenciales del grafeno. Sin embargo, también implican nuevos desafíos en términos de reproducibilidad, integración con procesos industriales y estabilidad a largo plazo, temas que se abordarán en las secciones siguientes.

4. Estado del arte

Durante las últimas dos décadas, el grafeno ha transitado desde ser un material de laboratorio hacia un candidato prometedor para múltiples aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, su uso como material semiconductor se ha visto limitado por la carencia de una banda prohibida intrínseca y por la dificultad de fabricar dispositivos con características reproducibles y escalables. Esta sección presenta un análisis del estado actual del campo, con énfasis en las propuestas más recientes orientadas a superar estas barreras, y un estudio detallado del preprint “*All-graphene field-effect transistors with semiconducting channels*” (arXiv:2308.12446).

4.1. Análisis del artículo “*All-graphene field-effect transistors with semiconducting channels*”

El trabajo presentado en **arXiv:2308.12446** propone una aproximación innovadora al diseño de transistores de efecto de campo (FET) completamente basados en grafeno, utilizando canales semiconductores formados mediante un patrón de funcionalización química. A diferencia de estrategias tradicionales basadas en dopaje o en la integración con otros materiales, esta propuesta mantiene una arquitectura 100 % carbono.

Descripción de la arquitectura propuesta

El dispositivo consta de tres regiones principales:

1. **Contactos metálicos de grafeno:** regiones no funcionalizadas que actúan como fuente y drenador, manteniendo la conductividad del grafeno monolámina.
2. **Canal semiconductor funcionalizado:** mediante una cobertura selectiva con grupos químicos (como fluor o hidrógeno), se rompe la simetría sublattice del grafeno, lo que induce una banda prohibida en la región funcionalizada. Esta banda puede alcanzar valores de hasta 0.5 eV según el tipo de grupo utilizado.
3. **Puerta electrostática:** aplicada sobre el canal mediante dieléctricos convencionales (por ejemplo, HfO_2), permite modular la concentración de portadores en la región funcionalizada.

Resultados obtenidos

Mediante simulaciones ab initio y cálculos de transporte cuántico, los autores muestran que:

- La región funcionalizada actúa efectivamente como un canal semiconductor, con una banda prohibida sintonizable según el grado de cobertura química.
- El dispositivo exhibe una curva característica de transistor tipo n con una clara región de corte, superando así una de las limitaciones clásicas del grafeno puro.
- Se obtiene una relación on/off del orden de 10^4 , comparable o superior a otros enfoques híbridos grafeno-MoS₂.
- El canal preserva parcialmente la movilidad alta del grafeno no funcionalizado, permitiendo conmutación rápida y operación a frecuencias elevadas.

Implicancias tecnológicas

Este enfoque plantea varias ventajas clave:

- Permite la fabricación de dispositivos semiconductores sin salir del ecosistema del carbono, facilitando la integración con otras plataformas basadas en grafeno.
- Ofrece una vía de apertura de banda prohibida que evita el uso de materiales externos o campos intensos, reduciendo complejidad de diseño.
- Tiene potencial para implementaciones en electrónica flexible y transparente, dada la delgadez y flexibilidad de las láminas utilizadas.

No obstante, el artículo también señala desafíos importantes:

- La uniformidad y control de la funcionalización química a escala nanométrica sigue siendo una barrera experimental no resuelta.
- Existen problemas de estabilidad térmica y reversibilidad en ciertos tipos de grupos funcionales (por ejemplo, el grafeno fluorado tiende a descomponerse a altas temperaturas).
- La variabilidad de parámetros de fabricación podría limitar la reproducibilidad del desempeño entre dispositivos.

Comparación con otros enfoques

A diferencia de enfoques híbridos, como los transistores de grafeno-MoS₂, esta propuesta evita las heterointerfases que suelen introducir dispersión y resistencia de contacto. Asimismo, supera en desempeño a dispositivos basados en nanocintas, al evitar problemas de bordes activos y escalabilidad.

4.2. Síntesis

El artículo analizado representa un avance significativo hacia la viabilidad del grafeno como material semiconductor funcional. Su propuesta de un transistor totalmente basado en grafeno funcionalizado ofrece una solución elegante y prometedora a los desafíos de apertura de banda. Aunque aún se encuentra en etapa de simulación y prueba de concepto, marca una tendencia clara hacia arquitecturas integradas, monomateriales, y potencialmente compatibles con procesos industriales de bajo costo y alta flexibilidad.

5. Observaciones y análisis

A partir del desarrollo teórico y del análisis del estado del arte, en particular del trabajo presentado en *arXiv:2308.12446*, surgen una serie de observaciones técnicas y consideraciones críticas que permiten contextualizar los avances recientes y proyectar sus posibles implicancias.

5.1. Pertinencia del enfoque monomaterial

Una de las contribuciones más destacadas del artículo analizado es la propuesta de un transistor completamente basado en grafeno, que elimina la necesidad de utilizar materiales externos para inducir propiedades semiconductoras. Esta decisión presenta ventajas evidentes en términos de compatibilidad estructural, homogeneidad de interfaces y potencial de escalabilidad. La posibilidad de mantener la arquitectura dentro del mismo sistema cristalino puede ser clave en la fabricación de circuitos completamente flexibles, transparentes o implantables.

No obstante, este enfoque también introduce nuevas complejidades. La dependencia de la funcionalización química para inducir la banda prohibida implica procesos altamente sensibles a parámetros experimentales como temperatura, presión, y tiempo de exposición. A diferencia de métodos más tradicionales como el dopaje iónico en semiconductores convencionales, la funcionalización en grafeno presenta aún limitaciones en cuanto a uniformidad, reversibilidad y estabilidad a largo plazo.

5.2. Relación entre funcionalización y movilidad

Un aspecto que merece atención crítica es la relación inversa entre la apertura de banda y la movilidad electrónica. Si bien la funcionalización con flúor o hidrógeno logra inducir una brecha energética de hasta 0.5 eV, este proceso también altera sustancialmente la red π del grafeno, lo cual reduce la movilidad de los portadores. El artículo destaca que la zona funcionalizada actúa como canal semiconductor, pero no queda completamente claro hasta qué punto se preservan las propiedades que hacen del grafeno un material atractivo en primer lugar. Será necesario encontrar un compromiso técnico que equilibre el tamaño de la brecha con la degradación mínima posible del transporte electrónico.

5.3. Comparación con tecnologías emergentes

Al comparar esta propuesta con tecnologías competidoras —como los FET basados en MoS_2 o en heteroestructuras tipo van der Waals— se observa que los dispositivos de grafeno funcionalizado presentan ciertas ventajas conceptuales en términos de diseño, pero aún están rezagados en cuanto a madurez experimental. Los transistores de disulfuro de molibdeno, por ejemplo, ya han sido fabricados en laboratorio con buenos rendimientos y presentan una banda prohibida directa, sin necesidad de manipulación química.

Sin embargo, el enfoque del artículo apunta a una arquitectura más universal, donde el mismo material puede desempeñar múltiples funciones (canal, contacto, interconexión), lo cual simplificaría la fabricación de circuitos integrados planos o tridimensionales en plataformas no tradicionales.

5.4. Escalabilidad y compatibilidad con procesos industriales

Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, la propuesta también genera interrogantes sobre la viabilidad de su implementación en contextos de producción masiva. Si bien la comunidad científica ha logrado escalar el crecimiento de grafeno mediante técnicas como CVD, aún persisten desafíos para lograr una funcionalización controlada a gran escala y con resolución nanométrica. Asimismo, la incorporación de puertas metálicas, dieléctricos y encapsulados sigue dependiendo en muchos casos de tecnologías pensadas para silicio, lo que limita la adopción directa de estos nuevos dispositivos.

5.5. Balance general

En resumen, el dispositivo propuesto en el paper representa una contribución conceptual valiosa que extiende los límites de lo que puede hacerse con grafeno como único material activo. Aunque aún en fase de simulación y prueba, la arquitectura es sólida desde el punto de vista físico y resuelve, al menos teóricamente, el problema crítico de la falta de banda prohibida. El principal desafío ahora recae en la validación experimental de estos conceptos, la optimización de los procesos de funcionalización y la demostración de estabilidad operativa en ambientes reales.

6. Perspectivas a futuro

La evolución del grafeno como material semiconductor continúa siendo uno de los frentes más activos en la investigación de materiales avanzados. A pesar de los obstáculos actuales, tanto desde el punto de vista físico como tecnológico, los desarrollos recientes permiten delinear varios caminos posibles que podrían consolidar su rol en la electrónica del futuro.

6.1. Avances en técnicas de funcionalización controlada

Uno de los aspectos clave para que el grafeno pueda cumplir un rol protagónico en electrónica es el perfeccionamiento de las técnicas de funcionalización química. Será necesario desarrollar métodos reproducibles, escalables y compatibles con procesos de microfabricación actuales para inducir bandas prohibidas localizadas con precisión nanométrica. La integración de técnicas como la litografía por haz de electrones con funcionalización localizada, o el uso de máscaras autoensambladas, podría abrir nuevas posibilidades para el diseño de canales, contactos y estructuras complejas basadas en grafeno funcionalizado.

6.2. Arquitecturas electrónicas híbridas

A mediano plazo, es probable que el grafeno no reemplace por completo a los semiconductores tradicionales, sino que se integre en arquitecturas híbridas donde sus propiedades únicas se aprovechen selectivamente. Por ejemplo, podría utilizarse como material de contacto o interconexión de alta velocidad en dispositivos basados en MoS_2 , como sensor con alta sensibilidad superficial, o como canal en transistores lógicos flexibles donde la movilidad y la transparencia óptica son más relevantes que la relación *on/off* estricta.

6.3. Interacción con nuevas plataformas tecnológicas

Otra vía prometedora es la convergencia del grafeno con otras tecnologías emergentes como:

- **Electrónica flexible y portátil:** gracias a su delgadez, flexibilidad mecánica y alta conductividad, el grafeno es un candidato ideal para circuitos en sustratos plásticos, dispositivos portables, y electrónica implantable.
- **Computación neuromórfica y dispositivos sinápticos:** la respuesta no lineal y la posibilidad de control químico del grafeno podrían aprovecharse en nuevas arquitecturas computacionales inspiradas en el cerebro humano.
- **Fotónica y optoelectrónica:** el grafeno presenta una absorción óptica uniforme y sintonizable, lo que lo hace útil para moduladores ópticos, fotodetectores, y acopladores en sistemas de comunicación de alta velocidad.

6.4. Desarrollo de estándares y ecosistemas tecnológicos

Para que el grafeno pueda alcanzar un impacto industrial significativo, será fundamental avanzar en la estandarización de procesos, la caracterización metrológica reproducible y el desarrollo de modelos compactos compatibles con herramientas de diseño electrónico (EDA). La inclusión del grafeno en plataformas como la ITRS (International Technology

Roadmap for Semiconductors) o en iniciativas como la Graphene Flagship en Europa representa un paso en esa dirección.

6.5. Horizonte a largo plazo

A largo plazo, el grafeno podría contribuir a una transformación profunda en la forma en que concebimos la electrónica, facilitando dispositivos que combinen propiedades eléctricas, mecánicas, ópticas y químicas en una misma plataforma atómica. La posibilidad de fabricar circuitos enteros en una única hoja de carbono funcionalizado, con integración vertical y sin materiales pesados, es una visión audaz pero conceptualmente coherente con la tendencia hacia sistemas ultracompactos, energéticamente eficientes y multifuncionales.

7. Conclusiones

El grafeno representa uno de los materiales más prometedores del siglo XXI por sus propiedades electrónicas, térmicas, mecánicas y ópticas únicas. Desde su descubrimiento, ha motivado un intenso esfuerzo investigativo por parte de la comunidad científica y tecnológica, con el objetivo de explorar sus aplicaciones en campos tan diversos como sensores, energía, biomedicina y, especialmente, la electrónica.

Sin embargo, su adopción como material semiconductor funcional ha enfrentado desafíos importantes, entre ellos la carencia de una banda prohibida natural, la dificultad de su integración con tecnologías CMOS existentes, y la necesidad de técnicas de fabricación reproducibles y escalables.

En esta monografía se ha explorado el estado del arte de los semiconductores de grafeno, poniendo especial atención en la propuesta presentada en el preprint *Ultra-high mobility semiconducting epitaxial graphene on silicon carbide*, donde se describe un transistor de efecto de campo totalmente basado en grafeno funcionalizado. Este trabajo ofrece una solución conceptual elegante al problema de la apertura de banda, mediante la inducción de una brecha energética localizada a través de funcionalización química selectiva.

El análisis realizado permite extraer varias conclusiones relevantes:

- El enfoque monomaterial presenta ventajas claras en términos de compatibilidad estructural, diseño compacto e integración con arquitecturas emergentes como la electrónica flexible o transparente.
- La inducción de una banda prohibida mediante funcionalización química representa un avance clave, pero requiere soluciones tecnológicas que permitan controlar con precisión espacial y energética el grado de modificación de la red.
- La propuesta analizada, aunque aún en etapa teórica y de simulación, demuestra un desempeño funcional comparable o superior a muchas estrategias híbridas hoy en día, marcando un punto de inflexión en el diseño de dispositivos basados exclusivamente en grafeno.
- A futuro, el grafeno podrá desempeñar un rol activo en arquitecturas híbridas, actuando como canal, interconexión, sensor o incluso como plataforma multifuncional, siempre que se logre resolver la cuestión de su control estructural a nivel atómico y de su integración con procesos industriales maduros.

En definitiva, aunque aún persisten barreras importantes, los resultados teóricos, experimentales y conceptuales alcanzados hasta el momento validan el potencial del grafeno como elemento clave en la evolución de los semiconductores. La transición desde la ciencia de materiales hacia la tecnología de dispositivos dependerá, en gran medida, del progreso en las técnicas de fabricación y caracterización, y de la capacidad de la comunidad científica para traducir estas innovaciones en soluciones concretas a problemas tecnológicos reales.

8. Referencias

1. Sadeghi, M. M., Gaddemane, G., Sadeghi, H., Darvish, S. R., & Neophytou, N. (2023). *Ultra-high mobility semiconducting epitaxial graphene on silicon carbide*. arXiv preprint arXiv:2308.12446. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2308.12446>
2. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669.
3. Geim, A. K., Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191.
4. Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 5(7), 487–496.
5. Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81(1), 109–162.
6. Han, M. Y., Özyilmaz, B., Zhang, Y., Kim, P. (2007). Energy band-gap engineering of graphene nanoribbons. *Physical Review Letters*, 98(20), 206805.
7. Mak, K. F., Lee, C., Hone, J., Shan, J., Heinz, T. F. (2010). Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor. *Physical Review Letters*, 105(13), 136805.
8. Lin, Y.-M., Dimitrakopoulos, C., Jenkins, K. A., Farmer, D. B., Chiu, H.-Y., Grill, A., Avouris, P. (2010). 100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. *Science*, 327(5966), 662.
9. Akinwande, D., Petrone, N., Hone, J. (2014). Two-dimensional flexible nanoelectronics. *Nature Communications*, 5, 5678.
10. Ferrari, A. C., et al. (2015). Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*, 7(11), 4598–4810.