

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA
VALPARAÍSO – CHILE**



**“DESEMPEÑO DE CELDAS SOLARES DE
HETEROJUNTURA CON GRAFENO COMO
CONDUCTOR TRANSPARENTE”**

PAOLA JACKELINE SÁNCHEZ GUERRERO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS, MENCIÓN FÍSICA

**PROFESOR GUÍA:
COMITÉ DE TESIS:**

**Dra. Valeria del Campo
Dra. Delfina Muñoz
Dr. Ricardo Henríquez**

FEBRERO – 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desempeño de celdas solares de heterojuntura con grafeno como conductor transparente

Nombre del candidato(a): Paola Jackeline Sánchez Guerrero

Carrera / Grado: Magíster en Ciencias, mención Física

Campus: Casa Central **Departamento:** Física

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Valeria del Campo Sfeir, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/02/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/02/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar agradeciendo el apoyo financiero de becas y los distintos proyectos asociados a este trabajo: ANID – FONDAP – 1523A0006; ANID – Fondecyt 1251918; ANID – ECOS210038 – C21E08; ANID – CIN250043; Beca Magister científico/tecnológico USM; Beca SERC – Apoyo estudiantes de postgrado.

Quisiera también agradecer a mi profesora tutora, Doctora Valeria del Campo, por confiar incluso más que yo en mi trabajo, gracias por las muchas horas de discusión de resultados en la oficina en que siempre llegaba con más dudas que respuestas.

Gracias al equipo de laboratorio, muchas de las cosas que hacemos sólo las logramos con el apoyo conjunto y con el aprendizaje que vamos logrando de nuestras mismas experiencias. En especial a Tamara, qué sería de este trabajo sin las largas horas en el CVD, las frustraciones transfiriendo y, cómo no, las vueltas a buscar café y pastelitos de Vivendum. Gracias por tu trabajo, tu apoyo constante y por contagiar tu juventud, por momentos olvido que ya no tengo 20 años.

Gracias a mi familia, por apoyarme siempre en cada etapa y en estas instancias de desarrollo académico. A Javier y sus papás, por alimentarme e incluso levantarme, literalmente, cada vez que fue necesario durante todo este periodo, gracias por creer siempre que puedo lograrlo todo. Amiga Valentina, y mi segunda familia, gracias por permanecer aun cuando últimamente sólo hablo de mi tesis. Gracias a todos ustedes por confiar en mis capacidades.

Gracias a mis colegas, que sin el apoyo de varios de ellos no habría sido posible presentar avances de este trabajo en diversos congresos.

Dedicatoria

A la Nena y el Papi, porque sé que desde donde estén son quienes más orgullosos están con este nuevo logro.

Resumen

El grafeno es un material bidimensional constituido por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal, que exhibe propiedades sobresalientes. Entre ellas destacan su alta conductividad eléctrica, elevada transmitancia óptica, flexibilidad mecánica y gran estabilidad química, lo que lo posiciona como un material de interés para aplicaciones optoelectrónicas avanzadas.

En este contexto, el grafeno ha emergido como un material prometedor para sustituir óxidos conductores transparentes convencionales, como el óxido de indio y estaño (ITO), en celdas solares de silicio de heterojuntura (SHJ). Sus propiedades eléctricas y ópticas, junto con la posibilidad de reducir el uso de materiales críticos, lo posicionan como una alternativa potencial para contactos transparentes en este tipo de dispositivos.

Este trabajo presenta la síntesis de grafeno por deposición química en fase de vapor (CVD), su transferencia por un método húmedo libre de polímeros a obleas de óxido de silicio (SiO_2) para su caracterización estructural y eléctrica, y su incorporación como electrodo transparente en celdas solares de heterojuntura. La calidad del grafeno se evaluó mediante espectroscopía Raman y microscopía electrónica de barrido (SEM), confirmando la formación de monocapas y bicapas de grafeno, y presencia moderada de defectos. Las propiedades eléctricas de las muestras se determinaron mediante el método de longitud de transferencia (TLM) y mediciones de efecto Hall, obteniendo resistencias de hoja en el rango 1 a 4 $\text{k}\Omega/\text{sq}$ y movilidades entre 0,46 y 54 cm^2/Vs . La interfaz plata/grafeno presentó resistividades de contacto en el rango $10\text{-}10^3 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$.

Finalmente, se integró grafeno como electrodo conductor transparente (TCE) en celdas SHJ fabricadas en el *Institut National de l'Énergie Solaire*, y se analizó su desempeño fotovoltaico bajo condiciones estándar (AM1,5G, 1 sol). Los resultados muestran que las celdas con grafeno alcanzaron eficiencias entre 0,1% y 3,7%, en contraste con una celda de referencia con ITO cuya eficiencia alcanzó un 16,9%. Este comportamiento se atribuye a la alta resistencia de hoja del grafeno y a la resistencia de contacto metal-grafeno, en concordancia con lo reportado en la literatura. Lo anterior en adición al comportamiento de la interfaz grafeno/silicio, en que podría existir una barrera tipo Schottky, asociada a desalineaciones energéticas condicionadas por la función trabajo del grafeno.

El estudio confirma que, sin estrategias adicionales de dopaje o ingeniería de contactos, el grafeno presenta limitaciones significativas para su uso como TCE en celdas SHJ, aunque ofrece una base experimental sólida para futuras optimizaciones orientadas a reducir pérdidas resistivas y mejorar la integración del material en dispositivos fotovoltaicos.

Abstract

Graphene is a two-dimensional material composed of a single layer of carbon atoms arranged in a hexagonal lattice, exhibiting outstanding properties. Among them are its high electrical conductivity, high optical transmittance, mechanical flexibility, and excellent chemical stability, which make it an interesting material for advanced optoelectronic applications.

In this context, graphene has emerged as a promising material to replace conventional transparent conductive oxides, such as indium tin oxide (ITO), in silicon heterojunction (SHJ) solar cells. Its electrical and optical properties, together with the potential to reduce the use of critical materials, make it a viable alternative for transparent contacts in this type of device.

This work presents the synthesis of graphene by chemical vapor deposition (CVD), its transfer by polymer-free wet solution method onto silicon oxide (SiO_2) wafers for structural and electrical characterization, and its incorporation as a transparent electrode in heterojunction solar cells. Graphene quality was evaluated by Raman spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM), confirming the formation of mono- and bilayer graphene, with a moderate presence of defects. The electrical properties of the samples were determined using the transfer length method (TLM) and Hall effect measurements, yielding sheet resistances in the range of 1 to 4 $\text{k}\Omega/\text{sq}$ and mobilities between 0.46 and 54 cm^2/Vs . The silver/graphene interface exhibited contact resistivities in the range of $10\text{-}10^3 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$.

Finally, graphene was integrated as a transparent conductive electrode (TCE) in SHJ solar cells fabricated at the *Institut National de l'Énergie Solaire*, and their photovoltaic performance was analyzed under standard test conditions (AM1.5G, 1 sun). The results show that graphene-based cells achieved efficiencies between 0.1% and 3.7%, in contrast to a reference ITO-based cell with an efficiency of 16.9%. This behavior is attributed to the high sheet resistance of graphene and the metal-graphene contact resistance, in agreement with reports in the literature. Additionally, the graphene/silicon interface may exhibit Schottky-type barrier behavior, associated with energy misalignments governed by the graphene work function.

The study confirms that, without additional doping strategies or contact engineering, graphene presents significant limitations for its use as TCE in SHJ solar cells. Nevertheless, it provides a solid experimental basis for future optimizations aimed at reducing resistive losses and improving the integration of graphene in photovoltaic devices.

Glosario

Ag: Plata

AM1,5G: *Air Mass 1,5 Global*

AZO: *Aluminium doped zinc oxide* - Óxido de zinc dopado con aluminio

CVD: *Chemical vapor deposition* - Deposición química en fase de vapor

FF: *Fill factor* - Factor de llenado

FTO: *Fluoride doped tin oxide* - Óxido de estaño dopado con fluor

Gr: Grafeno

ITO: *Indium tin oxide* - Óxido de indio y estaño

JSC: *Short circuit current density* - Densidad de corriente de cortocircuito.

L_T : *Transfer length* - Longitud de transferencia

P_{MP} : *Maximum power point* - Punto de máxima potencia

R_c : Resistencia de contacto

R_{cW} : Resistencia de contacto normalizada por ancho

ρ_c : Resistividad específica de contacto

R_{SH} : Resistencia de hoja

SHJ: *Silicon Heterojunction solar cell* - Celda solar de heterojuntura

Si: Silicio

TCE: *Transparent conductive electrode* - Electrodo conductor transparente

TCO: *Transparent conductive oxide* - Óxido conductor transparente

TLM: *Transfer length method* - Método de longitud de transferencia

V_{oc} : *Open circuit voltage* - Voltaje de cortocircuito

η : eficiencia de conversión de energía

E_g : *Bandgap* - banda prohibida

I_{sc} : *Short circuit current* - corriente de corto circuito

Índice

AGRADECIMIENTOS	2
Resumen	4
Abstract	5
Glosario	6
Índice	7
1. Introducción	9
2. Antecedentes	10
2.1. Radiación solar	10
2.2. Principios básicos de dispositivos fotovoltaicos	11
2.2.1. Semiconductores y juntura np	11
2.2.2. Generación fotovoltaica	12
2.3. Desempeño de celdas solares	13
2.4. Celdas solares de silicio de heterojuntura	14
2.4.1. Propiedades eléctricas de los materiales	16
3. Estado del Arte	19
3.1. Tecnologías fotovoltaicas	19
3.2. Materiales utilizados como electrodo conductor transparente	19
3.3. Grafeno como electrodo conductor transparente	20
3.3.1. Síntesis y transferencia de grafeno	20
3.3.2. Contactos metálicos en grafeno	21
3.3.3. Integración de grafeno como electrodo conductor transparente en celdas de silicio de heterojuntura	23
4. Objetivos	27
4.1. Objetivo general	27
4.2. Objetivos específicos	27
5. Metodología	28
5.1. Síntesis de grafeno	28
5.2. Transferencia de grafeno	29
5.3. Caracterización de muestras	29
5.3.1. Caracterización estructural	29
5.3.2. Caracterización eléctrica	31
5.3.3. Desempeño fotovoltaico	33

6.	<i>Resultados y análisis</i>	36
6.1.	Síntesis y transferencia de grafeno por CVD	36
6.2.	Caracterización muestras de grafeno sobre óxido de silicio (Gr/SiO₂)	37
6.2.1.	ITO/Glass	37
6.2.2.	Grafeno de una película sobre óxido de silicio (Gr(1)/SiO ₂)	38
6.2.3.	Grafeno de dos películas sobre óxido de silicio (Gr(2)/SiO ₂)	40
6.3.	Caracterización estructural muestras de grafeno sobre celdas de silicio de heterojuntura (Gr/SHJ)	43
6.3.1.	Grafeno de tres películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata	43
6.3.2.	Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata	44
6.3.3.	Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura sin metalizado	44
6.3.4.	Grafeno de una película sobre celda de heterojuntura sin metalizado	45
6.4.	Desempeño de celdas de silicio de heterojuntura con grafeno como electrodo conductor transparente	46
6.4.1.	SHJ con y sin electrodo frontal	46
6.4.2.	Celdas con ITO y grillas de plata	48
6.4.3.	Celda con ITO sin metalizado	49
6.4.4.	Grafeno de tres películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata	50
6.4.5.	Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata	51
6.4.6.	Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura sin metalizado	52
6.4.7.	Grafeno de una película sobre celda de heterojuntura sin metalizado	52
7.	<i>Discusión</i>	54
8.	<i>Conclusiones</i>	58
9.	<i>Referencias</i>	60

1. Introducción

Las celdas solares fotovoltaicas juegan un papel importante en la creciente demanda de fuentes de energía sostenibles, al ofrecer una alternativa eficiente y sostenible para la generación eléctrica. Este interés se ha intensificado en las últimas décadas, impulsado por los avances en materiales y tecnologías que han permitido incrementar su eficiencia.

Entre las arquitecturas más prometedoras se encuentran las celdas solares de silicio de heterojuntura (SHJ), reconocidas por su elevada eficiencia, procesos de fabricación a baja temperatura y capacidad para reducir pérdidas por recombinación superficial [1]. No obstante, uno de los componentes críticos en estas celdas es el electrodo conductor transparente (TCE), cuya función consiste en permitir el paso de la radiación solar hacia la capa activa a la vez que conduce la corriente eléctrica generada. Actualmente, uno de los materiales más utilizados como TCE es el óxido de indio y estaño (ITO), debido a su perfecta combinación entre alta conductividad eléctrica y transmitancia óptica [2]. Sin embargo, la escasez y el elevado costo del indio limitan la expansión comercial de esta tecnología [3]. Esta problemática ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y económicamente viables. En este contexto, el grafeno se presenta con una alternativa atractiva gracias a sus propiedades eléctricas y ópticas destacables, así como su potencial para reducir costos de producción [4].

Bajo estas condiciones, no sólo es relevante identificar materiales alternativos, como el grafeno, sino que también desarrollar procesos completos que permitan su integración eficiente en dispositivos fotovoltaicos. Estos procesos deben garantizar que sus propiedades eléctricas y ópticas se mantengan íntegras desde la síntesis hasta su incorporación en la celda.

2. Antecedentes

2.1. Radiación solar

La radiación solar es la fuente de energía más utilizada por dispositivos fotovoltaicos y está compuesta por un espectro amplio de frecuencias, que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Chile destaca a nivel global por sus altos niveles de radiación solar, especialmente el norte, donde el Desierto de Atacama registra valores de irradiancia excepcionalmente altos (Figura 1) y estables a lo largo del año, lo que convierte a nuestro país en un escenario ideal para el desarrollo e implementación de dispositivos fotovoltaicos.

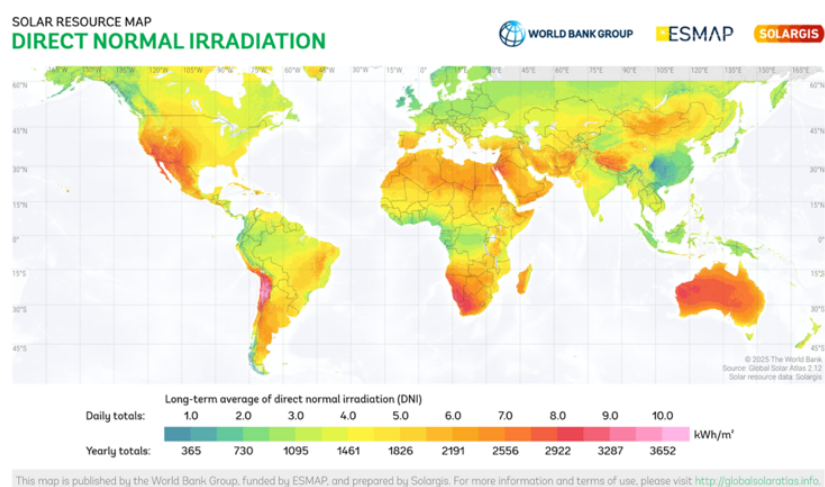


Figura 1: Mapa global de irradiancia normal directa. *Solar resource map* © 2021 Solargis [5].

Lo anterior representa una oportunidad para la transición energética en el país. La Figura 2 muestra que del total de energía generada en Chile durante diciembre del año 2024, aproximadamente el 47% provino de energías renovables no convencionales, y el 27,8% correspondió al recurso solar [6]. Este contexto no solo favorece la generación eléctrica, sino que también abre oportunidades a la investigación y la innovación en tecnologías fotovoltaicas orientadas a aprovechar al máximo las condiciones únicas del territorio.

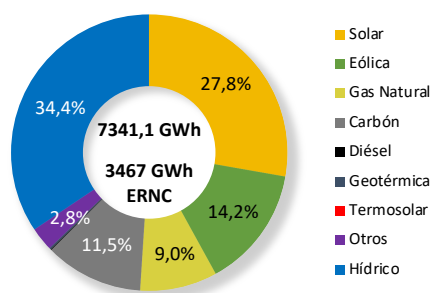


Figura 2: Generación de energía eléctrica en Chile, diciembre 2024 [6].

2.2. Principios básicos de dispositivos fotovoltaicos

2.2.1. Semiconductores y juntura np

La mayoría de los dispositivos fotovoltaicos se basan en materiales semiconductores, cuya capacidad para convertir energía solar en electricidad depende de su estructura de bandas. Esta estructura define dos regiones: la banda de valencia, donde se encuentran los electrones ligados, y la banda de conducción, donde los electrones son libres para moverse y conducir corriente eléctrica. La separación entre ambas bandas se denomina *bandgap* (E_G), y corresponde a la energía mínima requerida para que un electrón salte de la banda de valencia hacia la de conducción.

Cuando un fotón, cuya energía $h\nu \geq E_G$ incide sobre un material semiconductor, éste es absorbido por un electrón, que salta desde la banda de valencia a la banda de conducción, generando lo que conocemos como *par electrón-hueco*. El electrón queda libre para moverse en la banda de conducción y el hueco actúa como un portador de carga positivo en la banda de valencia, un esquema de esta transición puede observarse en la Figura 3.

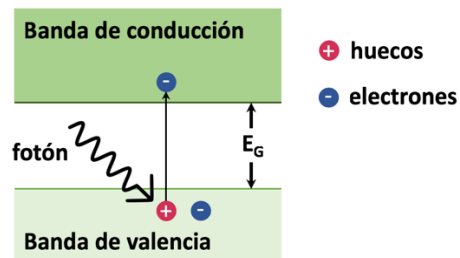


Figura 3: Esquema de la transición electrónica en un semiconductor tras la absorción de un fotón.

El *bandgap* determina qué fotones del espectro solar pueden ser aprovechados por el dispositivo, ya que, si bien el espectro solar es amplio, sólo aquellos que posean energía igual o mayor a E_G serán absorbidos por el material y lograrán la generación de energía. Es decir, semiconductores con *bandgap* distintos pueden aprovechar una parte distinta del espectro solar, lo cual influye directamente en la eficiencia del dispositivo.

Un material semiconductor intrínseco posee igual concentración de electrones y huecos, sin embargo, es posible modificar esta proporción mediante la incorporación de impurezas, proceso conocido como dopaje. Dependiendo del grupo atómico de los elementos utilizados como dopantes respecto del material base, se obtienen semiconductores de tipo n o p. La Figura 4b muestra los grupos de elementos en la tabla periódica según el tipo de dopaje y las Figuras 4a y 4c la estructura del material resultante para cada tipo de dopaje.

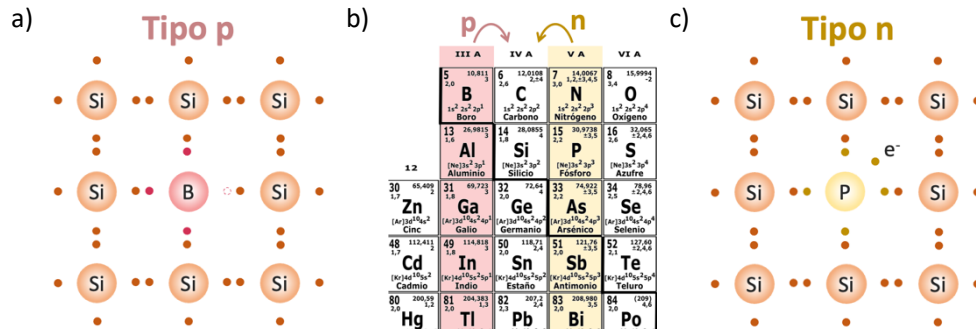


Figura 4: a) Estructura de un SC dopado de tipo p. b) extracto tabla periódica y grupos de elementos III A, IV A y V A. c) Estructura de un SC dopado de tipo n.

Se denomina juntura np a la unión de un semiconductor de tipo n con uno de tipo p. Al ponerse en contacto los semiconductores, los electrones mayoritarios del lado n difunden hacia el lado p, mientras que los huecos mayoritarios del lado p difunden hacia el lado n. Como consecuencia, se forma en la región cercana a la interfaz una zona en la que prácticamente no existen portadores de carga libres, denominada región de agotamiento. Esta región contiene iones donadores (*donors*) positivos fijos en el lado n y iones aceptores (*acceptors*) negativos fijos en el lado p. Un esquema de este proceso se muestra en la Figura 5. La juntura np es la estructura básica de una celda solar fotovoltaica.

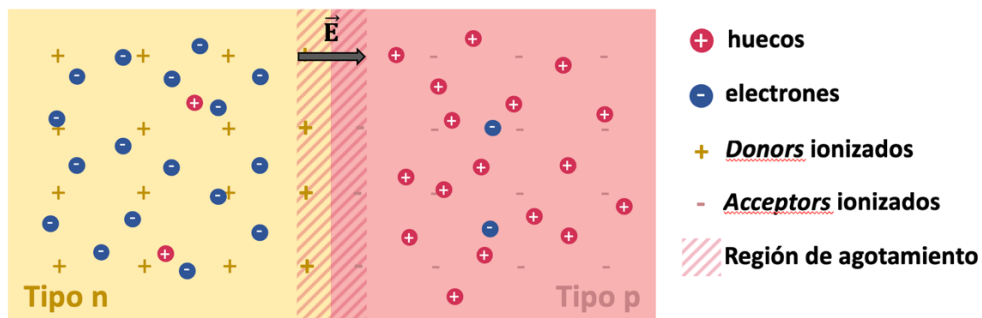


Figura 5: Esquema de una juntura np mostrando la región de agotamiento, el campo eléctrico interno (\vec{E}), portadores de carga mayoritarios y minoritarios y iones fijos (*donors* y *acceptors*).

2.2.2. Generación fotovoltaica

Una vez que el fotón incidente en la celda genera el par electrón-hueco, la región de agotamiento impulsa a los electrones hacia el lado n y a los huecos hacia el lado p generando una diferencia de potencial. Una vez cerrado el circuito los contactos eléctricos extraen los portadores y se produce una corriente eléctrica continua. El mecanismo de generación descrito puede observarse en la Figura 6, este mecanismo es la base del funcionamiento de una celda solar convencional de silicio de homojuntura.

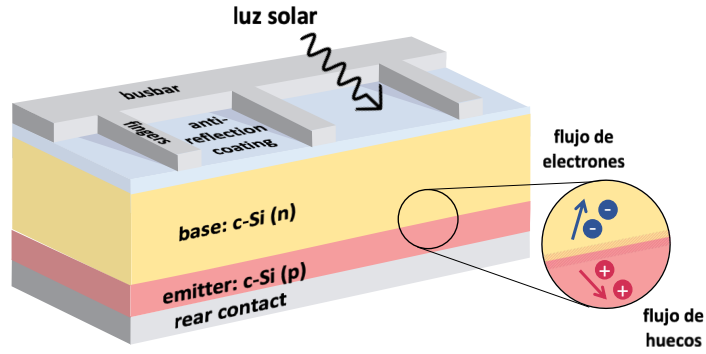


Figura 6: Estructura de una celda solar de silicio de homojuntura y esquema mecanismo de generación fotovoltaica.

Los pares electrón-hueco deben separarse antes de que estos puedan volver a juntarse, en un proceso denominado recombinación. La recombinación afecta directamente la eficiencia de una celda, puesto que, si muchos pares electrón-hueco se recombinan disminuye la disponibilidad de portadores de carga, reduciendo la corriente eléctrica generada por la celda.

2.3. Desempeño de celdas solares

Para evaluar el desempeño de una celda fotovoltaica se realiza una curva de corriente voltaje (curva IV) bajo iluminación estándar (AM1,5G, 1 sol). En ella se pueden identificar parámetros clave como la corriente de cortocircuito (I_{sc}), que corresponde al valor máximo de corriente cuando el voltaje es cero, y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), que es el máximo voltaje cuando la corriente en la celda decae a cero. Entre estos dos puntos se encuentra el punto de máxima potencia (P_{MP}), en el cual el producto de la corriente por el voltaje es máximo. Estos parámetros pueden verse representados en la curva IV de la Figura 7.

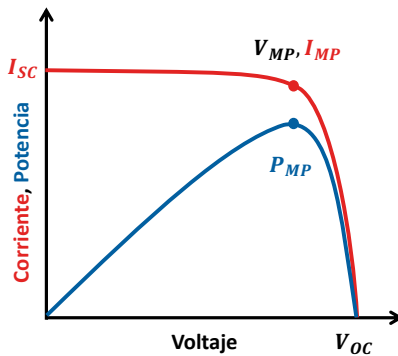


Figura 7: Curva IV y curva de potencia para una celda solar bajo iluminación estándar, mostrando puntos característicos I_{sc} , V_{oc} , P_{MP} .

El factor de llenado (FF) es un parámetro que cuantifica la cuadratura de la curva IV y se define como la razón entre la potencia del P_{MP} y el producto entre I_{SC} y V_{OC} , como se muestra en la ecuación (1).

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (1)$$

Un FF elevado indica que la celda se aproxima a un comportamiento ideal, mientras que valores bajos indican pérdidas internas de energía.

La forma de la curva depende de factores internos como la resistencia en serie (R_{SER}) y la resistencia shunt (R_{SHUNT}), así como de pérdidas ópticas. Un aumento en R_{SER} reduce la pendiente de la curva cerca de V_{OC} , mientras que una disminución en R_{SHUNT} aumenta la pendiente de la curva cerca de I_{SC} , ambos efectos se muestran en la Figura 8. Por otro lado, pérdidas ópticas disminuyen I_{SC} , ya que reducen la cantidad de fotones que alcanzan la capa activa de la celda, disminuyendo la generación de pares electrón-hueco. Estos efectos descritos reducen el área bajo la curva, que corresponde a la potencia entregada por la celda.

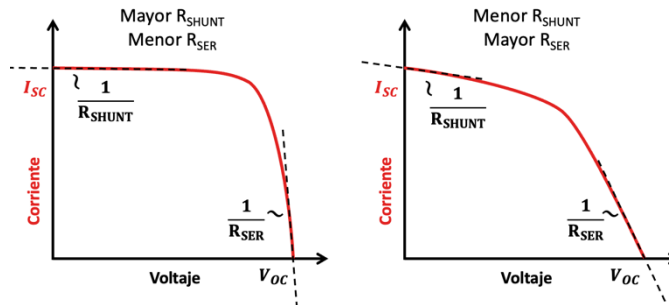


Figura 8: Comparación curvas IV con menor resistencia shunt y mayor resistencia en serie.

La eficiencia (η) de la celda es, en palabras sencillas, una medida de cuánta energía eléctrica útil puede generar a partir de la energía solar recibida, es decir, qué porcentaje de la radiación que incide sobre la celda se convierte efectivamente en electricidad. La eficiencia se puede calcular con cualquiera de las expresiones mostradas en la ecuación (2).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{P_{in}} = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2)$$

2.4. Celdas solares de silicio de heterojuntura

Una celda de silicio de heterojuntura (SHJ) se forma con una juntura np, pero ambos semiconductores dopados tienen distinta estructura, uno es cristalino y el otro es amorfo. La estructura de una celda SHJ se muestra en la Figura 9, y es descrita en detalle a continuación.

La capa activa de la celda SHJ consiste en una oblea de silicio cristalino sobre la cual se depositan capas delgadas de silicio amorfo intrínseco (i-a-Si:H), cuya finalidad es pasivar la superficie del silicio cristalino, reduciendo la recombinación superficial. Sobre estas capas se añade silicio amorfo dopado, de tipo n y p ($n+$ a-Si:H y $p+$ a-Si:H), que actúan como contactos selectivos de portadores de carga. La oblea base de silicio cristalino de tipo n y la capa de silicio amorfo de tipo p forman una heterojuntura np.

La ventaja de combinar silicio cristalino y silicio amorfo se basa en una propiedad ya mencionada, los distintos *bandgap* asociados a sus estructuras; 1,12 eV para el silicio cristalino y 1,7 eV para el amorfo. Así, la mayor parte de los pares electrón-hueco se generan en el silicio cristalino, que es capaz de absorber una fracción importante del espectro solar. Por su parte, el silicio amorfo, debido a su mayor *bandgap* y a su reducido espesor, contribuye de forma limitada a la generación de pares, desempeñando principalmente la función de pasivación y selectividad de portadores mencionada con anterioridad.

Para completar la estructura de la celda, sobre las capas de silicio amorfo dopado se incorporan electrodos conductores transparentes (TCE), debido a la baja conductividad eléctrica del silicio amorfo. El TCE debe presentar alta transmitancia óptica y baja resistividad, de modo que permita el paso de la luz solar hacia la capa activa de la celda y conduzca eficientemente los portadores de carga hacia los contactos metálicos depositados sobre él.

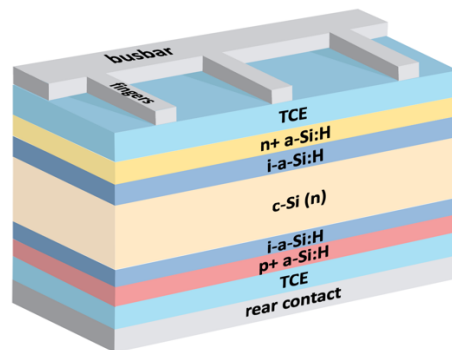


Figura 9: Estructura de celdas solares de silicio de heterojuntura utilizadas en este trabajo.

Además de los mecanismos de generación y separación de pares, el desempeño de una celda SHJ depende de la naturaleza del contacto eléctrico entre el semiconductor y los TCE. Dependiendo de la alineación energética entre el TCE y el semiconductor, el contacto puede comportarse como un contacto óhmico o dar lugar a la formación de una juntura Schottky. En un contacto óhmico ideal, no existe una barrera significativa para el transporte de portadores de carga mayoritarios, lo que permite una conducción eficiente. Por el contrario, una juntura Schottky se caracteriza por la aparición de una barrera de potencial en la interfaz, cuya altura depende de la función trabajo del electrodo y de las propiedades electrónicas del semiconductor, tales como su afinidad electrónica, nivel de dopaje y la presencia de estados interfaciales [7].

La presencia de una barrera Schottky modifica el transporte de carga a través de la interfaz, pudiendo limitar la corriente extraída del dispositivo. Una barrera mal optimizada puede incrementar la resistencia de contacto, lo que reduce la corriente de salida, afectando parámetros clave como I_{SC} , R_{SER} y, en consecuencia, FF y η [8]. Sin embargo, una optimización adecuada puede ser aprovechada para inducir campos internos que contribuyan a la separación y recolección de portadores .

Por lo tanto, la presencia o ausencia de barreras de este tipo no es una propiedad exclusivamente intrínseca del material del TCE, sino una consecuencia de la correcta ingeniería de contactos eléctricos y de alineación energética en las interfaces de estos materiales. Este aspecto es fundamental para el diseño de dispositivos fotovoltaicos, especialmente si para ello se emplean materiales o arquitecturas no convencionales.

La eficiencia de una celda solar de silicio de heterojuntura depende entonces de parámetros eléctricos y ópticos que interactúan de manera compleja en su estructura. Las pérdidas ópticas comprenden fenómenos de reflexión y absorción en el TCE y sombreado por *fingers* y *busbar*. La transmitancia óptica del TCE es un parámetro clave para minimizar estas pérdidas, transmitancias elevadas son esenciales para maximizar la absorción de fotones y garantizar una conversión de energía eficiente. R_{SER} proviene principalmente del TCE, las capas dopadas y los contactos metálicos, desde el punto de vista teórico, una alta R_{SER} produce una disminución en el factor de llenado y la eficiencia [8].

En este contexto, el impacto del TCE en el desempeño de la celda es clave, éste debe mantener un equilibrio óptimo entre alta transparencia y conductividad. Materiales como el ITO logran este balance, mientras que alternativas como el grafeno requieren optimización para alcanzar propiedades comparables.

Como ya ha sido mencionado R_{SER} depende, entre otros parámetros, de la interacción en la interfaz entre el TCE y los contactos metálicos incorporados sobre él, y del transporte lateral de corriente en el TCE a través de la resistencia de hoja. Por lo tanto se busca que: el TCE tenga baja resistencia de hoja y que la resistencia de contacto entre el TCE y el metalizado de la celda sea pequeña. A continuación se describen estos parámetros y algunas técnicas para su obtención.

2.4.1. Propiedades eléctricas de los materiales

Resistencia de hoja

La resistencia de hoja (R_{SH}) de una película delgada es una medida de su resistencia eléctrica independiente de su tamaño lateral, R_{SH} está definida como la resistencia entre dos lados opuestos de un cuadrado de material [7]. La resistencia de hoja es el parámetro fundamental para describir el transporte lateral de corriente en capas delgadas como el ITO en aplicaciones fotovoltaicas, metales finos y TCOs . Para materiales como el grafeno, esta definición cobra mayor importancia, ya que el transporte electrónico está confinado al

plano, al ser éste un material bidimensional. Es posible determinar la resistencia de hoja mediante diversos métodos, el escogido para este trabajo son mediciones de efecto Hall, se entrega mayor información sobre estas mediciones en la sección metodológica.

Resistencia de contacto

La resistencia de contacto es la contribución resistiva asociada a la interfaz entre un electrodo metálico y un material conductor o semiconductor, esta limita la inyección y extracción de corriente debido a barreras de potencial, desajuste de bandas y defectos interfaciales [7].

Es posible cuantificar esta resistencia mediante el método de longitud de transferencia (TLM por sus siglas en inglés: *Transfer Length Method*). Este método es una técnica ampliamente utilizada para la caracterización eléctrica de materiales conductores delgados y para la determinación de la resistividad de contacto entre un material semiconductor o semimetálico y contactos metálicos sobre él. Se basa en la medición de la resistencia eléctrica total (R_T) entre pares de contactos metálicos separados por diferentes distancias L . En el modelo clásico de TLM, R_T medida entre dos contactos corresponde a la suma de la contribución de la resistencia de cada contacto (R_C) y la contribución de la resistencia de hoja del material R_{SH} [7], un esquema simplificado de la medición se muestra en la Figura 10a. Esta relación puede expresarse como una función lineal de L , ya que al aumentar la separación de los contactos, aumenta R_T debido a la mayor contribución del material dada su resistencia de hoja. La relación lineal entre R_T y L es representada por la ecuación (3), que corresponde a un ajuste lineal de la gráfica mostrada en la Figura 10b.

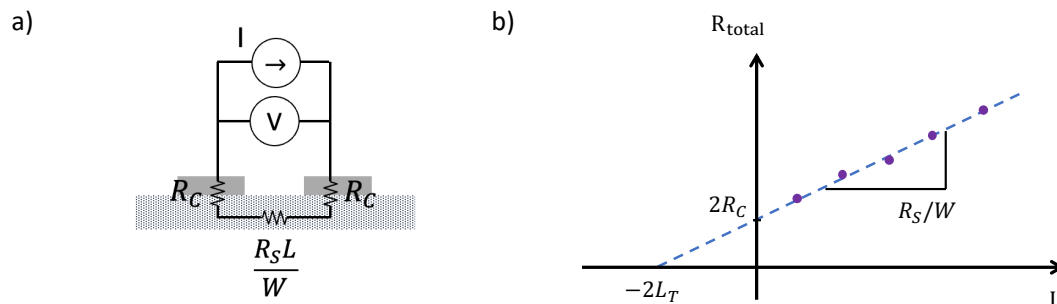


Figura 10: a) Esquema simplificado de la medición con parámetros involucrados, b) Ajuste de curva R_T en función de L .

$$R_T = 2R_C + \frac{R_{SH}}{W} L \quad (3)$$

La pendiente del ajuste lineal de R_T en función de L permite determinar R_{SH} , mientras que el intercepto con el eje vertical permite extraer la resistencia de contacto. A partir de estas dos cantidades es posible valorar la longitud de transferencia L_T , parámetro que describe cómo la corriente se distribuye entre el contacto metálico y la película debajo del mismo.

L_T corresponde a la mitad del valor absoluto del intercepto del ajuste con el eje horizontal, y puede calcularse en función de su pendiente e intercepto como muestra la ecuación (4).

$$L_T = \frac{R_C W}{R_{SH}} \quad (4)$$

La resistividad específica de contacto es extraída siguiendo los supuestos clásicos del modelo y considerando las recomendaciones de estandarización reportadas por Grover *et al.* [9]. En función del valor obtenido para L_T se aplica una expresión para la estimación de ρ_C , en el que se consideran dos aproximaciones:

Límite corto de corriente: cuando se cumple que $a < 0,5 L_T$ se considera que el contacto no es suficientemente largo y entonces la corriente depende de la geometría del contacto, por lo tanto, la resistividad de contacto se estima con (5).

$$\rho_C = R_C W a \quad (5)$$

Límite largo de corriente: cuando se cumple que $a > 1,5 L_T$ el contacto es óptimo, la corriente pasa casi toda cerca del borde del contacto, por lo que la geometría ya no es lo más importante, la resistividad de contacto se estima con (6).

$$\rho_C = R_C W L_T \quad (6)$$

La caracterización de la resistencia de hoja del TCE, así como la resistencia y resistividad de contacto entre el TCE y los contactos metálicos, es un aspecto clave en el desarrollo de este trabajo, ya que se estudia el efecto de estos parámetros en el desempeño de celdas solares que emplean grafeno como TCE.

3. Estado del Arte

3.1. Tecnologías fotovoltaicas

En la evolución de tecnologías fotovoltaicas, las celdas solares basadas en silicio cristalino representan arquitecturas con altas eficiencias que ocupan (al 2024) el 98% del mercado solar global [10]. En esta línea, las celdas de homojuntura PERC y TOPcon concentran la mayor parte del mercado. Por su parte las celdas solares de silicio de heterojuntura (SHJ) tienen una participación minoritaria, con una tendencia de crecimiento acelerado que confirma que, aunque este tipo de celdas no es dominante, su combinación de alta eficiencia, procesos de baja temperatura y pasivación efectiva, la posicionan como una de las tres tecnologías clave para la transición hacia módulos solares de alta eficiencia. La estructura de estas celdas permite alcanzar voltajes de circuito abierto de 750 mV y factores de llenado (FF) cercanos al 86%, superando a las tecnologías mayoritarias. Reportes recientes muestran que las celdas SHJ alcanza eficiencias de hasta 26,8%, mientras que TOPcon y PERC alcanzan 26,4% y 25% respectivamente [11]. Estas características consolidan a las celdas SHJ como una tecnología prometedora y también la convierten en una alternativa ideal para integrar en ella soluciones innovadoras capaces de potenciar su desempeño.

3.2. Materiales utilizados como electrodo conductor transparente

Existe un subgrupo de materiales utilizados convencionalmente como TCE, los óxidos conductores transparentes (TCO) dentro de los cuales destacan el óxido de indio y estaño (ITO), óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) y óxido de estaño dopado con fluor (FTO). Estos materiales poseen alto *bandgap* garantizando alta transparencia óptica para el espectro visible [12].

El ITO es, el TCO más utilizado a nivel global. Este material combina transmitancias de ~80-90% en el espectro visible, con resistividades del orden de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ en capas optimizadas por sputtering [13]. Estas propiedades explican su predominio industrial y su papel como TCO de referencia en celdas SHJ. Aun así, presenta limitaciones que motivan su sustitución, como la escasez y costo del indio y su fragilidad mecánica [3], [14].

El AZO ofrece una transmitancia superior al 80% y resistividad competitiva $\sim 10^{-5} - 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ cuando se optimizan tanto el proceso de deposición como el dopaje. Además, es menos escaso y más económico que el ITO, aunque su rendimiento óptico y eléctrico depende en gran parte del control de defectos y de la uniformidad del dopaje [15]. El FTO, por su parte, ofrece transmitancias en el rango 70-80% y conductividad eléctrica inferior a la del ITO; sin embargo, destaca por su mayor estabilidad térmica y química y su robustez mecánica, lo que lo hace adecuado en entornos más exigentes [15]. Finalmente, el uso de apilamientos

híbridos de estos óxidos ha permitido reducir el consumo de indio con pérdidas de eficiencia menores, lo que respalda su viabilidad para la industria [16].

3.3. Grafeno como electrodo conductor transparente

Materiales como el ITO alcanzan una combinación favorable entre conductividad eléctrica y transmitancia óptica, sin embargo alternativas como el grafeno requieren estrategias de optimización para lograr propiedades comparables en aplicaciones fotovoltaicas.

3.3.1. Síntesis y transferencia de grafeno

La síntesis y transferencia del grafeno son determinantes para el desempeño final del material. Entre los métodos disponibles, la producción de grafeno puede abordarse mediante rutas *top-down* como exfoliación mecánica, reducción de óxido de grafito, o *bottom-up* como crecimiento epitaxial o deposición química en fase de vapor CVD.

Aunque las técnicas *top-down* ofrecen grafeno de alta calidad estructural, presentan limitaciones en escalabilidad y control de número de capas, lo que restringe su aplicación industrial. Por el contrario, el crecimiento de grafeno CVD sobre cobre es el método más extendido y el más adecuado para aplicaciones a gran escala. La posibilidad de ajustar parámetros críticos como temperatura, presión y pureza del precursor permite controlar el tamaño de grano, la densidad de defectos y el espesor de la capa [17], [18], [19]. Como ejemplo, la Figura 11 presenta la variación en la calidad estructural del grafeno en función de la temperatura del proceso de síntesis. Se observa que mientras mayor es la temperatura, la banda D, asociada a defectos, disminuye su intensidad y el cociente entre la intensidad de las bandas 2D y G es cada vez mayor evidenciando la formación de monocapas de grafeno. Estos parámetros mejoran la conductividad eléctrica y garantizan mayor uniformidad del material, aspectos claves para aplicaciones fotovoltaicas, ya que defectos estructurales incrementan la resistividad del grafeno y reducen su transmitancia óptica [20].

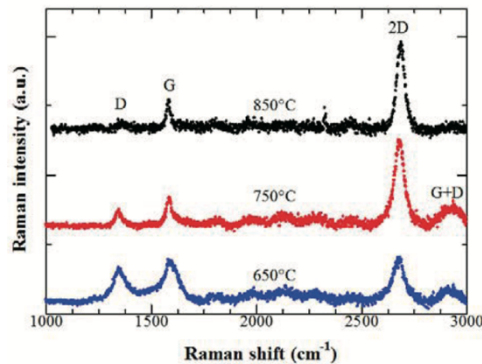


Figura 11: Espectro Raman de muestras de grafeno crecidas a diferente temperatura [19].

La transferencia al sustrato debe ser un proceso que minimice residuos poliméricos con el objetivo tanto de preservar las propiedades eléctricas y ópticas como de reducir la rugosidad y mejorar la adhesión al sustrato. En este sentido, métodos alternativos como la transferencia libre de polímeros han demostrado mejorar la limpieza superficial y recuperar propiedades cercanas al grafeno prístino [21].

Finalmente, la escalabilidad industrial de este material exige control reproducible de los procesos de síntesis y transferencia, ya que la variabilidad de la calidad cristalina y limpieza superficial siguen siendo el principal desafío para preservar sus propiedades.

3.3.2. Contactos metálicos en grafeno

La interacción entre grafeno y contactos metálicos es fundamental para garantizar una adecuada colección de carga y minimizar pérdidas resistivas en dispositivos fotovoltaicos. La formación de contactos metálicos afecta parámetros relevantes como la resistencia de contacto y por lo tanto el desempeño del dispositivo final [22], [23].

Diversos estudios han investigado la influencia del metal de contacto sobre la resistencia de contacto normalizada por ancho (R_cW). En particular, se ha reportado una comparación sistemática entre distintos metales como Ti, Ag, Cr, Fe, Co, Ni y Pd, mostrando que R_cW presenta una variación de varios órdenes de magnitud dependiendo del metal utilizado y de su función trabajo (Figura 12) [24]. Para la mayoría de los metales, los valores medidos se sitúan típicamente en el rango de 10^2 - $10^4 \Omega \cdot \mu\text{m}$, con una dispersión significativa atribuida a variaciones en el proceso de fabricación y en la calidad de la interfaz metal-grafeno.

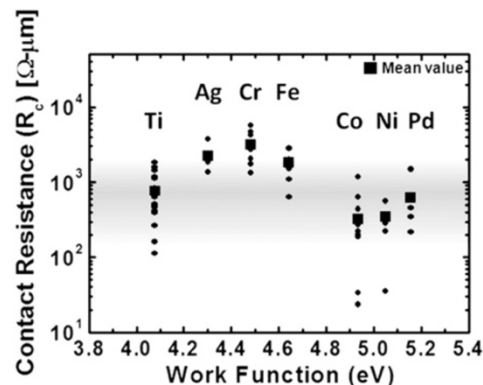


Figura 12: Resistencia de contacto normalizada en función de la función trabajo de distintos metales [24].

Dentro de este contexto, la plata ha sido menos explorada que otros metales, pero presenta un interés particular debido a su alta conductividad. Anzi *et al.* [25] reportaron valores de R_cW para distintos metales y combinaciones de metales, tales como Au, Pd/Au, Ni/Au, Ag, Au/Al, Ni/Al, los resultados de estas mediciones con el respectivo espesor del metal se encuentran en la Figura 13. En específico, los autores reportaron valores de $R_cW \sim 900 \Omega \cdot \mu\text{m}$ para contactos de 100 nm de plata sobre grafeno crecido por CVD, medidos mediante el método TLM. La elección de la plata pura considera el hecho de que este metal posee

baja resistividad, sin embargo, el resultado obtenido para $R_c W$ es alto lo que anula la ventaja que tiene la plata por sobre otros metales. Estos resultados evidencian que, incluso para metales más nobles, la resistencia de contacto puede ser elevada cuando existe baja densidad de portadores de carga. Cabe destacar que la mayoría de los valores reportados en la literatura para la interfaz Ag/Gr corresponden a mediciones realizadas en el punto de Dirac, condición que representa un caso límite de mínima densidad de portadores de carga. En ese sentido, estos valores sólo serán considerados como referencia indicativas, debido a las diferencias en las condiciones experimentales.

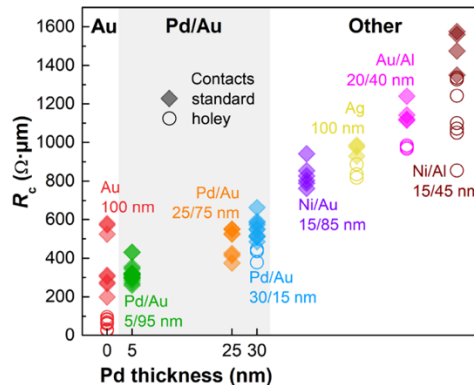


Figura 13: Resistencia de contacto normalizada para distintos metales y combinaciones de metales en función de su espesor [25].

El trabajo de Fernández *et al.* [26] revela resistividades altas (del orden de $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$) en contactos de 200 nm de aluminio sobre grafeno, con cuarzo como sustrato, además de una dispersión significativa. La propia autora atribuye esta degradación a que el aluminio puede difundir hacia el grafeno, formando otros compuestos y afectando el orden estructural del material, lo que se refleja en un deterioro de su resistencia de hoja y mala calidad del contacto. En este contexto, los autores también reportan que la resistividad de contacto mejora drásticamente al combinar 20 nm de Ni con 200 nm de Al, y 20 nm de Ti con 200 nm de Ag, reduciendo su valor en al menos dos órdenes de magnitud.

Por otro lado, el transporte electrónico en grafeno es altamente sensible al entorno, incluyendo el sustrato y los contactos metálicos, lo que puede dar lugar a inhomogeneidades de potencial eléctrico y variaciones en la densidad de portadores de carga a lo largo del material [27], [28], [29]. Nouchi *et al.* [28] reportan mediciones TLM en dispositivos de grafeno con intercepto negativo, fenómeno atribuido al dopaje inducido sobre el grafeno por los contactos metálicos. Giovanetti *et al.* [27] demostraron teóricamente que los materiales en contacto con grafeno inducen en él un dopaje local debido a la transferencia de carga asociada al alineamiento de los niveles de Fermi, modificando la densidad de portadores en la región bajo el contacto. La combinación de estos efectos provoca que parte de la caída de potencial no ocurra en el contacto mismo, sino en la región comprendida entre los contactos o *canal*, lo que en algunos casos invalida los supuestos del método TLM convencional.

3.3.3. Integración de grafeno como electrodo conductor transparente en celdas de silicio de heterojuntura

Interfaz grafeno/a-Si:H

A pesar de sus ventajas ópticas y químicas, la integración de grafeno como TCE en celdas SHJ presenta desafíos principalmente asociados a la interfaz Gr/a-Si:H dopado.

Existen numerosos trabajos que demuestran la formación de juntas Schottky bien definidas en interfaces Gr/c-Si(n), a partir de mediciones eléctricas. Li *et al.* [30] demostraron experimentalmente la operación de celdas solares basadas en una junta Schottky Gr/c-Si(n), mientras que trabajos posteriores han consolidado este enfoque y analizado la influencia del dopaje del grafeno y de la alineación energética en la altura de la barrera [31]. Por otro lado, Chen *et al.* [32] observaron una barrera Schottky bien definida en diodos Gr/c-Si(n). Estos resultados sugieren que, en estructuras Gr/a-Si:H empleadas en celdas SHJ, un desalineamiento energético similar podría contribuir a la resistencia de contacto sin una optimización adecuada.

Rol del óxido interfacial en dispositivos grafeno/silicio

Un aspecto clave en dispositivos que poseen una interfaz Gr/Si es la función que cumple la capa de óxido formada sobre el silicio previo a la transferencia del grafeno. En este contexto, Song *et al.* [33] realizaron un estudio del efecto del óxido de silicio nativo en celdas solares tipo Schottky *junction* con una interfaz Gr/n-Si, demostrando que la presencia de óxido interfacial induce una distorsión característica, denominada *S-kink*, en las curvas IV bajo iluminación. La distorsión *S-kink* se puede describir como un cambio en la concavidad de la curva, respecto de una curva IV ideal, en especial en torno al punto del voltaje de circuito abierto. Este efecto está asociado a una degradación importante en el factor de llenado (FF). Las curvas IV para distintos espesores de SiO₂, medidas y generadas a través de un modelo, se muestran en las Figuras 12a y 12b respectivamente.

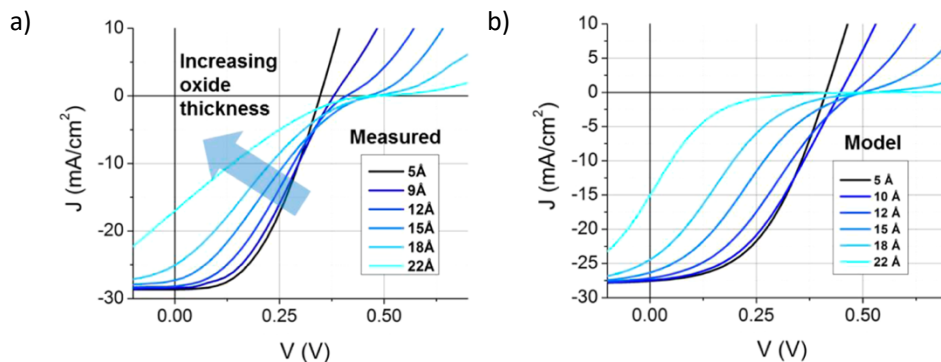


Figura 14: a) Curvas IV características para dispositivos Gr/n-Si con espesor de SiO₂ variable, b) curvas IV generadas por modelo [33].

Los autores atribuyen este comportamiento a la competencia entre el transporte de huecos por tunelamiento a través del óxido y la recombinación interfacial, que se intensifica a medida que aumenta el espesor de la capa de óxido. Este trabajo presenta resultados relevantes para interpretar resultados experimentales de curvas IV en celdas con interfaz Gr/Si.

Estrategias de optimización del grafeno como TCE

En el estudio de TCE para aplicaciones fotovoltaicas se deben establecer metas críticas en cuanto a transmitancia óptica y conductividad: transmitancia óptica mayor al 90% para una mayor absorción de la capa activa y resistencia de hoja $R_s \sim 10 \Omega/\text{sq}$ para reducir las pérdidas óhmicas [34]. Estos parámetros determinan la viabilidad de su sustitución y su potencial para la industria. Diversas investigaciones han demostrado la viabilidad de integrar grafeno como TCE en celdas SHJ, gracias a su alta movilidad electrónica, transmitancia óptica y flexibilidad mecánica [4], características que lo diferencian de los TCO convencionales.

En esta línea, trabajos recientes con electrodos híbridos (grafeno/TCO) muestran mejoras eléctricas y ópticas al combinar ITO con configuraciones de una a tres monocapas de grafeno. Fernández *et al.* [35] reportaron que el apilamiento de tres monocapas de grafeno sobre 80 nm de ITO logró una resistencia de hoja de $55 \Omega/\text{sq}$ indicando ganancias en conductividad. De forma consistente, Torres *et al.* [36] observaron que una monocapa de grafeno combinada con 80 nm de ITO reduce la resistencia de hoja y por lo tanto la resistencia en serie. De esta forma se incrementa el factor de llenado de la celda como se observa en la Figura 14. En la tabla inserta en la misma Figura se observa un aumento de 0,3 puntos porcentuales en la eficiencia de la celda bajo la configuración descrita.

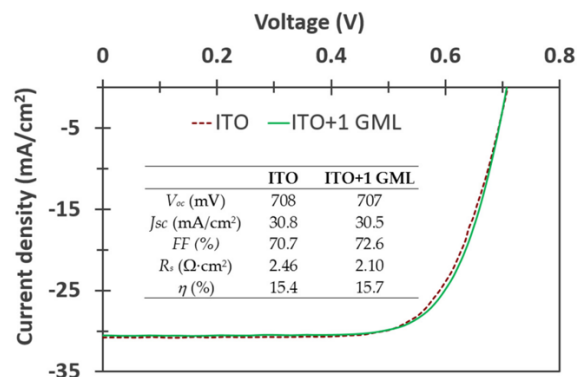


Figura 15: Curva IV de celda SHJ con ITO y combinación de ITO + monocapa de grafeno como TCE bajo iluminación estándar, se muestran parámetros característicos [36].

Respecto a la mejora de la conductividad del grafeno, Lancellotti *et al.* [37] reportan que el apilamiento de varias capas de grafeno reducen significativamente su resistencia de hoja sin comprometer significativamente su transmitancia. En la Figura 15a podemos observar que, si bien la transmitancia del grafeno disminuye al apilar capas, toda la curva generada para 5 capas de grafeno se mantiene por sobre el espectro de transmitancia de la capa de

80 nm de AZO, que es el espesor típico utilizado en celdas SHJ. En este trabajo reportaron los parámetros fotovoltaicos de celdas SHJ con 4 y 5 capas de grafeno sobre el lado p de la celda (p-nc-Si:H) y con contactos de aluminio. La Figura 15b muestra la estructura de la celda estudiada, la Figura 15c las curvas IV generadas comparadas con la celda con AZO. Los parámetros fotovoltaicos obtenidos se resumen en la Figura 15d. Las celdas con 5 capas de grafeno tuvieron un desempeño ligeramente mayor que aquellas con 4, pero inferior a las celdas con AZO, lo que respalda el potencial del grafeno para sustituir al AZO y la necesidad de una correcta optimización.

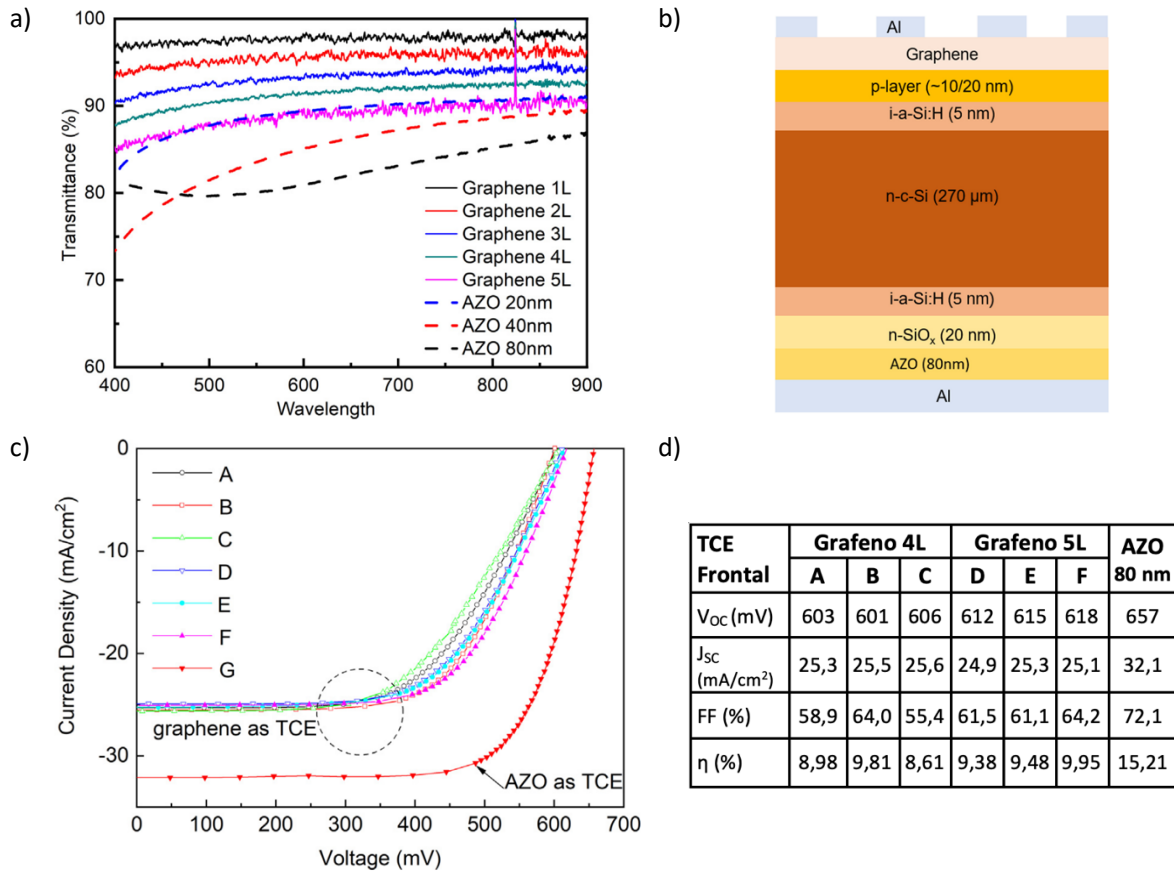


Figura 16: a) Espectro de transmitancia de películas de grafeno con distinto número de capas y AZO de tres espesores distintos, b) estructura de celda solar con grafeno utilizada, c) curvas IV para celdas SHJ con 4 y 5 capas de grafeno, sobre p-nc-Si:H, y celda con AZO, d) parámetros fotovoltaicos [37].

Adicionalmente, en el trabajo de Lancellotti *et al.* [37] estudiaron el efecto de la interacción de 5 capas de grafeno con distintos emisores dopados de tipo p (p-a-Si:H, p-nc-Si:H y p-nc-SiO_x) en el desempeño de celdas SHJ. Las curvas IV obtenidas se muestran en la Figura 17a, la Figura 17b resume los parámetros fotovoltaicos. De estos resultados se puede extraer que el desempeño de las celdas es considerablemente con silicio nanocrystalino como emisor, en comparación con el silicio amorfo. Los autores especulan que esto podría deberse a una adhesión inadecuada del grafeno al emisor de silicio amorfo ya que su superficie es totalmente plana en comparación con el nanocrystalino que posee una

superficie nanorugosa en la que el grafeno puede adherirse mejor. A esto se suma la mayor densidad de defectos del silicio amorfo, que afecta la movilidad de los portadores de carga.

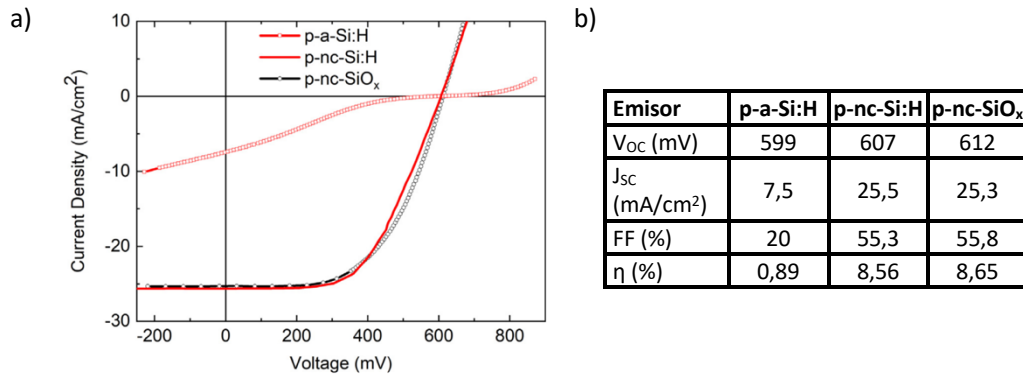


Figura 17: Curvas IV para celdas SHJ con 5 capas de grafeno, sobre p+ a-Si:H, y celda con AZO, b) Parámetros fotovoltaicos [37].

Como otra alternativa de optimización, el trabajo de Li *et al.* [38] muestra que combinaciones de grafeno con rejillas metálicas ultrafinas o nanohilos de plata permiten alcanzar R_s cercanos a $27 \Omega/\text{sq}$ con transmitancia óptica superior al 80%. Desde otra perspectiva, el dopaje químico también permite reducir R_s manteniendo alta transmitancia. Por ejemplo, el dopaje con trifluorometanosulfonimida (TFSA) demostró disminuciones de R_s comparables al ITO, manteniendo transparencia y aumentando la densidad de portadores de carga en dispositivos fotovoltaicos. Esto incrementa la corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto y factor de llenado [39]. Por su parte, Metha *et al.* [40] indican que es posible reducir R_s del grafeno si se dopa con materiales como HNO₃, MoO₃ y SOCl₂. En esta línea, el desafío es la estabilidad del dopaje, ya que puede degradarse por reacciones ambientales.

Aunque el grafeno aún no iguala el desempeño de TCE convencionales en términos de R_s y T simultáneamente, su potencial radica en su flexibilidad, su procesabilidad a baja temperatura y la ausencia de elementos críticos como el indio en su estructura. Por lo tanto, es un candidato estratégico para tecnologías fotovoltaicas emergentes si se optimiza correctamente.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es evaluar el potencial del grafeno como electrodo conductor transparente en celdas solares de silicio de heterojuntura mediante su caracterización eléctrica e integración en celdas solares para comparar su desempeño con electrodos convencionales como el ITO.

4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar procesos de síntesis y transferencia de grafeno para obtener láminas de alta calidad estructural, con áreas del orden de centímetros, minimizando residuos y defectos.
2. Determinar las propiedades estructurales del grafeno transferido mediante espectroscopía Raman y microscopía electrónica de barrido.
3. Determinar la resistencia de contacto entre contactos de plata y grafeno, la resistencia de hoja y la movilidad del grafeno a partir del método de longitud de transferencia y mediciones de efecto Hall, y compararlos con óxido de indio y estaño.
4. Evaluar el desempeño de celdas solares de silicio de heterojuntura con grafeno como electrodo conductor transparente en comparación con óxido de indio y estaño, mediante curvas voltaje-corriente medidas en condiciones estándar.

5. Metodología

Con el objetivo de sintetizar películas de grafeno de alta calidad estructural, para luego evaluar su desempeño en aplicaciones fotovoltaicas, se desarrolló un conjunto de procedimientos experimentales que contemplan la síntesis, transferencia y caracterización del material. La metodología planteada se basa en técnicas ampliamente utilizadas en la literatura y adaptadas para garantizar la limpieza del sustrato, la integridad de las películas de grafeno y confiabilidad de las mediciones eléctricas. En primer lugar, se describe el proceso de crecimiento de láminas de grafeno mediante deposición química en fase de vapor (CVD), seguido de la transferencia de las películas a sustratos escogidos. Luego se detallan las técnicas de caracterización, tanto estructural como eléctrica, que incluyen espectroscopía Raman, y mediciones de resistencia eléctrica de contacto y de hoja, y movilidad, mediante los métodos de longitud de transferencia (TLM) y mediciones de efecto Hall. Finalmente la evaluación del desempeño fotovoltaico de celdas solares con grafeno a partir de curvas corriente-voltaje (Curvas IV) bajo condiciones estándar de iluminación.

5.1. Síntesis de grafeno

Las películas de grafeno fueron sintetizadas mediante deposición química en fase de vapor (CVD por sus siglas en inglés: *Chemical Vapor Deposition*), usando cobre como sustrato, a 970°C en un ambiente controlado de hidrógeno (H_2) y con metano (CH_4) como principal reactor, alternado con ciclos de plasma de hidrógeno. La presión aproximada dentro del horno durante el proceso fue $\sim 10^{-2}$ hPa. El sustrato fue introducido dentro de un tubo de cuarzo, que sirve como soporte, y posicionado dentro del horno CVD. Un esquema simplificado del montaje se observa en la Figura 18, el tubo fue posicionado en el centro del horno para asegurar uniformidad térmica en el sustrato.

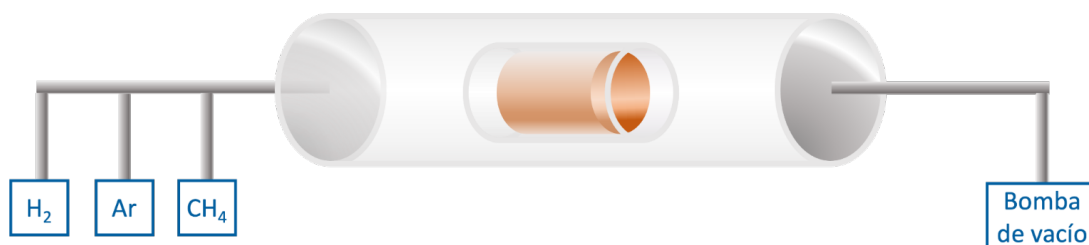


Figura 18: Disposición del tubo de cuarzo en horno CVD para el crecimiento de grafeno.

Durante el recocido térmico el hidrógeno elimina la capa de óxido de la superficie del metal, favoreciendo la limpieza y cristalización del sustrato, proceso que permitirá el crecimiento ordenado de grafeno. Durante el crecimiento, el H_2 se separa en átomos que ayudan a romper los enlaces del CH_4 , generando radicales libres de carbono, que se unen al sustrato y forman el grafeno.

5.2. Transferencia de grafeno

Una vez sintetizadas las películas de grafeno, el siguiente paso consiste en transferirlas al sustrato deseado para su caracterización y aplicación. El proceso de transferencia se realizó mediante un método húmedo libre de polímeros. Este procedimiento evita residuos de polímeros en las muestras, ya que estos podrían afectar la conductividad del material.

El primer paso de la transferencia consistió en posicionar un rectángulo de cobre, con grafeno crecido sobre él, sobre una solución de ácido nítrico, con el objetivo de retirar residuos de óxido de grafeno de la superficie posterior del cobre. Luego, se dejó flotar en una solución de nitrato férrico hasta que el cobre se degradada por completo, como resultado de este paso de la transferencia se obtienen láminas de grafeno flotando en agua destilada. Luego, las láminas de grafeno fueron lavadas en agua destilada, el último paso, para retirar por completo residuos de nitrato férrico, fue hacer flotar la película de grafeno sobre una solución de ácido clorhídrico. Finalmente la película fue transferida al sustrato escogido, posicionándolo lentamente sobre ella. Un esquema del proceso de transferencia es mostrado en la Figura 19.

Los sustratos utilizados fueron obleas de silicio dopadas de tipo n con una película de 285 nm de óxido de silicio (SiO_2), para evaluar la calidad del grafeno; y celdas solares de silicio de heterojuntura incompletas, con el objetivo de valorar el desempeño de las mismas y compararlo con el de celdas completadas con ITO, para esto el grafeno es transferido sobre el *front surface field* de las celdas, es decir, sobre la capa de silicio amorfo dopado de tipo n de la celda (n^+ a-Si:H).

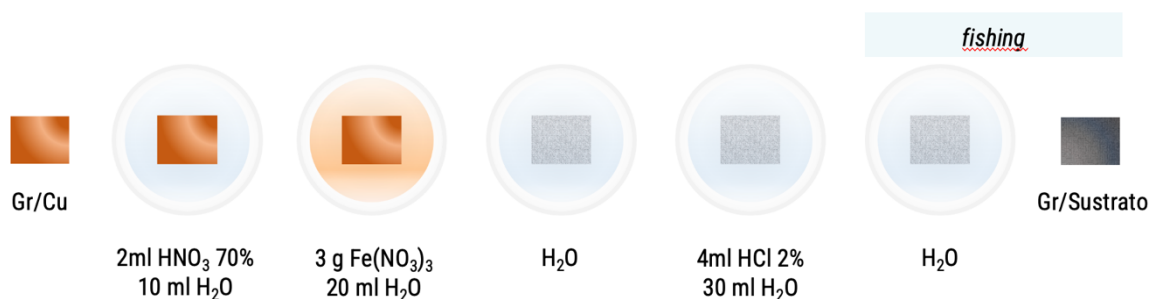


Figura 19: Esquema del proceso de transferencia de grafeno.

5.3. Caracterización de muestras

5.3.1. Caracterización estructural

Espectroscopía Raman

Para evaluar las propiedades estructurales de las muestras de grafeno se utilizó espectroscopía Raman. La espectroscopía Raman se basa en la dispersión inelástica de la luz cuando un haz de radiación electromagnética interactúa con la muestra, las

modificaciones del haz permiten obtener información sobre la estructura de la muestra. El espectro Raman permite identificar principalmente: número de capas y presencia de defectos. Este tipo de espectroscopía constituye una herramienta no invasiva y de gran sensibilidad para caracterizar estructuralmente nuestras muestras, tanto para verificar que el grafeno efectivamente creció sobre el sustrato durante el proceso de síntesis, como para evaluar la calidad estructural luego de transferido.

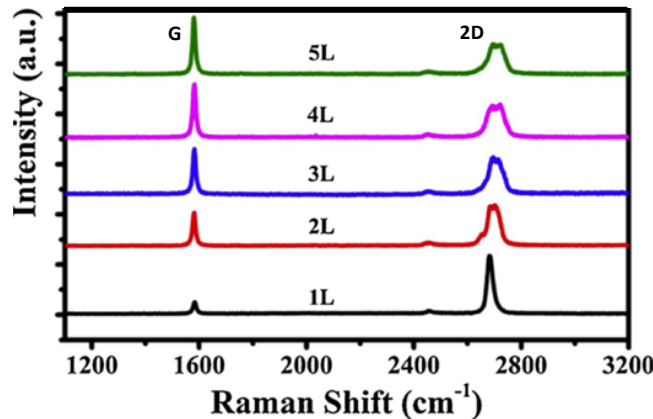


Figura 20: Espectro Raman para distinto número de capas de grafeno sobre SiO₂/Si. Adaptado de [41].

Como se observa en la Figura 20, es posible determinar el número de capas de muestras de grafeno transferidas sobre óxido de silicio si analizamos el cociente entre las intensidades de los *peaks* característicos G $\sim 1580\text{ cm}^{-1}$ y 2D $\sim 2700\text{ cm}^{-1}$ [41]. Se considera que, si $I_{2D}/I_G > 2$ la muestra posee una capa, si $1 < I_{2D}/I_G < 2$, la muestra es de dos capas y si $I_{2D}/I_G > 1$, la muestra es de 3 capas o más [41], [42].

Adicionalmente, es de gran interés la presencia del peak D en el espectro Raman del grafeno $\sim 1350\text{ cm}^{-1}$, que representa los defectos, una baja intensidad en este peak será indicador de baja presencia de defectos en la muestra.

Se utilizó para este análisis un equipo RENISHAW inVia Raman Microscope acoplado a un microscopio óptico Leica DM 2500M Ren. Las mediciones se efectuaron en el rango de $1000\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$, empleando un láser de 532 nm, con una potencia al 5%.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología superficial y la uniformidad de las capas de grafeno fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Las imágenes SEM se adquirieron con el objetivo de evaluar la continuidad del recubrimiento de las películas de grafeno y la presencia de defectos. Las mediciones se realizaron utilizando un haz de electrones de baja a moderada energía, con el fin de minimizar posibles efectos de carga y daño sobre las muestras, permitiendo una caracterización representativa de la superficie. Se utilizó para ello un microscopio ZEISS EVO MA 10.

Adicionalmente, se realizó un análisis de espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS), acoplado a microscopía electrónica, para determinar la composición elemental de las muestras, permitiendo correlacionar la presencia de elementos con las propiedades observadas.

Luego de evaluar la calidad estructural y la homogeneidad de las muestras mediante espectroscopía Raman y microscopía SEM, se procede a evaluar las propiedades eléctricas mediante dos métodos complementarios: método de longitud de transferencia (TLM) y efecto Hall.

5.3.2. Caracterización eléctrica

Método de longitud de transferencia

Para determinar la resistividad de contacto entre contactos metálicos y las películas de grafeno se utilizó el método de longitud de transferencia. Este método consiste en medir la resistencia eléctrica total, mediante el método de dos puntas, entre pares de contactos eléctricos de ancho a , con distintos espaciamentos L , depositados por *sputtering* sobre el grafeno. La geometría de los contactos eléctricos para las mediciones TLM se observa en la Figura 21a, los valores de los espaciamentos entre los contactos se presentan en la Tabla 1. La Figura 21b muestra el montaje de 2 mediciones en pares de contactos distintos.

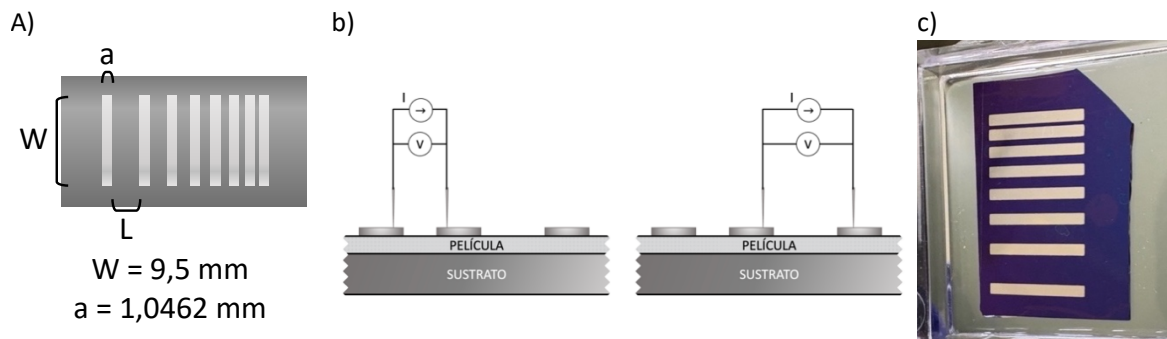


Figura 21: a) Vista superior arreglo de contactos para medición con TLM, b) Corte transversal arreglo de contactos y esquema de la medición, c) fotografía de una muestra de grafeno sobre óxido de silicio con contactos metálicos para mediciones TLM.

Las mediciones TLM fueron adquiridas utilizando una fuente KEITHLEY, Modelo 2401, en configuración automática para medición de resistencia por 2 puntas. Estas mediciones permitieron determinar la resistencia de hoja R_{SH} del grafeno y la resistencia de contacto R_C en la interfaz Ag/Gr. Con estas dos cantidades determinadas fue posible valorar la longitud de transferencia L_T y, en función de ella, la resistividad de contacto ρ_C de la muestra.

Con el objetivo de comparar con los datos reportados por la literatura, se determinó además de ρ_C , la resistencia de contacto normalizada por el ancho del contacto: $R_C W$.

Tabla 1: Valores de espaciamentos entre contactos para TLM empleados en este trabajo.

L_1	0,4473 mm
L_2	0,6988 mm
L_3	0,9384 mm
L_4	1,1917 mm
L_5	1,4175 mm
L_6	1,9155 mm
L_7	2,9052 mm

En algunas muestras, los contactos metálicos fueron reforzados con adhesivo epóxico conductor con partículas de plata, esto ya que las puntas metálicas utilizadas en el proceso de medición rayaban la plata depositada, afectando la continuidad de las películas y, por lo tanto, su comportamiento eléctrico.

Efecto Hall

Las mediciones de efecto Hall se realizaron utilizando un sistema Ecopia AMP55T, acoplado al analizador HMS5300. Se aplicó sobre la muestra una corriente mientras esta era sometida a un campo magnético generado por el sistema. El equipo registra el voltaje Hall, que permite determinar, entre otros parámetros, la movilidad de la muestra μ_H , el coeficiente Hall R_H y la resistencia de hoja R_{SH} . Todas las mediciones fueron realizadas a temperatura ambiente ~ 297 K y para un rango de corriente entre $-80 \mu\text{A}$ y $80 \mu\text{A}$. Al introducir los parámetros en el software, el espesor de las muestras fue estimado: 20 \AA para las muestras con una película de grafeno y 40 \AA para las muestras con dos películas.

Se analizó una muestra de una película de grafeno sobre SiO_2 , con el objetivo de obtener parámetros comparativos. Sin embargo, las muestras estudiadas corresponden a muestras preparadas para mediciones TLM, por lo que poseen franjas de plata en su superficie, lo que modifica las condiciones experimentales. Cada muestra se midió 5 veces en dos configuraciones de contactos distintas, como las mostradas en la Figura 22, la diferencia entre ellas es la posición de los contactos del centro de la muestra. Por simplicidad en la figura sólo se ha representado una conmutación para cada arreglo de contactos. Se reportó el promedio de las 5 mediciones para cada configuración.



Figura 22: Dos configuraciones de contactos para mediciones de efecto Hall.

Adicionalmente, fue calculada para cada set de mediciones la concentración de portadores de carga n_H [7], utilizando la ecuación (7).

$$N_H = \frac{1}{q|R_H|} \quad (7)$$

Donde q corresponde a la carga del electrón.

5.3.3. Desempeño fotovoltaico

Curva IV

El desempeño fotovoltaico de las celdas SHJ se evaluó mediante la medición de curvas corriente-voltaje (IV) bajo iluminación estándar. Sobre el grafeno transferido en la superficie frontal de las celdas se depositaron contactos de plata en una disposición de *fingers* y el *busbar*, mostrada en la Figura 22^a. Para esto se diseñaron dos máscaras, cuya geometría y medidas se presentan en las Figuras 22b y 22c.

Las mediciones de curvas IV se realizaron bajo condiciones estándar de prueba, correspondientes a una irradiancia aproximada de 1000 W/m^2 (1 sol), espectro AM1,5G y temperatura ambiente $\sim 297 \text{ K}$. La curva IV se obtuvo aplicando un voltaje variable a la celda y registrando la corriente generada en cada punto de operación.

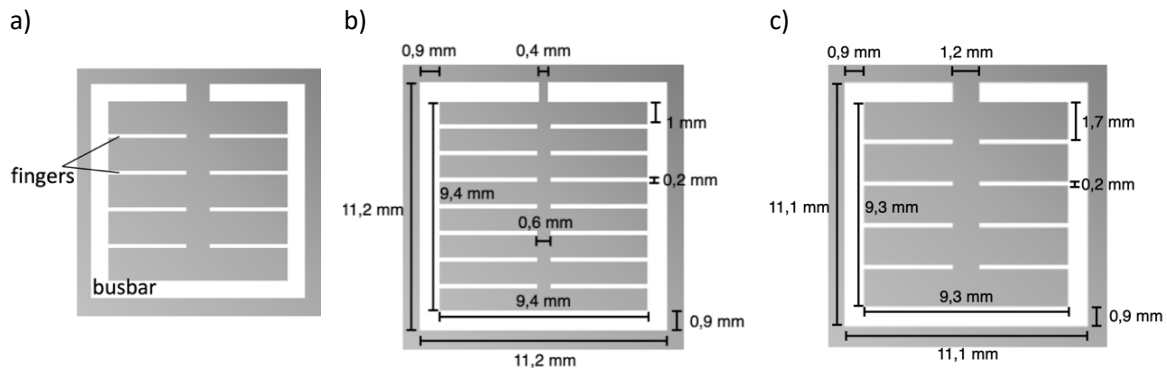


Figura 23: a) Diseño de fingers y busbar para celda solar SHJ, b) máscara 1, c) máscara 2.

A partir de las curvas IV se extrajeron los principales parámetros fotovoltaicos de la celda, incluyendo la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de la celda (η). Estos parámetros permiten evaluar de manera integral el desempeño eléctrico de la celda y analizar el impacto del grafeno como TCE y de los contactos metálicos sobre las pérdidas resistivas del dispositivo.

El registro de datos experimentales se realizó iluminando las celdas con un simulador SCIENCETECH, modelo SciSun-300, con una lámpara calibrada para el espectro AM1,5G. Las mediciones fueron adquiridas utilizando una fuente KEITHLEY, Modelo 2401, que actúa simultáneamente como fuente de voltaje y amperímetro, controlada mediante un software

de adquisición de datos que permite automatizar el barrido de voltaje y la lectura de corriente. El software entrega, además de la curva IV, una curva de potencia y todos los parámetros fotovoltaicos asociados (I_{SC} , V_{OC} , P_{MP} , R_{SHUNT} , R_{SER} , FF y η). Para efectos comparativos, se determina adicionalmente la densidad de corriente de cortocircuito (J_{SC}), que corresponde al cociente entre la corriente de cortocircuito y el área efectiva de la celda, como se presenta en la ecuación (8), ya que éste parámetro si es comparable para dispositivos con diferente área.

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{\text{Área efectiva}} \quad (8)$$

La medición de curvas IV resulta particularmente relevante, puesto que las pérdidas resistivas asociadas a la resistencia de hoja del grafeno y a la resistencia de contacto en la interfaz Ag/Gr pueden verse reflejadas directamente en el factor de llenado de la celda.

Se prepararon ocho muestras en total. Cuatro de ellas corresponden a grafeno de una y dos películas sobre obleas de SiO_2 (Gr(1)/ SiO_2 _PS_1, Gr(1)/ SiO_2 _PS_2, Gr(2)/ SiO_2 _PS_3 y Gr(2)/ SiO_2 _PS_4), un esquema de la estructura de estas muestras se presenta en la Figura 24a, en él se observan los contactos de plata depositados sobre las muestras para mediciones TLM. Las otras cuatro muestras corresponden a grafeno de tres, dos y una película sobre el *front surface field* (n^+ a-Si:H) de celdas SHJ (Gr(3)/SHJ_PS_5, Gr(2)/SHJ_PS_6, Gr(2)/SHJ_PS_7 y Gr(1)/SHJ_PS_8), un esquema de estas estructuras se presenta en las Figuras 24b y 24c, en ellas se observa que sólo las primeras dos muestras fueron metalizadas.

Se realizaron mediciones sobre muestras control. Para caracterización eléctrica se empleó una película de 70 nm de ITO sobre vidrio (ITO/Glass) con contactos para TLM y una muestra de grafeno de una película sobre óxido de silicio, con contactos metálicos en los extremos para mediciones Hall, un esquema de ambas muestras se observa en la Figura 24d. Para comparar el desempeño fotovoltaico de las celdas preparadas con grafeno se generaron curvas IV para distintas muestras: una celda SHJ completa con ITO y metalizada (SHJ completa); celdas con ITO metalizadas en este trabajo (ITO con Grilla1 y Grilla2), ambas poseen estructura similar, la cual es presentada en la Figura 24e. Finalmente, se midió una celda con ITO sin metalizado de plata (ITO sin Ag) cuya estructura se muestra en la Figura 24f.

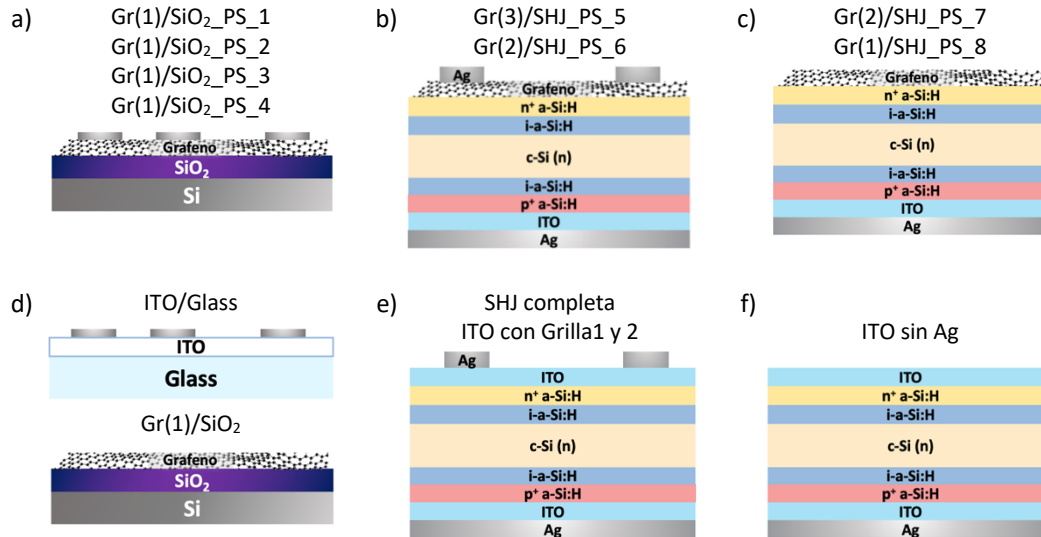


Figura 24: Estructura de muestras de: a) grafeno de una y dos películas sobre óxido de silicio con contactos metálicos para TLM, b) grafeno de tres y dos películas sobre celdas de silicio de heterojuntura con metalizado, c) grafeno de dos y una película sobre celdas de silicio de heterojuntura sin metalizado, d) 70 nm de ITO sobre vidrio con contactos para TLM y grafeno de una película sobre óxido de silicio, e) celdas completas con ITO y metalizadas, f) celda completa con ITO sin metalizado de plata.

6. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados de la síntesis, transferencia y caracterización de películas de grafeno, así como su desempeño fotovoltaico al ser transferidas sobre celdas solares SHJ.

6.1. Síntesis y transferencia de grafeno por CVD

Se sintetizaron películas de grafeno por CVD utilizando cobre como sustrato. La Figura 25 muestra el espectro Raman medido sobre dos puntos diferentes en un trozo de cobre posterior al proceso de síntesis, en él destacan las bandas características del grafeno, D, G y 2D. El análisis Raman permite evidenciar el crecimiento de las películas para luego ser transferidas sobre el sustrato deseado.

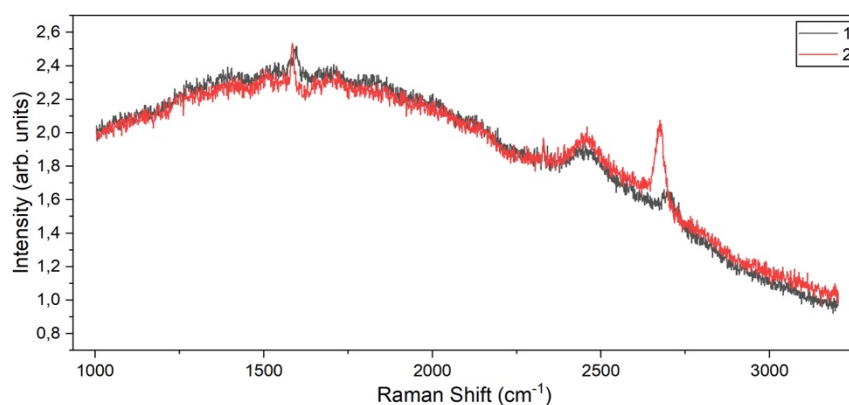


Figura 25: Espectro Raman de grafeno crecido sobre cobre en dos puntos distintos de la muestra.

De acuerdo con la metodología propuesta, la transferencia fue realizada mediante un proceso húmedo libre de polímeros con el fin de preservar la integridad de las películas y minimizar residuos en ellas. La Figura 26^a muestra una fotografía del proceso de transferencia, en particular una película de grafeno de tamaño considerable (7 cm^2), flotando en agua con residuos de nitrato férrico. La Figura 26^b es la misma fotografía editada para un mejor contraste óptico. La Figura 26^c presenta una película de grafeno ya transferida sobre una oblea de SiO_2 que permite el contraste óptico adecuado para poder observarla a simple vista. En esta fotografía se observan zonas claras, que corresponden a regiones del sustrato que no están cubiertas por grafeno.

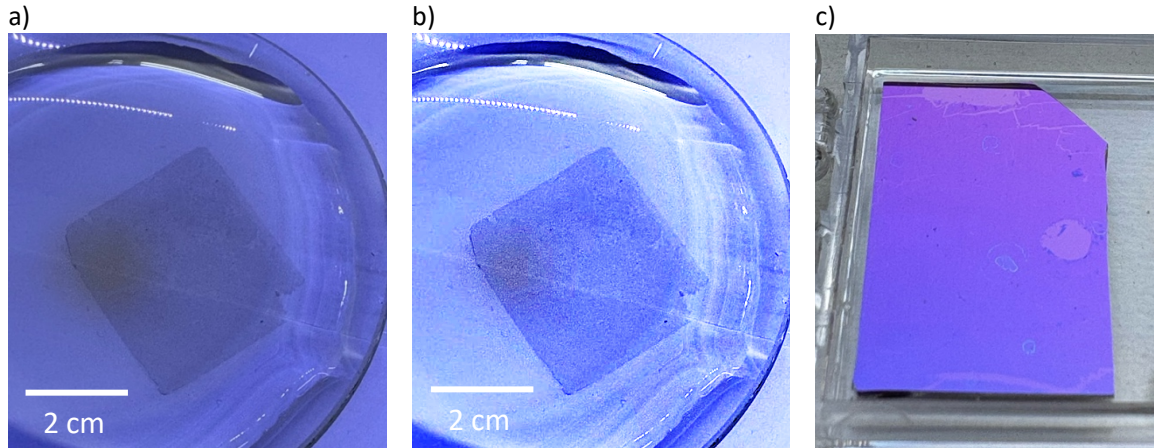


Figura 26: a) película de grafeno flotando en H_2O y residuos de $Fe(NO_3)_3$ durante el proceso de transferencia, b) misma fotografía editada para lograr un mayor contraste, c) película de grafeno transferida a oblea de SiO_2 .

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la caracterización de las películas de grafeno transferidas sobre distintos sustratos.

6.2. Caracterización muestras de grafeno sobre óxido de silicio (Gr/SiO_2)

En películas transferidas sobre obleas de óxido de silicio, el objetivo principal es evaluar la calidad del grafeno, su integridad estructural y el comportamiento eléctrico en función del proceso de transferencia y del contacto con electrodos metálicos. Se prepararon muestras de una y dos transferencias de grafeno, llamadas: grafeno de una película, $Gr(1)$ y grafeno de dos películas, $Gr(2)$. Se busca comparar las propiedades de ambas estructuras, para ello se emplearon técnicas complementarias: espectroscopía Raman y microscopía electrónica de barrido SEM y mediciones mediante el método de longitud de transferencia TLM para determinar resistencia y resistividad de contacto en la interfaz Ag/Gr , y mediciones de efecto Hall para determinar la resistencia de hoja del grafeno, la movilidad, el coeficiente Hall y la concentración de portadores de carga.

Se describen los resultados correspondientes a cada muestra, destacando las características más relevantes observadas en cada análisis. Un resumen de la caracterización de muestras de grafeno de una película sobre óxido de silicio ($Gr(1)/SiO_2$) se muestra en la Tabla 2. Así mismo, un resumen de la caracterización de muestras de grafeno de dos películas sobre óxido de silicio ($Gr(2)/SiO_2$) se presenta en la Tabla 3.

6.2.1. ITO/Glass

Con el objetivo de comparar las mediciones de resistividad de contacto de las muestras de grafeno, se midió una película de ~ 70 nm de ITO depositado sobre vidrio. Una fotografía de la muestra con contactos eléctricos se presenta en la Figura 27^a. La Figura 27^b muestra el

gráfico de mediciones de resistencia para método TLM, de él se determina que la resistencia de contacto normalizada corresponde a $1,7 \cdot 10^4 \Omega \cdot \mu\text{m}$ y la resistividad de contacto entre la plata y el ITO es $75 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$. Esta medición entrega un valor de $37 \Omega/\text{sq}$ para la resistencia de hoja del ITO.

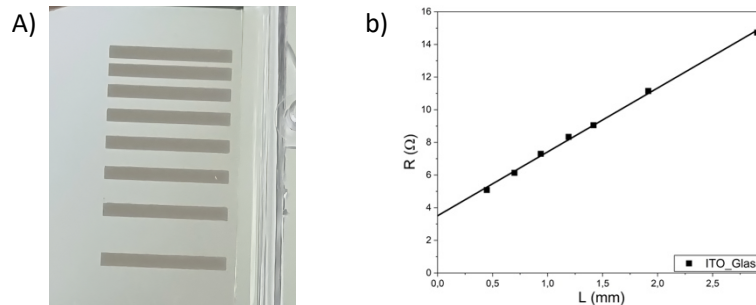


Figura 27: Ag/ITO/Vidrio: a) fotografía de la muestra con contactos de plata depositados en ella, b) gráfico R_T en función de L para contactos de plata depositados por sputtering (3 mediciones).

6.2.2. Grafeno de una película sobre óxido de silicio (Gr(1)/SiO₂)

La primera muestra de grafeno sobre óxido de silicio (Gr(1)/SiO₂_PS_1) presenta un espectro Raman característico (Figura 28^a). En él se identifican las bandas G y 2D bien definidas, con cocientes I_{2D}/I_G de $\sim 2,34$, $\sim 1,93$ y $\sim 2,17$ que indican la formación predominante de una monocapa de grafeno. Adicionalmente es posible observar que en algunos puntos de la muestra la banda D posee una intensidad significativa lo que indica que la muestra posee defectos. Una micrografía SEM presentada en la Figura 28b muestra una película continua con mínima presencia de arrugas y sin fracturas evidentes, lo que indica un proceso de transferencia al sustrato exitoso.

En la Figura 28c se observa el gráfico TLM, del cual se extrae que la resistencia de contacto normalizada y la resistividad de contacto entre el grafeno y la plata registran valores de $2,9 \cdot 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}$ y $299 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ respectivamente. Al reforzar los contactos metálicos con epoxi de plata, se obtiene $R_C W = 1,6 \cdot 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}$ y $\rho_C = 67 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$. La resistencia de hoja extraída de las mediciones TLM es $2827 \Omega/\text{sq}$ para la plata depositada y $3703 \Omega/\text{sq}$ con el refuerzo de epoxi.

Se realizaron mediciones de efecto Hall sobre la muestra Gr(1)/SiO₂_PS_1, para dos configuraciones de contactos eléctricos distintas, que pueden observarse en la Figura 22 en la sección metodología. Todas las mediciones de efecto Hall fueron realizadas a temperatura ambiente ($\sim 297 \text{ K}$), para un campo magnético de $0,556 \text{ T}$ y para un rango de corriente de $-80 \mu\text{A}$ y $80 \mu\text{A}$. A partir de ellas se determinaron dos valores de resistencia de hoja: $3915 \Omega/\text{sq}$ y $2821 \Omega/\text{sq}$, dos valores de movilidad: $0,47 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ y $0,46 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, y dos valores de coeficiente Hall: $-0,0001 \text{ cm}^3/\text{C}$ y $0,0002 \text{ cm}^3/\text{C}$ que indican variación en el tipo de portadores de carga (negativo para electrones y positivo para huecos). La concentración

de portadores de carga para esta muestra fue de $3,1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ y $6,2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ para cada una de las configuraciones medidas.

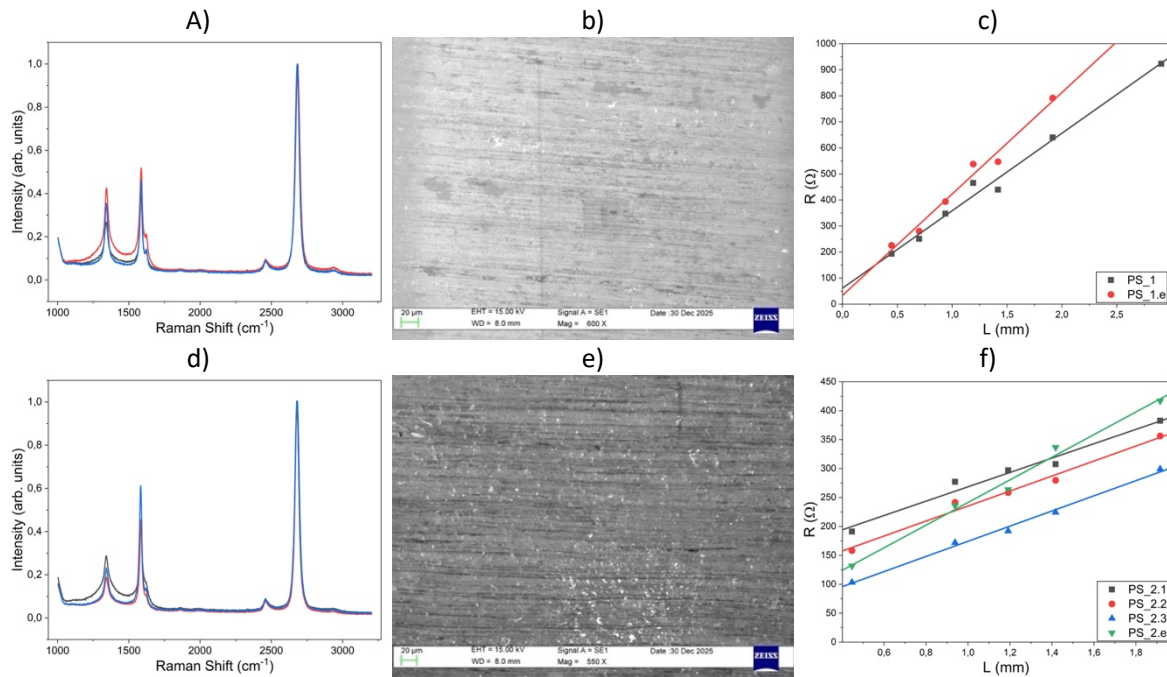


Figura 28: Muestra Gr(1)/SiO₂_PS_1: a) Espectro Raman para tres puntos distintos de la muestra, b) Imagen SEM a escala de 20 μm, c) gráfico R_T en función de L para contactos de plata depositados por sputtering (negro) y reforzados con epoxi de plata (rojo). Muestra Gr(1)/SiO₂_PS_2: d) Espectro Raman en tres puntos distintos de la muestra, e) Imagen SEM a escala de 20 μm, f) gráfico R_T en función de L para contactos de plata depositados por sputtering (3 mediciones: negro, rojo y azul) y reforzados con epoxi de plata (verde).

El espectro Raman de la muestra Gr(1)/SiO₂_PS_2 en 3 regiones diferentes se presenta en la Figura 28d, en ella se aprecian las bandas D, G y 2D. El cociente entre las intensidades de las bandas 2D y G (I_{2D}/I_G) registra valores de $\sim 2,26$, $\sim 2,19$ y $\sim 1,64$. Esto permite inferir que la muestra es una monocapa de grafeno con pequeñas regiones de dos capas, la baja intensidad de la banda D indica que la muestra es poco defectuosa. A partir de la imagen SEM, en la Figura 28e, se puede observar que la muestra presenta continuidad general, sin grietas o arrugas visibles, lo que indica que el proceso de transferencia al sustrato fue exitoso.

Un gráfico de varias mediciones TLM, incluyendo una en la cual los contactos fueron reforzados con epoxi de plata, se presenta en la Figura 28f. Los resultados obtenidos muestran que, entre la película de grafeno y los contactos de plata, la resistencia de contacto normalizada registra valores que van en descenso con cada medición, de $6,9 \cdot 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}$, $5,0 \cdot 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}$ y $2,0 \cdot 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}$. Por lo tanto, la resistividad de contacto presenta el mismo comportamiento: $3990 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, $2043 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ y $341 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$. Al reforzar contactos metálicos con epoxi de plata, se obtienen valores similares a los de la última medición, $R_C W = 2,2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}$ y $\rho_C = 253 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$. La resistencia de hoja registró valores de $1179 \Omega/\text{sq}$, $1231 \Omega/\text{sq}$, $1244 \Omega/\text{sq}$ y $1858 \Omega/\text{sq}$ para cada medición respectivamente, estos valores son

similares para las tres mediciones con contactos de plata, pero es ligeramente mayor cuando los contactos son reforzados con epoxi de plata, este resultado es consistente con el obtenido para la muestra Gr(1)/SiO₂_PS_1 en que la resistencia de hoja también aumento ligeramente al reforzar los contactos con epoxi de plata.

Las primeras tres mediciones sobre la muestra Gr(1)/SiO₂_PS_2 con el depósito de plata fueron realizadas sucesivamente, en ellas podemos observar que aplicar una corriente sobre la muestra tuvo efecto apreciable sobre R_C, las rectas tienen un intercepto cada vez más pequeño. Este efecto no se evidencia sobre R_{SH}, las tres rectas poseen pendientes muy cercanas entre sí.

Mediciones de efecto Hall sobre esta muestra (Gr(1)/SiO₂_PS_2) arrojaron los siguientes resultados: R_{SH} = 576 Ω/sq y 1636 Ω/sq, μ_H = 54,09 cm²/Vs y 11,37 cm²/Vs, R_H = 0,0008 cm³/C y 0,0018 cm³/C, y n_H = 3,5·10²¹ cm⁻³ y 7,8·10²¹ cm⁻³.

6.2.3. Grafeno de dos películas sobre óxido de silicio (Gr(2)/SiO₂)

El espectro Raman de la muestra Gr(2)/SiO₂_PS_3 (Figura 29^a) permite identificar las bandas D, G y 2D. El cociente I_{2D}/I_G registra valores de ~0,92, ~1,71, ~1,94 y ~1,48, lo que indica que la muestra es predominantemente una bicapa de grafeno con islas de tres capas. Por su parte, la banda D indica que la muestra posee defectos. Este resultado es consistente si consideramos que para preparar esta muestra sobre la oblea de SiO₂ fueron transferidas dos películas de grafeno. Una micrografía SEM de esta muestra (Figura 29^b) da evidencia de una película irregular con grietas, atribuibles al proceso de transferencia. Sin embargo estas no comprometen la cobertura global de la muestra.

En la Figura 29^c se observa el gráfico de mediciones TLM, de él se extrae que la resistencia de contacto normalizada y la resistividad de contacto entre la película de grafeno y los contactos de plata presenta valores de 1,3·10⁵ Ω·μm y 65 mΩ·cm² respectivamente. Para la resistencia de hoja se obtuvo un valor de 2529 Ω/sq. Al reforzar los contactos con epoxi de plata, el ajuste lineal para las mediciones TLM aumenta la pendiente y presenta un intercepto negativo. Teóricamente este resultado no es físicamente posible, ya que en el TLM clásico, el intercepto representa 2R_C. Sin embargo, esta medición es consistente con lo reportado por Nouchi *et al.* [28], interceptos negativos para interfaces Ag/SiO₂/Si. En la sección de discusión abordaremos en profundidad este resultado.

A través de las mediciones Hall sobre la muestra Gr(2)/SiO₂_PS_3, se determinaron valores de: 1432 Ω/sq y 897 Ω/sq para R_{SH}, 42,20 cm²/Vs y 135,94 cm²/Vs para μ_H, -0,0132 cm³/C y 0,0185 cm³/C para R_H, y 3,3·10²⁰ cm⁻³ y 4,8·10²⁰ cm⁻³ para n_H. El cambio de signo en R_H indica una variación en el tipo de portador de carga.

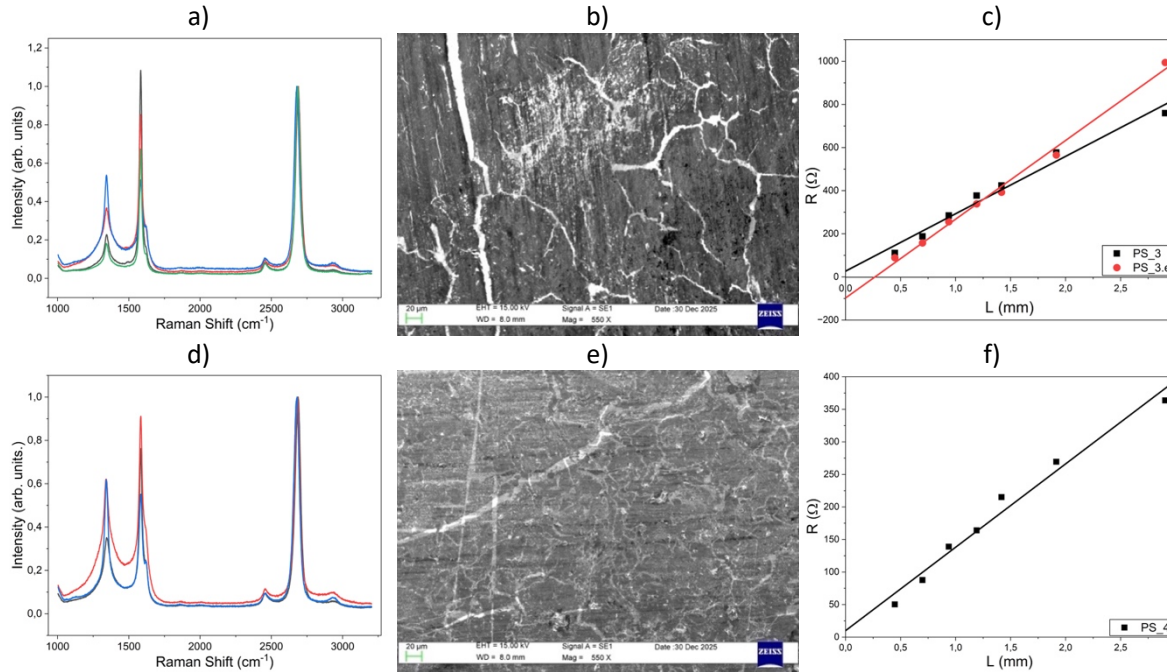


Figura 29: Muestra Gr(2)/SiO₂_PS_3: a) Espectro Raman para tres puntos distintos de la muestra, b) Imagen SEM a escala de 20 μm, c) gráfico R_T en función de L para contactos de plata depositados por sputtering (negro) y reforzados con epoxi de plata (rojo). Muestra Gr(2)/SiO₂_PS_4: d) Espectro Raman para tres puntos distintos en la muestra, e) Imagen SEM a escala de 20 μm, f) gráfico R_T en función de L para contactos de plata depositados por sputtering.

El espectro Raman de la muestra Gr(2)/SiO₂_PS_4 (Figura 29d) presenta claramente las bandas características D, G y 2D. El cociente I_{2D}/I_G presenta valores de ~1,31, ~1,10 y ~1,81, lo que permite inferir que la muestra es predominantemente una bicapa de grafeno, la banda D indica que la muestra posee bastantes defectos. La imagen SEM, presentada en la Figura 29e, muestra una superficie homogénea con algunas pequeñas grietas, estas imágenes permiten verificar que el proceso de transferencia fue satisfactorio.

La muestra con los contactos de plata depositados sobre ella puede observarse en la Figura 29f. De la medición TLM (Figura 31b) se extrae que R_CW presenta un valor de 4,7·10⁴ Ω·μm y ρ_C de 18 mΩ·cm². Para R_{SH} el valor obtenido fue de 1217 Ω/sq.

Las mediciones de efecto Hall sobre esta muestra (Gr(2)/SiO₂_PS_4) permitieron determinar valores de: 1421 Ω/sq y 356 Ω/sq para la R_{SH}, 1,38 cm²/Vs y 7,21 cm²/Vs para μ_H, 0,0004 cm³/C y 0,0005 para R_H, y 1,3·10²² cm⁻³ y 1,6·10²² cm⁻³ para n_H. En el caso de esta muestra, el coeficiente Hall no presenta variación de signo, lo que indica el transporte está dominado mayoritariamente por portadores de tipo p.

Con el objetivo de comparar los resultados de efecto Hall de las muestras presentadas, se midió una muestra control Gr(1)/SiO₂, correspondiente a una película de grafeno transferida sobre óxido de silicio. Sobre el perímetro de esta muestra se depositó por *sputtering* 4 contactos metálicos para realizar la medición. Esta muestra presentó valores

de resistencia de hoja de 786 Ω/sq y 163 Ω/sq , movilidad: 183,22 cm^2/Vs y 5,36 cm^2/Vs , y coeficiente Hall: -0,0262 cm^3/C y 0,0001 cm^3/C . El cambio de signo en el coeficiente Hall sugiere variaciones importantes en el tipo y densidad de portadores de carga. Se determinó para la muestra control una concentración de portadores de carga de $2,4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ y $6,2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ para cada medición respectivamente. La resistencia de hoja medida para la muestra control fue más pequeña que para el resto de las muestras, explicar esta diferencia está fuera de lo que abordamos en este trabajo, sin embargo, este resultado es relevante ya que permite la toma de decisiones sobre los estudios del desempeño del grafeno como TCE, por ejemplo, evaluar el desempeño de una celda SHJ con grafeno como TCE sin metalizado de plata.

Tabla 2: Tabla resumen de parámetros obtenidos a partir de caracterización estructural y eléctrica para muestras de grafeno de una película sobre óxido de silicio Gr(1)/SiO₂.

Muestra	I_{2D}/I_G	R_{cW} ($\Omega \cdot \mu\text{m}$)	ρ_c ($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{SH} TLM (Ω/sq)	R_{SH} HALL (Ω/sq)	μ_H (cm^2/Vs)	R_H (cm^3/C)	n_H (cm^{-3})
Gr(1)/SiO ₂ _PS_1	2,1±0,2	1,6 – 2,9·10 ⁵	67 – 299	2827 – 3703	2821 – 3915	0,46 – 0,47	-0,0001 – 0,0002	3,1·10 ²² – 6,2·10 ²²
Gr(1)/SiO ₂ _PS_2	2,0±0,2	2,0 – 6,9·10 ⁵	253 – 3990	1179 – 1858	576 – 1636	11,37 – 54,09	0,0008 – 0,0018	3,5·10 ²¹ – 7,8·10 ²¹

Tabla 3: Tabla resumen de parámetros obtenidos a partir de caracterización estructural y eléctrica para muestras de grafeno de dos películas sobre óxido de silicio Gr(2)/SiO₂.

Muestra	I_{2D}/I_G	R_{cW} ($\Omega \cdot \mu\text{m}$)	ρ_c ($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{SH} TLM (Ω/sq)	R_{SH} HALL (Ω/sq)	μ_H (cm^2/Vs)	R_H (cm^3/C)	n_H (cm^{-3})
Gr(2)/SiO ₂ _PS_3	1,5±0,4	1,3·10 ⁵	65	2529	897 – 1432	42,20 – 135,94	-0,0132 – 0,0185	3,3·10 ²⁰ – 4,8·10 ²⁰
Gr(2)/SiO ₂ _PS_4	1,4±0,4	4,7·10 ⁴	18	1217	356 – 1421	1,38 – 7,21	0,0004 – 0,0005	1,3·10 ²² – 1,6·10 ²²

De los resultados presentados en las Tablas 2 y 3 es posible extraer que las mediciones de R_{SH} para cada muestra son, en general, menores al ser medidas por efecto Hall. Esto podría deberse al hecho de que el método TLM es mucho más sensible a variaciones en la resistencia, es por ello que se consideran como más representativos los valores obtenidos mediante efecto Hall. De estos mismos resultados se extrae que no existe una modificación sistemática de la movilidad de las muestras y la concentración de portadores de carga en función del número de películas transferidas o al comparar las muestras metalizadas con la muestra control, cuyos parámetros se encuentran dentro del mismo rango.

Adicionalmente, las muestras de grafeno transferido sobre óxido de silicio presentan resistencias de hoja considerablemente mayores a la muestra de ITO sobre vidrio, que registró $R_{SH} = 37 \Omega/\text{sq}$.

6.3. Caracterización estructural muestras de grafeno sobre celdas de silicio de heterojuntura (Gr/SHJ)

En esta sección se presentan resultados de la caracterización de muestras de grafeno transferidas sobre celdas SHJ, las muestras se presentan en orden cronológico según fueron caracterizadas, ya que esto permitió tomar decisiones sobre las siguientes mediciones a desarrollar.

6.3.1. Grafeno de tres películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata

La celda Gr(3)/SHJ_PS_5, corresponde a una celda sobre la cual fueron transferidas tres películas de grafeno. Una fotografía de esta muestra se presenta en la Figura 30^a, en ella se observa que la muestra posee manchas resultantes del proceso de transferencia, estas manchas disminuyen su transparencia.

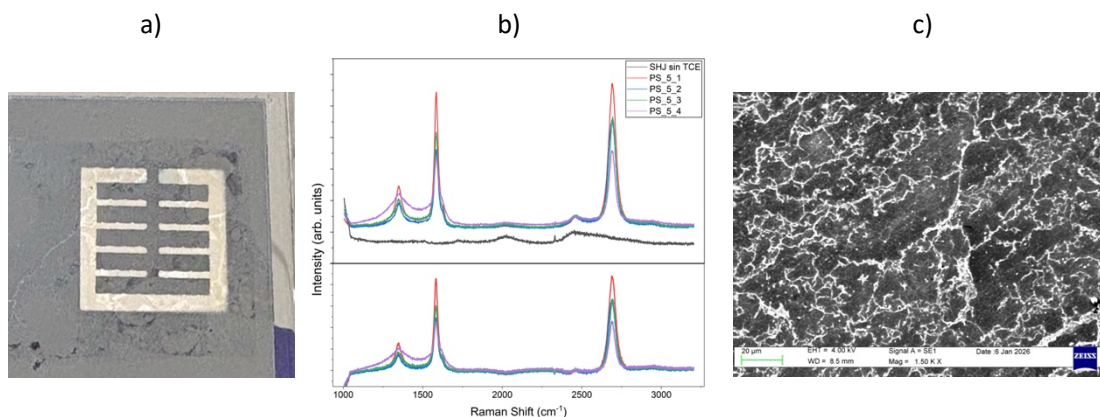


Figura 30: Muestra Gr(3)/SHJ_PS_5: a) fotografía de la celda con metalizado de plata, b) superior: espectro Raman en cuatro puntos distintos de la muestra y espectro Raman *front surface field* de la celda (negro); inferior: espectro Raman de cuatro puntos distintos de la muestra a los cuales se le ha restado la contribución de la celda, c) micrografía SEM a escala de 20 μm.

En la Figura 30b se presenta el espectro Raman de la muestra medido en cuatro regiones diferentes, el espectro Raman del *front surface field* de la celda y la diferencia entre ellos. La presencia de los *peaks* característicos del grafeno es un indicador de que el grafeno fue correctamente transferido a la celda. Al haber transferido 3 películas de grafeno lo esperable es que la muestra sea como mínimo una bicapa, dado que las películas transferidas no eran totalmente continuas y dejaban áreas despejadas que luego fueron cubiertas con las sucesivas transferencias. En el análisis Raman del grafeno sobre la celda SHJ no es posible identificar directamente el número de capas, esto debido a que existe una interacción electrónica entre el silicio amorfo dopado y la capa de grafeno. Sin embargo, se estima la razón de intensidades entre los *peaks* 2D y G para los espectros Raman a los cuales se ha restado la contribución de la celda ($\sim 1,02$, $\sim 1,35$, $\sim 1,09$ y $\sim 1,04$), estas razones indican que la muestra corresponde principalmente a una bicapa de grafeno. La Figura 30c

muestra una micrografía SEM a escala de 20 μm , en ella se observa que la muestra posee gran cantidad de defectos atribuibles al proceso de transferencia. Este resultado es consistente con lo observado en el espectro Raman, que presenta un *peak* D con intensidad apreciable.

6.3.2. Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata

La muestra Gr(2)/SHJ_PS_6 fue preparada transfiriendo dos películas de grafeno sobre la superficie frontal de la celda. Una fotografía de la celda con el metalizado se visualiza en la Figura 31^a. El espectro Raman de esta muestra, medido en tres regiones diferentes (Figura 31b), permite confirmar la presencia de grafeno sobre la superficie de la celda. Considerando que la muestra posee 2 películas transferidas, y en analogía al análisis realizado sobre el espectro Raman de la muestra anterior, podemos estimar la razón I_{2D}/I_G : $\sim 1,75$, $\sim 1,21$ y $\sim 1,95$, la cual indica que esta muestra debe corresponder a una bicapa de grafeno. La Figura 31c, muestra una micrografía SEM, en ella podemos observar que la muestra posee pequeños defectos, principalmente grietas, las zonas oscuras podrían dar evidencia de regiones de la celda no cubiertas por grafeno. Sin embargo, la continuidad de la película no parece estar comprometida.

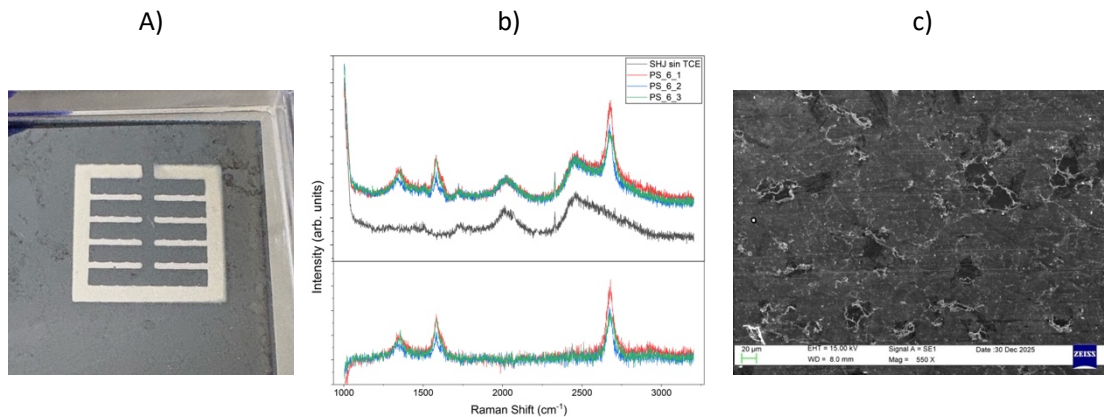


Figura 31: Muestra Gr(2)/SHJ_PS_6: a) fotografía de la celda con metalizado de plata, b) superior: espectro Raman en tres puntos distintos de la muestra y espectro Raman *front surface field* de la celda (negro); inferior: espectro Raman de tres puntos distintos de la muestra a los cuales se le ha restado la contribución de la celda, c) micrografía SEM a escala de 20 μm .

6.3.3. Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura sin metalizado

Se preparó una segunda celda con dos transferencias de grafeno, pero esta celda no fue metalizada. Su objetivo fue estudiar el efecto del metalizado sobre el desempeño de los dispositivos, considerando los valores medidos para las resistencias de hoja del grafeno y de contacto entre el grafeno y el metalizado de plata. Una fotografía de la celda se aprecia en la Figura 32a, en ella es posible verificar que no existen marcas o manchas visibles sobre la muestra, lo que sugiere que la transparencia del grafeno en esta muestra es adecuada.

Nuevamente el espectro Raman, mostrado en la Figura 32b, permite confirmar la presencia de grafeno sobre la superficie de la celda. La muestra en estudio debe corresponder principalmente a una bicapa de grafeno, con islas de tres capas, ya que el cociente I_{2D}/I_G para el espectro Raman sin la contribución de la celda toma valores de $\sim 1,37$, $\sim 1,06$, $\sim 0,71$ y $\sim 0,82$. La micrografía SEM presentada en la Figura 32c, indica que la muestra posee pequeñas arrugas, lo que sugiere que el proceso de transferencia a la celda fue exitoso. Si comparamos esta micrografía SEM con la obtenida para la muestra Gr(2)/SHJ_PS_6, es posible verificar que esta muestra no posee regiones de sustrato descubiertas y posee aparentemente menos defectos.

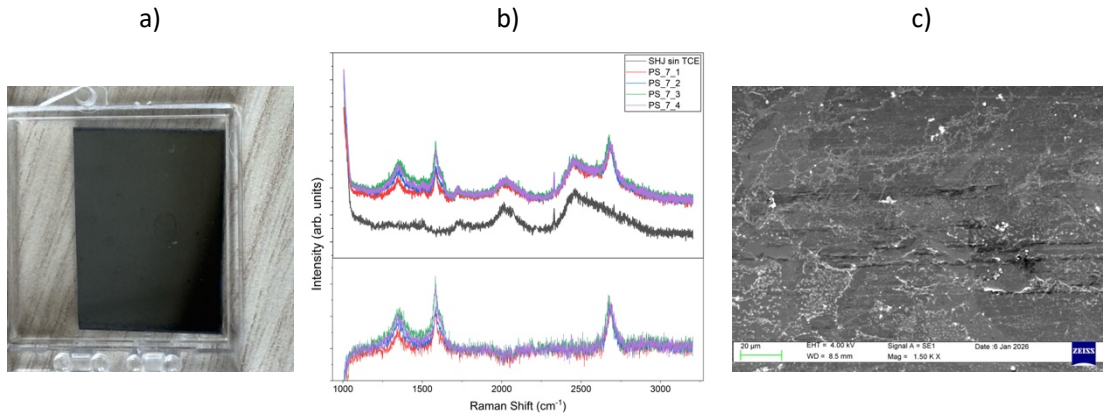


Figura 32: Muestra Gr(2)/SHJ_PS_7: a) fotografía de la celda con metalizado de plata, b) superior: espectro Raman en cuatro puntos distintos de la muestra y espectro Raman *front surface field* de la celda (negro); inferior: espectro Raman de cuatro puntos distintos de la muestra a los cuales se le ha restado la contribución de la celda, c) micrografía SEM a escala de 20 μm .

6.3.4. Grafeno de una película sobre celda de heterojuntura sin metalizado

Una fotografía de la muestra Gr(1)/SH_PS_8 se presenta en la Figura 33a, en ella es posible observar que no existe contraste óptico entre el grafeno y el sustrato lo que indica que el proceso de transferencia no generó manchas visibles que reduzcan su transparencia.

El espectro Raman realizado sobre un punto de la muestra, mostrado en la Figura 33b, permite evidenciar que el grafeno está correctamente transferido ya que se observan los *peaks* característicos del grafeno. Al haber transferido 1 película de grafeno lo esperable es que la muestra sea una monocapa. Sin embargo, al estimar la razón entre los *peaks* 2D y G se obtienen valores sugerentes de una bicapa de grafeno ($\sim 1,06$, $\sim 1,14$ y $\sim 1,76$). Una imagen AFM de esta muestra se presenta en la Figura 33c, en ella es posible verificar que el grafeno cubre completamente la superficie de la celda, con pequeñas arrugas y aglomeraciones de carbono amorfo (zonas claras). El análisis AFM arrojó una rugosidad alta (12,5 nm) atribuible al método de transferencia.

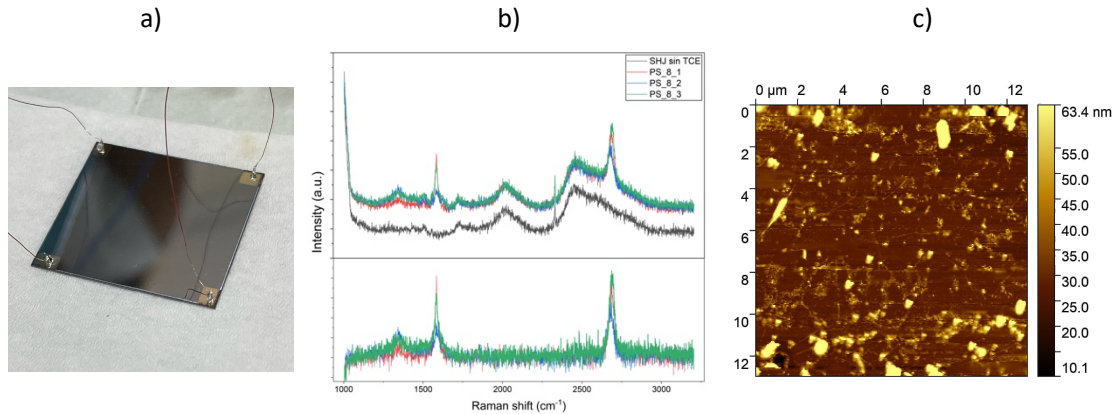


Figura 33: Muestra Gr(1)/SHJ_PS_8: a) fotografía de la celda con metalizado de plata, b) superior: espectro Raman en cuatro puntos distintos de la muestra y espectro Raman *front surface field* de la celda (negro); inferior: espectro Raman de cuatro puntos distintos de la muestra a los cuales se le ha restado la contribución de la celda, c) Imagen AFM a escala de 12,97 μm obtenida en trabajo previo [43].

6.4. Desempeño de celdas de silicio de heterojuntura con grafeno como electrodo conductor transparente

Para las muestras transferidas sobre celdas SHJ, el objetivo principal fue evaluar su desempeño fotovoltaico a partir de la generación de curvas IV bajo iluminación estándar AM1,5G e irradiancia aproximada de 1 sol. Para ello se deposita una grilla de 100 nm de plata con una configuración específica por el lado frontal, y se cubre totalmente el lado trasero. Este depósito se realiza por *sputtering*, para generar los contactos eléctricos. Para una de estas muestras también se estudia el efecto del refuerzo de los contactos con adhesivo epóxico de plata.

Con el fin de comparar estas mediciones con celdas con ITO, se realizaron pruebas en celdas de control: una celda completa y metalizada en el mismo lugar de fabricación (SHJ completa); una celda sin electrodo conductor transparente (SHJ sin TCE); celdas preparadas con ITO como TCE y metalizadas con dos grillas de plata diferentes (Grilla1 y Grilla2), con el fin de definir el metalizado a utilizar en las celdas con grafeno transferido; y por último, una celda completa con ITO medida en una región sin metalizar.

6.4.1. SHJ con y sin electrodo frontal

La celda de referencia corresponde a una celda completa con ITO como TCE en ambos lados de la celda y metalizada en el mismo lugar de fabricación. En la Figura 34a se presenta una fotografía de la celda y en la Figura 34b una imagen microscópica con las dimensiones de los *fingers* y del *busbar*.

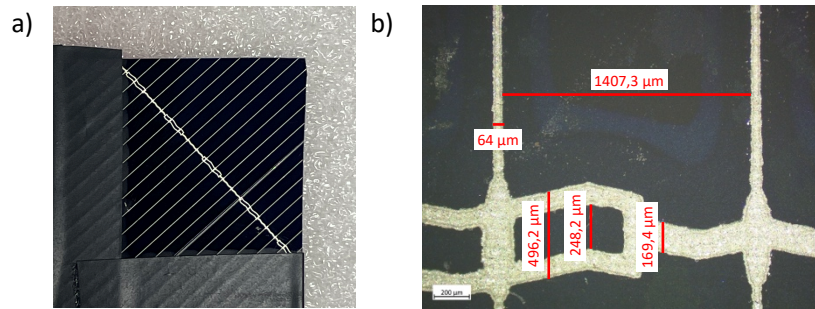


Figura 34: SHJ completa: a) fotografía de la celda, b) imagen de microscopio óptico de *fingers* y *busbar* a escala de 200 μm con dimensiones.

Al iluminar la celda de referencia con una irradiancia de $\sim 99,98 \text{ mW/cm}^2$, sobre una superficie efectiva de aproximadamente $4,4 \text{ cm}^2$, se generaron las curvas IV y de potencia mostradas en la Figura 35a, cuyos parámetros fotovoltaicos se observan en la Tabla 4.

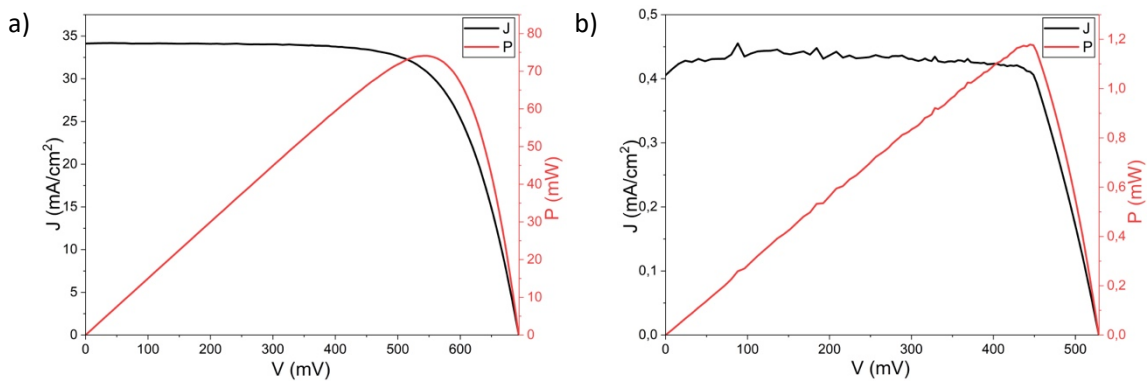


Figura 35: a) curva IV y de potencia para celda de referencia SHJ completa, b) curva IV y de potencia para celda SHJ sin TCE.

En una segunda celda se midió directamente sobre el *front surface field*, es decir, sobre la capa de silicio amorfo dopado de tipo n de la celda ($n^+ \text{ a-Si:H}$). La Figura 35a muestra la curva IV para esta celda incompleta, sin finalizar con TCE ni contactos metálicos, bajo una irradiancia de $\sim 99,73 \text{ mW/cm}^2$ y considerando un área efectiva de $\sim 1 \text{ cm}^2$. La Tabla 4 muestra los parámetros obtenidos.

Tabla 4: Parámetros fotovoltaicos obtenidos para celdas SHJ con y sin electrodo frontal.

Muestra	SHJ completa	SHJ sin TCE
V_{OC} (mV)	694	529
J_{SC} (mA/cm^2)	34,09	0,41
P_{MP} (mW)	74,09	1,21
FF (%)	71,1	85,2
R_{SER} (Ω)	1	31
R_{SHUNT} (Ω)	233	523
η (%)	16,9	1,2

Al comparar las celdas con y sin electrodo se observa que la mayoría de los parámetros registran valores mayores para la celda completa. En particular, la densidad de corriente (J_{SC}) extraída disminuye considerablemente en la celda sin electrodo en comparación con la celda completa. El voltaje de circuito abierto (V_{OC}) presenta también una disminución en la muestra SHJ sin TCE, lo que indica que en esta celda existe mayor recombinación. En ambas celdas las resistencias en serie (R_{SER}) y shunt (R_{SHUNT}) presentan una relación ideal, R_{SER} pequeña y R_{SHUNT} alta., pero los valores que toma cada una de estas resistencias son menores para la celda SHJ completa. Si bien el factor de llenado (FF) para la celda sin TCE es mayor, la eficiencia de esta celda es de 1,2%, significativamente más pequeña que la celda SHJ completa (16,9%) lo cual se relaciona principalmente con la baja densidad de corriente generada.

6.4.2. Celdas con ITO y grillas de plata

Se midieron celdas con ITO sobre las cuales se depositaron contactos metálicos con dos máscaras distintas, el objetivo es definir en función del desempeño de estas muestras el metalizado a utilizar en celdas con grafeno.

Se diseñaron dos máscaras, cuyas medidas se encuentran especificadas en la metodología de este trabajo, en las Figuras 22b y 22c. Con ellas se depositó, por *sputtering*, 100 nm de plata sobre la superficie frontal de dos celdas completadas con ITO: Grilla1 cuya fotografía se muestra en la Figura 36a, y Grilla2, mostrada en la Figura 36b. Ambas máscaras tienen aproximadamente 1 cm de lado y el busbar tiene 0,9 mm de ancho. La principal diferencia entre ellas es el número de fingers (7 y 4) y, por lo tanto, la distancia entre ellos (1,0 mm y 1,7 mm respectivamente). De este modo la celda con la Grilla2 posee una mayor superficie expuesta a la radiación que la Grilla1.

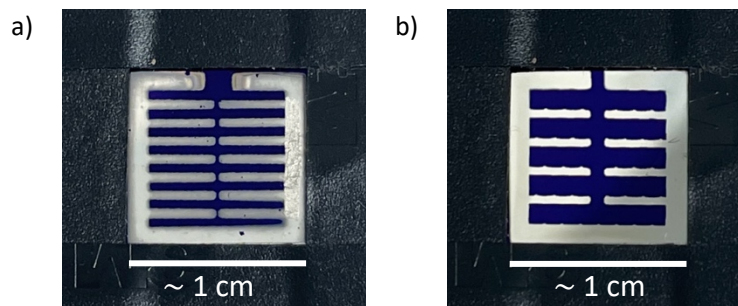


Figura 36: Fotografías celdas con ITO con contactos metálicos: a) Grilla1, b) Grilla2.

Las mediciones IV de las celdas con Grilla1 y Grilla2, se realizaron bajo una irradiancia de $\sim 99,97 \text{ mW/cm}^2$ y $\sim 99,93 \text{ mW/cm}^2$ respectivamente. En ambos casos el área efectiva es de aproximadamente 1 cm^2 . Las curvas IV (Figura 37a) muestran que una mayor superficie de la celda expuesta a la radiación logra una mayor absorción, lo que implica un valor más alto para la corriente generada. Los parámetros fotovoltaicos de ambas celdas, se muestran en la Figura 37b, en ella podemos observar que V_{OC} y FF no presentan mayor variación. R_{SER}

de ambas celdas es similar, lo cual es esperable ya que ambas muestras poseen el mismo espesor de ITO y de plata, por lo que las resistencias de hoja del ITO y de contacto entre el ITO y la plata no deberían presentar variaciones significativas. Sin embargo la R_{SHUNT} para la Grilla 2 se ve disminuida, dado que la capa de ITO es idéntica en ambas muestras, las diferencias observadas se atribuyen exclusivamente a la geometría de los contactos de plata. Una menor cobertura de Ag deja una mayor fracción del ITO expuesta, generando mayor relación perímetro/área, lo que supone una mayor inyección lateral de corriente en el borde Ag/ITO. No obstante, la eficiencia es mayor para la celda con ITO y Grilla2 (7,2% en contraste con un 4,9%), siendo el parámetro más influyente la densidad de corriente generada.

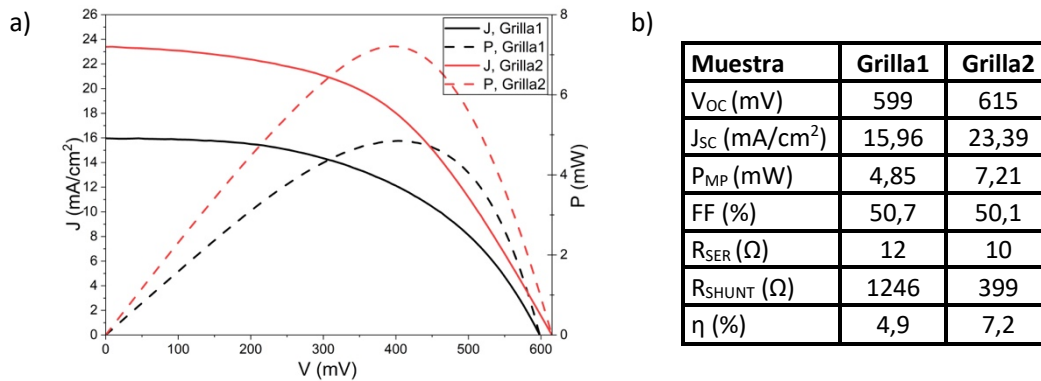


Figura 37: a) Curvas IV y curvas de potencia para celdas con ITO (negro: Grilla1 y rojo: Grilla2), b) parámetros fotovoltaicos celdas con ITO, Grilla1 y Grilla2.

Si bien el desempeño de la celda con la Grilla2 fue mejor que con la Grilla1, este metalizado no es completamente óptimo si comparamos este desempeño con la celda SHJ completa cuya eficiencia y FF son considerablemente mayores. La diferencia puede deberse tanto a la configuración geométrica (Figura 34b), al tipo de contacto y al método de depósito del metalizado. No obstante, este experimento permitió determinar que la Grilla2 es más efectiva y por lo tanto fue la escogida para ser utilizada en el estudio del desempeño del grafeno como TCE.

Se presentan a continuación, los resultados de las curvas IV de las celdas SHJ con grafeno como TCE. Un resumen de los parámetros fotovoltaicos obtenidos para muestras con grafeno y muestras de referencia se presenta en la Tabla 5 en la sección discusión.

6.4.3. Celda con ITO sin metalizado

Se realizó una medición sobre una de las celdas con ITO, pero en una región donde no hay contactos metálicos. La medición fue realizada bajo iluminación estándar y una irradiancia de $\sim 99,73$ mW/cm², considerando un área efectiva de $\sim 0,5$ cm².

Un esquema de la estructura de esta celda se presenta en la Figura 24f. Las curvas IV y de potencia generadas se presentan en la Figura 38a, en ella se aprecia que la forma de la curva

IV generada se acerca a la de una curva ideal, con una pequeña distorsión cerca de V_{OC} , compatible con una distorsión tipo *S-kink*. Esta distorsión no es apreciable en las celdas con ITO metalizadas presentadas en el apartado anterior (Celdas con ITO y grillas de plata).

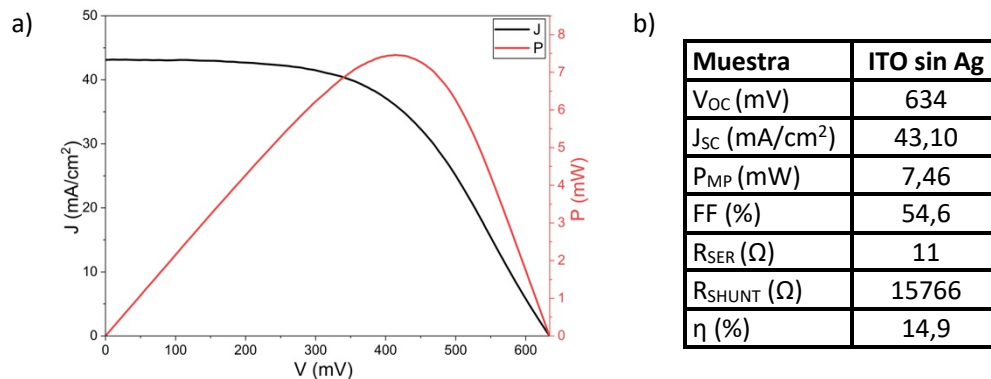


Figura 38: Celda con ITO sin metalizado: a) Estructura de la celda medida, b) curva corriente-voltaje y curva de potencia, c) parámetros fotovoltaicos.

A partir de los parámetros fotovoltaicos presentados en la Figura 38b es posible indicar que FF de esta celda es menor respecto del de la celda SHJ completa, pero mayor que en el sector donde se encuentran los contactos metálicos (ITO con Grilla2). J_{SC} generada es más alta que para la región con metalizado (ITO con Grilla2) y la celda SHJ completa, este es un resultado esperado, considerando que al no poseer metalizado, la absorción de radiación a través de la superficie de la celda es mayor. La resistencia en serie de esta celda es mayor que para la celda SHJ completa, una R_{SER} mayor dificulta la extracción de portadores de carga, lo cual es consistente con la disminución en su eficiencia.

6.4.4. Grafeno de tres películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata

Un esquema de la muestra Gr(3)/SHJ_PS_5 se presenta en la Figura 24b. Las curvas IV y de potencia para la muestra medidas para una irradiancia de $\sim 99,83$ mW/cm² y un área efectiva de ~ 1 cm², se muestran en la Figura 39a, en ella es posible visualizar que la curva IV presenta un comportamiento muy alejado del ideal, con una distorsión tipo *S-kink* muy marcada. Los parámetros fotovoltaicos asociados son presentados en la Figura 39b.

V_{OC} registrado para esta celda es ligeramente menor que para las celdas con ITO, lo que sugiere una mayor recombinación superficial. J_{SC} es pequeña, lo cual podría deberse a la baja transparencia de las películas de grafeno transferidas a la celda, lo cual se aprecia en la Figura 28a, menor radiación logra ser absorbida por la capa activa de la celda.

Adicionalmente, la relación entre valores de R_{SHUNT} y R_{SER} se aleja de un comportamiento ideal. R_{SER} es alta, lo cual podría estar relacionado con el aumento de la resistencia de hoja del grafeno al agregar los contactos de plata sobre él y por el elevado valor de la resistividad de contacto en la interfaz Ag/Gr. Por otra parte, R_{SHUNT} es baja, lo que sugiere que la corriente eléctrica posee fugas, que podrían estar asociadas a contacto entre el metalizado

posterior y la capa activa de la celda y a la formación de una capa de óxido en la interfaz Gr/n⁺ a-Si:H, ya que la distorsión presente en la curva IV de esta celda es consistente con el comportamiento reportado previamente en dispositivos Gr/n-Si con óxido de espesor considerable [33].

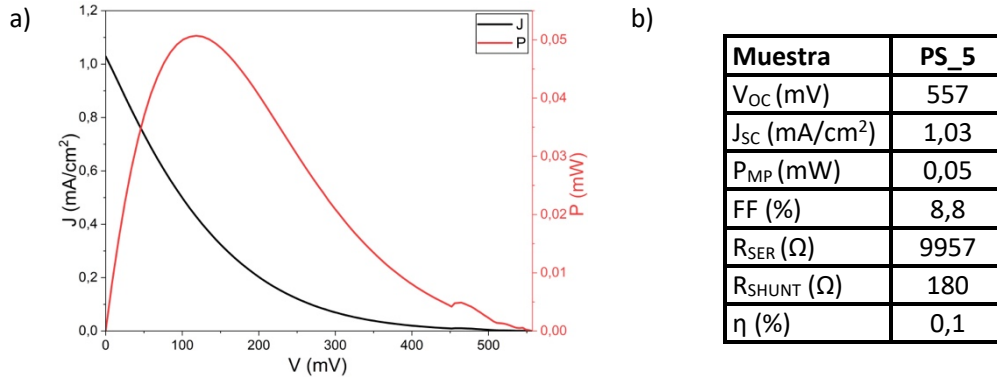


Figura 39: Celda Gr(3)/SHJ_PS_5: a) curva IV y curva de potencia, b) parámetros fotovoltaicos.

6.4.5. Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura con metalizado de plata

La Figura 40a muestra curvas IV y de potencia para la muestra, las curvas negras corresponden a la celda con 100nm de plata depositados por sputtering (PS_6), para una irradiancia de $\sim 99,90$ mW/cm², y las curvas rojas son de la misma celda con el busbar reforzado con epoxi de plata (PS_6.e), para una irradiancia de $\sim 99,73$ mW/cm², ambas mediciones consideran un área efectiva de ~ 1 cm². Los parámetros fotovoltaicos de ambas mediciones se presentan en la Figura 40b. La variación de parámetros fotovoltaicos entre las mediciones con y sin epoxi de plata no presentan variaciones significativas, esto se ve reflejado en las curvas IV que son muy similares entre sí.

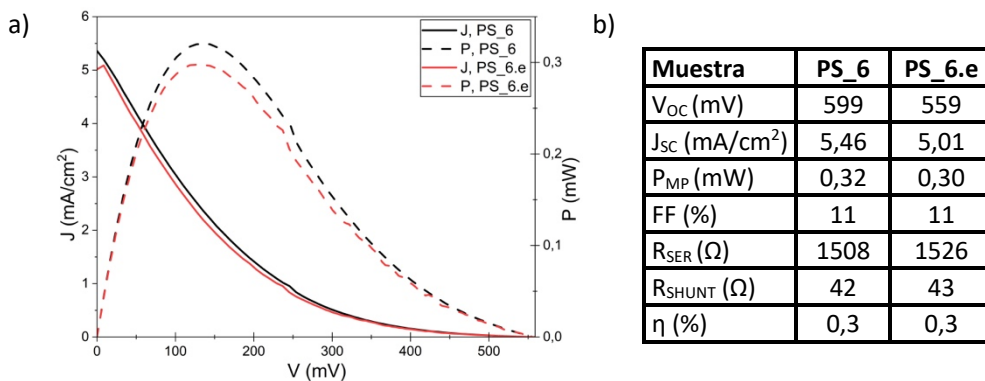


Figura 40: Celda Gr(2)/SHJ_PS_6: a) Curva IV y curva de potencia con plata depositada (negro) y contactos reforzados con epoxi de plata (rojo), b) Parámetros fotovoltaicos de ambas mediciones.

Es posible observar, en ambas curvas IV, el efecto observado en la muestra Gr(3)/SHJ_PS_5, nuevamente consistente con lo reportado por Song *et al.* [33]. Aun con el comportamiento no ideal de la curva, la eficiencia de esta muestra (0,3%) es mayor a la de la celda

Gr(3)/SHJ_PS_5 (0,05%), lo cual puede explicarse dado el aumento de la densidad de corriente extraída por esta muestra. No obstante lo anterior, se observa un comportamiento no ideal en las resistencias shunt y en serie para esta muestra.

6.4.6. Grafeno de dos películas sobre celda de heterojuntura sin metalizado

Con el objetivo de indagar en el efecto del metalizado sobre el desempeño de celdas SHJ con grafeno como TCE, se midió una muestra con grafeno de dos películas sin metalizar. Un esquema de la estructura de esta celda se presenta en la Figura 24c. En la Figura 41a se observan curvas IV y de potencia para la muestra Gr(2)/SHJ_PS_7 obtenidas iluminando la celda con una irradiancia de $\sim 99,73 \text{ mW/cm}^2$, considerando un área efectiva de $\sim 1 \text{ cm}^2$.

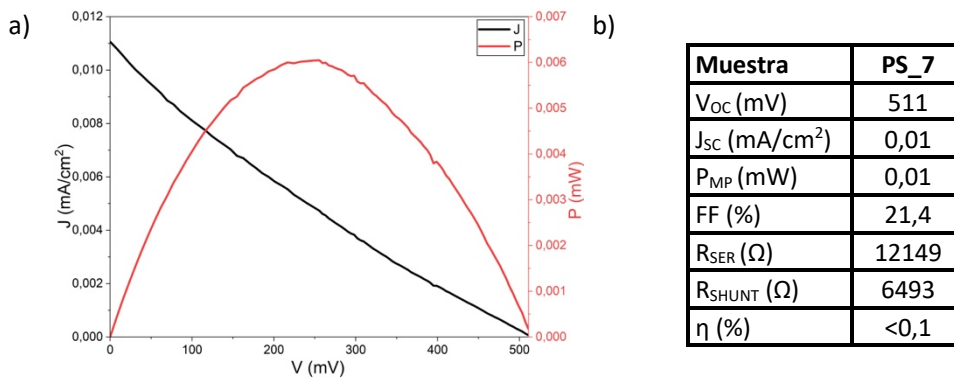


Figura 41: Celda Gr(2)/SHJ_PS_7: a) curva IV y curva de potencia, b) parámetros fotovoltaicos.

Los parámetros fotovoltaicos asociados a esta celda se muestran en la Figura 41b, de ellos se puede extraer que la densidad de corriente generada por esta celda es considerablemente menor que las celdas con grafeno y metalizado de plata, lo cual es un resultado inesperado que requiere ser estudiado. Si bien la curva IV no presenta una distorsión tan marcada como en las celdas anteriores, sigue siendo una curva que dista bastante de un comportamiento ideal y es posible apreciar en ella una degradación importante del factor de llenado. R_{SER} de esta muestra presenta un valor demasiado alto, contribuyendo a la degradación del factor de llenado. Estos parámetros en conjunto llevan a esta celda a tener una eficiencia sustancialmente disminuida (0,0006%).

6.4.7. Grafeno de una película sobre celda de heterojuntura sin metalizado

La celda Gr(1)/SHJ_PS_8 corresponde a una muestra de grafeno de una película sin contactos metálicos. La Figura 42a muestra la curva IV y curva de potencia de esta celda iluminada con una irradiancia de $\sim 99,73 \text{ mW/cm}^2$, para un área efectiva de $\sim 1 \text{ cm}^2$. En ella se observa que existe una degradación en el factor de llenado, lo que se puede confirmar en la tabla de parámetros presentada en la Figura 42b.

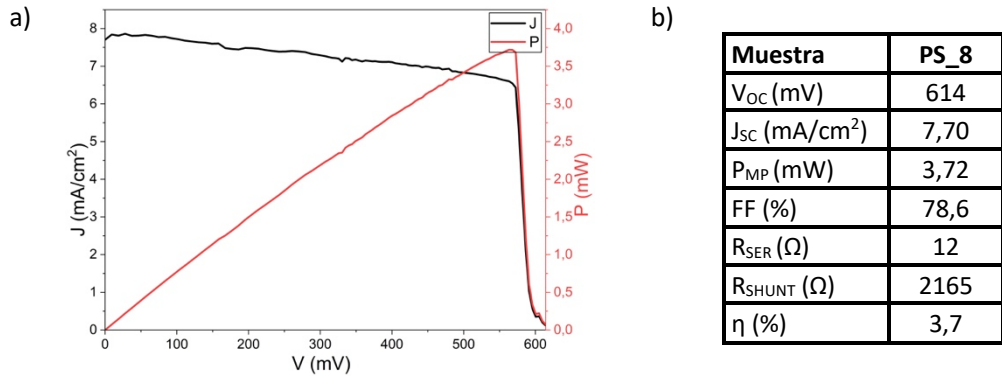


Figura 42: Celda Gr(1)/SHJ_PS_8: a) Curva IV y curva de potencia, b) Parámetros fotovoltaicos.

J_{SC} extraída de esta muestra es mayor a las tres muestras anteriores con grafeno como TCE, lo cual es un resultado esperado, ya que no hay metalizado que sombree la capa activa de la celda. Sin embargo, esta densidad de corriente es muy disminuida en comparación de la celda con ITO sin metalizar, lo que sugiere que el grafeno, en las condiciones estudiadas, no logra igualar el desempeño del ITO como TCE. R_{SHUNT} y R_{SER} de esta celda poseen un comportamiento típico de curva ideal, R_{SHUNT} alta y R_{SER} pequeña, comportamiento que no se observa en los parámetros obtenidos para otras muestras con grafeno. Adicionalmente, la eficiencia de esta celda es la mayor obtenida para muestras con grafeno, lo que sugiere que efectivamente existe una problemática asociada a los contactos metálicos (interfaz Ag/Gr).

7. Discusión

El presente trabajo evaluó el uso de grafeno sintetizado por CVD como electrodo conductor transparente (TCE) en celdas solares de silicio de heterojuntura (SHJ), abordando de manera integrada su caracterización estructural, eléctrica y su impacto en el desempeño fotovoltaico del dispositivo final.

La discusión de los resultados se estructura considerando, en primer lugar, las propiedades eléctricas del grafeno y de la interfaz metal/grafeno, y posteriormente su influencia directa sobre los parámetros fotovoltaicos de las celdas SHJ estudiadas.

Resistencia de hoja y calidad eléctrica del grafeno transferido

Los valores de resistencia de hoja y movilidad del grafeno obtenidos mediante mediciones de efecto Hall se resumen en la Tabla 3. Los resultados muestran resistencias de hoja del orden de 1-4 k Ω /sq, consistentes con los valores obtenidos mediante TLM, mostrados en la Tabla 2, y representativos de grafeno CVD transferido sobre un sustrato aislante. Estos valores son significativamente más altos que el medido para el ITO y los típicamente reportados para TCE convencionales.

Adicionalmente, en estos resultados no se evidencia una reducción sistemática de la resistencia de hoja al aumentar el número de películas de grafeno transferidas, Esto sugiere que la conductividad eléctrica efectiva de las muestras no está determinada únicamente por el apilamiento de capas, sino que podría estar fuertemente influenciada por su calidad estructural.

Resistencia de contacto en la interfaz Ag/Gr

Los resultados de resistencia de contacto normalizada y resistividad específica de contacto obtenidos mediante el método de longitud de transferencia se presentan en las Tablas 2 y 3. Los valores obtenidos muestran una dispersión considerable entre muestras nominalmente similares, lo que evidencia una fuerte dependencia de la resistencia de contacto con factores locales del sistema experimental y con la calidad efectiva del contacto metal-grafeno.

Es posible observar una ligera disminución tanto de la resistencia de contacto normalizada como de la resistividad de contacto específica en función del número de películas de grafeno transferidas, tal como se observa en las Figuras 43a y 43b. Sin embargo, esta tendencia no es monótona ni reproducible para todas las muestras y se encuentra enmascarada por una dispersión significativa. Este comportamiento pone en evidencia las limitaciones del modelo TLM clásico aplicado en sistemas metal-grafeno, en los cuales el transporte electrónico es altamente sensible al dopaje inducidos por el contacto metálico y por el sustrato, así como a inhomogeneidades de la interfaz [9], [27], [28], [29].

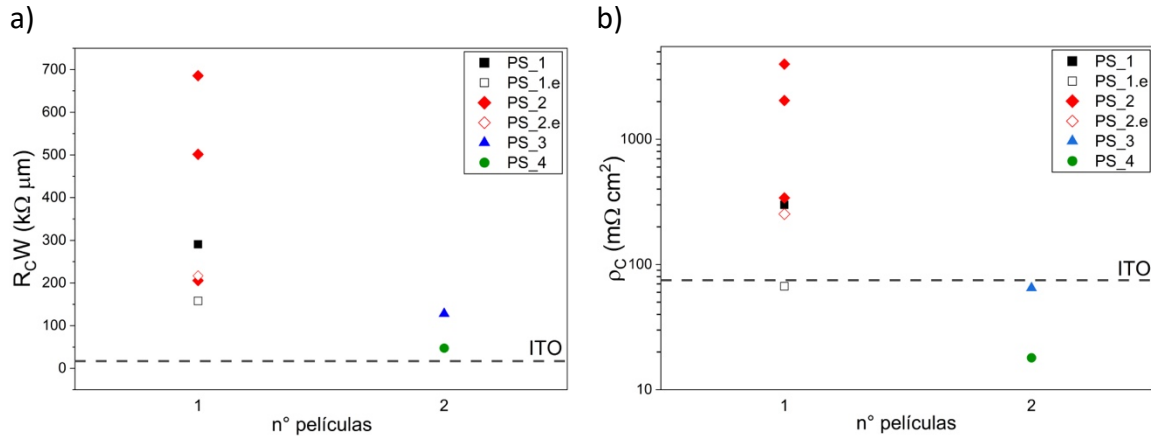


Figura 43: a) Grafico de resistencia de contacto normalizada R_{CW} en función del número de películas de grafeno en muestras Ag/Gr/SiO₂, b) Grafico de resistividad de contacto en función del número de películas de grafeno en muestras Ag/Gr/SiO₂.

En este contexto, los valores de resistencia de contacto extraídos deben interpretarse como parámetros eléctricos efectivos del sistema experimental y no como propiedades intrínsecas del contacto. Los valores obtenidos en este trabajo son superiores a los reportados por Anzi *et al.* [25] para contactos Ag/Gr medidos bajo condiciones controladas de dopaje cercanas al punto de Dirac. Esta diferencia puede atribuirse a la ausencia del control del dopaje, así como a diferencias en la calidad estructural del grafeno, el proceso de transferencia e incluso la geometría de los contactos empleados. Estudios previos han demostrado que incluso para un mismo metal, la resistencia de contacto en grafeno puede variar varios órdenes de magnitud dependiendo de las condiciones experimentales y del estado electrónico local del material [24].

Impacto de las propiedades eléctricas del grafeno en el desempeño fotovoltaico

Los parámetros fotovoltaicos obtenidos a partir de las curvas IV bajo iluminación estándar, resumidos en la Tabla 5, muestran que las celdas SHJ con grafeno como TCE presentan un desempeño inferior al de las celdas con ITO. Esta diferencia se manifiesta principalmente en una reducción del factor de llenado (FF) y de la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), mientras que el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) se mantiene relativamente constante.

La comparación de las muestras SHJ sin TCE y Gr(1)/SHJ_PS_8, presentada en la Figura 48a, evidencia que el uso de grafeno como TCE mejora los parámetros fotovoltaicos obtenidos para la celda SHJ, confirmando la necesidad de aplicar electrodos conductores para obtener un mejor desempeño en las celdas. Sin embargo, la comparación entre las muestras Gr(1)/SHJ_PS_8 e ITO2 sin Ag, presentada en la Figura 48b, evidencia que, si bien el desempeño de la celda con grafeno como TCE es mayor a la celda sin TCE, esta mejora no logra igualar el desempeño del ITO.

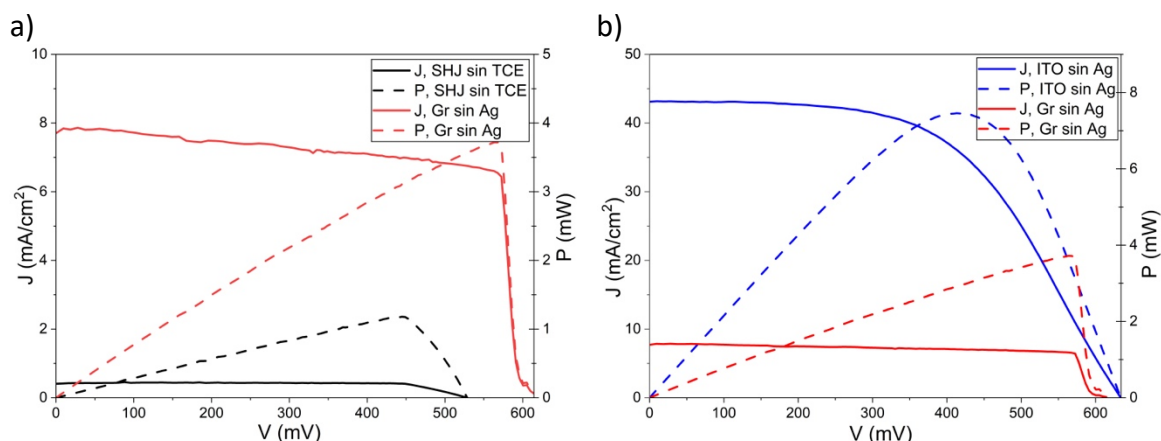


Figura 44: a) Comparación curvas IV y de potencia para muestras SHJ sin TCE (negro) y Gr(1)/SHJ_PS_8 (rojo), b) comparación curvas IV y de potencia para muestras Gr(1)/SHJ_PS_8 (rojo) y ITO2 sin Ag (azul).

Tabla 5: Tabla resumen de parámetros fotovoltaicos de celdas estudiadas.

Muestra	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	P_{MP} (mW)	FF (%)	η (%)
SHJ completa	694	34,09	74,09	71,1	16,9
SHJ sin TCE	529	0,41	1,21	85,2	1,2
ITO Grilla2	615	23,39	7,21	50,1	7,2
ITO sin metalizado	634	43,10	7,46	54,6	14,9
Gr(3)/SHJ_PS_5	557	1,03	0,05	8,8	0,1
Gr(2)/SHJ_PS_6	559	5,01 - 5,36	0,30 – 0,32	10,6-10,7	0,3
Gr(2)/SHJ_PS_7	511	0,01	0,0061	21,4	<0,01
Gr(1)/SHJ_PS_8	614	7,70	3,72	78,6	3,7

La celda Gr(3)/SHJ_PS_5 genera una J_{SC} mucho más baja que la celda Gr(2)/SHJ_PS_6, esto podría explicarse debido a la baja transparencia del grafeno en la primera muestra, como se puede visualizar en la Figura 34a. Este resultado también es consistente con las mediciones de transmitancia reportadas por Lancellotti *et al.* [37], que muestran una ligera disminución de la transmitancia óptica a medida que se apila un mayor número de capas de grafeno.

La estabilidad del V_{OC} sugiere que los mecanismos de recombinación y la calidad de la pasivación de la heterojuntura no se ven significativamente afectados por la incorporación del grafeno. Este comportamiento es consistente con el hecho de que, en tecnologías SHJ, el V_{OC} está principalmente determinado por la pasivación de la interfaz entre el silicio cristalino y el silicio amorfo hidrogenado, mientras que modificaciones en el TCE frontal tienden a impactar otros parámetros del dispositivo [1], [14]. En contraste, la reducción del

FF podría atribuirse principalmente al incremento de la resistencia serie efectiva del dispositivo, asociada tanto a la elevada resistencia del hoja del grafeno como a la alta resistencia de contacto en la interfaz Ag/Gr.

De manera complementaria, la disminución de J_{SC} observada en la Tabla 5 podría estar relacionada con una recolección no uniforme de los portadores fotogenerados, limitada por la conductividad lateral del grafeno y por la no idealidad de los contactos metálicos, tal como se ha reportado previamente para TCE basados en grafeno en SHJ [36], [37]. En dispositivos convencionales con ITO presentan una recolección de corriente más homogénea debido a su mayor conductividad lateral [3]. En coherencia con este comportamiento, las celdas de referencia con ITO estudiadas en este trabajo presentan valores de J_{SC} superiores a los obtenidos en las celdas con grafeno, lo que refuerza la interpretación propuesta.

Posible rol de la interfaz Gr/ n^+ a-Si:H

Si bien este trabajo no evalúa directamente la alineación de bandas ni la naturaleza electrónica de la interfaz entre el grafeno y la capa dopada de silicio amorfo (Gr/ n^+ a-Si:H), estudios previos en sistemas Gr/Si han demostrado que la interfaz puede comportarse como una barrera tipo Schottky bajo ciertas condiciones [30], [32]. Por analogía, un comportamiento similar no puede descartarse en la interfaz considerada en este trabajo.

Adicionalmente, se ha demostrado que la presencia de óxidos interfaciales y el nivel de dopaje del grafeno pueden modificar la altura efectiva de la barrera y afectar al transporte de portadores en dispositivos Gr/Si [33]. En este sentido, los resultados obtenidos en este trabajo para celdas SHJ con grafeno como TCE, son consistentes con lo reportado. En particular, las celdas Gr(3)/SHJ_PS_5 y Gr(2)/SHJ_PS_6 presentaron curvas IV (Figuras 39a y 40a) con forma no ideal, caracterizada por una distorsión marcada compatible con el comportamiento tipo *s-kink* asociado a la presencia de óxidos interfaciales de espesor no despreciable, tal como fue reportado por Song *et al.* [33]. En contraste, la celda Gr(1)/SHJ_PS_8 no presenta este comportamiento, la curva IV generada para ella tiene un comportamiento más cercano al ideal, tal como se observa en la Figura 42a. La diferencia entre estas muestras es justamente el tiempo de exposición al ambiente, las celdas se encontraban en un empaque sellado, en un ambiente de nitrógeno, la muestra Gr(1)/SHJ_PS_8 fue transferida sólo unos minutos después de exponer las celdas al aire, mientras que las Gr(3)/SHJ_PS_5 y Gr(2)/SHJ_PS_6 estuvieron expuestas al ambiente por meses, lo que sugiere que la capa de óxido presente en las dos últimas debe tener un espesor considerablemente mayor que la primera.

8. Conclusiones

En este trabajo se estudió el uso de grafeno sintetizado por deposición química en fase de vapor (CVD) como electrodo conductor transparente (TCE) en celdas de silicio de heterojuntura (SHJ), poniendo especial atención a la caracterización eléctrica del grafeno y de la interfaz Plata/Grafeno y su impacto sobre el desempeño fotovoltaico de los dispositivos. Los resultados obtenidos permiten concluir lo siguiente:

Las mediciones eléctricas revelaron resistencias de contacto normalizadas en la interfaz Ag/Gr significativamente superiores a las reportadas para el óxido de indio y estaño (ITO), lo que incrementa la resistencia serie del dispositivo. Este comportamiento pone en evidencia la sensibilidad del transporte electrónico en grafeno a factores como la calidad del contacto, el dopaje inducido y la homogeneidad de la interfaz, aspectos que requieren optimización para reducir pérdidas resistivas.

Los resultados muestran que el número de capas de grafeno influye en el comportamiento eléctrico del sistema, observándose diferencias entre muestras monocapa y bicapa. Estas diferencias se asocian a la modificación del régimen electrónico del grafeno bajo el contacto metálico. Sin embargo, el aumento del número de capas no conduce de manera sistemática a una reducción de la resistencia de hoja ni de la resistencia de contacto.

La presencia de grietas y discontinuidades en las películas de grafeno transferidas contribuye a incrementar la resistencia efectiva del canal y la dispersión mediante los valores medidos por TLM. Estas no idealidades estructurales constituyen un factor adicional a considerar al interpretar los resultados y refuerzan la idea de optimizar los procesos de transferencia del grafeno para aplicaciones en dispositivos fotovoltaicos.

Las celdas SHJ con grafeno como TCE conservaron voltajes de circuito abierto comparables a los dispositivos de referencia, lo que indica que la pasivación de la heterojuntura no se ve comprometida con la incorporación del grafeno. Sin embargo, la baja conductividad lateral del grafeno y la no idealidad de los contactos metálicos provocaron una disminución significativa en el factor de llenado y la eficiencia global, confirmando que el comportamiento eléctrico del TCE es determinante para el rendimiento de las celdas. Este comportamiento es atribuible a pérdidas resistivas dominadas por la elevada resistencia de hoja del grafeno, que incrementa la resistencia lateral del electrodo, y por la resistencia de contacto en la interfaz Ag/Gr, en consistencia con las mediciones eléctricas realizadas.

Los resultados obtenidos son coherentes con lo reportado en la literatura para dispositivos basados en grafeno, donde se ha demostrado que su integración exitosa requiere estrategias adicionales como dopaje químico, apilamiento de capas o configuraciones híbridas con óxidos conductores. Sin estas optimizaciones, el grafeno no alcanza parámetros competitivos frente a materiales convencionales.

Si bien no se evaluó directamente la naturaleza de la juntura Gr/n+ a-Si:H, la literatura sugiere que esta interfaz puede comportarse como una barrera tipo Schottky bajo ciertas condiciones, y acentuada por la formación de óxido nativo en la superficie del silicio. La posible presencia de esta barrera adicional podría contribuir a las pérdidas observadas en el desempeño fotovoltaico de los dispositivos, constituyendo un mecanismo complementario a las pérdidas resistivas identificadas experimentalmente

En conjunto, los resultados presentados en este trabajo, confirman que, en ausencia de estrategias adicionales de dopaje o ingeniería de contactos, el uso de grafeno como TCE en celdas SHJ presenta limitaciones eléctricas significativas. Estos resultados son coherentes con el estado del arte, donde se ha demostrado que el desempeño competitivo del grafeno como electrodo conductor transparente suele requerir configuraciones híbridas, apilamiento controlado de capas o técnicas de dopaje químico o electrostático [34], [35], [36], [37], [39].

No obstante, el trabajo desarrollado permite identificar de manera clara las principales limitantes del sistema y proporciona una base experimental sólida para orientar posibles futuras líneas de investigación. En particular, la ingeniería de la interfaz metal-grafeno y la alineación energética en la interfaz Gr/Si emergen como estrategias clave para reducir pérdidas resistivas y apuntar hacia una integración más eficiente del grafeno en dispositivos fotovoltaicos de heterojuntura.

9. Referencias

- [1] Y. P. Xiao, X. Q. Wei, and L. Zhou, "Interface states study of intrinsic amorphous silicon for crystalline silicon surface passivation in HIT solar cell," *Chinese Phys. B*, vol. 26, Art. no. 048104, 2017, doi: 10.1088/1674-1056/26/4/048104.
- [2] T. Gageot *et al.*, "Feasibility test of drastic indium cut down in SHJ solar cells and modules using ultra-thin ITO layers," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 261, Art. no. 112512, 2023, doi: 10.1016/j.solmat.2023.112512.
- [3] W. Cui, F. Chen, Y. Li, X. Su, and B. Sun, "Status and perspectives of transparent conductive oxide films for silicon heterojunction solar cells," *Mater. Today Nano*, Art. no. 100329, 2023, doi: 10.1016/j.mtnano.2023.100329.
- [4] P. Mandal, J. Debbarma, and M. Saha, "A review on the emergence of graphene in photovoltaics industry," *Biointerface Res. Appl. Chem.*, vol. 11, no. 6, pp. 15009–15036, 2021, doi: 10.33263/briac116.1500915036.
- [5] Solargis, "Global Solar Resource Map – Direct Normal Irradiation (DNI)," 2021.
- [6] Coordinador Eléctrico Nacional, "Reporte energético," 2025. [Online]. Available: www.coordinador.cl
- [7] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006, doi: 10.1002/0471749095.fmatter.
- [8] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. Sydney, Australia: Univ. New South Wales, 1982.
- [9] S. Grover, S. Sahu, P. Zhang, K. O. Davis, and S. K. Kurinec, *Standardization of Specific Contact Resistivity Measurements Using Transmission Line Model (TLM)*. Edinburgh, U.K.: IEEE, 2020.
- [10] Fraunhofer ISE, "Photovoltaics report," 2025. [Online]. Available: www.ise.fraunhofer.de
- [11] M. A. Green *et al.*, "Solar cell efficiency tables (Version 66)," *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, vol. 33, no. 7, pp. 795–810, 2025, doi: 10.1002/pip.3919.
- [12] D. S. Ginley, *Handbook of Transparent Conductors*. New York, NY, USA: Springer, 2011, doi: 10.1007/978-1-4419-1638-9.
- [13] J. Patel, R. K. Sharma, M. A. Quijada, and M. M. Rana, "A review of transparent conducting films (TCFs): Prospective ITO and AZO deposition methods and applications," *Nano*, vol. 14, no. 24, Art. no. 2013, 2024, doi: 10.3390/nano14242013.

- [14] M. Kim *et al.*, “Roadmap towards sustainable SHJ solar cell design,” in *Proc. AIP Conf.*, 2023, doi: 10.1063/5.0140906.
- [15] E. I. Bancu *et al.*, “Towards AZO thin films for electronic and optoelectronic large-scale applications,” *Crystals*, vol. 15, Art. no. 0670, 2025, doi: 10.3390/cryst15080670.
- [16] P. Schmid *et al.*, “Reducing indium consumption in silicon heterojunction solar cells with TCO stack systems of ITO and AZO,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 13, no. 5, pp. 646–655, 2023, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3267175.
- [17] J. A. A. Hutapea *et al.*, “Comprehensive review of graphene synthesis techniques,” *Micromachines*, vol. 5, Art. no. 0040, 2025, doi: 10.3390/micro5030040.
- [18] S. H. Alwan *et al.*, “A mini-review on graphene,” *Eng. Proc.*, vol. 59, no. 1, Art. no. 226, 2023, doi: 10.3390/engproc2023059226.
- [19] A. Dathbun and S. Chaisitsak, “Effects of three parameters on graphene synthesis by chemical vapor deposition,” in *Proc. 8th IEEE Int. Conf. Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, Suzhou, China, 2013, doi: 10.1109/NEMS.2013.6559895.
- [20] M. D. Bhatt, H. Kim, and G. Kim, “Various defects in graphene: A review,” *RSC Adv.*, vol. 12, pp. 24859–24877, 2022, doi: 10.1039/d2ra01436j.
- [21] Z. Wu *et al.*, “Step-by-step monitoring of CVD-graphene during wet transfer by Raman spectroscopy,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 71, pp. 41447–41452, 2019, doi: 10.1039/c9ra09268d.
- [22] W. Liu, J. Wei, X. Sun, and H. Yu, “A study on graphene-metal contact,” *Crystals*, vol. 3, no. 1, pp. 257–274, 2013, doi: 10.3390/cryst3010257.
- [23] T. Cusati *et al.*, “Electrical properties of graphene-metal contacts,” *Sci. Rep.*, vol. 7, Art. no. 5107, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-05069-7.
- [24] E. Watanabe *et al.*, “Low contact resistance metals for graphene-based devices,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 24, pp. 171–174, 2012, doi: 10.1016/j.diamond.2012.01.019.
- [25] L. Anzi *et al.*, “Ultra-low contact resistance in graphene devices at the Dirac point,” *2D Mater.*, vol. 5, no. 2, Art. no. 025014, 2018, doi: 10.1088/2053-1583/aaab96.
- [26] S. Fernández *et al.*, “Graphene-based contacts for optoelectronic devices,” *Micromachines*, vol. 11, no. 10, Art. no. 919, 2020, doi: 10.3390/mi11100919.
- [27] G. Giovannetti *et al.*, “Doping graphene with metal contacts,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, Art. no. 026803, 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.101.026803.

- [28] R. Nouchi, T. Saito, and K. Tanigaki, "Observation of negative contact resistances in graphene field-effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, Art. no. 152104, 2008, doi: 10.1063/1.3000619.
- [29] S. Das Sarma *et al.*, "Electronic transport in two-dimensional graphene," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 83, pp. 407–470, 2011, doi: 10.1103/RevModPhys.83.407.
- [30] X. Li *et al.*, "Graphene-on-silicon Schottky junction solar cells," *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 25, pp. 2743–2748, 2010, doi: 10.1002/adma.200904383.
- [31] S. Ju *et al.*, "Graphene/silicon Schottky solar cells," *Opt. Commun.*, vol. 428, pp. 258–268, 2018, doi: 10.1016/j.optcom.2018.02.033.
- [32] C. C. Chen *et al.*, "Graphene-silicon Schottky diodes," *Nano Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 1863–1867, 2011, doi: 10.1021/nl104364c.
- [33] Y. Song *et al.*, "Role of interfacial oxide in graphene-silicon Schottky barrier solar cells," *Nano Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 2104–2110, 2015, doi: 10.1021/nl505011f.
- [34] N. N. Rosli *et al.*, "A review of graphene-based transparent conducting films for use in solar photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 99, pp. 83–99, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.011.
- [35] S. Fernández *et al.*, "Advanced graphene-based transparent conductive electrodes for photovoltaic applications," *Micromachines*, vol. 10, no. 6, Art. no. 402, 2019, doi: 10.3390/mi10060402.
- [36] I. Torres *et al.*, "Graphene-based electrodes for silicon heterojunction solar cell technology," *Materials*, vol. 14, no. 17, Art. no. 4833, 2021, doi: 10.3390/ma14174833.
- [37] L. Lancellotti *et al.*, "Graphene as non-conventional transparent conductive electrode in silicon heterojunction solar cells," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 525, Art. no. 146443, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.146443.
- [38] H. Li *et al.*, "Promising hybrid graphene–silver nanowire composite electrode for flexible organic light-emitting diodes," *Sci. Rep.*, vol. 9, Art. no. 54424, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-54424-3.
- [39] X. Miao *et al.*, "High efficiency graphene solar cells by chemical doping," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 6, pp. 2745–2750, 2012, doi: 10.1021/nl204414u.
- [40] A. N. Mehta *et al.*, "Understanding noninvasive charge transfer doping of graphene," *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, vol. 29, no. 7, pp. 5239–5252, 2018, doi: 10.1007/s10854-017-8443-8.

- [41] G. S. Papanai *et al.*, "Probing number of layers and quality assessment of mechanically exfoliated graphene via Raman fingerprint," *Mater. Today Commun.*, vol. 22, Art. no. 100795, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.100795.
- [42] A. C. Ferrari *et al.*, "Raman spectrum of graphene and graphene layers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 18, Art. no. 187401, 2006, doi: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.
- [43] C. Álvarez, "Crecimiento y caracterización de grafeno para su aplicación en energía solar fotovoltaica," Tesis, Valparaíso, Chile, 2025.