

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“CRECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE
GRAFENO PARA SU APLICACIÓN EN ENERGÍA
SOLAR FOTOVOLTAICA”**

CATALINA ÁLVAREZ HERNANDO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIATURA EN ASTROFÍSICA

**PROFESOR GUÍA:
COMITÉ DE PROYECTO:**

**Dra. Valeria del Campo
Dr. Ricardo Henríquez
Dra. Yara Jaffé**

ENERO – 2025

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco profundamente el apoyo incondicional de mi familia, papás y hermanos, quienes han creído en mis capacidades incluso más que yo misma.

A mi profesora guía, Valeria del Campo, por confiar en mí desde 2022, cuando me recibió como parte de su equipo de trabajo. Siempre le estaré agradecida y la admiro profundamente por su ejemplo y dedicación.

A mis compañeros de laboratorio y a los profesores, quienes me han enseñado, inspirado y ayudado en cada etapa.

A mis compañeras y mejores amigas de universidad, Bratz, porque sin su amistad y apoyo no habría superado ni el primer semestre. Su aliento ha sido mi refugio en los momentos más difíciles.

A mis amigos y compañeros de carrera, por estar ahí desde los días inciertos de la pandemia, que ahora parecen tan lejanos.

A mis amigas del colegio y de la vida, que celebran mis logros como si fueran propios, las amo con todo el corazón.

Finalmente, a todas las personas que pensaron en mí y en mi familia durante febrero de 2024, cuando parecía que todo estaba perdido. Incluso en los momentos más oscuros, siempre existe la posibilidad de comenzar de nuevo.

Dedicatoria

Con todo el cariño del mundo, a mi familia, papá, mamá, Emilio y Valentín, sin ellos no podría haber llegado hasta esta instancia. Me tocó finalizar mi etapa de pregrado en el que parecía el peor año de todos, pero sin duda ha sido en el que me he sentido más querida.

Resumen

El contexto de la crisis ecológica global, el uso y desarrollo de fuentes de energía renovables, como la energía solar, se vuelven esenciales para la sostenibilidad del planeta. La energía solar, una de las más abundantes y limpias, tiene el potencial de reducir significativamente la dependencia de combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental. Sin embargo, la implementación a gran escala de celdas solares enfrenta desafíos importantes, como el alto costo de algunos materiales y la limitada eficiencia energética que presentan en comparación con otras fuentes. Estos obstáculos limitan su adopción masiva, por lo que la investigación dirigida a optimizar la estructura y los materiales que componen las celdas solares es esencial. Analizar y mejorar la composición de estas celdas contribuye a incrementar su eficiencia, reducir los costos y extender su vida útil, facilitando así una transición energética más viable y económica.

En este trabajo se realizó un estudio enfocado en la síntesis de grafeno mediante la técnica de deposición química de vapor (CVD) y su posterior caracterización, con el propósito de utilizarlo como material conductor en celdas solares de heterojuntura. La técnica CVD es conocida por permitir la obtención de grafeno de alta calidad, lo que resulta fundamental para asegurar un buen rendimiento en aplicaciones fotovoltaicas. En el laboratorio, se llevaron a cabo procesos de síntesis y verificación de la calidad del grafeno antes de su transferencia a la estructura de las celdas solares, asegurando que las propiedades eléctricas y ópticas del material fueran las adecuadas para su función.

Como resultado final de este proceso, se logró la transferencia de una película limpia y uniforme de grafeno sobre la capa n de una celda solar de silicio de heterojuntura (SHJ), de aproximadamente 6 cm^2 . Se estudiaron sus propiedades superficiales mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) y se mide su resistencia de hoja utilizando el método de Van der Pauw para compararla con la de la película de ITO. La película de grafeno transferida a la celda solar posee leves fisuras con una a escala de $12,97 \mu\text{m}$, presentando una rugosidad media de $12,5 \text{ nm}$ que indica que la altura de la película presenta algunas variaciones en su planicie. Mediante el método de Van der Pauw, se ha medido una resistencia de hoja de alrededor de $103 \Omega/\square$ para el grafeno, comparable a la medición de cerca de $60 \Omega/\square$ para una película de 70 nm de ITO (óxido de indio y estaño).

Este logro es un paso importante hacia la validación del grafeno como una alternativa viable al ITO, material convencionalmente utilizado como capa conductora transparente. La síntesis y aplicación exitosa del grafeno en estas celdas abre la posibilidad de mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción, lo que contribuye al desarrollo de una tecnología solar más accesible y eficiente, que puede jugar un papel clave en la transición hacia un futuro energético sostenible.

Commented [VD1]: Excelente resumen !!

Commented [VD2]: Más de una película?

Commented [VD3]: No es necesario tanto detalle en el resumen

Commented [VD4]: No estoy de acuerdo, piensa que una película plana sería de menos de 1 nm .

Commented [VD5]: Ojo con este valor, mira cómo lo hizo Paola en su informe para el curso de celdas solares.

Abstract

The global ecological crisis context highlights the importance of using and developing renewable energy sources, such as solar energy, to ensure the planet's sustainability. Solar energy, one of the most abundant and clean sources, has the potential to significantly reduce reliance on fossil fuels and minimize environmental impact. However, the large-scale implementation of solar cells faces major challenges, such as the high cost of certain materials and the limited energy efficiency compared to other sources. These obstacles hinder their widespread adoption, making research aimed at optimizing the structure and materials of solar cells essential. Analyzing and improving the composition of these cells contributes to increasing their efficiency, reducing costs, and extending their lifespan, thus enabling a more viable and economical energy transition.

This study focused on the synthesis of graphene through the chemical vapor deposition (CVD) technique and its subsequent characterization, aiming to use it as a conductive material in heterojunction solar cells. The CVD technique is well-known for enabling the production of high-quality graphene, which is critical for ensuring good performance in photovoltaic applications. In the laboratory, synthesis processes and quality verification of the graphene were conducted before its transfer to the structure of solar cells, ensuring that the material's electrical and optical properties met the required standards.

As a result of this process, clean and uniform graphene films were successfully transferred onto the n-layer of a heterojunction silicon solar cell (SHJ) with an approximate area of 6 cm². Its surface properties were studied using atomic force microscopy (AFM), and its sheet resistance was measured using the Van der Pauw method, allowing comparison with an ITO (indium tin oxide) film. The graphene film transferred to the solar cell exhibited no noticeable cracks on the scale of 12.97 μm, with an average roughness of 12.5 nm, indicating minimal height variations across the film's flatness. Using the Van der Pauw method, a sheet resistance of approximately 103 Ω/□ was measured for graphene, comparable to the measurement of about 60 Ω/□ for a 70 nm-thick ITO film.

This achievement is a significant step toward validating graphene as a viable alternative to ITO, the conventional material used as a transparent conductive layer. The successful synthesis and application of graphene in these cells opens the possibility of improving efficiency and reducing production costs, contributing to the development of more accessible and efficient solar technology. This advancement can play a crucial role in the transition toward a sustainable energy future.

Glosario

CVD= Chemical Vapor Deposition, deposición química en fase de vapor.

SHJ= Heterojuntura de silicio.

Commented [VD6]: Lo voy a revisar cuando este corregida la versión en castellano

Índice

Agradecimientos	2
Dedicatoria	3
Resumen	4
Abstract	5
Glosario	5
Índice	6
Antecedentes	7
Motivación	10
Estado del arte	11
Relevancia del Proyecto	12
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Metodología	13
Síntesis	13
Caracterización	15
Transferencia	15
Resultados y análisis	21
Conclusiones y proyecciones	26
Referencias	27
Productos	30

Antecedentes

En la contingencia actual, de cambio climático y crisis ecológica, la investigación sobre las energías renovables para su implementación como herramienta de solución, se transforma en una esperanza de vida a futuro. La energía solar, captada a través de celdas solares, se presenta como una solución accesible y de bajo impacto ambiental debido a la abundancia de la luz solar y la continua reducción de los costos asociados a su tecnología [1]. La zona norte de Chile, reconocida por recibir la mayor radiación solar a nivel mundial, representa un laboratorio natural ideal para la implementación y optimización de estas tecnologías [2]. En los últimos años, un área de avance dentro de la tecnología fotovoltaica ha sido el desarrollo de celdas solares de silicio de heterojuntura (SHJ, por sus siglas en inglés). Estas celdas combinan lo mejor de dos mundos: una capa de silicio cristalino, que ofrece alta eficiencia de conversión, y capas de silicio amorfo, que permiten mejorar la captura de la luz y la separación de las cargas generadas por la absorción de la radiación solar [3]. A la fecha, las celdas SHJ han alcanzado una eficiencia de conversión récord del 26,81%, lo que las posiciona como una de las tecnologías fotovoltaicas más avanzadas disponibles en el mercado [4].

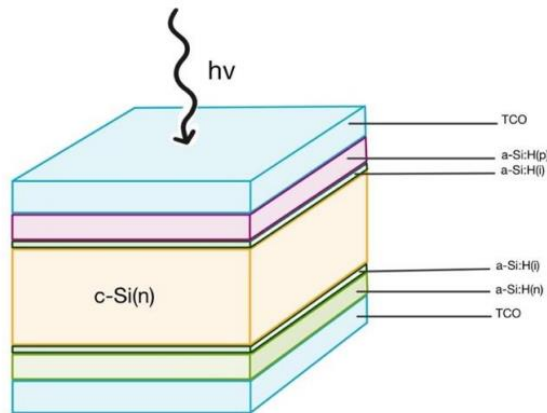


Figura 1. Ilustración que representa la configuración de una celda SHJ, mostrando las capas principales: óxido transparente conductor (TCO), silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) dopado y no dopado, y silicio cristalino tipo nnn (c-Si(n)). La luz solar ($h\nu$) incide en la celda.[5]

La estructura de una celda SHJ (Figura 1), está diseñada para maximizar la conversión de luz solar en electricidad. En la parte superior e inferior, se encuentran capas de óxido transparente conductor (TCO, por sus siglas en inglés), que permiten el paso de la luz solar hacia el interior de la celda mientras actúan como contactos eléctricos para la recolección de cargas generadas. Justo debajo del TCO superior, se encuentran las capas de silicio amorfo hidrogenado dopado tipo p (a-Si:H(p)) y una capa intrínseca (a-Si:H(i)), que pasiva la interfaz, reduciendo las recombinaciones de electrones y huecos.

En el núcleo de la celda, se encuentra el silicio cristalino dopado tipo n (c-Si(n)), que actúa como el principal material absorbente, donde se generan la mayor parte de los pares electrón-hueco al interactuar con la luz solar ($h\nu \geq E_g$). Por debajo del silicio cristalino, otra capa intrínseca de silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H(i)) cumple una función similar a la superior, mejorando la calidad de las interfaces internas.

Finalmente, una capa de silicio amorfo hidrogenado dopado tipo n (a-Si:H(n)) facilita el transporte selectivo de electrones hacia el TCO inferior.

Sin embargo, un componente clave en el funcionamiento de estas celdas es la capa conductora transparente, que facilita el transporte de las cargas desde las capas activas de la celda hacia los contactos metálicos, lo que permite la extracción de la corriente generada. Tradicionalmente, el material más utilizado para esta capa ha sido el óxido de indio y estaño (ITO), debido a sus sobresalientes propiedades eléctricas y ópticas. El ITO combina una alta conductividad eléctrica (en el orden de los $10\text{-}20\Omega/\text{sq}$) con una excelente transparencia ($\sim 85\text{-}90\%$) en el rango de las longitudes de onda visibles, lo que lo convierte en un material casi ideal para las celdas solares [6].

No obstante, el indio, uno de los componentes del ITO, es un recurso escaso y costoso [7]. Su disponibilidad limitada ha generado preocupaciones sobre la viabilidad a largo plazo de seguir utilizando este material en la producción masiva de celdas solares, ya que su precio podría aumentar considerablemente a medida que la demanda crezca. Además, la extracción y procesamiento de indio conllevan un impacto ambiental significativo [8]. Estos factores han impulsado la búsqueda de alternativas al ITO que sean más sostenibles, tanto desde el punto de vista económico como ecológico.

En este contexto, el grafeno ha surgido como un material con un inmenso potencial para revolucionar la tecnología de celdas solares. Descubierta en 2004, el grafeno es una forma de carbono bidimensional, compuesta por una sola capa de átomos dispuestos en una estructura hexagonal [9]. A pesar de su delgadez, el grafeno posee una serie de propiedades extraordinarias que lo hacen altamente atractivo para aplicaciones tecnológicas. Entre sus características más notables se encuentran su alta conductividad eléctrica, su gran resistencia mecánica, su flexibilidad y su alta transparencia óptica [10]. Estos atributos sugieren que el grafeno podría ser un reemplazo eficiente y rentable para el ITO en las celdas solares de heterojuntura, además de ofrecer mejoras potenciales en la durabilidad y el rendimiento de ellas.

Una de las principales vías para la síntesis de grafeno a escala industrial es el método de deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) [11]. En este proceso, se utilizan hidrocarburos gaseosos, como metano (CH_4), en una cámara de reacción para hacer crecer películas delgadas de grafeno sobre un sustrato catalizador, típicamente cobre. Una vez sintetizado, el grafeno se transfiere a la superficie deseada mediante un proceso de decapado del sustrato metálico y posterior aplicación sobre el sustrato final, que en este caso sería la celda solar de heterojuntura.

El objetivo de esta investigación es explorar la viabilidad de utilizar el grafeno como capa conductora transparente en celdas solares de heterojuntura de silicio, en sustitución del ITO. Para ello, se llevará a cabo la síntesis de películas de grafeno mediante CVD y su posterior

Commented [VD7]: Punto seguido del párrafo anterior

Commented [VD8]: Referencias antes del punto seguido

Commented [VD9]: Saqué el hidrógeno porque es el gas diluyente (como el agua en una solución), no es relevante en esta parte, si lo es en la metodología.

transferencia a celdas solares de heterojuntura. La caracterización de estas películas incluirá la evaluación de sus propiedades eléctricas y ópticas.

El éxito de esta investigación no solo contribuiría a avanzar en el campo de la energía solar fotovoltaica, sino que también podría abrir nuevas oportunidades para la implementación de materiales innovadores en otras aplicaciones tecnológicas que requieren conductividad eléctrica y transparencia óptica, como pantallas táctiles, sensores y dispositivos electrónicos flexibles. De este modo, el uso de grafeno en las celdas solares podría representar un paso importante hacia una tecnología energética más sostenible, eficiente y accesible, en un momento en que la transición hacia energías limpias es más urgente que nunca.

Commented [VD10]: Me encantó este párrafo !!!!

Semiconductores

En un material sólido, la estructura electrónica se caracteriza por una separación entre las bandas de energía llamadas banda de valencia y banda de conducción. Esta separación, conocida como band gap (brecha de energía), define si un material actúa como un conductor, semiconductor o aislante. En los semiconductores, el band gap es lo suficientemente pequeño para que los electrones puedan ser promovidos a la banda de conducción mediante energía térmica o mediante la absorción de fotones. Este proceso genera pares de electrones y huecos que pueden participar en la conducción eléctrica.

El efecto fotoeléctrico en los semiconductores ocurre cuando los fotones incidentes sobre el material son absorbidos, siempre que su energía sea igual o mayor al band gap, generando pares de electrones y huecos. Este principio es fundamental en la operación de dispositivos fotovoltaicos, donde la energía solar se convierte en electricidad.

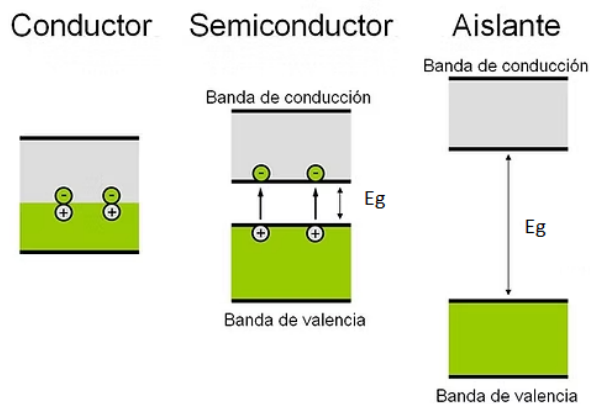


Figura 2. Diagrama representativo del comportamiento de las bandas de energía para diferentes materiales, conductor, semiconductor y aislante respectivamente.

Juntura np

Una juntura np se forma al unir dos materiales semiconductores: uno dopado tipo n (con exceso de electrones) y otro dopado tipo p (con exceso de huecos). Esta configuración genera una zona de depleción en la región de contacto, donde se establece un campo eléctrico interno

debido a la redistribución de cargas. Este campo eléctrico facilita la separación de electrones y huecos generados por la absorción de fotones, evitando su recombinación prematura y permitiendo la generación de corriente eléctrica. Para el funcionamiento de una celda solar se requiere la separación de electrones y huecos, lo que implica la formación de una unión np. Para lograrlo, es fundamental introducir impurezas en el material con el objetivo de mejorar su desempeño. Este proceso, conocido como dopaje, puede realizarse en dos variantes: tipo n y tipo p.

En el dopaje tipo n, se agregan átomos que poseen un electrón extra en su capa de valencia, lo que aumenta la cantidad de electrones libres en la banda de conducción del silicio, mejorando su capacidad para transportar carga.

Por otro lado, el dopaje tipo p consiste en incorporar átomos que carecen de un electrón en su capa de valencia. Esto incrementa la densidad de huecos en la banda de valencia del silicio, lo que a su vez optimiza su capacidad de conducción y favorece el rendimiento de la celda solar.

Motivación

En el contexto de las energías renovables es necesario abaratar costos de producción para implementar la energía solar como una alternativa sustentable tanto en Chile como a nivel global. A medida que se estudian las celdas solares, más posibilidad tenemos de mejorar la estructura y así la eficiencia de las celdas. En cuanto a las celdas de heterojuntura, decidimos trabajar con la capa conductora transparente para utilizar la opción de grafeno, material que es sintetizado en el laboratorio.

Debido a su alta conductividad, flexibilidad y transparencia, el grafeno se presenta como un material prometedor para esta aplicación. La síntesis de grafeno en el laboratorio mediante deposición química de vapor (CVD) ofrece la posibilidad de producir películas de alta calidad que pueden ser transferidas a celdas solares de 6 cm^2 [P1]. Estas películas permiten realizar estudios experimentales sobre su rendimiento como capa conductora transparente, con el objetivo de evaluar su resistencia y capacidad para mejorar la eficiencia de las celdas solares de heterojuntura.

La sustitución del ITO por grafeno en las celdas solares de SHJ representa un avance significativo hacia tecnologías fotovoltaicas más económicas y sostenibles. Este trabajo busca explorar las capacidades del grafeno como conductor transparente, evaluando sus propiedades estructurales, ópticas y eléctricas, para establecer su potencial como alternativa en dispositivos de conversión de energía solar.

Este proyecto busca avanzar en la implementación del grafeno en celdas solares y aspira a contribuir al desarrollo de una tecnología solar más eficiente y accesible, un paso importante hacia la sostenibilidad energética global.

Commented [VD11]: No entiendo bien a qué corriente te refieres

Commented [VD12]: Puedes referenciar el póster de Paola

Commented [VD13R12]: Al final de tu tesis haz una sección de PRODUCTOS y coloca los póster relacionados a tu trabajo, y los referencias con el nombre de los autores, título, y datos de la conferencia (nombre, lugar, mes, año)

Commented [VD14]: Ese nombre también está bien, pero has usado el otro todo el rato.

Estado del arte

Desde su descubrimiento en 2004, el grafeno ha atraído considerable atención debido a su singular estructura bidimensional y propiedades excepcionales, tales como alta conductividad eléctrica, flexibilidad y transparencia superior al 90% [12]. Estas propiedades lo hacen un candidato atractivo para reemplazar materiales tradicionales como el óxido de indio y estaño (ITO) en celdas solares [13].

Entre las técnicas de síntesis más desarrolladas se encuentra la deposición química de vapor (CVD), que se destaca por su capacidad para producir grafeno de alta calidad a gran escala [10]. Este proceso implica la descomposición de gases precursores, como el metano, a altas temperaturas, facilitando la deposición de átomos de carbono sobre sustratos de cobre que actúan como catalizadores. Las condiciones de temperatura, presión y flujo de gases influyen directamente en la calidad y uniformidad de la capa de grafeno, y un control preciso de estos parámetros es esencial para obtener una monocapa de alta pureza [14].

La caracterización del grafeno es fundamental para evaluar su potencial para aplicaciones fotovoltaicas. Para caracterizar su estructura, la espectroscopía Raman es una técnica esencial, ya que permite determinar la calidad estructural, el número de capas y la presencia de defectos en el grafeno. Un pico en la banda G ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) prominente y un pico en la banda 2D ($\sim 2690 \text{ cm}^{-1}$) de mayor intensidad son indicativos de una monocapa de grafeno de alta calidad [15]. Por otro lado, la medición de la resistencia de hoja, que se realiza típicamente con un método de cuatro puntas, es crucial para determinar la viabilidad del grafeno como una película conductora en celdas solares. Para ser efectivo, el grafeno debe presentar una baja resistencia de hoja, comparable o mejor que la del ITO, sin sacrificar la transmisión de luz.

En el ámbito de las aplicaciones solares, las celdas de heterojuntura de silicio (SHJ) han demostrado ser una tecnología eficiente que se beneficia de la integración de materiales con alta conductividad y transparencia. El uso de grafeno como TCF en estas celdas solares ha mostrado resultados prometedores [16]. Este nanomaterial de carbono ha proporcionado una transmisión de luz adecuada y una capacidad de conducción que, en algunos estudios, ha superado al ITO. Además, la resistencia de hoja del grafeno puede mejorarse mediante la aplicación de capas múltiples y el dopaje, optimizando su rendimiento si se cautelan sus propiedades ópticas.

No obstante, la adopción del grafeno en aplicaciones a gran escala aún enfrenta desafíos, como la transferencia de la película de grafeno desde el sustrato de cobre a otros materiales dieléctricos sin introducir defectos que comprometan su conductividad y uniformidad. Las técnicas de transferencia continúan siendo objeto de estudio y desarrollo para reducir el daño y preservar la calidad de las películas.

De esta forma, los esfuerzos actuales se centran en optimizar los métodos de síntesis y los procesos de transferencia para maximizar su desempeño en dispositivos solares,

promoviendo así una tecnología más económica y eficiente [17]. Estos avances son esenciales para lograr una mayor adopción del grafeno en la industria fotovoltaica y para el desarrollo de soluciones energéticas más sostenibles y menos dependientes de materiales críticos como el ITO.

Commented [VD15]: Esto lo leíste? Hay referencia?

Commented [VD16]: Excelente

Comparación con otros materiales emergentes

El grafeno también compite con otros materiales alternativos al ITO, como el óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) y materiales híbridos que combinan diferentes propiedades. El AZO, por ejemplo, es más económico y abundante, pero presenta mayores resistencias de hoja y es más sensible a la humedad. En contraste, las combinaciones híbridas de grafeno con ITO o grillas metálicas han demostrado mejoras significativas en conductividad y eficiencia sin comprometer la transparencia [18]. Otros materiales en investigación incluyen óxidos conductores transparentes dopados y estructuras basadas en nanotubos de carbono, aunque ninguno ha alcanzado el nivel de versatilidad y desempeño observado en el ITO.

Tendencias recientes

Avances recientes exploran el uso de grafeno en celdas solares de perovskita y orgánicas (OSC), donde también se valoran sus propiedades de flexibilidad y compatibilidad con procesos de fabricación a bajas temperaturas. En particular, las celdas de perovskita con grafeno han mostrado un notable potencial al integrar capas híbridas que combinan la transparencia del grafeno con materiales que mejoran la pasivación superficial.

En el ámbito de las aplicaciones industriales, el desarrollo de tecnologías híbridas, como la deposición de capas de grafeno sobre materiales tradicionales como ITO, está ganando impulso [18]. Estas combinaciones buscan optimizar las propiedades de conductividad y transparencia, mitigando las limitaciones de cada componente individual.

Impacto ambiental

La producción de grafeno tiene una huella ambiental significativamente menor en comparación con el ITO, debido a la abundancia de carbono y la posibilidad de sintetizarlo con procesos menos dependientes de materiales críticos [19]. Además, el grafeno puede ser reciclado y reutilizado en aplicaciones secundarias, lo que contribuye a una economía circular [20]. Esto refuerza su atractivo como un componente clave en tecnologías sostenibles. Su implementación en dispositivos fotovoltaicos podría reducir la dependencia de materiales escasos y costosos, como el indio, y apoyar la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

Relevancia del Proyecto

La implementación de grafeno como alternativa al ITO en celdas solares de heterojuntura representa un avance tecnológico y ambiental significativo. Este proyecto se centra en explorar el potencial del grafeno como un material conductor transparente, evaluando sus

propiedades estructurales, y eléctricas para establecer su viabilidad en la industria fotovoltaica. Además, busca contribuir al desarrollo de celdas solares más económicas, eficientes y sostenibles. Se ha propuesto la alternativa de implementar un nuevo material en la capa conductora de una celda solar de heterojuntura. Actualmente, los antecedentes de flexibilidad, conductividad y transparencia del grafeno dan un indicio del potencial de utilizar este nanomaterial en las celdas solares.

La adopción de grafeno podría reducir significativamente los costos de producción de celdas solares, mejorando su eficiencia y haciendo la energía solar más accesible. Esto beneficiaría especialmente a regiones con alta radiación solar y recursos limitados, promoviendo la democratización del acceso a tecnologías de energía limpia. Además, el desarrollo de una industria basada en el grafeno podría generar nuevas oportunidades económicas y fomentar la innovación tecnológica en múltiples sectores, desde la electrónica hasta la energía renovable.

Objetivo general

Explorar la viabilidad del uso de grafeno como capa conductora transparente en celdas solares de heterojuntura de silicio.

Objetivos específicos

- Implementar una metodología que permita la incorporación de grafeno en celdas solares de heterojuntura.
- Transferir exitosamente una película de grafeno sobre una celda solar de silicio de heterojuntura.
- Determinar las propiedades estructurales y eléctricas de una película de grafeno sobre la capa emisora de una celda solar de heterojuntura.
- Comprender la física que permite la generación eléctrica a partir de celdas solares fotovoltaicas.
- Estructurar una investigación de carácter experimental.

Metodología

En este estudio, se implementó un enfoque experimental para la síntesis, caracterización y transferencia de grafeno sobre una celda solar de heterojuntura de aproximadamente 6 cm². Se describe detalladamente cada una de estas etapas, destacando los aspectos químicos, técnicos y operativos involucrados.

Síntesis

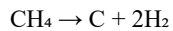
El proceso de síntesis de grafeno (Figura 3) se llevó a cabo mediante deposición química en fase de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) y se utilizó cobre como sustrato. Este método utiliza precursores gaseosos que reaccionan químicamente para depositar átomos de carbono en un sustrato adecuado, formando una estructura bidimensional de grafeno. Se utilizó un cilindro de cuarzo, dentro del cual se coloca una lámina de cobre, que se introdujo dentro del horno CVD. El procedimiento comenzó con la activación de la bomba de vacío hasta los

Commented [VD17]: En tu caso no es propuesta porque la realizaste

1500 Hz de frecuencia y la apertura de la válvula de entrada de gas. Una vez alcanzada el nivel de vacío deseado ($3.0E-2$ hPa), se encendió el horno y se programaron las condiciones de calentamiento y mantenimiento de temperatura.

1. Proceso de calentamiento: La temperatura se incrementa gradualmente hasta $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora y 30 minutos. Durante este tiempo, se introduce hidrógeno (H_2) a 20 sccm, que actúa como agente reductor para eliminar óxidos superficiales y preparar el sustrato para el crecimiento.

2. Proceso de crecimiento: Posteriormente, la temperatura se mantuvo constante en $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas y 20 minutos, momento en el cual se introdujeron los gases de hidrógeno, argón y metano necesarios para la reacción. A $970\text{ }^{\circ}\text{C}$, se inyectan metano (CH_4), hidrógeno (H_2) y argón (Ar) como gases precursores. El metano, al descomponerse térmicamente, libera átomos de carbono que se depositan en la superficie del cobre, formando capas de grafeno. Esta reacción está representada por la ecuación química:



El hidrógeno también juega un papel crucial al evitar la formación de óxidos indeseados y al promover la eliminación de carbono amorfo. Las condiciones del plasma y las proporciones de gases son cuidadosamente controladas para maximizar la uniformidad y calidad del grafeno.

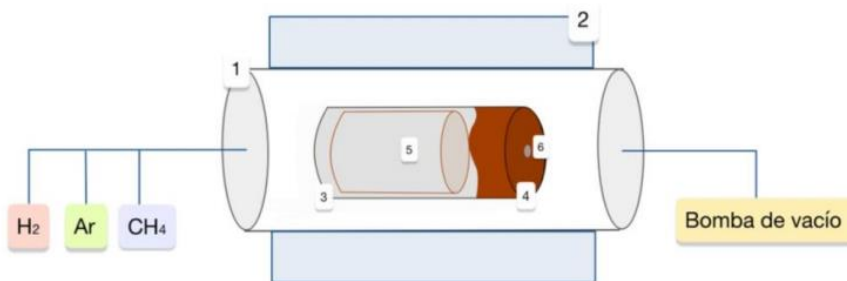


Figura 3. Ilustración que representa la configuración de síntesis de grafeno mediante CVD. Tubo de cuarzo principal en donde se ingresa el tubo de cuarzo más pequeño 2. Horno 3. Tubo de cuarzo pequeño se utilizará para el depósito de grafeno 4. Tapa posterior de cobre que cubre uno de los extremos del tubo 5. Lámina de cobre en forma cilíndrica dentro del tubo 6. Agujero en el centro de la tapa que permite el flujo turbulento de los gases en el tubo.[21]

3. Proceso de enfriamiento: Tras completar el depósito, se enfría el sistema y se espera al menos 1 hora y 20 minutos antes de retirar la muestra para garantizar un enfriamiento homogéneo de la muestra y evitar su oxidación. Se esperaron otros 40 minutos adicionales antes de extraer el cilindro.

En la fase final, se verificó el estado del horno cuando la temperatura descendió a aproximadamente $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1252\text{ }^{\circ}\text{C}$. Luego, se apagó la bomba de vacío y se cerraron todas las válvulas en el orden inverso a la inicial para evitar cualquier riesgo. Finalmente, se extrajo el tubo de cuarzo con las muestras de grafeno obtenidas, que mostraron una película uniforme

Commented [VD18]: ojo

y de alta calidad. Este procedimiento es esencial para lograr un grafeno adecuado para estudios posteriores y su correcta transferencia.

Caracterización

Para evaluar las propiedades estructurales del grafeno, se empleó la espectroscopía Raman. Esta técnica permite identificar características clave del material mediante el análisis de las vibraciones moleculares y los modos de excitación. El espectro Raman del grafeno muestra picos distintivos como el pico D ($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$), que indica la presencia de defectos estructurales; el pico G ($\sim 1580\text{ cm}^{-1}$), asociado a la vibración de los átomos de carbono en el plano; y el pico 2D ($\sim 2690\text{ cm}^{-1}$), característico de la naturaleza bidimensional del grafeno. La relación de intensidades entre las bandas G y 2D es crucial para diferenciar grafeno monocapa de multicapa, mientras que la anchura y forma de la banda 2D proporciona información sobre el acoplamiento electrónico entre capas. Este análisis detallado hace de la microscopía Raman una herramienta indispensable en la caracterización del grafeno, ya que permite evaluar su calidad y propiedades estructurales de manera rápida, precisa y no destructiva.

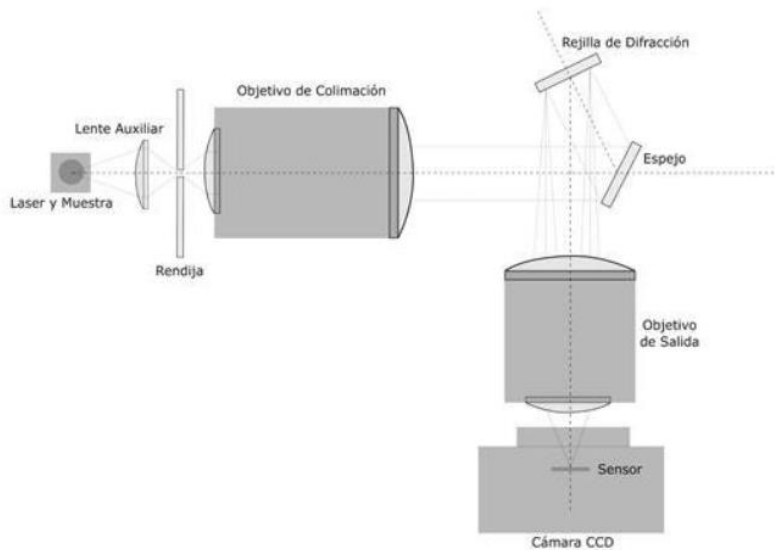


Figura 4: Esquema del sistema óptico para la detección de espectros Raman.[22]

Transferencia

El grafeno sintetizado fue transferido de manera preliminar a sustratos de Silicio para estudiar sus propiedades y potenciar uso en aplicaciones específicas. Este proceso implica la

eliminación del sustrato de cobre y el traslado del grafeno a un nuevo soporte (Figura 5). El proceso incluye las siguientes etapas:

1. Eliminación de residuos: La muestra de grafeno sobre cobre se deja caer en una solución de agua desionizada y ácido nítrico (HNO_3) para limpiar los residuos de carbono adheridos a la cara posterior.

2. Disolución del cobre: Se deja caer la muestra en 20 ml de una solución con concentración de 100gr de nitrato férrico ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) en 200 ml de agua, que disuelve completamente el cobre, dejando una lámina de grafeno libre flotando.

3. Transferencia al sustrato: El grafeno se coloca cuidadosamente en agua destilada junto al sustrato deseado. Se retira el agua de forma controlada, posicionando el grafeno en el sustrato sin dañar su integridad estructural. Se observa el procedimiento en la Figura 5.

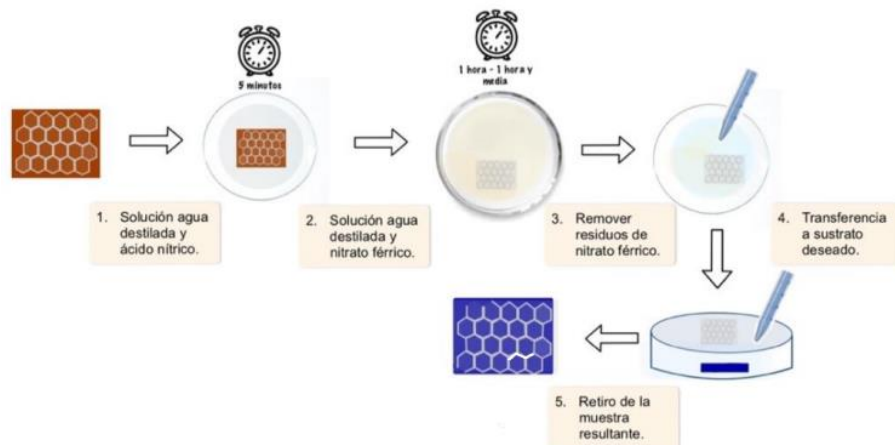


Figura 5. Proceso de transferencia de grafeno desde un material catalizador de cobre a un sustrato deseado. [21]

Cuando el proceso de pruebas terminó y obtuvimos buenos resultados de Raman luego de la síntesis y de transferencia a sustratos de Silicio, transferimos la película de grafeno al lado tipo n de una celda solar de heterojuntura fabricada en el Institut National de l'Énergie Solaire, Francia, que tiene una película de ITO de 70 nm en su lado tipo p. Considerando que el grafeno a utilizar tenga el área suficiente para cubrir el área de 6 cm^2 .

Commented [VD19]: Cuántos mg por ml de agua?

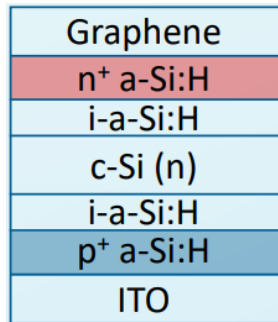


Figura 6. Esquema de la celda solar de heterojuntura utilizada en este trabajo con grafeno en la parte superior.

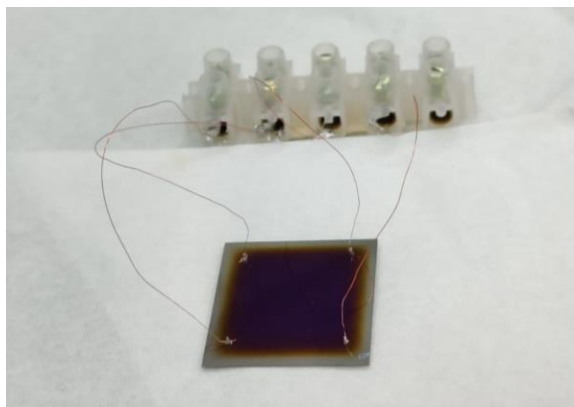


Figura 7. Celda por el lado del ITO hacia arriba con conexiones de oro para medición de Van der Pauw.

La técnica de Van der Pauw es un método experimental utilizado para mediciones de conductividad. Puede ser utilizada para medir la resistividad o el coeficiente Hall de una muestra plana y delgada con cualquier forma geométrica. Se basa en hacer contactos eléctricos en los bordes de la muestra y aplicar corrientes y medir voltajes entre diferentes pares de contactos. Esta técnica es especialmente útil para materiales de forma irregular o que no son fáciles de manipular en geometrías específicas, como la de grafeno transferido en el laboratorio, ya que no requiere que la muestra sea de una forma definida como cuadrada o circular. [23]

Se colocan cuatro contactos en los bordes de la muestra como se observa en la Figura 7. Estos contactos deben ser pequeños para minimizar el efecto del tamaño del contacto en las mediciones. Se aplica una corriente entre dos contactos, mientras que se mide el voltaje entre

los otros dos. Esto se repite para diferentes combinaciones de contactos. Las conexiones se realizaron en ambos lados de la celda para medir tanto el ITO como el grafeno posteriormente transferido.

Utilizamos un voltímetro y un femtoamperímetro. El **voltímetro** se utiliza para medir la diferencia de potencial entre dos contactos opuestos de la muestra mientras se aplica una corriente a través de otros dos contactos. En las mediciones de Van der Pauw, las diferencias de potencial pueden ser muy pequeñas, especialmente en materiales con alta resistividad. El **femtoamperímetro** se utiliza para dar a la muestra corrientes pequeñas, indica además el voltaje asociado a esta corriente determinada.



Figura 8: imagen de voltímetro a la izquierda y el femtoamperímetro a la derecha.

Las propiedades eléctricas, como la resistividad, son fundamentales para evaluar la calidad de los materiales conductores o semiconductores en las celdas solares. La resistividad afecta directamente la eficiencia de conversión de energía en la celda fotovoltaica. La técnica de Van der Pauw nos permite medir sin considerar la forma del material, en laboratorio como trabajamos con grafeno, el área al no ser completamente pareja se puede hacer trabajoso las conexiones y medición por lo que esta técnica nos permite mayor precisión.

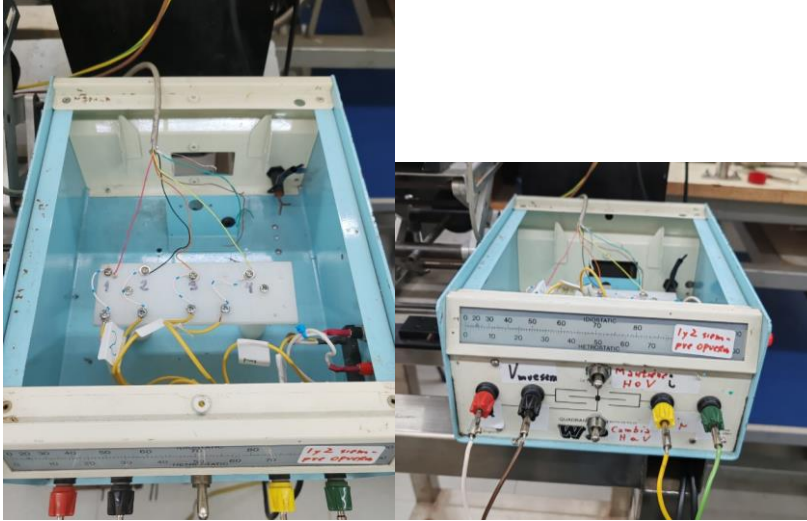


Figura 9: A la izquierda conexiones internas del conmutador, a la derecha cable externo que se conecta a voltímetro y femtoamperímetro.

En primer lugar, se procede a conectar el femtoamperímetro al circuito experimental, el cual tiene la función de suministrar un voltaje de alimentación constante a la muestra, con un valor establecido de 0,1 [V]. Una vez que el sistema está en funcionamiento, se inicia el proceso de medición. El femtoamperímetro es responsable de medir la corriente eléctrica, denominada I_{medida} , y la resistencia eléctrica, representada como R_{medida} , en la muestra bajo estudio. Paralelamente, un voltímetro conectado al montaje registra el voltaje aplicado, conocido como V_{medido} . Posteriormente, se lleva a cabo un cambio manual en las conexiones del conmutador. Este paso es esencial para invertir el sentido del voltaje de alimentación aplicado a la muestra, lo cual permite realizar mediciones en la dirección opuesta del campo eléctrico generado. Se vuelven a registrar las variables correspondientes para este nuevo sentido del voltaje.

Para alternar el lado de la muestra en el que se aplica el voltaje de alimentación, así como el lado donde se mide el voltaje, se utiliza el conmutador de manera manual. Este procedimiento se repite de manera idéntica para garantizar que todas las mediciones en ambos sentidos sean consistentes y comparables.

La resistencia para cada medición es calculada mediante la ecuación (1).

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Y la resistencia de hoja (R_{sh}) es calculada mediante la ecuación (2).

$$R_{sh} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{R_{12} + R_{23}}{2} f \quad (2)$$

$$f = 1 - \left(\frac{\ln(2)}{2} \right) \left(\frac{R_{12} - R_{23}}{R_{12} + R_{23}} \right)^2 \quad (3)$$

En las ecuaciones (2) y (3), R_{12} es la resistencia obtenida a partir de la medición de corriente entre los contactos 1 y 2 y R_{23} a partir de la medición de corriente entre contactos 2 y 3, es decir, ambas resistencias son medidas entre lados consecutivos de la muestra. La numeración de los contactos alrededor de la muestra puede apreciarse en la Figura 10.

Una vez obtenida la resistencia de hoja, es posible determinar la resistividad de la muestra a partir de su espesor (t), estos tres parámetros se relacionan mediante la ecuación (4).

$$\rho = R_{sh} t \quad (4)$$

Se determinó la resistencia sobre los cuatro lados de la muestra y R_{sh} fue calculada con las cuatro combinaciones posibles entre ellas, se informa como resultado de la medición el promedio de las resistencias de hoja obtenidas. Las configuraciones necesarias para determinar la resistencia de hoja de la muestra se presentan en la Figura 10 [24].

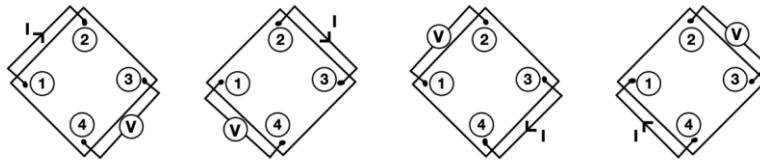


Figura 10: Cuatro configuraciones necesarias para medir con Van der Pauw.

Esto supone un problema dadas las configuraciones posibles que entrega el conmutador, ya que el femtoamperímetro siempre debe estar conectado al sistema en las entradas a y b, mostradas en la Figura 11. c), entregando sólo la posibilidad de alimentar al sistema entre los contactos 1 y 4 o entre los contactos 2 y 3. Para solucionar este problema fue necesario modificar las conexiones entre la muestra y el conmutador, debieron ser intercambiados los contactos 2 y 4. Esto permite que las mismas dos configuraciones aptas del conmutador ahora alimenten al sistema entre los contactos 1 y 2 o entre los contactos 3 y 4. Las conexiones entre muestra y conmutador son presentadas en la Figura 11.

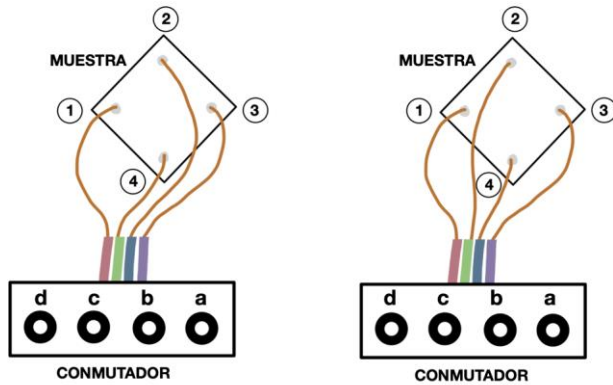


Figura 11: Conexiones entre muestra y conmutador: a) primera conexión; b) 2 y 4 cambiados.

Llamamos UU y DU a las dos configuraciones del conmutador cuando está conectado a la muestra de la forma en que se observa en la Figura 11. a) y UU* y DU* a las mismas dos configuraciones con los contactos 2 y 4 intercambiados, Figura 11. b). La Tabla 1 muestra las cuatro disposiciones útiles entregadas por el conmutador para los dos montajes.

Tabla 1: Configuraciones del conmutador para las mediciones.

	UU	UU*	DU	DU*
a	1	1	2	4
b	4	2	3	3
c	3	3	4	2
d	2	4	1	1

Resultados y análisis

Durante el presente estudio, se logró sintetizar grafeno de alta calidad mediante el método de deposición química de vapor (CVD). Los resultados obtenidos fueron consistentes en cuanto a uniformidad y propiedades estructurales, evaluadas mediante espectroscopía Raman, microscopía de fuerza atómica (AFM) y mediciones eléctricas. Además, se realizó una

comparación detallada entre las propiedades del grafeno y las de una película de 70 nm de óxido de indio y estaño (ITO), material utilizado convencionalmente en celdas solares de heterojuntura (HJ).

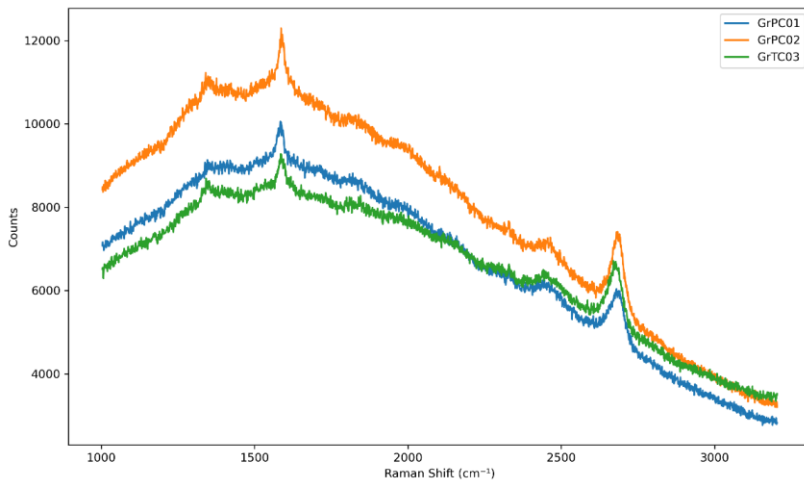


Figura 12. Caracterización por espectroscopía Raman de grafeno sobre cobre de 3 síntesis distintas.

La síntesis observada a través de espectroscopia Raman en la Figura 12, confirma la calidad del grafeno observando los picks característicos. Previo a la transferencia a la celda solar, se realizaron múltiples pruebas del proceso de transferencia (Figura 13 y 14) donde al realizarla sobre obleas de silicio se toma en cuenta las precauciones mencionadas anteriormente, donde la mayor dificultad está en poder tener un área grande de grafeno sobre el sustrato, los picks se mantienen.

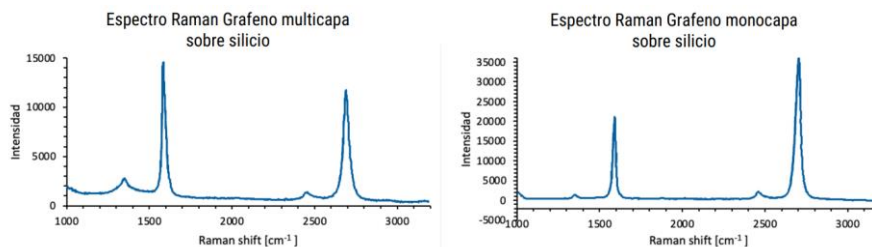


Figura 13. Raman de muestras de grafeno sobre silicio, GrPC02 a la izquierda y GrTC03 a la derecha



Figura 14. Grafeno flotando sobre solución de nitrato ferrico a la izquierda y muestra del mismo grafeno transferido sobre oblea de silicio a la derecha. Grafeno GrPC02.

La espectroscopía Raman confirmó la alta calidad del grafeno sintetizado previo a la transferencia del material a la celda. La transferencia de grafeno sobre la celda fue exitosa, como lo muestran las fotografías de la Figura 16. El espectro obtenido de grafeno transferido sobre la celda solar (Figura 15) mostró picos característicos G y 2D, con una relación $I(2D)/I(G)$ de aproximadamente 2. Esto es indicativo de una monocapa de grafeno con pocos defectos estructurales. La ausencia significativa del pico D ($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$) sugiere una baja densidad de defectos, lo que refuerza la pureza del material sintetizado. Este resultado es consistente con estudios previos que demuestran la capacidad del método CVD para producir grafeno de alta calidad a gran escala.

Commented [VD20]: Poner Raman de grafeno sobre cobre

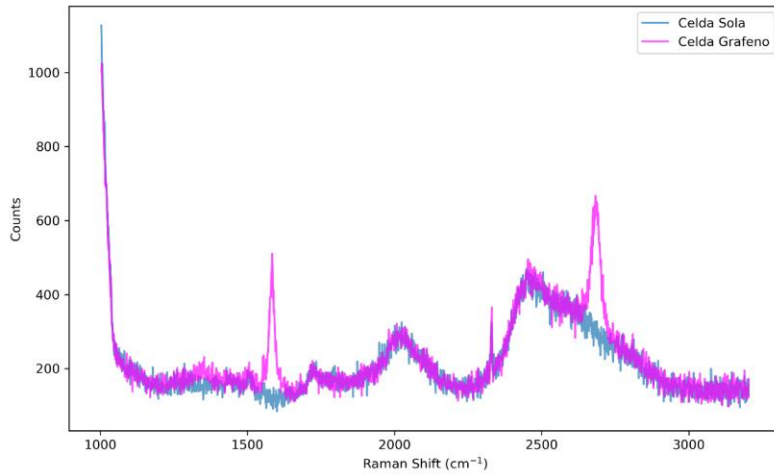


Figura 15: Espectro Raman del grafeno sintetizado mediante CVD, mostrando los picos característicos G y 2D, grafeno GrPC01.

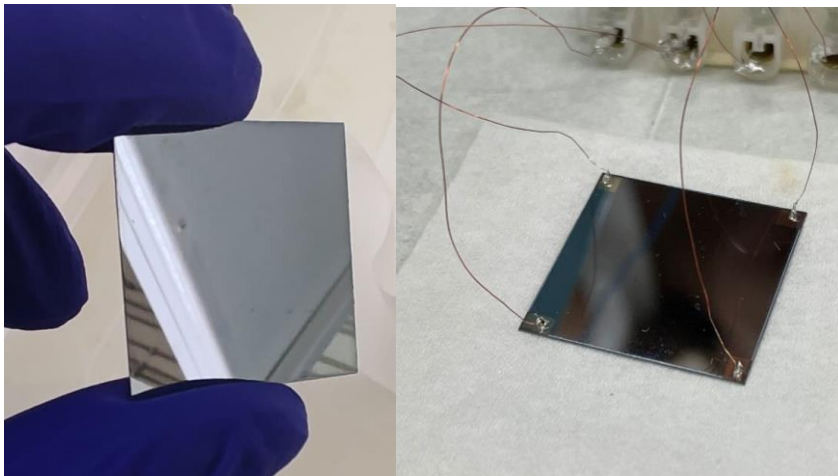


Figura 16: Celda SHJ, a la izquierda sin capa conductora transparente, a la derecha con grafeno como capa conductora transparente con conexiones de oro.

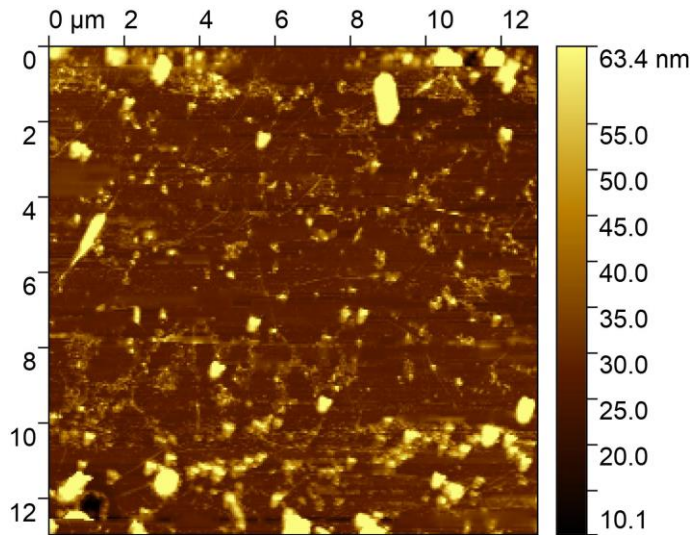


Figura 17: Imagen AFM superficie grafeno sobre capa n de celda solar de HJ, en región de 12,97 μm

La caracterización de la superficie de grafeno sobre la celda solar, mediante AFM (Figura 17), reveló una rugosidad promedio de 12,5 nm en una región de 12,97 μm . Presenta aglomeraciones que varían su densidad debido a aglomeraciones de carbono amorfo provenientes de la síntesis de grafeno. La rugosidad indica una distribución que presenta fisuras notorias que pueden comprometer su funcionalidad como capa conductora transparente. Adicionalmente, las imágenes obtenidas muestran que se debe mejorar la continuidad estructural de la película de grafeno para adaptarse a la superficie de la capa n de la celda solar.

Las mediciones de resistencia de hoja, realizadas mediante el método de Van der Pauw, mostraron un valor promedio de 103 Ω/\square para el grafeno transferido. Este valor es comparable al de la película de 70 nm de ITO, que presentó una resistencia de 60 Ω/\square . Donde el ITO presenta una resistencia menor a la esperada.

Durante la transferencia de grafeno, se observó que el proceso es altamente sensible al movimiento brusco sobre el agua destilada. Para mitigar estos efectos, se implementaron técnicas de control procurando que desde la síntesis en el cobre no se arrugara excesivamente el material, lo cual permitió reducir las imperfecciones y defectos en las películas transferidas. La Tabla 2 presenta el resultado de las mediciones de diferencia de potencial y corriente eléctrica junto al cálculo de la resistencia eléctrica en las distintas configuraciones del montaje experimental para la celda con grafeno. En ella se observa que existe una pequeña diferencia entre las mediciones UU, DU y UU*, DU*, que puede atribuirse a que al modificar la conexión entre los contactos y el conmutador se debió desoldar y soldar la muestra, lo que puede producir cambios en el material debido al uso de alta temperatura, o

Commented [VD21]: Esta imagen esta en la carpeta drive?

Commented [VD22]: Primero describe la imagen AFM, hay aglomeraciones que probablemente corresponde a carbono amorfo.

Commented [VD23]: Esta rugosidad es alta

Commented [VD24]: Este párrafo quizás cambie si calculas la resistencia de hoja de otra manera.

en la distribución geométrica de los contactos, el ideal sería no tener que hacer manualmente los cambios en las conexiones de la muestra.

Tabla 2: Mediciones de corriente y diferencia de potencial y cálculo de la resistencia.

	I [mA]	ΔV [V]	R [Ω]
UU	13,41	0,322	24,01
DU	36,16	0,857	23,70
UU*	15,31	0,371	24,23
DU*	18,63	0,366	19,65

La Tabla 3 muestra el cálculo de la resistencia de hoja para cada combinación posible de las mediciones realizadas. Se puede observar en ella que presenta leves variaciones entre sí obteniendo para la resistencia de hoja promedio un valor de 103 [Ω/\square].

Tabla 3: Cálculo de resistencias de hoja.

	R_{sh} [Ω/\square]
UU-UU*	109,27
UU*-DU	108,56
DU-DU*	97,88
DU*-UU	98,54

La resistividad de la muestra se ha calculado considerando para ella un espesor promedio de 12,5 nm, obteniendo un valor de $1.2966 \cdot 10^{-6}$ [Ωm]. La discrepancia del valor respecto a la literatura da que el método de deposición debe mejorar en cuanto a la rugosidad mostrada en AFM [25].

Conclusiones y proyecciones

En función de los resultados previos donde se logra sintetizar de manera exitosa grafeno de buena calidad, se pretende transferir grafeno de manera iterativa, ajustando las condiciones en cada paso, para obtener resultados más precisos y fiables. Además, se puede comparar las celdas HJ de 6 cm², fabricada en el Institut National de l'Énergie Solaire con película de 70 nm de ITO sobre su capa p con las que tienen ITO sobre la capa n, para verificar si el grafeno pudiera tener mejores propiedades.

En cuanto a la síntesis de grafeno y transferencia se recomienda realizar el proceso durante la misma semana para evitar que el material sintetizado se rompa y se eviten alteraciones físicas debido a las condiciones de trabajo.

Commented [VD25]: Quizás hay que modificar en función de los nuevos resultados y la inclusión de los dos párrafos anteriores cautelando que no se repita la idea.

El presente estudio demuestra que el grafeno sintetizado mediante deposición química de vapor (CVD) puede ser un material viable para su uso en celdas solares de heterojuntura.

Los resultados obtenidos mediante espectroscopía Raman confirman que el grafeno sintetizado posee una alta calidad estructural debido al bajo pick D. En cuanto a microscopía de fuerza atómica presenta irregularidades en la estructura siendo la uniformidad de la transferencia un paso a mejorar.

La resistencia de hoja del grafeno obtenida de aproximadamente $103 \Omega/\square$ para el grafeno, comparable a la medición de cerca de $60 \Omega/\square$ para una película de 70 nm de ITO (óxido de indio y estaño), demostrando que puede desempeñar un rol funcional como capa conductora transparente, aunque su resistencia es ligeramente mayor.

Se logró transferir una película de grafeno continua sobre la celda, lo que asegura un buen contacto con las capas subyacentes y una adecuada integración al dispositivo. El grafeno representa una alternativa más sostenible al ITO debido a la abundancia de carbono y su menor impacto ambiental. Su implementación podría reducir significativamente los costos y la dependencia de materiales críticos como el indio. Se deben realizar más mediciones siguiendo el procedimiento para verificar el comportamiento del grafeno al mejorar la uniformidad de este sobre la celda. Se planea continuar optimizando las técnicas de síntesis y transferencia para mejorar aún más las propiedades eléctricas del grafeno. Se investigará la combinación del grafeno con otros materiales, como capas híbridas de ITO y grafeno, para maximizar la eficiencia y reducir los costos de producción. Finalmente, se explorará su escalabilidad industrial y su integración en dispositivos comerciales, promoviendo su adopción en la industria fotovoltaica y otras aplicaciones tecnológicas. Estos resultados abren la puerta a futuras investigaciones dirigidas a integrar grafeno con materiales complementarios, como celdas de perovskita, para maximizar su desempeño.

Los resultados obtenidos sugieren que el grafeno sintetizado y transferido cumple con los requerimientos funcionales necesarios para su implementación en celdas solares de heterojuntura al mejorar la uniformidad de la transferencia, posicionándose como un candidato prometedor para reemplazar al ITO.

Commented [VD26]: Ojo con este valor, mira cómo lo hizo Paola en su informe para el curso de celdas solares.

Commented [VD27]: Eso va en las conclusiones

Commented [VD28]: También en las conclusiones

Referencias

- [1] I. Renewable Energy Agency, *Renewable power generation costs in 2021*. 2022. [Online]. Available: www.irena.org
- [2] A. Molina, M. Falvey, and R. Rondanelli, "A solar radiation database for Chile," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-13761-x.
- [3] M. A. Green *et al.*, "Solar cell efficiency tables (Version 61)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 3–16, Jan. 2023, doi: 10.1002/pip.3646.
- [4] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, and B. Hallam, "Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic

technologies: Challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption,” *Energy Environ Sci*, vol. 14, no. 11, pp. 5587–5610, Nov. 2021, doi: 10.1039/d1ee01814k.

- [5] S. DeWolf, A. Descoedres, Z. C. Holman, and C. Ballif, “High-efficiency silicon heterojunction solar cells: A review,” *Green*, vol. 2, no. 1, pp. 7–24, 2012, doi: 10.1515/GREEN-2011-0018.
- [6] C. G. Granqvist and A. Hultåker, “Transparent and conducting ITO films: new developments and applications,” *Thin Solid Films*, vol. 411, no. 1, pp. 1–5, May 2002, doi: 10.1016/S0040-6090(02)00163-3.
- [7] W. C. P. Shanks, B. E. Kimball, A. C. Tolcin, and D. E. Guberman, “Germanium and indium,” 2017. doi: 10.3133/pp1802I.
- [8] E. Commission, “Written by Deloitte Sustainability British Geological Survey Bureau de Recherches Géologiques et Minières Netherlands Organisation for Applied Scientific Research Study on the review of the list of Critical Raw Materials Criticality Assessments,” 2017.
- [9] R. Bel Hadj Tahar, T. Ban, Y. Ohya, and Y. Takahashi, “Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties,” *J Appl Phys*, vol. 83, no. 5, pp. 2631–2645, 1998, doi: 10.1063/1.367025.
- [10] B. Tsu, T. Chu, S. Chatterjee, and B. T. T. Chu, “1 Graphene-Based Polymer Nanocomposites,” 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/280101269>
- [11] M. Song, C. Cai, X. Li, Z. Chen, and X. Cai, “Graphene: Preparation and Applications,” *RSC Smart Materials*, vol. 2021-January, no. 37, pp. 100–130, 2020, doi: 10.1039/9781788019279-00100.
- [12] R. Garg, N. K. Dutta, and N. R. Choudhury, “Work function engineering of graphene,” Jun. 01, 2014, *MDPI*. doi: 10.3390/nano4020267.
- [13] M. Ahmed, A. Bakry, E. R. Shaaban, and H. Dalir, “Structure, Electrical and Optical Properties of ITO Thin Films and their Influence on Performance of CdS/CdTe Thin-Film Solar Cells.”
- [14] Y. Zhang, L. Zhang, and C. Zhou, “Review of chemical vapor deposition of graphene and related applications,” *Acc Chem Res*, vol. 46, no. 10, pp. 2329–2339, Oct. 2013, doi: 10.1021/AR300203N/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AR-2012-00203N_0002.GIF.
- [15] Y. Hao *et al.*, “Probing layer number and stacking order of few-layer graphene by Raman spectroscopy,” *Small*, vol. 6, no. 2, pp. 195–200, Jan. 2010, doi: 10.1002/SMLL.200901173.

- [16] Y. Wu *et al.*, “Graphene transparent conductive electrodes for highly efficient silicon nanostructures-based hybrid heterojunction solar cells,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 117, no. 23, pp. 11968–11976, Jun. 2013, doi: 10.1021/JP402529C.
- [17] F. Bonaccorso, A. Lombardo, T. Hasan, Z. Sun, L. Colombo, and A. C. Ferrari, “Production and processing of graphene and 2d crystals,” *Materials Today*, vol. 15, no. 12, pp. 564–589, Dec. 2012, doi: 10.1016/S1369-7021(13)70014-2.
- [18] A. Haidar, J. Guimón, and I. Alon, “Can graphene fuel a transformative change in energy storage technologies? A scenario analysis for the next two decades,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 202, p. 123278, May 2024, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2024.123278.
- [19] S. Das, D. Pandey, J. Thomas, and T. Roy, “The Role of Graphene and Other 2D Materials in Solar Photovoltaics,” *Advanced Materials*, vol. 31, no. 1, p. 1802722, Jan. 2019, doi: 10.1002/ADMA.201802722.
- [20] L. Bai *et al.*, “Graphene for Energy Storage and Conversion: Synthesis and Interdisciplinary Applications,” *Electrochemical Energy Reviews*, vol. 3, no. 2, pp. 395–430, Jun. 2020, doi: 10.1007/S41918-019-00042-6.
- [21] María Saavedra Fredes, “Estudio de la función trabajo de grafeno para su uso como conductor transparente sobre la capa emisora para celdas de heterojuntura.,” Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso – Chile, 2024.
- [22] O. Urquidi, “ESPECTROSCOPIA RAMAN DE COSTO REDUCIDO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LÍQUIDOS TRANSPARENTES,” *INVESTIGACION & DESARROLLO*, vol. 19, no. 1, pp. 95–103, Jul. 2019, doi: 10.23881/idupbo.019.1-6i.
- [23] J. Banaszczyk, A. Schwarz, G. De Mey, and L. Van Langenhove, “The Van der Pauw method for sheet resistance measurements of polypyrrole-coated para-aramide woven fabrics,” *J Appl Polym Sci*, vol. 117, no. 5, pp. 2553–2558, Sep. 2010, doi: 10.1002/app.32186.
- [24] J. Banaszczyk, A. Schwarz, G. De Mey, and L. Van Langenhove, “The Van der Pauw method for sheet resistance measurements of polypyrrole-coated para-aramide woven fabrics,” *J Appl Polym Sci*, vol. 117, no. 5, pp. 2553–2558, Sep. 2010, doi: 10.1002/app.32186.
- [25] K. S. Novoselov *et al.*, “Electric field in atomically thin carbon films,” *Science (1979)*, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669, Oct. 2004, doi: 10.1126/SCIENCE.1102896/SUPPL_FILE/NOVOSELOV.SOM.PDF.

Productos

[P1] Paola Sánchez, Catalina Álvarez, Tamara Beltrán, Ricardo Henríquez, Valeria del Campo, Póster “GRAPHENE AS TRANSPARENT CONDUCTOR IN HETEROJUNCTION SOLAR CELLS”, Congreso internacional de energía solar BifIPV, Antofagasta, enero 2025.

[P2] Tamara Beltrán, Catalina Álvarez, Paola Sánchez, Ricardo Henríquez, Valeria del Campo, Póster “GRAFENO COMO CONDUCTOR TRANSPARENTE EN CELDAS SOLARES”, Simposio Chileno de Física (SOCHIFI), Temuco, noviembre 2024.