



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA OBTENCIÓN DE CELDAS SOLARES DE BAJO COSTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FELIPE JAVIER HERRERA VELAZCO

PROFESOR GUÍA:

DENISE CRIADO PEREIRA DE SOUZA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARCO A. BEJAR VEGA

VICTOR M. FUENZALIDA ESCOBAR

SANTIAGO DE CHILE

AGOSTO 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: FELIPE HERRERA VELAZCO
FECHA: AGOSTO 12 DE 2009
PROF. GUÍA: SRTA. DENISE CRIADO P.

“ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA OBTENCIÓN DE CELDAS SOLARES DE BAJO COSTO”

El objetivo general del presente trabajo de título es estudiar la viabilidad de obtener celdas solares de bajo costo, con la finalidad de fabricar una celda solar con los equipos y tecnología disponibles en la actualidad en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Para esto se estudiaron las etapas de obtención de una celda solar, tal como el proceso de formación de textura en el sustrato, deposición y difusión de distintas capas dopantes y formación de contactos metálicos.

En la actualidad, nuestra facultad ha considerado la importancia que existe en la investigación de este tipo de energía. Es por esto que la Dra. Denise Criado, del Departamento de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Chile, ha iniciado esta línea de investigación, comenzando con la fabricación y caracterización de películas delgadas para aplicación en celdas solares de bajo costo en un laboratorio convencional. Sin duda, para desarrollar esta tecnología es necesario disponer de un laboratorio con las características ad-hoc, el cual no está disponible. Por lo tanto, es necesario reacondicionar equipos e instalaciones para cumplir los requerimientos mínimos de fabricación y limpieza.

Los procesos iniciales de fabricación fueron destinados para acondicionar y mejorar las condiciones de construcción y poder definir factores que influían de forma relevante en los flujos de corriente del dispositivo definitivo. Para esto se determinaron volúmenes óptimos de películas a través de los experimentos y literatura, tiempos óptimos de exposición y deposición dentro de los diversos procesos involucrados. Se logró fabricar una junta de aluminio, silicio y fósforo, para posteriormente depositar contactos metálicos y así lograr medir flujos de corriente. A su vez, se probó una celda solar, donde los contactos eran proporcionados por un polímero conductor. De estas medidas se logró determinar la existencia de aumentos en el flujo de corriente, tanto en juntas con contactos poliméricos como en juntas con contactos metálicos comparadas con medidas realizadas a la junta sin contacto. El mayor aumento en el flujo de corriente fue obtenido en una celda con contactos metálicos, llegando cerca de 49 mA, por sobre el flujo de 3,3 mA obtenido en celdas con contacto polimérico, sobre probetas de 1 in^2 . Se obtuvo una eficiencia de 1,5% para la celda de contactos metálicos, valor que puede aumentar mejorando procesos que lleven a un mejor contacto metálico, disminuir resistencias en el cuerpo de la celda y en los contactos, disminuir impurezas, mejorar gradiente de difusión y minimizar contacto lateral entre capas.

Quiero agradecer y dedicar esta memoria a mis padres, Jaime Herrera G. y María Cristina Velazco H., por el apoyo, paciencia y comprensión que me han brindado a lo largo de toda mi vida, para poder ser la persona que soy.

*A mis hermanos, Jaime y Rodrigo por el respaldo que le han dado a mis sueños e ideales.
A mi profesor Integrante, Víctor M. Fuenzalida por la confianza generada para que yo pudiera trabajar con seguridad y tranquilidad en los distintos equipos de su laboratorio.*

A mi profesor co-guía, Marco A. Bejar por enseñarme el camino de la innovación y día a día buscar la mejora en mi trabajo.

En particular, a mi profesora guía, Denise Criado P. de Souza por su comprensión, confianza y respaldo en todos los momentos de éste proceso, que significó el éxito de esta memoria.

Agradecimientos a la Dra. Katia Franklin Albertin y Dr. Michel O. S. Dantas, profesores Manuel Cid Sanchez e Inés Pereira y el apoyo de Cristina, Ana Rita Pereira dos Santos y Carlos Ramos del Laboratorio de Microelectrónica de la Universidad de Sao Paulo. A Andrés Espinosa y Ricardo Silva, técnicos del Laboratorio de Superficies y Nanomateriales de la Universidad de Chile.

Finalmente, agradezco a mis amigos y familiares que siempre se han preocupado por mi, brindándome su apoyo y cariño.

Muchas gracias.

Felipe Herrera Velazco

Índice general

Índice de Tablas	IV
Índice de Figuras	VI
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivos Generales	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Motivación	2
1.3. Limitaciones	4
2. Antecedentes.	5
2.1. Tipos de tecnología en celdas solares	5
2.2. Espectro del Sol	5
2.3. Semiconductores	6
2.4. Comportamiento físico de una celda solar	7
2.5. Modelo básico de una celda solar	10
2.6. Celdas híbridas	12

2.7. Eficiencia de un celda solar. [2]	12
2.8. Modelo eléctrico de una celda solar. [14]	14
3. Metodología Específica	15
3.1. Introducción	15
3.2. Procedimientos de Construcción	15
3.2.1. Limpieza química de celdas.	15
3.2.2. Textura del sustrato de Silicio.	18
3.2.3. Deposición de Aluminio.	19
3.2.4. Deposición de Fósforo.	20
3.2.5. Difusión de Aluminio y Fósforo.	21
3.2.6. Formación del Contacto metálico.	23
3.2.7. Máscara	24
3.2.8. Proceso de litografía.	25
3.2.9. Formación del Contacto polimérico.	27
3.3. Procedimiento de Caracterización	27
3.3.1. Medida de Resistividad.	27
3.3.2. Microscopía electrónica de Barrido	28
3.3.3. Medidas de flujo de corriente y par de valores V-I.	29
4. Resultados	31
4.1. Limpieza química y textura del sustrato de Silicio.	31
4.2. Deposición y difusión de Aluminio para capa p y contactos metálicos.	37
4.3. Deposición y difusión de fósforo para capa n.	39

4.4. Litografía	41
4.5. Medidas de resistividad.	42
4.6. Medidas de Corriente	46
4.6.1. Mediciones de flujo de corriente para probetas con contacto metálico	47
4.6.2. Mediciones de flujo de corriente para probetas con contacto polimérico	51
4.6.3. Curva V-I y cálculo de eficiencia de probeta 3.	52
5. Conclusiones	55
Bibliografía	57
A. Tablas de datos obtenidos por método de cuatro contactos.	I
A.1. Datos obtenidos por el método de cuatro contactos para contactos transversales.	II
A.2. Datos obtenidos por el método de cuatro contactos para contactos puntuales.	IV
B. Datasheet de P509 y plano de máscara.	VI
B.1. Datasheet de solución de fósforo P509.	VI
B.2. Contactos metálicos.	VII

Índice de Tablas

1.1. Principales puntos de óptima captación de energía solar en el mundo.[15]	4
3.1. Procedimiento de difusión utilizados.	22
4.1. Tabla resumen de probetas ensayadas para litografía.	41
4.2. Detalle de valores geométricos de la probeta con contactos transversales y puntuales.	43
4.3. Resumen de resistividades.	46
4.4. Resumen de corrientes obtenidas.	47
4.5. Flujos de corriente de juntura con contacto metálico, probeta 1 de dos etapas.	49
4.6. Flujos de corriente de juntura con contacto metálico, probeta 2 de dos etapas.	49
4.7. Flujos de corriente de juntura con contacto metálico, probeta 3 de una etapa.	50
4.8. Flujos de corriente de juntura con contacto metálico, probeta 4 de una etapa.	50
4.9. Flujos de corriente de juntura antes de la deposición de polímero, probeta 5.	51
4.10. Flujos de corriente de juntura después de la deposición de polímero, probeta 5.	51
4.11. Flujos de corriente de juntura antes de la deposición de polímero, probeta 6 de una etapa.	52
4.12. Flujos de corriente de juntura después de la deposición de polímero, probeta 6 de dos etapas.	52
4.13. Valores de voltaje y corriente obtenidos de la probeta 3 con circuito con fuente bajo 650 W/m^2 de radiación incidente.	53

4.14. Valores I_{SC} , V_{OC} , I_{MP} y V_{MP} , de la probeta 3. 54

Índice de Figuras

1.1. Aumento en la fabricación de celdas, Millones de watts producidos por año en función del año.[1]	3
1.2. Ubicación de puntos con mayor condición para la captación de Energía Solar.[15]	4
2.1. Bandas de energía de electrones para Aislantes (izquierda) y Semiconductores (derecha).[10]	6
2.2. Estados ocupados en un semiconductor antes (a) y después (b) de la excitación.[10]	7
2.3. Para una unión pn rectificadora, representación de la distribución de electrones y vacancias en los casos: (a) No hay potencial eléctrico, (b) Polarización directa, (c) Polarización inversa .[10]	8
2.4. Gráfico corriente versus voltaje de una unión n-p para ambas polaridades (diodo).[10]	9
2.5. Curva IxV bajo iluminación patron (AM1,5G) de celda N-7-2 realizada por National Renewable Laboratory (NREL)[6].	9
2.6. Diagrama explicativo del funcionamiento de la celda solar.[16]	10
2.7. Micrografía de una superficie texturizada obtenida en un microscopio SEM.[6]	11
2.8. Esquema de etapas para fabricación de una celda solar. 1) Limpieza, 2) Textura, 3) Formación capa p, 4) Formación capa n, 5) Contactos metálicos.	11
2.9. Polímero Poli[1,2- di-(2-tienil)vinileno] [13].	12
2.10. Caracterización V-I para una celda ideal y Potencia producida por la celda. [2].	13
2.11. Circuito equivalente de una celda solar. [14].	14

2.12. Componentes que afectan la resistencia en serie de una celda solar. [2].	14
3.1. Evaporador de Aluminio.	20
3.2. Disposición de trozos de aluminio.	20
3.3. Montaje de la Oblea de silicio en evaporador.	20
3.4. Equipo Spin coating típico.	21
3.5. Horno High temperature tube furnace F59300 de marca Thermolyne.	23
3.6. Horno para el tratamiento térmico de los contactos metálicos.	24
3.7. Máscara utilizada en litografía.	25
3.8. Equipos de litografía y spinner utilizados	26
3.9. Etapas de litografía por técnica lift off.	26
3.10. Circuito equivalente para el método de cuatro contactos.	28
3.11. Esquema de medida de resistividad de cuatro contactos; a ancho, b separación y l largo de la probeta.	28
3.12. Microscopio de barrido del Departamento de Ingeniería Metalurgia de la Universidad de Santiago de Chile.	29
3.13. Circuitos para realizar las medidas de los par V-I.	30
4.1. Disposición de la Oblea en el Portacelda.	32
4.2. Texturización de oblea de Silicio.	32
4.3. Microscopio óptico, oblea texturizada, resolución 500x.	33
4.4. Microscopio óptico, oblea texturizada, resolución 800x.	33
4.5. Microscopio óptico, oblea sin texturizar, resolución 800x.	33
4.6. Caracterización de textura, resolución x2000	34
4.7. Caracterización de textura, resolución x5000.	34

4.8. Caracterización de textura, resolución x1000 a 90°	35
4.9. Caracterización de textura, resolución x5000 a 90°	35
4.10. Caracterización de textura, resolución x10000 a 37°	35
4.11. Caracterización de textura, resolución x5000 a 37°	35
4.12. Análisis de imagen 4.9 en programa Image J.	36
4.13. Análisis de imagen 4.9 en programa Image J.	37
4.14. Probeta (texturizada) evaporada con aluminio en su parte posterior.	38
4.15. Contactos metálicos sobre la capa n.	38
4.16. Comparación de probetas con aluminio depositado. A la izquierda se aprecian los primeros contactos realizados y a la derecha los contactos definitivos.	39
4.17. Primeras probetas con deposición de fósforo.	40
4.18. Probeta con piquete, resolución x50.	41
4.19. Probeta con piquete, resolución x200.	41
4.20. Probeta texturizada con litografía insatisfactoria.	42
4.21. Juntura con litografía satisfactoria.	42
4.22. Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto transversal sin luz.	44
4.23. Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto transversal con luz.	44
4.24. Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto puntual sin luz.	45
4.25. Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto puntual con luz.	45
4.26. Equipo para medir corriente en la celda.	47
4.27. Detalle de las medidas de corriente.	47

4.28. Resumen comparativo de flujos de corriente obtenido en las diferentes probetas ensayadas. .	48
4.29. Curva V-I y curva V-P para probeta 3.	53

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la energía proveniente del sol se utiliza para producir energía térmica y eléctrica (concentradores solares y paneles fotovoltaicos). En la última década, el incremento en la fabricación de celdas solares (o celdas fotovoltaicas) para uso en paneles fotovoltaicos, ha tenido un considerable aumento, debido a una serie de factores, pero el principal factor se debe a que la mayoría de las fuentes de producción de energía son dependientes de hidrocarburos (ejemplo: petróleo y gas natural), que a su vez es una fuente limitada sujeta principalmente a un precio dependiente del mercado. Este incremento ha ocasionado que se comience una serie de nuevos estudios sobre celdas solares y una disminución en el costo de los módulos fotovoltaicos desde $5 \$/W_p$ (W_p : watt producido) a comienzo de los años noventa, a $2.5 \$/W_p$ en el año 2004, haciendo que esta tecnología sea cada día más alcanzable [1].

Una celda solar es un dispositivo que convierte energía solar en energía eléctrica, utilizando materiales semiconductores. Generalmente, las celdas fotovoltaicas se construyen y se comportan como un diodo, es decir un semiconductor con dopaje parcial tipo p y tipo n. La incidencia de fotones sobre el semiconductor produce pares electrón-huecos. Esta memoria realizó un estudio de películas delgadas sobre silicio para aplicación en celdas solares, con procesos convencionales de laboratorio. La finalidad fue fabricar una celda solar y definir mejoras en los procesos de fabricación con tal de mejorar flujos de corriente (o de eficiencia), logrando estudiar y fabricar una celda solar incorporando las etapas que contemplan su investigación. El proyecto constó de dos etapas de estudio: construcción y caracterización. En la etapa de caracterización se definieron y estudiaron las variables que indicaban el nivel de eficiencia de la celda obtenida en la etapa de construcción.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Generales

- Esta memoria tiene como objetivo estudiar la viabilidad de obtener celdas solares de bajo costo en sustratos de silicio y estudiar sus procesos de fabricación.

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos impuestos al comienzo de esta memoria fueron:

- Estudio de procesos químicos para minimizar el efecto de reflexión por medio de la obtención y caracterización de la texturización del sustrato de silicio.
- Formación de la juntura p-n por medio de deposición de capa p por evaporación de aluminio.
- Formación de la juntura p-n por medio de deposición de capa n por solución líquida de fósforo.
- Estudio del proceso de difusión por medio de tratamiento térmico en capa p y n .
- Desarrollo de contactos metálicos por medio de la técnica lift-off y deposición por evaporación.

1.2. Motivación

La motivación por la cual se desea desarrollar este tema en la memoria se puede resumir en cuatro aspectos.

- **Búsqueda de fuentes de energía debido a crisis energética mundial y nacional:** En la actualidad, la generación de energía eléctrica en Chile está respaldada principalmente por centrales hidroeléctricas y centrales termoeléctricas, haciendo que su funcionamiento sea a capacidad máxima, por ende se cae en una dependencia de estos dos tipos de generación, siendo necesario el uso de otras fuentes generadoras de energía, por ejemplo el gas natural proveniente de otros países. Hay que señalar que tanto las centrales hidroeléctricas y las centrales termoeléctricas están sujetas a factores de inestabilidad, como períodos de sequía para el primer caso y constante fluctuación del precio o crisis del gas argentino para el segundo caso. Debido al compromiso que existe en cubrir la demanda de energía del país y, producto de los factores anteriormente mencionados, se han tenido que buscar soluciones alternativas, como el cambio de gas natural a petróleo en centrales termoeléctricas, ocasionando mayores costos de producción; y a la larga; inseguridad en el suministro de energía.

- **Desarrollo de fuentes de energía a nivel nacional:** Por parte del Gobierno, existe incentivo en el desarrollo de energías renovables, en desmedro de las convencionales (www.cne.cl). Esto se aplica tanto a las nuevas políticas que se ponen en práctica como a fondos concursables.
- **Aumento de estudios relacionados a la energía solar:** El aumento en la demanda por esta tecnología ha ocasionado que las investigaciones en el tema tengan un incremento. Estos estudios se focalizan en disminuir los costos unitarios y un nivel mayor de eficiencia. En la figura 1.1 se observa el incremento en la fabricación de celdas solares en un lapsus de quince años.

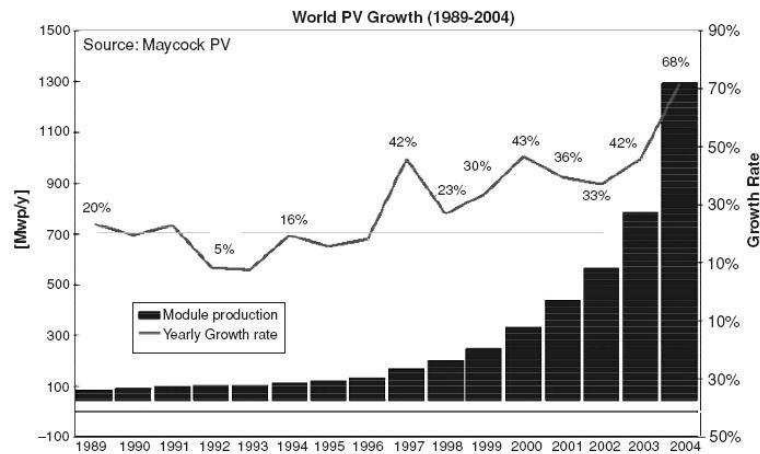


Figura 1.1: Aumento en la fabricación de celdas, Millones de watts producidos por año en función del año.[1]

- **Condición Geográfica:** Chile tiene una situación geográfica bastante privilegiada para la captación de energía solar (figura 1.2). En el mundo existen seis puntos en donde las condiciones son óptimas para para la captación de energía solar, uno de esos es el Desierto de Atacama en el norte de Chile, el cual presenta el punto con mayor índice de radiación, cubriendo un área de 139.860 km^2 como se observa en la tabla 1.1.

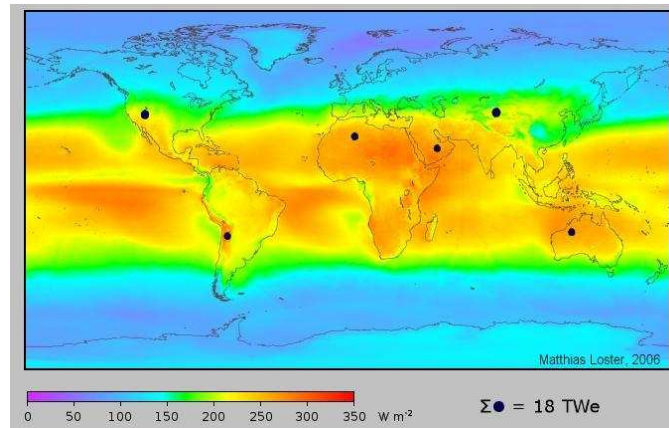


Figura 1.2: Ubicación de puntos con mayor condición para la captación de Energía Solar.[15]

Localización	Área disponible km^2	Radiación w/m^2	Área requerida km^2
Sahara, Africa	9064960	260	144231
Great Sandy, Australia	388500	265	141509
Takla Makan, China	271950	210	178571
Arabian, Este Medio	2589910	270	138889
Atacama, Sudamerica	139860	275	136364
Great Basin, EEUU	492100	220	170455

Tabla 1.1: Principales puntos de óptima captación de energía solar en el mundo.[15]

1.3. Limitaciones

En un comienzo se consideró que el período de obtención de una celda solar completa y optimizada es superior al tiempo de realización de esta memoria. Para suplir esta falta de tiempo se contempló llegar a la fabricación de una celda completa, dejando la optimización de contactos e incorporación de la película reflectora para etapas posteriores. Aún más, debido a que esta línea de investigación recién está comenzando en nuestra facultad, no se disponen de las condiciones adecuadas para realizar la fabricación y caracterización. Es por esto que se debió comenzar desde cero, reacondicionando equipos y laboratorios. Algunos de los equipos no estaban en pleno funcionamiento, ya que se encontraban detenidos desde hacía largo tiempo. A su vez, hubo equipos que se encontraban en funcionamiento y otros debieron ser adaptados para los procesos adecuados.

Capítulo 2

Antecedentes.

2.1. Tipos de tecnología en celdas solares

La mayoría de las industrias microelectrónicas trabajan con silicio, por ende un gran número de las celdas y de los estudios ligados se desarrollan con este material. Dentro de los tipos de celdas de silicio, se encuentran tres: silicio monocristalino (c-Si), silicio policristalino (p-Si) y el silicio amorfo (a-Si). El silicio abarca alrededor del 90% del mercado de celdas solares. En el silicio monocristalino la disposición de los átomos es ordenada y periódica, teniendo una sola orientación cristalina (átomos dispuestos simétricamente). Este tipo de celda alcanza rendimientos cercanos al 17% y tiene una presencia en el mercado por sobre el 36% de las celdas de silicio. Otras de sus cualidades es su estabilidad. En el silicio policristalino, el sustrato presenta cristales ordenados de un tamaño de micrones de forma aleatoria, teniendo la ventaja de ser más barato comparado con c-Si, alcanzando un rendimiento cercano al 12% y cubriendo el 58% del mercado de celdas de silicio. En el silicio amorfo no existe orden en la estructura cristalina y es depositado por técnicas de deposición de películas delgadas en un sustrato de menor costo, siendo una alternativa al sustrato de Si. Este tipo de celda logra llegar a una eficiencia del 6 u 8%, con una fabricación simple y de bajo costo [1].

2.2. Espectro del Sol

El sol libera o emite energía en forma de radiación térmica. Esta energía, al llegar a la atmósfera, tiene que pasar una serie de “filtros”, tales como la difusión, absorción por las moléculas de gases, reflexión en las nubes, etc., para finalmente llegar a la superficie terrestre. El espectro solar se divide en tres regiones:

- Región visible: Para longitudes de onda $\lambda \in (0,38;0,78) \mu m$, es el rango que puede ser detectado por el ojo humano.
- Región infrarrojo: Para longitudes de onda $\lambda \geq 0,78 \mu m$, conocido como infrarrojos.

- Región ultravioleta: Para longitudes de onda $\lambda \leq 0,38 \mu m$.

Tomando el espectro, cada región mencionada es una fracción de la constante solar ($K= 1366 \text{ w}/m^2$) donde el 7% corresponde a la ultravioleta con una radiación de $95.7 \text{ W}/m^2$, el 47.3% es visible con $646.6 \text{ W}/m^2$ de radiación y el 45.7% es infrarrojo con una radiación de $624.76 \text{ W}/m^2$. Para efectos de esta memoria, las regiones que principalmente inciden y son absorbidas por las celdas, son el infrarrojo y la visible, esto se justificará más adelante.

2.3. Semiconductores

Este tipo de materiales tiene una conductividad eléctrica intermedia, comparada con la de los metales (conductividad alta) y aislantes (conductividad baja), estando en el rango de 10^{-6} a $10^4 \text{ 1}/\Omega m$. Se llama semiconductor extrínseco cuando las características eléctricas están determinadas por átomos de impureza y en caso contrario se llaman semiconductores intrínsecos [10].

En materiales sólidos, los átomos están tan cerca que existen perturbaciones entre electrones y distintos átomos, ocasionando que los niveles de energía se desdoblén en estados electrónicos diferentes, pero próximos. Este efecto es denominado banda de energía de electrones. La estructura de bandas encontrada en los semiconductores es la misma que existe en los aislantes, pero el intervalo prohibido de energía es aún más estrecho ($<2 \text{ eV}$).

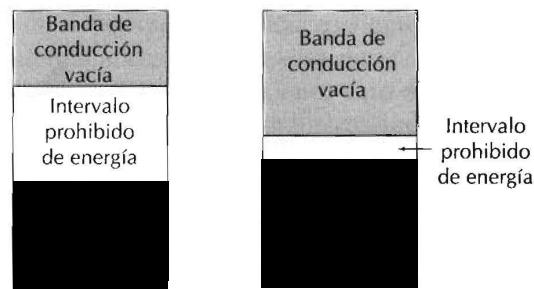


Figura 2.1: Bandas de energía de electrones para Aislantes (izquierda) y Semiconductores (derecha).[10]

El silicio es un semiconductor que tiene un intervalo prohibido de Energía de $E_g = 1.1 \text{ eV}$. La energía E_g está dada por la siguiente ecuación:

$$E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Donde:

- h : Constante de Planck, $4,13 \cdot 10^{-15}$ eV-s.
- c : Velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8$ m/s.
- λ : Longitud de onda

Sabiendo el intervalo prohibido de energía del silicio, se puede deducir la longitud de onda máxima a la cual el silicio absorbe la luz, que es $\lambda=1.13 \mu m$, obteniendo que el silicio absorbe longitudes de onda que pertenecen a Ultravioleta, Visible y parte del Infrarrojo.

En los semiconductores cada electrón que es excitado, desde las bandas de valencia a la banda de conducción, deja un "electrón ausente", o bien, en terminología de bandas, un estado electrónico vacante en la banda de valencia, como se muestra en la figura 2.2. Si se desea, en lo semiconductores es posible insertar impurezas deseables denominada dopantes. Los dopantes que generan exceso de electrones son llamados dopantes tipo n y aquellos que tienen exceso de huecos son los dopantes tipo p. A medida que a un semiconductor se le adiciona una cierta cantidad de dopantes, se necesita una menor energía para conducir un electrón fuera de la banda de valencia en dirección de la banda de conducción, provocando un aumento en la conductividad del material.

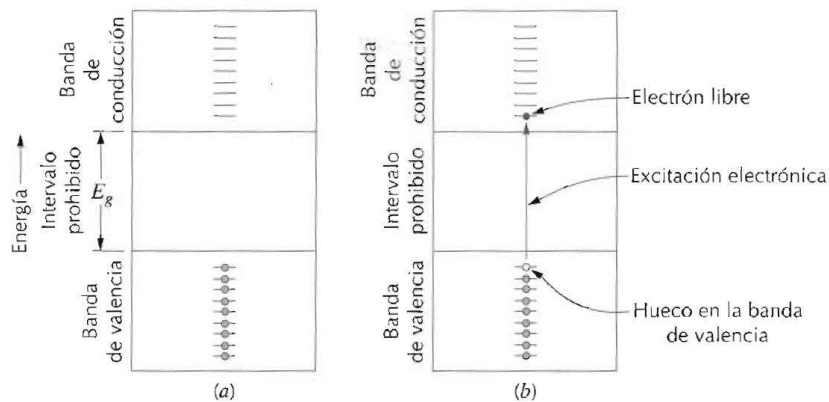


Figura 2.2: Estados ocupados en un semiconductor antes (a) y después (b) de la excitación.[10]

2.4. Comportamiento físico de una celda solar

Un diodo es un dispositivo eléctrico que permite el paso de la corriente eléctrica en una sola dirección. Cuando hablamos de un diodo p-n, nos referimos a la unión de dos materiales semiconductores extrínsecos¹ tipos p y n, donde ninguno de los dos tipos de materiales (separados) no tienen carga eléctrica, pero al ser

¹Semiconductor extrínseco es aquel que sus características eléctricas están determinadas por átomos de impurezas.

unidos se manifiesta una difusión de electrones desde el cristal n al p, ocasionando que aparezcan cargas fijas a ambos lados de la unión, es decir, con dos polaridades distintas se puede establecer un potencial eléctrico a través de la unión p-n. Polaridad directa es cuando se establece un terminal positivo en el lado p y un terminal negativo en el lado n (por ejemplo, cuando se utiliza una batería), produciendo flujo de electrones en la unión. Polaridad inversa es cuando el terminal negativo se ubica en el lado p y el positivo en el n, esto ocasiona que las vacantes, electrones y transportadores mayoritarios sean desplazados lejos de la unión. En una celda solar la luz generará en el semiconductor pares de electrones vacantes aumentando la corriente del dispositivo.

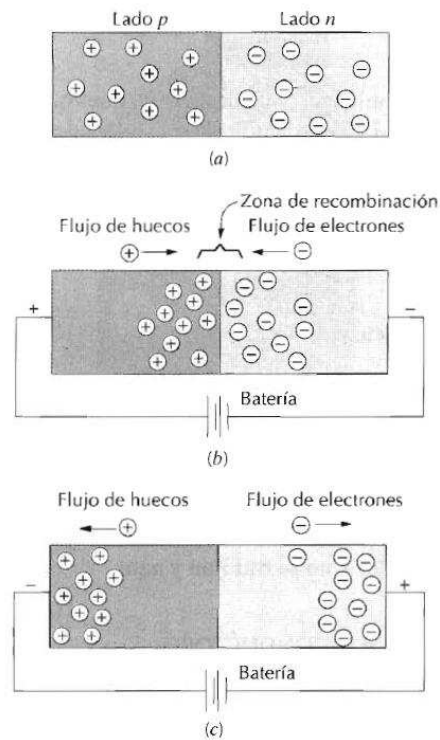


Figura 2.3: Para una unión pn rectificadora, representación de la distribución de electrones y vacancias en los casos: (a) No hay potencial eléctrico, (b) Polarización directa, (c) Polarización inversa .[10]

La corriente que circula en un diodo está dada según la siguiente ecuación:

$$I = I_0 \left(e^{qV_0/kT} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Donde:

- I_0 : Corriente de saturación.

- V_0 : Diferencia de tensión entre sus extremos.
- k : Constante de Boltzman.
- T : Temperatura absoluta.
- q : Carga del electrón.

Debido a que ingresa luz a la celda, hay una nueva componente dada por la corriente foto generada. Así la ecuación 2.2 puede ser reescrita como:

$$I = I_D - I_L = I_0 \left(e^{qV_0/kT} - 1 \right) - I_L \quad (2.3)$$

Donde I_L es la corriente foto generada. De esta ecuación se puede deducir el comportamiento de una celda solar obteniendo la figura 2.4. Se puede apreciar que en el tercer cuadrante se expresa la polaridad inversa y en el primer cuadrante la polaridad directa. Con los valores de la polaridad directa es posible determinar la eficiencia η de la celda solar. En la figura 2.5 se muestra una curva IxV de una celda solar [6].

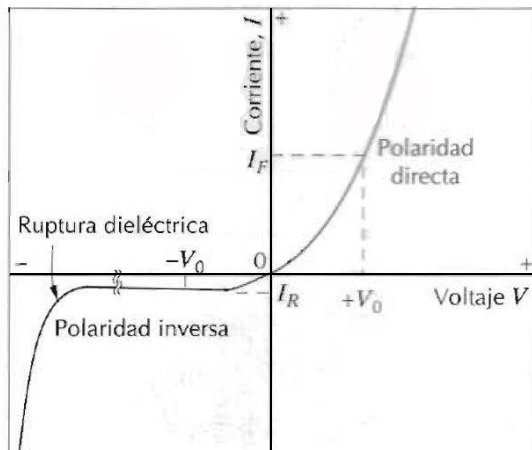


Figura 2.4: Gráfico corriente versus voltaje de una unión n-p para ambas polaridades (diodo).[10]

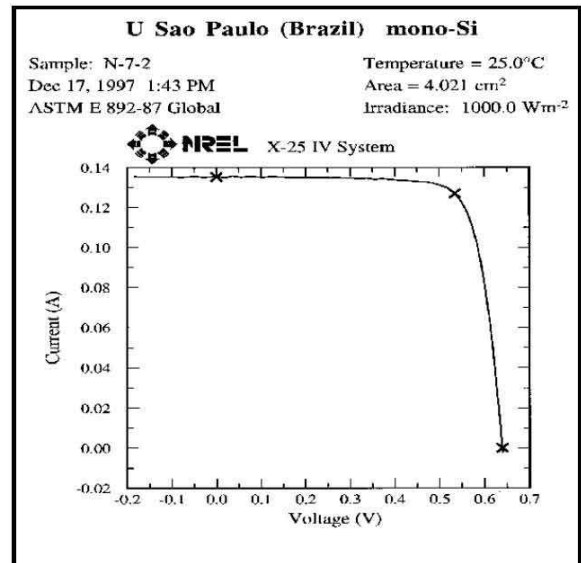


Figura 2.5: Curva IxV bajo iluminación patron (AM1,5G) de celda N-7-2 realizada por National Renewable Laboratory (NREL)[6].

2.5. Modelo básico de una celda solar

Como se mencionó en el capítulo 1, una celda fotovoltaica convierte energía solar en energía eléctrica por medio de la utilización de materiales semiconductores. Normalmente, las celdas fotovoltaicas están compuestas por un material semiconductor, una capa p y una capa n. Su funcionamiento se basa en la incidencia de la luz solar (fotones) sobre la celda, para producir la generación de pares electrón-hueco que provocan el flujo de electrones y huecos. Los fotones que tienen igual o mayor energía de banda que el semiconductor, logran pares. Los electrones libres pueden ser capturados y así producir corriente eléctrica por medio de conductores eléctricos ubicados a cada lado de la celda (capa p y n). Para aprovechar al máximo el espectro solar, existen celdas solares de más de una juntura, donde cada una absorbe con mayor eficiencia distintas regiones del espectro solar, absorbiendo la mayor cantidad de energía y logrando una mayor eficiencia de conversión [16].

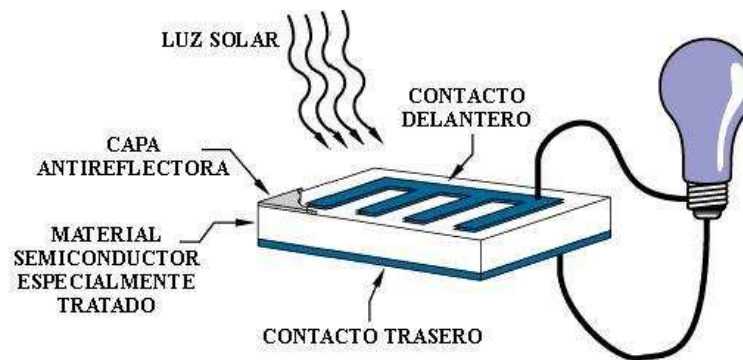


Figura 2.6: Diagrama explicativo del funcionamiento de la celda solar.[16]

Además de la formación de la juntura p-n para la fabricación de una celda solar, es necesario utilizar otras etapas de fabricación, como limpieza química, texturización y formación de contactos metálicos con tal de cumplir una alta eficiencia. La importancia de esas etapas sobre un sustrato de silicio monocristalino se describen a continuación:

1. **Limpieza química:** Esta etapa se realiza para eliminar impurezas que son producidas por gases absorbidos, películas contaminantes y partículas no deseadas. Es una de las etapas con mayor importancia dentro del proceso de fabricación de una celda solar, debido a que una correcta limpieza se puede traducir en valores considerables de eficiencia.
2. **Formación de textura:** Esta etapa se utiliza para aumentar la probabilidad de captación del fotón incidente. La oblea de silicio proviene de fábrica pulida, por ende es necesario realizar esta etapa para la reducción de la reflexión óptica de un 35% a un 10%, que ocasiona que los rayos luminosos se acoplen a la celda en un ángulo oblicuo [2]. En la imagen 2.7 se aprecia una superficie texturizada.

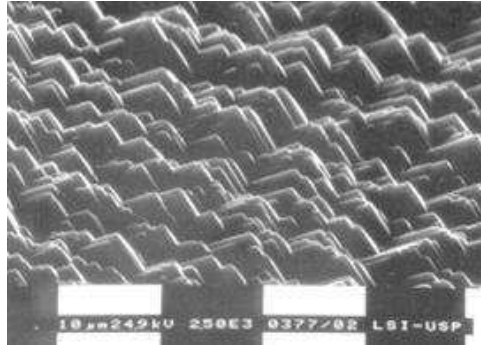


Figura 2.7: Micrografía de una superficie texturizada obtenida en un microscopio SEM.[6]

3. **Formación de la capa p:** Para la formación de la capa p se deposita aluminio por evaporación en la parte posterior del sustrato de silicio y la difusión está dada por el tratamiento térmico que da el horneado.
4. **Formación de la capa n:** Para la formación de la capa n se deposita fósforo en solución líquida en el frente del sustrato, por medio de spin on coating y su difusión está dada por el tratamiento térmico que da el horneado.
5. **Contactos metálicos:** Los contactos metálicos se fabrican para que la juntura de aluminio, silicio y fósforo, al ser excitada por los fotones provenientes del sol, capten el electrón que entra en flujo. Los contactos metálicos se ubican sobre la capa n por medio de la técnica lift-off y son depositados por evaporación y se difunden en la juntura por medio de un tratamiento térmico.

A continuación se presenta un esquema explicativo de las etapas recién mencionadas.

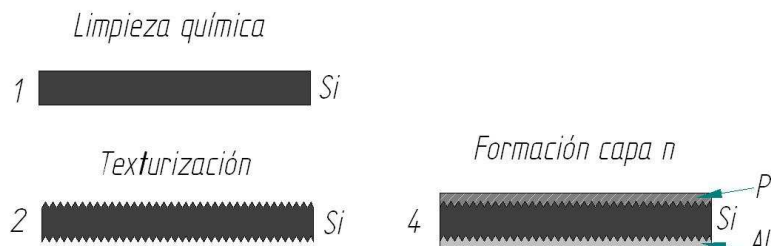


Figura 2.8: Esquema de etapas para fabricación de una celda solar. 1) Limpieza, 2) Textura, 3) Formación capa p, 4) Formación capa n, 5) Contactos metálicos.

2.6. Celdas híbridas

Al combinar materiales orgánicos e inorgánicos para fabricar celdas solares el producto es una celda solar híbrida. La ventaja de trabajar con materiales orgánicos se debe a su flexibilidad, bajo peso y fácil deposición, permitiendo colocarlos en cualquier superficie. La desventaja de los materiales orgánicos es la dificultad de generar electrones libres en el material [1]. Por lo tanto, la hibridación de ambos tipos de materiales complementa deficiencias y fortalecen ventajas de cada material. En la actualidad, la alumna Vania Rojas Fuentes de la Universidad Tecnológica Metropolitana ha comenzado un estudio de electro síntesis de 1,2-di-(2-tienil)vinileno. Este polímero se produce por polimerización electroquímica en ánodo de ITO-glass (EPTV)[13] (figura 2.9). Este polímero tiene una conductividad de $2,0 \cdot 10^{-4} S/cm$ y se puede depositar en solución líquida.

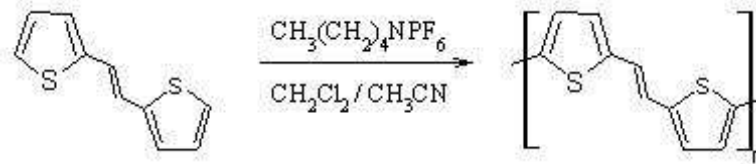


Figura 2.9: Polímero Poli[1,2- di-(2-tienil)vinileno] [13].

2.7. Eficiencia de un celda solar. [2]

Para poder cuantificar el comportamiento de una celda solar, es necesario determinar su eficiencia. Para esto se requiere caracterizar la curva voltaje-corriente (V-I) y la curva voltaje-potencia (V-P) para determinar los puntos característicos de operación de una celda solar, que son corriente de corto circuito I_{SC} , voltaje de circuito abierto V_{OC} , corriente de máxima potencia I_{MP} y voltaje de máxima potencia V_{MP} .

- Corriente de corto circuito I_{SC} : Es la corriente que entrega la celda solar cuando sus terminales se encuentran cortocircuitados. La corriente de corto circuito varía preferentemente con la radiación solar incidente sobre la celda.
- Voltaje de circuito abierto V_{OC} : Es la tensión de la celda cuando sus terminales se encuentran abiertos, es decir sin carga alguna. El voltaje de circuito abierto varía con la temperatura de la celda.
- Corriente de máxima potencia I_{MP} : Es la corriente cuando la potencia que entrega la celda es máxima. La corriente de máxima potencia normalmente toma valores de 0,9 veces la I_{SC} .
- Voltaje de máxima potencia V_{MP} : Es la tensión de una celda cuando la potencia que entrega la celda es máxima. Normalmente varía en un rango entre 0,6 a 0,85 veces el V_{OC} .

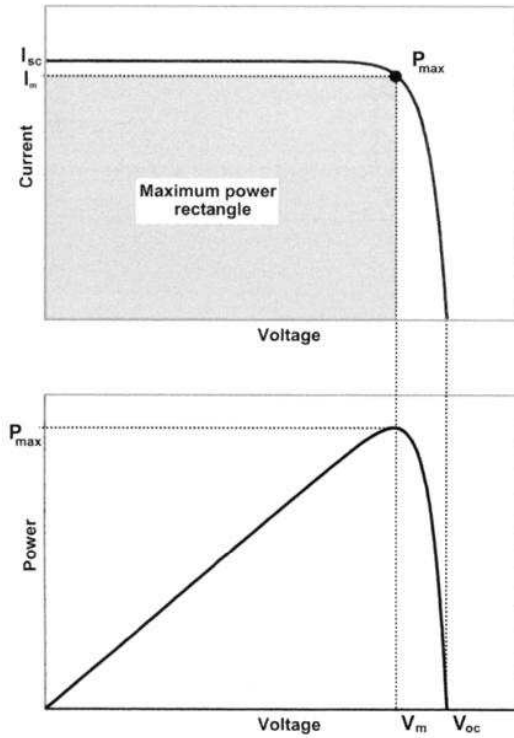


Figura 2.10: Caracterización V-I para una celda ideal y Potencia producida por la celda. [2].

Con los valores obtenidos de la caracterización de la curva V-I, se determina el factor de forma (Fill Factor) o factor de llenado. Este factor indica la calidad del dispositivo. El factor de forma se determina por la siguiente ecuación :

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} = \frac{P_{max}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (2.4)$$

Así la eficiencia de una celda solar esta dada por:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}}{P_{in}} \quad (2.5)$$

Donde P_{in} es la potencia entregada a la celda, es decir la radiación incidente sobre la superficie de la celda.

2.8. Modelo eléctrico de una celda solar. [14]

Una celda solar se puede modelar eléctricamente tomando en cuenta todas sus características internas. Primero se debe tomar en cuenta su dependencia de la radiación incidente, esto se modela por medio de una fuente de corriente. Además, generalmente, esta formada por una juntura p-n, lo que se modela como un diodo conectado en paralelo a la fuente mencionada anteriormente. La tensión generada por la celda, que varía ante la variación de carga debido a la juntura esta dada por el diodo. Ahora basta considerar que diodo de la juntura p-n no se considera como un diodo ideal y que la celda presenta pérdidas, que se aprecian en forma de calor. Estas dos nuevas consideraciones, hacen que el modelo considere dos resistencias, una en serie (R_s) y otra en paralelo (R_{SH}). El circuito equivalente de una celda solar se aprecia en la figura 2.11.

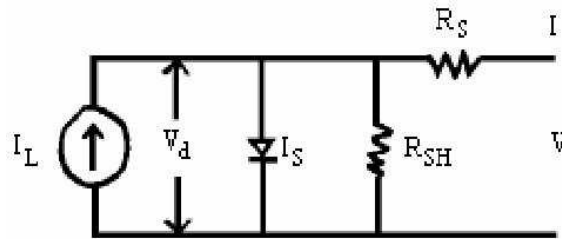


Figura 2.11: Circuito equivalente de una celda solar. [14].

La resistencia R_s y R_{SH} toman en cuenta factores como la calidad de los contactos metálicos, resistencias en el cuerpo de la celda y en los contactos, nivel de impurezas, gradiente de difusión y minimización del contacto lateral entre capas p y n. En la figura 2.12 se puede observar las diferentes resistencias que considera la resistencia en serie contemplada en el circuito equivalente de la celda.

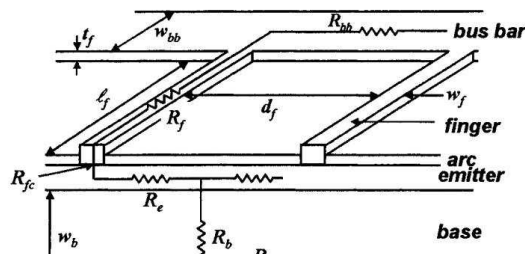


Figura 2.12: Componentes que afectan la resistencia en serie de una celda solar. [2].

Capítulo 3

Metodología Específica

3.1. Introducción

En este capítulo se detallará la metodología específica empleada en el desarrollo del presente trabajo de título. La metodología será dividida en dos subcapítulos; el primero describe los procedimientos de construcción de una celda solar que son limpieza química de celdas, textura del sustrato de silicio, deposición de aluminio, deposición de fósforo, difusión de aluminio y fósforo, formación de los contactos metálicos y medidas de resistividad. En el segundo subcapítulo se detallan los procedimientos de caracterización utilizados. Además, fueron desarrolladas otras etapas que en un principio no estaban programadas en el proyecto inicial, como es el diseño de la máscara para fabricar los contactos metálicos, el proceso de litografía y la ejecución del proceso de metalización.

3.2. Procedimientos de Construcción

3.2.1. Limpieza química de celdas.

La limpieza es una de las etapas más importantes dentro de la fabricación de celdas solares, debido a su influencia directa en el rendimiento final. Antes del tratamiento a alta temperatura es necesario eliminar cualquier contaminante, tales como metales y grasas en la superficie del silicio. Uno de los procesos de limpieza más utilizados es el llamado RCA y consta de dos etapas: SC1 ($NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$) y SC2 ($HCL + H_2O_2 + H_2O$). La primera se utiliza para eliminar todas las partículas orgánicas y la segunda para eliminar contaminantes metálicos [2]. Un reemplazo al proceso RCA, es el llamado "IMEC-clean", este procedimiento consiste en un baño por $H_2SO_4 + H_2O_2$ y una solución de HF , eliminando completamente partículas metálicas. Una de las ventajas de este procedimiento es el bajo consumo de productos químicos, traducándose en bajos costos y disminución de los desechos químicos. Normalmente, las impurezas pueden

ser producidas por:

1. Películas contaminantes, éstas pueden ser compuestos moleculares, iones y especies atómicas.
2. Partículas indeseadas.
3. Gases absorbidos.

El proceso de limpieza de la oblea de silicio durante la fabricación de la celda fotovoltaica debe ser el correcto y lo más limpio posible, para que el valor eficiencia final no se vea afectado. Es por esto que es una de las etapas fundamentales dentro del proceso de fabricación y busca eliminar cualquier tipo de impurezas existente. La limpieza de obleas se realizó por medio de un ataque químico con reactivos de grado de pureza tipo PA (para análisis), pero los reactivos adecuados para la construcción de una celda solar deben ser de grados especiales, tipo MOS, electrónico o grado solar. Estos reactivos cuestan 10 veces más que un reactivo de grado PA. La limpieza de celdas fue realizada en una campana con sistema de extracción, ubicado en el Laboratorio de Materiales Semiconductores que se encuentra en el edificio de química de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, a cargo de la Dra. Denise Criado. Los reactivos que se utilizarán y los implementos que permiten su manejo se describen a continuación [17]:

- 3 vasos de vidrio pyrex.
- 1 vaso de polipropileno.
- 1 hot plate.
- 1 pinza de acero inoxidable.
- 1 pinza de polipropileno.
- 1 *lt* de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4).
- 1 *lt* de Ácido Fluorhídrico (HF).
- 1 *lt* de Hidróxido de Amonio (NH_4OH).
- 1 *lt* de Ácido Clorhídrico (HCl).
- 1 *lt* de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2).

Hay que señalar que toda agua utilizada en este proceso debe ser deionizada con resistividad de 18 *Mohm – cm* y el equipamiento fue reacondicionado durante el desarrollo de esta memoria. A su vez, se

debe realizar la limpieza de implementos que son utilizados para el manejo de reactivos, y para esto se debe verificar que los materiales y recipientes estén limpios. Luego, los vidrios siguen el siguiente proceso de limpieza:

- Los vidrios son sometidos a una solución de $HCl + HNO_3$ en una relación 3:1.
- Enjuagar en agua DI.
- Los vidrios son sometidos a una solución de $H_2O + H_2O_2 + NH_4OH$ en una relación 7:2:1.
- Enjuagar en agua DI.
- Verificar visualmente que los vidrios estén limpios.

El procedimiento de limpieza de láminas de silicio es llamado RCA. Las soluciones que realizan la limpieza se calientan en un plato caliente a una temperatura de $75 [^{\circ}C]$. Esta limpieza sigue los siguientes pasos:

1. En un vaso de vidrio se prepara una solución de $H_2SO_4 + H_2O_2$ en una relación 4:1, durante **10 minutos** se sumerge la lámina de silicio. Se enjuaga con agua DI por 3 minutos y otros 3 minutos dentro un vaso con agua DI. Esta solución llamada “piraña” es utilizada para eliminar la grasa presente en la superficie del silicio.
2. En un vaso de polipropileno se prepara una solución de $HF + H_2O$ en una relación 1:10, durante **30 segundos** se sumerge la lámina de silicio. Se enjuaga con agua DI por 3 minutos y otros 3 minutos dentro un vaso con agua DI. Esta solución se utiliza para eliminar SiO_2 existente en la superficie del silicio.
3. En un vaso de vidrio se prepara una solución de $NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$ en una relación 1:1:5, durante **10 minutos** se sumerge la lámina de silicio. Se enjuaga con agua DI por 3 minutos y otros 3 minutos dentro un vaso con agua DI. Esta solución es utilizada para eliminar grasas y metales contenidos en la superficie del silicio.
4. En un vaso de vidrio se prepara una solución de $HCl + H_2O_2 + H_2O$ en una relación 1:1:5, durante **10 minutos** se sumerge la lámina de silicio. Se enjuaga con agua DI por 3 minutos y otros 3 minutos dentro un vaso con agua DI. Esta solución es utilizada para extraer metales de la superficie del silicio.
5. Se secan las láminas con nitrógeno (N_2).

3.2.2. Textura del sustrato de Silicio.

Al igual que la limpieza química, la texturización es un proceso importante dentro de la fabricación de la celda solar. La función de la texturización de la superficie del sustrato, es crear una estructura cristalina que mantenga el fotón proveniente de los rayos solares dentro de la celda y así obtener un mayor aprovechamiento. Las superficies texturizadas reducen la reflexión desde un 35 % a menos de un 10 % asegurando que los rayos solares entren a la celda en un ángulo oblicuo, provocando que sea menos probable su salida. Esta mejora se traduce considerablemente en los valores de eficiencia y especialmente en películas delgadas de silicio (espesores inferiores a 200 μm). En el silicio monocristalino, el texturizado se debe a que la tasa de reacción química entre los planos $\langle 100 \rangle$ y $\langle 111 \rangle$ es mayor en el primero (ver figura 2.7). Este ataque químico es producido por una solución compuesta por NaOH o KOH más isopropanol, pero su principal desventaja es el poco control del tamaño de la pirámide y la existencia de zonas sin reacción (sin textura). Para poder obtener cierto control en la texturización (obtención de pirámides de alto entre 3 a 5 μm) es importante tomar en cuenta los siguientes parámetros [2]:

- Una adecuada preparación de la superficie del sustrato.
- Control de la temperatura.
- Una adecuada relación de reactivos.
- Control del tiempo de texturización.

La corrosión del sustrato de silicio por vía húmeda en solución de KOH , es característica por la anisotropía de los perfiles corroídos. De hecho, la tasa de corrosión del silicio, está fuertemente influenciada por los planos cristalino expuestos a la corrosión. Así, por ejemplo, mientras los planos $\langle 100 \rangle$ son corroídos sin dificultad, los planos $\langle 111 \rangle$ casi no son atacados. A medida que la corrosión ataca el silicio o las capas subyacentes a la superficie, se crean pirámides cuya pared está formada por los planos $\langle 111 \rangle$, que no fueron corroídos. Como resultados se obtienen pirámides con paredes inclinadas en un ángulo bien definido ($54,7^\circ$), determinado por la red cristalina del Silicio [12]. Los materiales utilizados para el proceso de texturización química son:

- 2 vasos de vidrio pyrex.
- 1 plato caliente.
- 1 pinza de polipropileno.
- 1 l de Hidroxido de Potasio (KOH).

- 1 l de Alcohol isopropílico o isopropanol ($H_3C - HCOH - CH_3$).

Al igual que el procedimiento de limpieza, en la texturización química toda agua utilizada debe ser deionizada con resistividad de 18 *Mohm* – *cm*. Todos los productos químicos utilizados fueron de un grado de pureza PA, inferior a lo recomendado (más baratos). Además, todos los recipientes y materiales deben estar limpios al momento de ser utilizados. Las etapas y tiempos del proceso de texturización utilizadas fueron obtenidas de la literatura. En un plato caliente se realizó el proceso de texturización según las siguientes etapas:

1. **Pretexturizado:** En un vaso de vidrio se prepara una solución compuesta por 500 g de *KOH* y 1 l de agua DI. Se hunde la lámina de silicio en la solución a una temperatura de 98 °C durante **30 segundos**. Se enjuaga con agua DI por 3 minutos y otros 3 minutos dentro un vaso con agua DI. Esta etapa tiene como finalidad eliminar posibles imperfecciones y defectos producidos por el corte de las láminas de silicio.
2. **Texturizado:** En un vaso de vidrio se prepara una solución compuesta por 5 g *KOH*, 37,5 ml de isopropanol y 500 ml de agua DI. Se hunde la lámina de silicio en la solución a una temperatura de 80 °C durante **112 minutos**. Se enjuaga con agua DI por 3 minutos y otros 3 minutos dentro un vaso con agua DI.

3.2.3. Deposición de Aluminio.

La deposición de aluminio se realiza por la técnica de evaporación. El evaporador utilizado está ubicado en el edificio de física, específicamente en el Laboratorio de Superficie y Nanomateriales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que está a cargo del Dr. Victor Fuenzalida (ver figura 3.1). Previo a la evaporación, se debe montar la oblea y los trozos de aluminio que serán evaporados. Una vez realizado el montaje, se procede a seguir el protocolo de encendido del evaporador. Todo el proceso de evaporación y montaje sigue los siguientes pasos:

- Se montan dos trozos de aluminio de masa 0,073 gr, sobre el filamento de tungsteno para obtener un espesor de aproximadamente 2 micrones de acuerdo a trabajos anteriormente realizados en este laboratorio (ver figura 3.2).
- La oblea de silicio es fijada por una pinza, con la cara que será depositada en dirección a los trozos de aluminio que serán evaporados. Para evitar que la evaporación afecte la parte posterior (donde se difundirá fósforo), la pinza fija un portaobjeto, que está ubicado en la parte posterior de la celda (ver figura 3.3).

- Se pone la cúpula del evaporador y se comienza con el protocolo de encendido, con la finalidad de alcanzar un vacío cercano a $2 \cdot 10^{-3} Pa$.
- Una vez alcanzado el vacío, se comienza a aumentar la corriente en 4 A cada 3 min y se anota la presión del medidor penning, presión en el pulmón, corriente y observaciones, para evitar cualquier error de procedimiento.
- Una vez que el aluminio se haya evaporado totalmente, se comienza el descenso de la corriente en 5 A cada 1 min y se sigue el protocolo de apagado del evaporador.

Hay que señalar que se desea depositar una película de aluminio de espesor $2,0 \mu m$ y de calidad para evaporación en semiconductores y no se conoce su grado de pureza. El aluminio utilizado en microelectrónica es de 99,999% de pureza.



Figura 3.1: Evaporador de Aluminio.

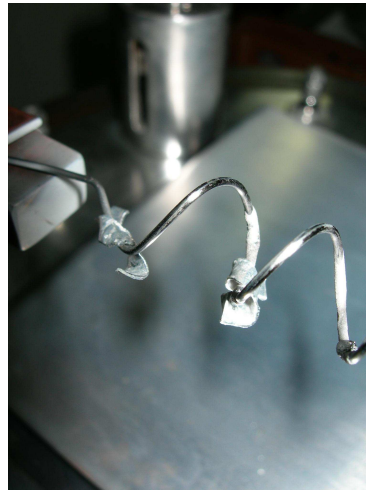


Figura 3.2: Disposición de trozos de aluminio.



Figura 3.3: Montaje de la Oblea de silicio en evaporador.

3.2.4. Deposición de Fósforo.

Esta deposición se realiza por técnica de spin coating de una solución líquida de fósforo, a temperatura ambiente. El spin coating es un procedimiento que se utiliza para aplicar películas delgadas y uniformes sobre sustratos planos a través de soluciones líquidas. El procedimiento es el siguiente:

- Se introduce la oblea de silicio centrada en el spin coater o spinner.
- Se fija la oblea de silicio por medio del vacío producido por la bomba.

- Se deposita la cantidad deseada de solución líquida de fósforo sobre la oblea de silicio que está fija al plato.
- Se hace girar el plato con la oblea de silicio hasta que el espesor de película sea el deseado. El espesor de la película estará definido por las revoluciones por minutos a las cuales llega el plato y la concentración de la solución líquida.

El volumen de solución líquida de fósforo está dado por la información (datasheet) que entrega el fabricante de la solución que es de 1,0 ml o menos para 2,0 in² (pulgadas cuadradas). Claramente el volumen exacto no está definido, éste se estimó luego de aplicar distintas cantidades de solución a cinco probetas de silicio de área 0,5 in². Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 4.



Figura 3.4: Equipo Spin coating típico.

3.2.5. Difusión de Aluminio y Fósforo.

La difusión de los dopantes (aluminio y fósforo) se realizó por medio de tratamiento térmico en una atmósfera de nitrógeno extra puro de grado de pureza 4,8 (99,998 %). Según la literatura estudiada (tesis de Nair Stem [6] y la tesis de Canan Rodrigues [11]) y los datos entregados por el fabricante de la solución dopante (en anexos ver descripción del producto, P509), el ambiente ideal debe estar constituido por un 90% de N_2 y un 10% de O_2 , pero debido a limitaciones en el control de flujo del gas dentro del horno, todo tratamiento térmico se realizó utilizando solamente N_2 . Se realizaron dos procedimientos de difusión de acuerdo a datos encontrados en la literatura ([6] y [11]). Según la tesis de Nair Stem, la difusión de ambos dopantes se puede realizar al mismo tiempo, utilizando una oblea con aluminio depositado por un lado, y en el horno utilizar una fuente líquida de $POCl_3$ utilizando N_2 como gas de arrastre para la formación de la capa n. El dopaje de las dos capas al mismo tiempo, se caracteriza por tener un número menos de etapas, caracterizando un proceso de bajo costo. Nair Stem observó que 3 horas de proceso era tiempo

suficiente para garantizar un eficiente atrapamiento de impurezas a través de la difusión de Al, proceso conocido como *gettering*, en donde el aluminio difundido sirve para atrapar impurezas del sustrato de silicio, además de hacer el dopaje. Entonces, el primer procedimiento realizado en la presente tesis, fue una oblea con aluminio depositado por la parte trasera (sin difundir), que se utilizó como fuente de dopaje (en el frente de la oblea) para la capa n, una solución de dopaje líquida *Spin on Diffusant*, con el mismo tiempo para la difusión acorde al procedimiento utilizado por la tesis de Nair Sterm, de **3 h a 1100 °C**. El segundo procedimiento fue utilizar dos etapas para la difusión del dopante, el primer proceso de **3 h a 1100 °C** para la difusión del aluminio, después fue depositada la solución líquida por spin on coating y llevada al horno a **800 °C durante 10 a 15 min**. Esto fue hecho acorde a la tesis de Canan Rodrigues, proceso en que se obtiene un mayor tiempo de vida de los portadores para la capa n, utilizando la misma solución dopante. En la tabla 3.1 se describen los dos procedimientos de difusión utilizados:

Procedimiento 1: Una etapa
Difusión de Al y P en sustrato de silicio, a 1100 °C durante 3 h.
Procedimiento 2: Dos etapas
Difusión de Al en sustrato de silicio, a 1100 °C durante 3 h.
Difusión de P en sustrato de silicio, a 800 °C durante 10 a 15 min.

Tabla 3.1: Procedimiento de difusión utilizados.

Al igual que el evaporador, el horno que se utilizó está ubicado en el edificio de física, específicamente en el Laboratorio de Superficie y Nanomateriales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que está a cargo del Dr. Victor Fuenzalida. El horno utilizado para trabajar es denominado High temperature tube furnace F59300 de marca Thermolyne, este horno logra alcanzar cerca de 1000 °C en aproximadamente **2 min**, el cual también posee características de bajo costo desde el punto de vista del tiempo ahorrado en el proceso de difusión (ver figura 3.5). Este horno tiene un rango de operación entre 800 y 1700 °C, se puede trabajar con atmósfera de nitrógeno y argón, y para esto se pueden utilizar tubos de alúmina y cuarzo de diámetros entre 2,5 y 7,62 cm. El control de temperatura esta dado por 8 resistencias de Super Kanthal 33 de Disilicio de molibdeno.



Figura 3.5: Horno High temperature tube furnace F59300 de marca Thermolyne.

3.2.6. Formación del Contacto metálico.

Los contactos metálicos son fabricados de aluminio, el mismo que se utilizó para la capa p. Esta deposición se debe realizar tanto en el frente como en el respaldo de la juntura (de aluminio, silicio y fósforo). Por el respaldo la metalización es completa y por el frente la metalización es parcial. El procedimiento de evaporación y montaje se puede leer en el subcapítulo 3.2.3. Una vez que ambos contactos se han fabricado, se debe realizar un tratamiento térmico a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 min en un ambiente idealmente de hidrógeno, para la saturación de enlaces incompletos (dangling bonds: enlaces incompletos en los átomos.), además de la formación de la formación de la aleación de silicio, pero en este trabajo fue utilizado nitrógeno por facilidad. El horno utilizado para este proceso es modelo Lindberg Hevy Duty, ubicado en el Laboratorio de Superficie y Nanomateriales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que está a cargo del Dr. Victor Fuenzalida (ver figura 3.6).



Figura 3.6: Horno para el tratamiento térmico de los contactos metálicos.

Para poder llevar a cabo este proceso es necesario realizar dos procedimientos previos: Fabricación de máscara y Proceso de litografía. Ambos procedimientos se describen a continuación.

3.2.7. Máscara

Para fabricar la morfología correcta de los contactos metálicos por medio de litografía, se debe tener un patrón de transferencia conocido como máscara. En este caso el patrón de transferencia debe ser negativo, debido a que la resina que se utiliza reacciona en las zonas en que no se deja pasar luz ultravioleta, por ende los contactos metálicos quedarán en las zonas en que la máscara deja pasar luz. La máscara ideal es creada por emulsión con metales en un vidrio especial para litografía, pero este tipo de máscara en Chile no se fabrica. Una alternativa fue trabajar con una máscara producida por impresión de diapositiva, limitando los anchos de los contactos a 0,5 mm. Así, podemos mencionar que el proceso utilizado es de bajo costo. El patrón impreso tiene forma de peine y su geometría inicial fue definida a partir de la tesis de Canan Rodrigues (Ver cita [11]). En la figura 3.7 se muestra el patrón utilizado.

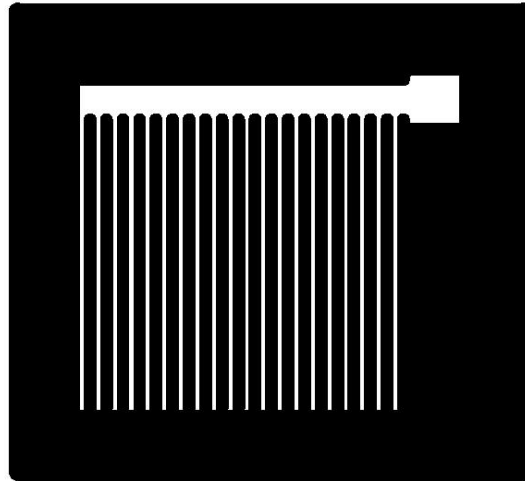


Figura 3.7: Máscara utilizada en litografía.

3.2.8. Proceso de litografía.

La palabra litografía deriva del griego (lithos = piedra) que significa impresión en una superficie plana. En la actualidad, litografía es la generación y transferencia de patrón que dan forma a las capas que constituyen los componentes básicos de los circuitos integrados. Antes de comenzar a desarrollar la litografía se deben limpiar las probetas de silicio según el procedimiento señalado en el sub capítulo de limpieza. Una vez limpiadas las probetas, se secan las obleas con un chorro de N_2 o haciendo rotar el spinner por 10 s a 7000 rpm aproximadamente. El proceso de litografía consiste en tres etapas, que son deposición de capas, exposición y revelación. A continuación se detalla cada proceso por separado

- **Deposición de capas:** La oblea se centra en el soporte del spinner. Cabe señalar que se deben priorizar geometrías circulares o rectangulares por sobre geometrías rectangulares, además se debe procurar depositar la solución en el centro de rotación con el fin de obtener una película homogénea. Previamente se fija el spinner a 7000 rpm y 40 s, una vez hecha esta etapa se dispone la probeta (de 1 in²) en el centro del spinner y se cubre con HMDS, para comenzar la rotación una vez dada la orden de rotación mediante el pedal. El HMDS es un fijador que promueve la adherencia de la resina al sustrato de silicio. De la misma forma, se repite el proceso para depositar la fotoresina. La velocidad y tiempo de rotación viene dada por el fabricante y así asegurar un espesor resultante de fotoresina aproximadamente de 2 a 3 μm .
- **Exposición:** Una vez terminado el proceso de deposición de capas y antes de la exposición, es necesario que la probeta esté sometida a una temperatura de 80 °C durante 20 s en un plato caliente (hot plate). Según el protocolo de encendido del equipo de litografía que aparece en el apéndice, se da

comienzo a la exposición de luz ultravioleta durante 8 *min* aproximadamente.

- **Revelación:** Una vez terminada la exposición, se retira la probeta con una pinza y es sumergida en el porta probetas en solución reveladora diluida en agua deionizada, en una proporción de 1:10. Se sumerge durante 3 *min* aproximadamente o hasta que se hayan eliminado todos los residuos de fotoresina (de las zonas que no se deseen).

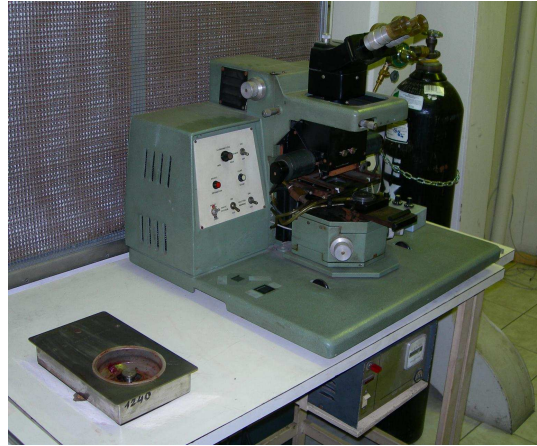


Figura 3.8: Equipos de litografía y spinner utilizados

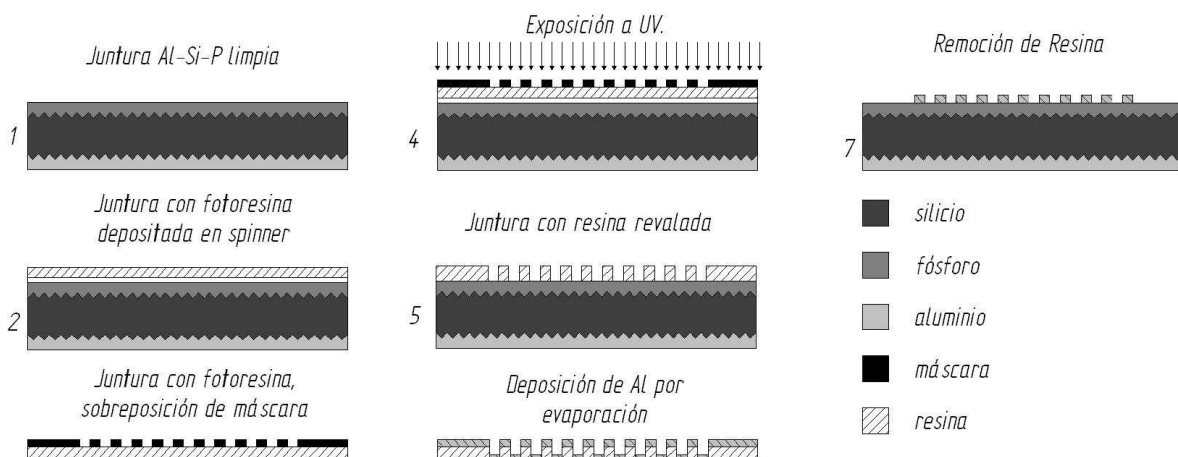


Figura 3.9: Etapas de litografía por técnica lift off.

El proceso de litografía se utiliza para fabricar los contactos metálicos que van por sobre la película de fósforo depositada en el frente de la oblea. La deposición de los contactos metálicos frontales y posteriores

se detalla en la subsección 3.2.6. Por otra parte, para que la resina pueda catalizar se necesita de una máscara con la morfología (o patrón) de los contactos que se requieren fabricar.

3.2.9. Formación del Contacto polimérico.

Al igual que la solución de fósforo, la deposición del contacto polimérico se realiza por la técnica de spin coating en solución líquida, a temperatura ambiente. El procedimiento de deposición es el siguiente:

- Se introduce la oblea de silicio centrada en el spin coater o spinner.
- Se fija la oblea de silicio por medio del vacío producido por la bomba.
- Se deposita una cierta cantidad de solución líquida de fósforo sobre la oblea de silicio que está fija al plato.
- Se hace girar el plato con la oblea de Silicio hasta que el espesor de película sea el deseado. El espesor de la película estará definido por las revoluciones por minutos a las cuales llega el plato y la concentración de la solución líquida.

El volumen de solución líquida de polímero depositado sobre la juntura de aluminio, silicio y fósforo es de 0,2 ml para una probeta de 1 in² (pulgadas cuadradas). Se deposita en ambas caras de la probeta y el corto circuito entre las capas n y p está dado por la limpieza en cloroformo en los bordes de la probeta.

3.3. Procedimiento de Caracterización

3.3.1. Medida de Resistividad.

La medición de resistividad por el método de cuatro contactos consiste en adherir 4 cables de cobre al sustrato que se desea medir a temperatura ambiente. El circuito consiste en una resistencia conocida en serie con el sustrato, tal como se muestra en la figura 3.10. Se conoce la diferencia de potencial V_f debido a que se suministra por medio de una fuente, se conoce el valor de la resistencia R_r , además se mide con un multímetro los voltajes en la resistencia (conocida) y en el sustrato (V_r y V_m). Con los valores de la resistencia R_r y voltaje de la resistencia V_r , se deduce el valor de la corriente I_r que circula por el circuito (ya que es un circuito en serie, se sabe que $I_r = I_m$, donde I_m es la corriente que circula por la muestra). Luego, para distintos voltajes de entrada (V_f) se obtienen pares de valores de I_m y V_m ; agregando pares de valores negativos (corriente invertida, con el fin de mejorar la estadística); estos pares de valores se grafican, donde la pendiente de la línea de tendencia que se obtiene, es el valor de la resistencia R_m de la muestra. Con este valor, junto a los valores geométricos de la probeta; espesor t , separación b y ancho a ; se determina el valor de la resistividad ρ . El valor de la resistividad está determinado por:

$$\rho = R_m \cdot \frac{(a \cdot t)}{b} \quad (3.1)$$

Se desea estudiar la resistividad de las siguientes probetas:

- Probeta de sustrato de silicio.

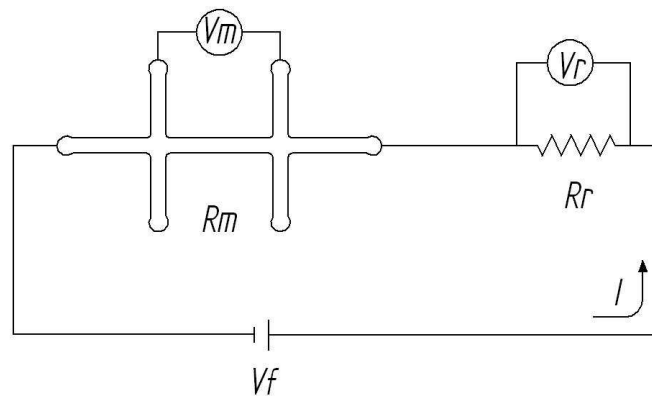


Figura 3.10: Circuito equivalente para el método de cuatro contactos.

La medición de cuatro contactos se realizó de dos formas, adhiriendo los cables con pasta de plata de forma transversal o de forma puntual, como se describe en la figura 3.11.

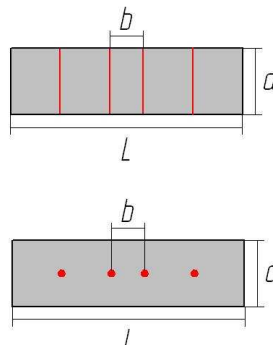


Figura 3.11: Esquema de medida de resistividad de cuatro contactos; a ancho, b separación y l largo de la probeta.

3.3.2. Microscopía electrónica de Barrido

El funcionamiento de un microscopio de barrido se basa en la aceleración de electrones en un campo eléctrico para formar la imagen. Para poder observar una muestra, ésta debe ser conductora, en el caso

que no lo sea se debe cubrir con un material conductor. La observación por Microscopía electrónica de Barrido (SEM) se realiza en el microscopio perteneciente al Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile a cargo de Gladys C. Olivares, Jefe del Laboratorio del Microscopio Electrónico SEM. Este microscopio es de marca JEOL, modelo JSM-5410, y tiene una resolución máxima de 4 nm , a 30 kV a una distancia de 8 mm . Es capaz de entregar tres tipos de información, de Topografía (rebote de electrones secundarios), backscattering para imágenes de contraste de peso atómico y EDS para análisis de composición. En este microscopio se caracterizó:

- Textura del sustrato.
- Piquetes sobre la superficie del sustrato con deposición de aluminio.



Figura 3.12: Microscopio de barrido del Departamento de Ingeniería Metalurgia de la Universidad de Santiago de Chile.

3.3.3. Medidas de flujo de corriente y par de valores V-I.

Las medidas de flujo y corriente fueron realizadas en el Laboratorio de Materiales en un equipo especialmente fabricado y acondicionado para la prueba de obleas. Este equipo es de marca Electroglass (wafer prober, modelo 131) y se puede apreciar en las figuras 4.26 y 4.27. Las medidas de flujo de corriente se realiza por medio del contacto de un amperímetro con los contactos superior e inferior de la celda que estaba bajo radiación del panel de prueba. El panel de prueba entrega $650\text{ W}/\text{m}^2$ cuando esta encendido completamente y $350\text{ W}/\text{m}^2$ cuando se enciende solo la mitad.

Por otra parte, las medidas de los par de valores V-I es posible realizarlas por medio de dos metodos o dos tipos de circuitos:

- Circuito con fuente: Se dispone una fuente en serie con la celda solar y se procede a fijar la corriente en el máximo valor permitido y se varía el voltaje, para obtener la polarización directa, que es la que interesa.
- Circuito con resistencia: Se dispone de una resistencia variable (potenciómetro de precisión) en serie y se procede a variar la resistencia para obtener los valores que permitan determinar la curva V-I.

Con estos dos tipos de circuitos es posible determinar la curva V-I de una celda solar, que es la que nos entrega la información necesaria para determinar la eficiencia del dispositivo. A su vez es fácil corroborar el comportamiento como diodo, de una celda solar sin la interacción de la luz, por medio de ambos circuitos. Un esquema de ambos tipos de circuito se observa en la figura 3.13.

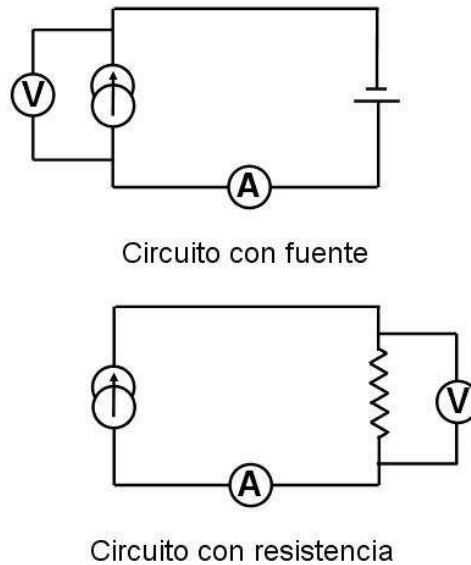


Figura 3.13: Circuitos para realizar las medidas de los par V-I.

Capítulo 4

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las diferentes etapas que contemplan la construcción y caracterización de las probetas. De los procesos mencionados, en esta memoria se logró realizar limpieza y texturización del sustrato, deposición y difusión de aluminio, deposición y difusión de fósforo, litografía por la técnica lift off, deposición de contactos y medidas de resistividad.

4.1. Limpieza química y textura del sustrato de Silicio.

Para cumplir con el protocolo de limpieza, ha sido necesario mantener una zona limpia dentro del Laboratorio de Materiales, durante y después del proceso, en el cual se trabaja. Durante el proceso se trabaja en la campana con extractor de aire y una vez terminado este procedimiento las probetas son guardadas en un secador al vacío. Después de realizar una serie de procedimientos de limpieza, siguiendo la metodología descrita en el subcapítulo 3.2.1, se ha logrado identificar y corregir algunos niveles de impureza. Después del proceso de limpieza se realizó la textura de la oblea. Se hicieron varios procesos de textura acorde a la metodología expuesta en el subcapítulo 3.2.2, pudiendo identificar y mejorar factores que influyen en la correcta texturización del sustrato. Las imágenes que se presentan a continuación muestran probetas texturizadas una vez terminado el proceso.

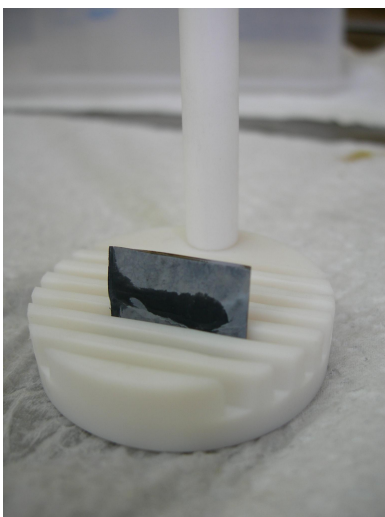


Figura 4.1: Disposición de la Oblea en el Portacelda.

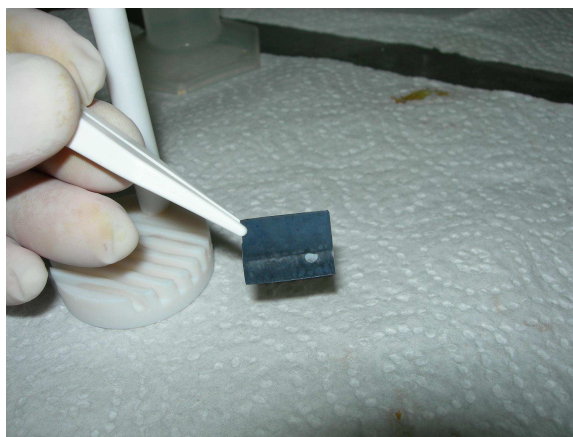


Figura 4.2: Texturización de oblea de Silicio.

Una vez realizada la texturización, se pueden apreciar a simple vista los efectos ocasionados por el ataque químico, notándose la superficie opaca, pero no existe forma de cuantificar el nivel de particulados en el sustrato y la homogeneidad de la textura, no garantizando la eficiencia del procedimiento, a menos que se caracterice por microscopia SEM. Para afirmar el éxito de la texturización sobre la superficie del sustrato es necesario que la probeta sea caracterizada bajo microscopia SEM.

Se debieron corregir una serie de factores que influían en la correcta aplicación de estos procesos. Uno de los factores que se debió manejar fue limpiar la campana antes de cualquier proceso de limpieza de obleas y texturización. A pesar que la campana es la zona limpia del laboratorio, ésta no se encuentra en condiciones óptimas para un trabajo totalmente limpio, es por esto que se decidió tapar cualquier vaso con reactivo para que éste no se contaminara con partículas indeseadas y una vez terminado cualquier proceso se guardaron las probetas en recipientes cerrados al vacío. Otro factor de importancia a considerar fue que durante la texturización se formaban burbujas en la superficie de la probeta. Éstas provocaban que la texturización no fuese uniforme y para esto se utilizó el agitador del plato caliente, para que las burbujas formadas se desprendieran. Otro punto a considerar para la texturización está ligado a las dimensiones de las probetas. Si se trabaja con probetas pequeñas las burbujas tenderían a entorpecer el ataque químico en gran parte del área de la celda, en cambio si se trabaja con una celda de mayor tamaño, la relación entre el tamaño de la probeta y el porte de la burbuja está a favor de la oblea. Para el proceso de limpieza y texturización se usó un porta obleas de teflón, debido a que la mayoría de los reactivos utilizados son capaces de corroer metales, es por esto que también se utilizó una pinza de polipropileno en el caso que las probetas se cayeran del porta obleas. Se tomó precaución en respetar parámetros de tiempo de ataque (tanto para la limpieza como para la textura), relación de reactivos y temperatura de exposición en el plato caliente, ya que producto de cualquier

diferencia significativa en más de uno de estos parámetros podría causar algún resultado no esperado.

Debido a que las precauciones para mantener la limpieza de la superficie no surten efecto durante un tiempo prolongado, se sugiere disminuir el lapsus existente entre cada proceso de fabricación, y a su vez realizar un procedimiento de limpieza entre procesos.

Las primeras texturas hechas se visualizaron en el microscopio óptico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, ubicado en el Taller Molina. En las figuras 4.3 y 4.4 se observan los resultados de la primera texturización. Para tener un punto de referencia también se aprecia en la figura 4.5 una probeta sin textura. En las figuras 4.3 y 4.4 se observa una especie de rugosidad sobre la superficie del sustrato, pero no se puede garantizar la formación de pirámides.

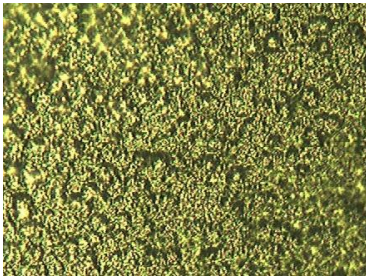


Figura 4.3: Microscopio óptico, oblea texturizada, resolución 500x.

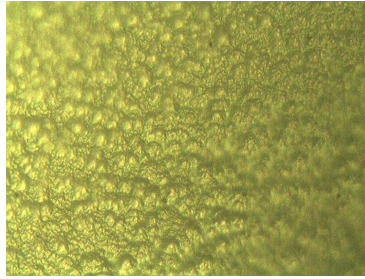


Figura 4.4: Microscopio óptico, oblea texturizada, resolución 800x.

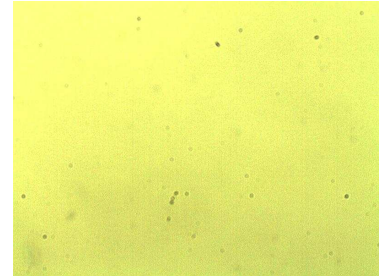


Figura 4.5: Microscopio óptico, oblea sin texturizar, resolución 800x.

Normalmente no se suelen caracterizar texturas con este tipo de microscopio, ya que se necesita de un microscopio que tenga resoluciones capaces de visualizar entre 3 a 5 micrones. Para poder ver las pirámides con mayor detalle, se recurre al Microscopio SEM del Departamento de Ingeniería metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile. En las figuras 4.6 y 4.7 se observan las mismas probetas que fueron vistas por el microscopio óptico.

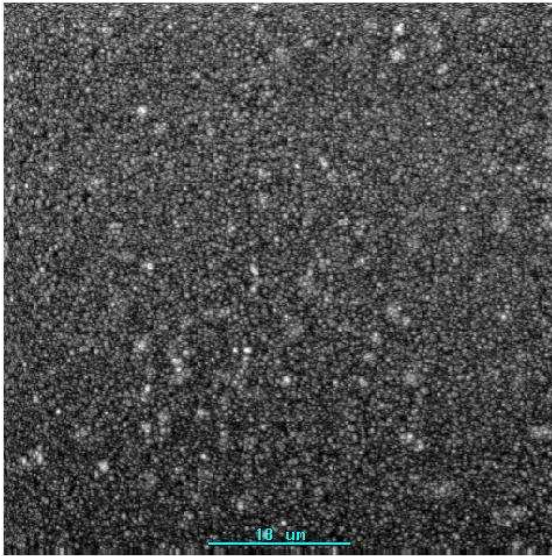


Figura 4.6: Caracterización de textura, resolución x2000

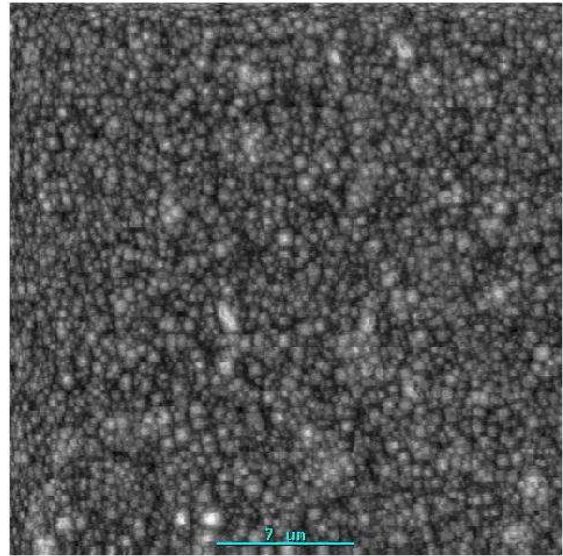


Figura 4.7: Caracterización de textura, resolución x5000.

En las figuras 4.6 y 4.7 se aprecia una rugosidad similar a la observada en el microscopio óptico, pero a una resolución mayor. Si esta texturización hubiera sido exitosa se esperaría observar pirámides de base entre 2 a 3 μm y dada la resolución de la imagen se puede aseverar que hubo algún problema en el proceso de texturización ocasionando la ausencia de pirámides.

Según la tesis en la cual se basa esta memoria [6], se deberían ver pirámides, pero no es lo que se observa en estas primeras cuatro caracterizaciones, estas consideraciones fueron mencionadas en el subcapítulo 4.1. Producto de la ausencia de pirámides, se rehizo el proceso de textura tomando las consideraciones mencionadas al comienzo de este capítulo. Resultado de esta nueva texturización se obtuvieron texturizaciones satisfactorias, debido a que se logra apreciar claramente la existencia de pirámides en el sustrato.

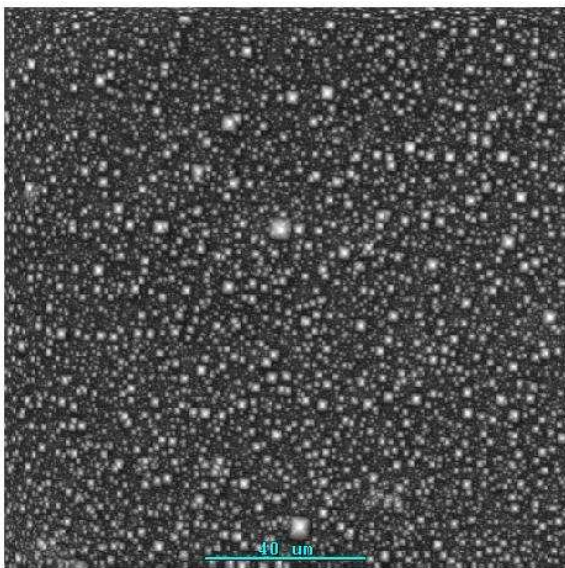


Figura 4.8: Caracterización de textura, resolución x1000 a 90°.

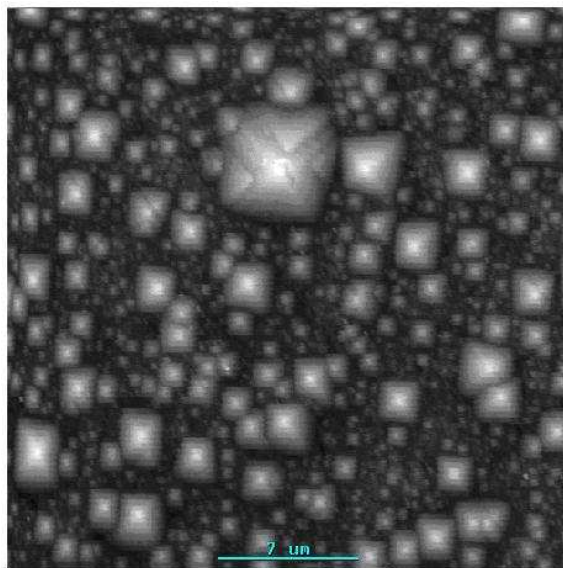


Figura 4.9: Caracterización de textura, resolución x5000 a 90°.

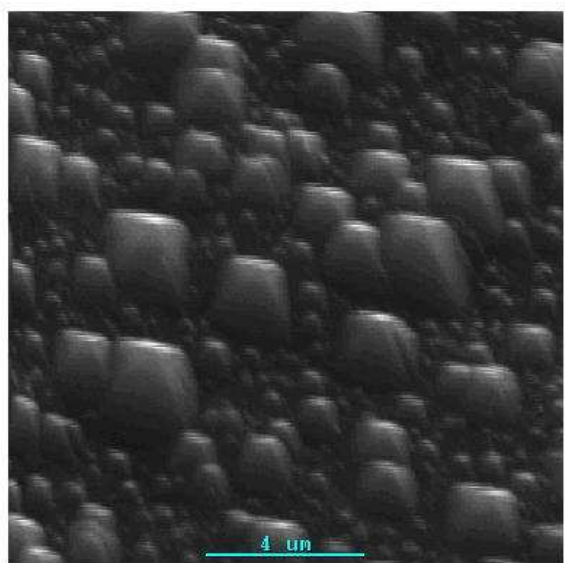


Figura 4.10: Caracterización de textura, resolución x10000 a 37°.

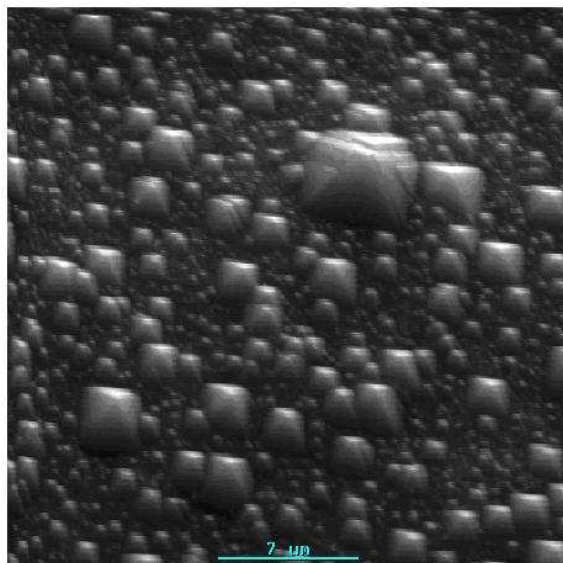


Figura 4.11: Caracterización de textura, resolución x5000 a 37°.

De estas imágenes se puede deducir que las pirámides están distribuidas de forma uniforme y se corroborar la existencia de ellas en toda la muestra. El análisis de estos resultados se realizó por medio del programa *Image J*. Con este programa se pudo establecer la cantidad de pirámides existentes en $28 \mu\text{m}$. *Image J* es capaz de entregar la ubicación y el área basal de cada pirámide, y así deducir la dimensión de la base.

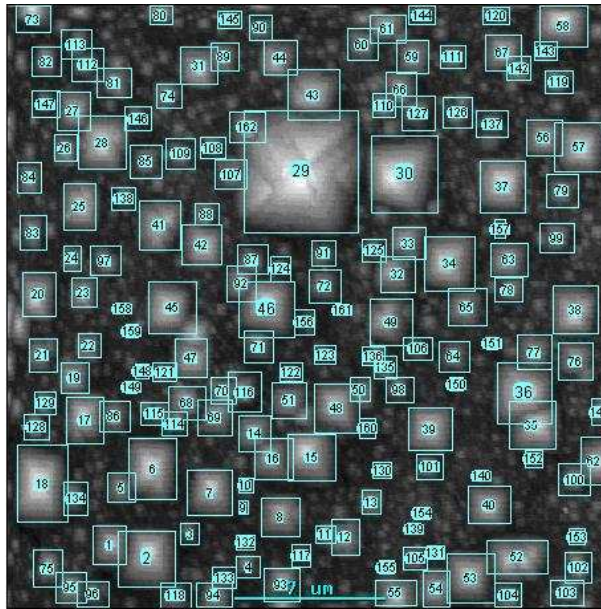


Figura 4.12: Análisis de imagen 4.9 en programa Image J.

Con los valores entregados por *Image J* se logró realizar un histograma para rangos de $1 \mu m^2$ (ver imagen 4.13), con esto se pudo establecer la cantidad de pirámides existentes en cada rango. En el histograma se observa una gran cantidad de pirámides que poseen base entre el rango de 1 a $2 \mu m$, encontrando 105 pirámides. La existencia de pirámides de base mayor ocurren en un número bastante inferior (entre el rango 2 a 3 hay 22 pirámides y superior a $3 \mu m$ hay sólo 2 pirámides), permitiendo decir que hay una cierta homogeneidad en la formación de pirámides de base inferior a $2 \mu m$. Cabe señalar que la cantidad de pirámides de base igual o inferior a $1 \mu m$, podría ser mayor al respecto al valor mencionado en el histograma (33 pirámides entre el rango 0 a $1 \mu m$), debido a que la resolución de la imagen no permite observar correctamente el contorno.

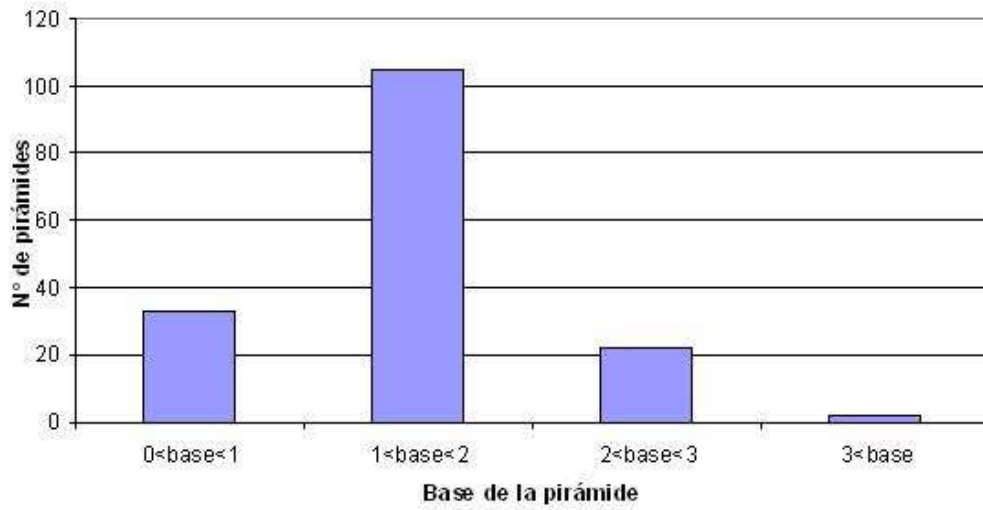


Figura 4.13: Análisis de imagen 4.9 en programa Image J.

Los resultados de la morfología demuestran las mejoras hechas al procedimiento de texturización, obteniendo resultados favorables para la disminución de la reflexión existente en la superficie del sustrato. Se logró intervenir más del 50% del área inicial, es decir, en más de la mitad de la superficie (inicialmente pulida) existen pirámides.

4.2. Deposición y difusión de Aluminio para capa p y contactos metálicos.

Se logró depositar aluminio (por evaporación) de forma parcial y total sobre el sustrato de silicio acorde con la metodología mencionada en los subcapítulos 3.2.3 y 3.2.6. La deposición total y difusión de aluminio se realizó en el respaldo del silicio para fabricar la capa p y contacto posterior. Por otra parte, para el contacto frontal se depositó aluminio de forma parcial utilizando el proceso de lift off según lo descrito en el subcapítulo 3.2.8, además de su tratamiento térmico. En la figura 4.14 se puede apreciar la deposición total de aluminio (sin difusión) para el contacto en la parte posterior de una probeta texturizada por medio del proceso de evaporación. En la imagen 4.15 se logran ver los contactos de aluminio (con tratamiento térmico) que van por sobre la capa n.

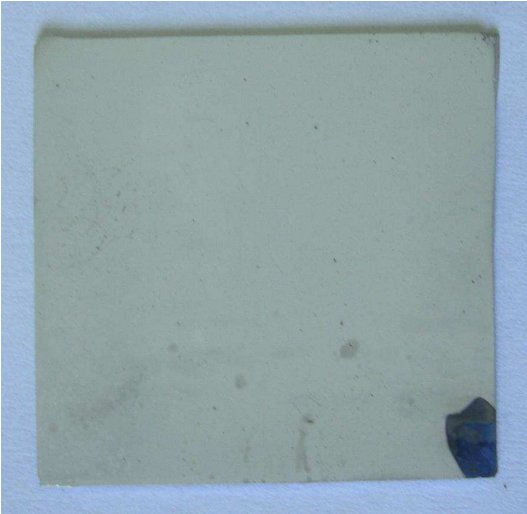


Figura 4.14: Probeta (texturizada) evaporada con aluminio en su parte posterior.

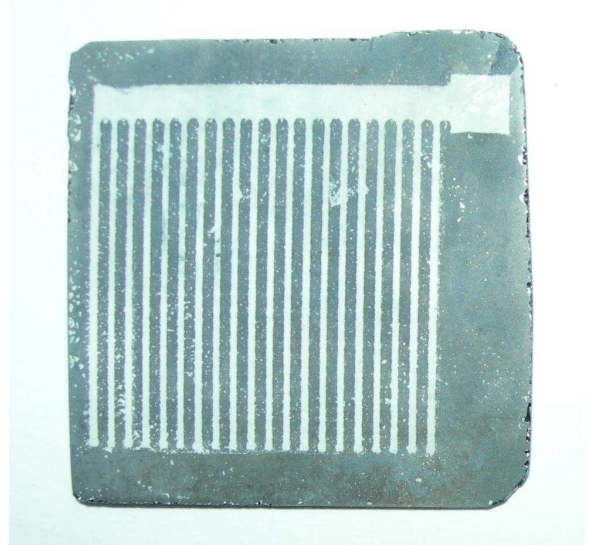


Figura 4.15: Contactos metálicos sobre la capa n.

En las primeras evaporaciones se logró identificar aspectos que condujeron a deposiciones fallidas. El principal problema que se tuvo fueron las constantes filtraciones que llevaban a la pérdida de vacío, las cuales fueron corregidas por medio de varios reparos, como el cambio de adaptaciones, limpieza y cambio de sellos, cambio de bombas y reconstrucción de piezas. A pesar de todas estas modificaciones, las filtraciones persistieron y se decidió utilizar otro sistema de evaporación, donde sólo se debió corregir el sistema de refrigeración. Durante las distintas evaporaciones se consideró que los trozos de aluminio montados sobre el filamento de tungsteno estuvieran firmes, ya que durante la evaporación en el instante de fundición del aluminio (pasa de estado sólido a líquido) se produce la gota de aluminio y si ésta no está bien ubicada sobre el filamento, el aluminio líquido cae y se pierde masa de aluminio a evaporar. Otro aspecto que se consideró, es la pérdida de área evaporada, por el hecho de que las probetas son fijadas por pinzas, este defecto se puede observar en la oblea que aparece en la figura 4.14. Se trató de minimizar tomando la probeta en una de sus aristas y ubicándola perpendicular al filamento. Cuando el sistema de evaporación no lograba llegar a la presión de evaporación ($2 \cdot 10^{-3} Pa$), o durante el proceso de evaporación, subía la presión drásticamente, las metalizaciones tendían a oxidarse, obteniendo una deposición no uniforme. En las evaporaciones definitivas se tomaron en cuenta todos los factores mencionados, logrando la obtención de una evaporación uniforme y definida.

Una vez que el proceso de litografía anduvo correctamente, se depositó aluminio sobre la capa n con litografía (cubierta con resina) para fabricar los contactos metálicos de la parte superior de la celda. En la figura 4.16 se aprecia el mejoramiento que se produjo en la deposición de aluminio. La celda de la izquierda es la primera probeta ensayada, donde se observa deposición de aluminio en zonas no deseadas, debido a que

la máscara no era lo suficientemente opaca. La celda de la derecha es la con la máscara mejorada y con una correcta deposición de aluminio. Las mejoras en el proceso de litografía provocaron una mayor definición de los contactos metálicos. Las mejoras que se realizaron a la evaporación de los contactos metálicos son las mismas precauciones que se tomaron para la evaporación de la capa p, junto con mejorar la definición de la máscara.

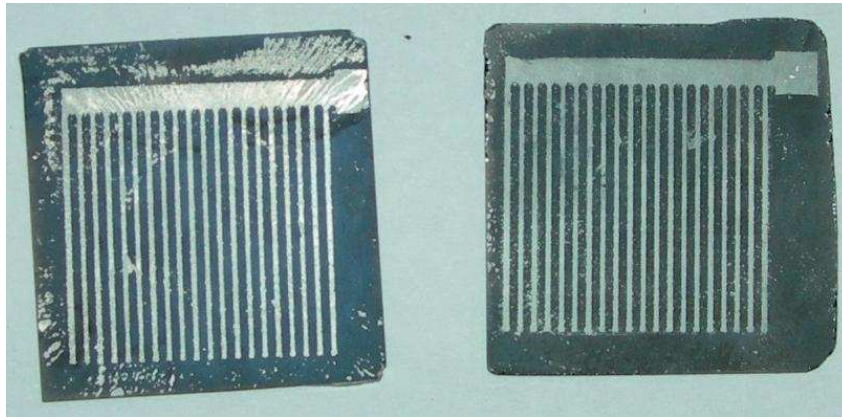


Figura 4.16: Comparación de probetas con aluminio depositado. A la izquierda se aprecian los primeros contactos realizados y a la derecha los contactos definitivos.

Para la difusión de la capa p se tuvo el inconveniente de la alta temperatura producida por el horno en los extremos del tubo de cuarzo. El tubo por el cual pasa nitrógeno, en sus bordes está sellado por tapas de aluminio, con la finalidad de conectar mangueras para hacer pasar el gas. En un comienzo, las mangueras estaban conectadas directamente a la tapa de aluminio y producto de la transferencia de calor, las mangueras se derretían obstaculizando el ambiente controlado. La solución que se le dio a este problema fue poner tubos de cobre de 40 cm de largo en los extremos, es decir, la manguera se conecta al tubo de cobre, el tubo de cobre a la tapa de aluminio y ésta al tubo de cuarzo, manteniendo el flujo de nitrógeno. El segundo problema fue mantener la temperatura máxima deseada del horno, en un comienzo se utilizó la opción de programar la temperatura (programando el tiempo y la temperatura de ascenso), pero al momento que se llegaba a 1100 °C, alcanzando 1350 °C aproximadamente, al parecer el silicio llega a temperaturas de fusión, provocando piquetes sobre las probetas. En el siguiente subcapítulo se podrán apreciar estos resultados (imagen 4.17). Se optó por no utilizar el sistema de programación del horno, y se fijó la temperatura de 1100 °C y se dejó que el horno llegara de forma natural a la temperatura.

4.3. Deposición y difusión de fósforo para capa n.

Para la deposición de la capa n se definió el volumen óptimo de solución de fósforo. En un comienzo se optó por usar el volumen sugerido por el fabricante, que es 1,0 ml o menos para 2,0 in². Los volúmenes se

detallan a continuación:

- En una oblea de resistividad $4,5-5,5 \Omega \cdot cm$ se depositó un volumen de $0,5 ml$ de solución de fósforo.
- En una oblea de resistividad $1-5 \Omega \cdot cm$ se depositó un volumen de $0,5 ml$ de solución de fósforo.
- En una oblea de resistividad $4,5-5,5 \Omega \cdot cm$ con aluminio depositado en su reverso, se depositó un volumen de $0,7 ml$ de solución de fósforo.

Una vez que se depositó cada volumen de solución en el spinner a $4000 rpm$ por $10 s$ se dejó durante $15 min$ en un plato caliente a $190 ^\circ C$. A las probetas se les aplicó tratamiento térmico por $3 h$ a $1100 ^\circ C$. Éstas se pueden observar en las siguientes imágenes.

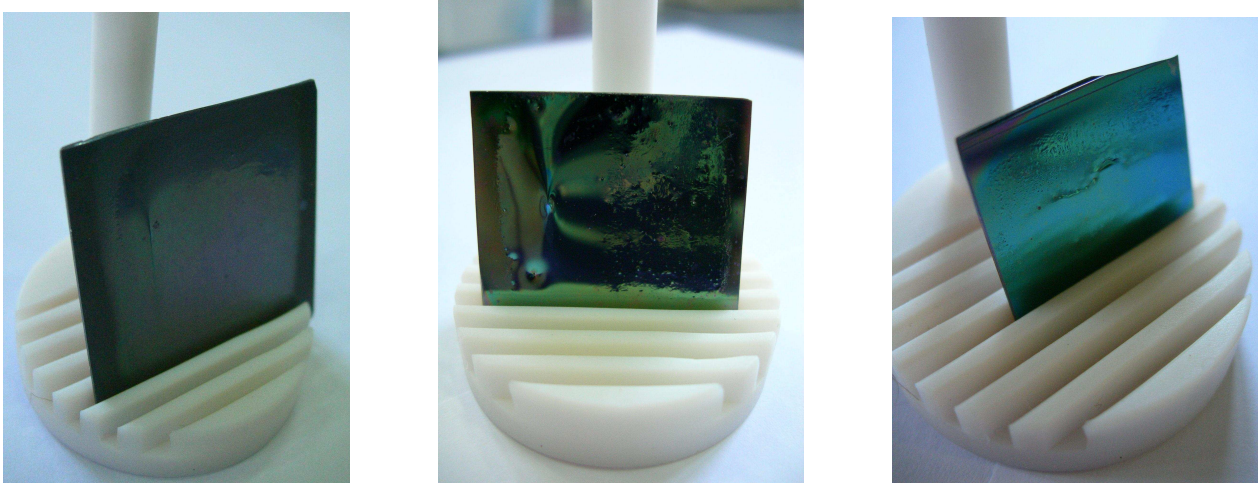


Figura 4.17: Primeras probetas con deposición de fósforo.

Las probetas ensayadas fueron caracterizadas por microscopia SEM para ver con claridad lo que pasó durante la difusión (imágenes 4.18 y 4.19). En el análisis realizado por el microscopio SEM se observó el crecimiento de un piquete de silicio, resultado que no era el esperado. De esto se puede deducir que la deposición de fósforo no fue correcta. Esto, más la inestabilidad de la temperatura máxima del horno, llevaría a la formación del piquete. El volumen desproporcionado de fósforo provocó que el exceso se traspasara a la capa de aluminio. Producto de estos resultados se decidió disminuir el volumen de solución depositada en las probetas, para esto se realizó deposición en 5 probetas de $1 in^2$ cada una. Se depositó solución de fósforo a $5000 rpm$ durante $10 s$ y se puso en el plato caliente durante $15 min$ a una temperatura de $180 ^\circ C$. Para comprobar el volumen óptimo por área se ensayaron $0,2$; $0,15$, $0,1$; $0,05$ y $0,04 ml$ de solución de fósforo.



Figura 4.18: Probeta con piquete, resolución x50.

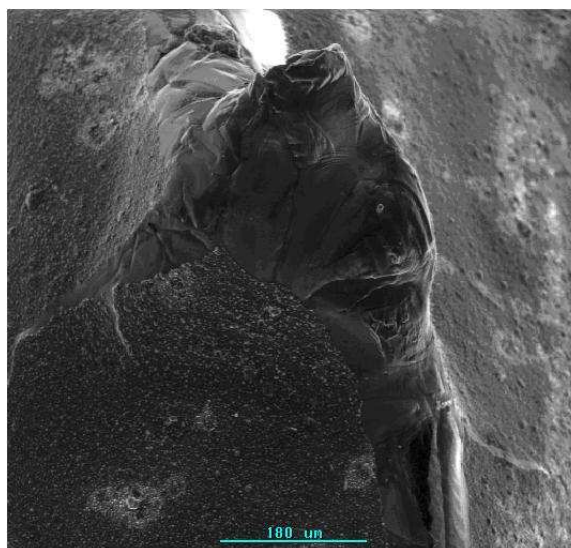


Figura 4.19: Probeta con piquete, resolución x200.

De estas nuevas deposiciones se logró definir el rango de volumen por área, obteniendo deposiciones de fósforo uniforme y que lograran cubrir toda la superficie frontal de la probeta. El volumen óptimo encontrado de solución se encuentra entre **0,05 a 0,06 ml** por **1 in²**.

4.4. Litografía

Al igual que los procesos anteriores, se realizaron pruebas para definir la cantidad de resina en la superficie. Todas las obleas ensayadas tienen un área de 1 in², éstas se resumen a continuación:

Probeta	Estado	Volumen de fijador ml	Volumen de resina ml	Rotación rpm	Tiempo de rotación s
1	Sin textura	0,03	0,06	7000	90
2	Sin textura	0,04	0,04	7000	90
3	Sin textura	0,06	0,18	7000	90
4	Con textura	0,04	0,2	7000	240
5	Con textura	0,06	0,2	7000	240

Tabla 4.1: Tabla resumen de probetas ensayadas para litografía.

De estas pruebas se observa que para el rango entre 0,04 a 0,06 ml de fijador y 0,2 ml de resina se obtiene una deposición de resina uniforme. Bajo este rango de volumen de fijador y resina, se observa que el fijador no se distribuye de forma uniforme y la resina no logra cubrir completamente la superficie de la oblea.

Al depositar fijador en superficies texturizadas, éste se distribuye con mayor rapidez que en las superficies pulidas. Para la uniformidad de la deposición de resina es de suma importancia contar con una máscara bien marcada y definida, para tener contorno definidos en las líneas de contacto.

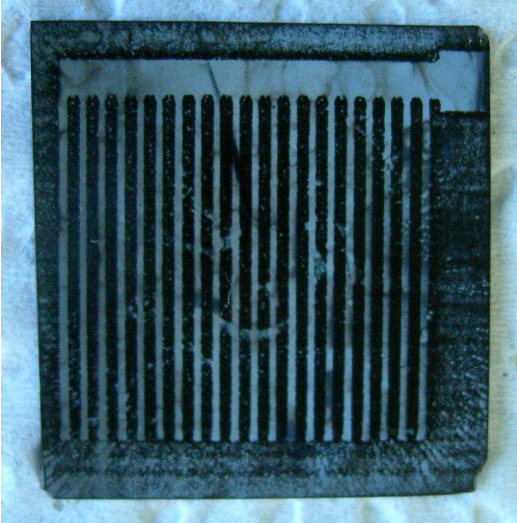


Figura 4.20: Probeta texturizada con litografía insatisfactoria.

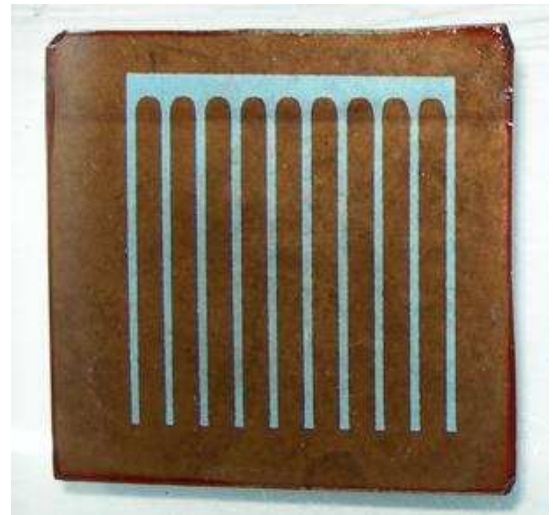


Figura 4.21: Juntura con litografía satisfactoria.

La mejora en la máscara se puede apreciar en la imagen 4.21, ya que muestra diferencias significativas en la definición de los bordes de los contactos. En un comienzo se obtuvieron resultados como la litografía de la imagen 4.20, este problema surge debido a que la máscara permite pasar luz ultravioleta en zonas donde no debe hacerlo, provocando que la resina (negativa) no reaccione y una vez que es revelada no cubra esas zonas dejando libre la superficie, y cuando la probeta es evaporada con aluminio quedan lugares con metalización no deseada. Comparando las probetas de la imágenes expuestas, se corrobora que la mejora en la definición de la máscara da un resultado superior al obtenido inicialmente. La diferencia entre el diseño del peine radica en el cambio a un patrón impreso en la máscara, más sencillo. Esta diferencia apunta a disminuir la cantidad de contactos en el peine, debido a que la mayor cantidad de contactos por sobre la capa disminuye el número de fotones por área de exposición. La correcta deposición de resina sobre la probeta llevó a la obtención de una mejor fabricación de los contactos metálicos.

4.5. Medidas de resistividad.

Las medidas de resistividad se realizaron por el método de cuatro contactos. Las dimensiones de las probetas ensayadas se resumen en la tabla 4.2. Las dimensiones relevantes de este resumen son ancho, separación y espesor. Se midieron dos probetas, una con contactos transversales y otra con contactos puntuales, cada una con y sin luz. Acorde a lo mencionado en el subcapítulo 3.3.1 se realizaron medidas de V_m y I_m ,

obteniendo pares de valores que se detallan en los anexos.

Contacto transversal			
a	b	L	t
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10,13 ± 0,37	5,20 ± 0,05	34,27 ± 0,23	0,52 ± 0,05
Contacto puntual			
a	b	L	t
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10,13 ± 0,37	10,20 ± 0,2	34,27 ± 0,23	0,52 ± 0,05

Tabla 4.2: Detalle de valores geométricos de la probeta con contactos transversales y puntuales.

Con los valores de V_m y I_m expuestos en los anexos se obtienen los gráficos 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25. Durante el proceso de medición de los pares de valores V_m y I_m , después de aumentar el voltaje de la fuente, se observaron fluctuaciones de los valores, es por esto que se decidió medir a intervalos estables con el fin de minimizar errores de interferencia. Comparando las figuras 4.22 y 4.23 podemos observar que para el contacto transversal sin luz la pendiente de línea de tendencia de los valores V_m y I_m es superior al caso del contacto transversal con luz. Asumiendo que el valor de desfase de la recta con el origen es bastante pequeño, el valor de la pendiente nos entrega la resistencia de la muestra. Con este valor se obtiene el valor de la resistividad de la muestra, que es directamente proporcional a la resistencia, por ende si aumenta el valor de la resistencia debería aumentar el valor de la resistividad (manteniendo los parámetros geométricos ancho, separación y espesor). Que la pendiente del contacto transversal sin luz sea mayor que la del contacto transversal con luz, nos indica que el material ensayado tiene mayor conductividad al estar expuesto a la luz. Esto se debe a que el material ensayado es un semiconductor y al ser expuesto a la luz, de cierta forma se le suministra energía aumentando la conductividad.

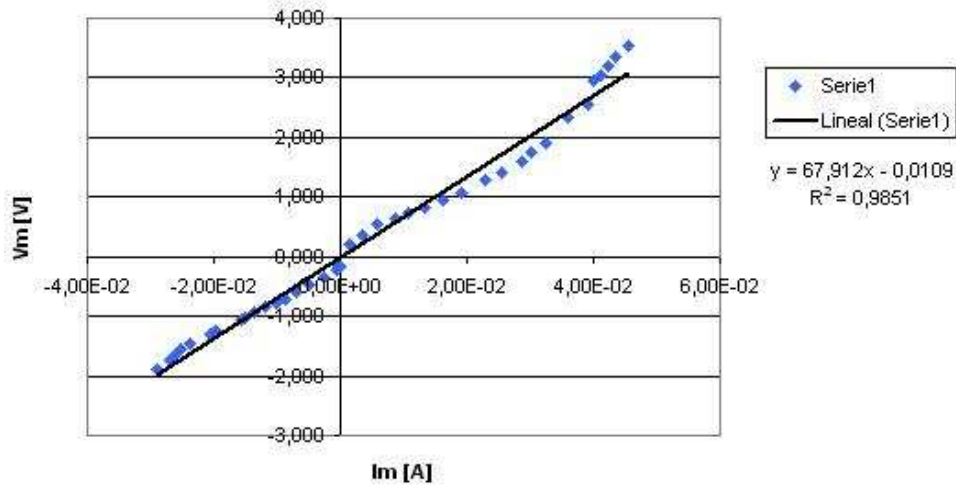


Figura 4.22: Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto transversal sin luz.

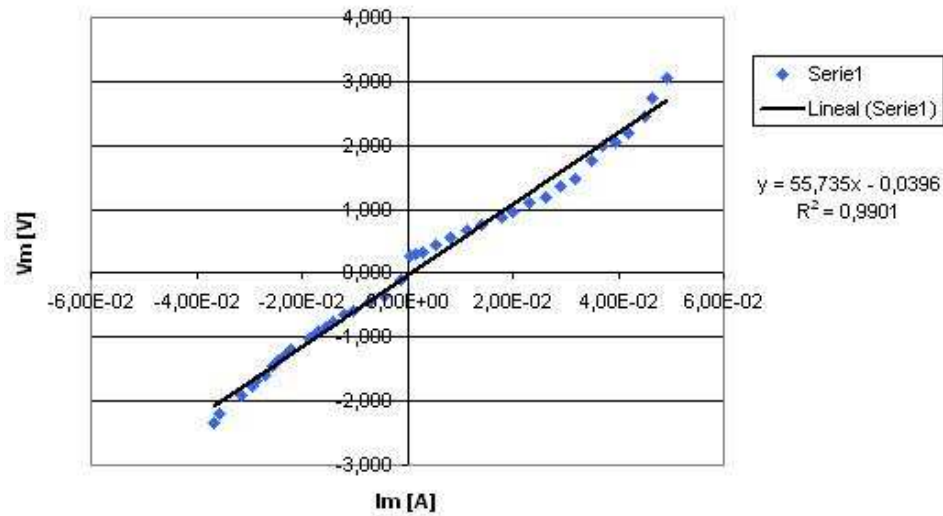


Figura 4.23: Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto transversal con luz.

Para las figuras 4.24 y 4.25 se puede acotar lo mismo que en las figuras anteriores. La pendiente para el caso del contacto puntual sin luz es mayor que para el contacto puntual con luz. El motivo es el mismo que se explicó anteriormente. La diferencia entre los valores de resistencia de la muestra entre el contacto transversal y puntual se debe a la diferencia geométrica de medir el circuito. El aumento de conductividad entre un ensayo sin luz y otro con luz es más notorio para el contacto transversal.

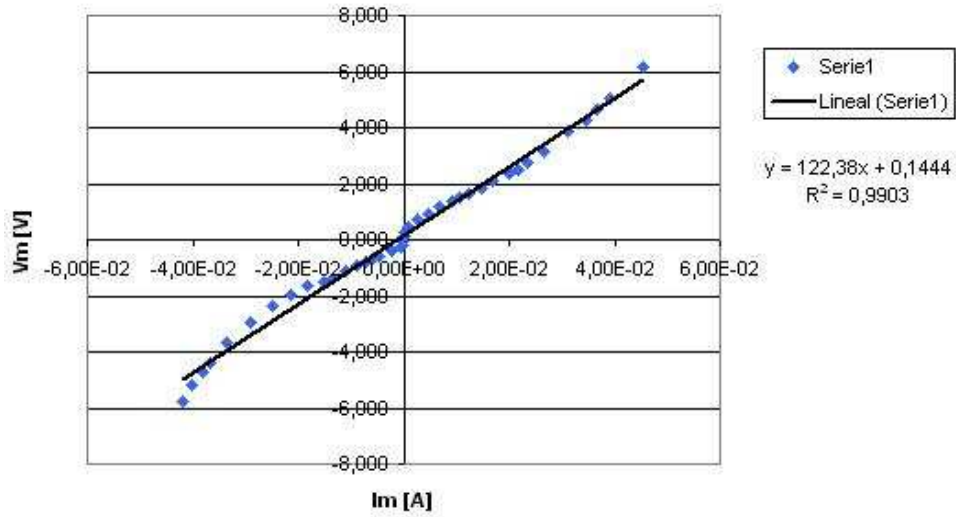


Figura 4.24: Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto puntual sin luz.

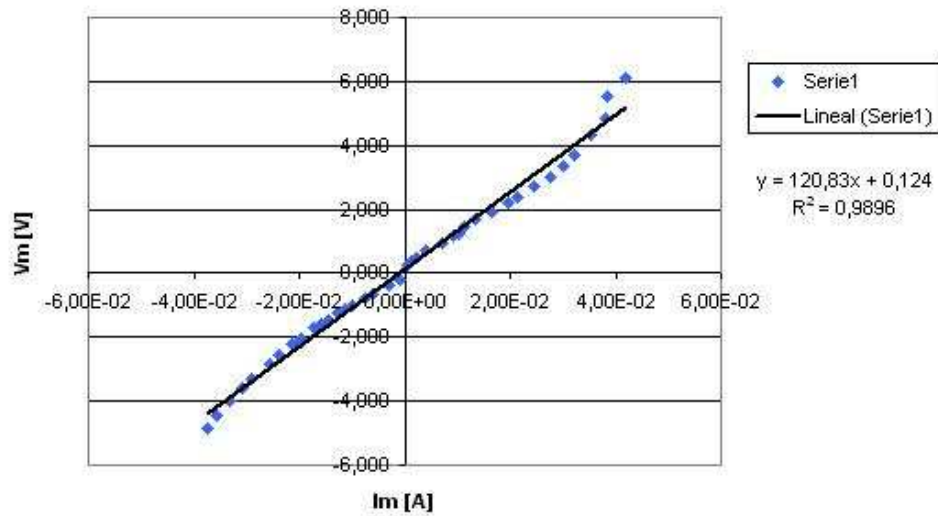


Figura 4.25: Curva Voltaje en muestra versus Corriente de la muestra, para una resistencia de 1000 Ohms con contacto puntual con luz.

En la tabla 4.3 se detallan los valores de resistividad que se realizaron a las probetas de silicio con contactos transversales y puntuales, con y sin luz.

	R_m [Ω]	r [$\Omega \cdot cm$]
Contacto transversal sin luz	67,91	6,88
Contacto transversal con luz	55,74	5,65
Contacto puntual sin luz	122,38	6,32
Contacto puntual con luz	120,83	6,24

Tabla 4.3: Resumen de resistividades.

A pesar que los valores de las resistividades obtenidas están fuera del rango de resistividad entregado por el fabricante ($4,5-5,5 \Omega \cdot cm$), estos son relativamente aceptables debido a que se comportan según lo esperado, es decir, la curva V_m en función de I_m se comporta de forma lineal y para valores cercanos a cero tiene una leve diferencia. Junto a esto, los 4 valores de resistividad no se separan por más de $1,2 \Omega \cdot cm$ a pesar que el sustrato ensayado es el mismo para ambos métodos. El contacto que se acercó más al valor dado por el fabricante es el contacto transversal, aún así no se puede deducir cuál es el mejor método para medir resistividad, por sobre el contacto puntual. Cabe señalar que estas mediciones sirven para corroborar el rango de resistividad (o conductividad) del silicio que se utiliza como sustrato.

4.6. Medidas de Corriente

Las medidas de corriente se realizaron una vez que la celda solar fue terminada, esto quiere decir aluminio y fósforo depositados y difundidos, contactos frontales y posteriores. Para la medición de corriente fue utilizado un sistema adaptado para medidas de dispositivos de microelectrónica. Este sistema se compone por un panel de ampollitas halógenas de 1500 Watts cuando está prendido completamente y 750 Watts cuando se prende la mitad del panel. Como se mencionó en el subcapítulo 3.3.3, este panel entrega 650 W/m^2 cuando esta encendido completamente. Para la realización de las medidas se utilizó una lámina de aluminio para tomar contacto con la parte inferior de la celda, ya que el porta muestra del dispositivo de microelectrónica está hecho de goma, siendo imposible realizar las medidas en esa situación. El aluminio es puesto en contacto con la celda por medio del vacío generado por la bomba del sistema. Cabe destacar que este equipo se utiliza solo para determinar la generación de corriente en la celda por efecto fotoeléctrico, pero no es posible comparar con otros trabajos, dado que no es factible simular las condiciones internacionales de caracterización de celda, con un espectro de luz incidente AM1,5G, que representa la irradiancia solar terrestre en una superficie con orientación específica, definido con un plano inclinado a 37° en relación al ecuador terrestre, publicado por la ASTM G173-03 (con control de temperatura, presión, etc.).



Figura 4.26: Equipo para medir corriente en la celda.

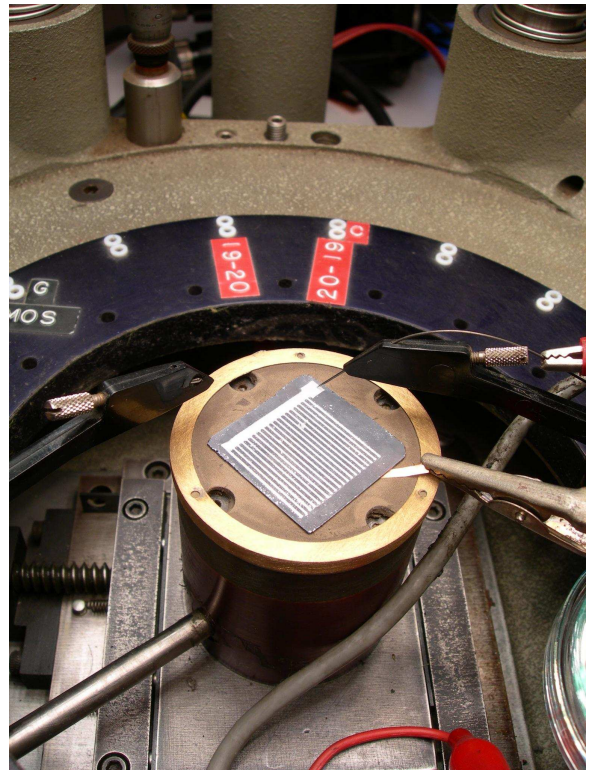


Figura 4.27: Detalle de las medidas de corriente.

4.6.1. Mediciones de flujo de corriente para probetas con contacto metálico

La primera celda fabricada con los procedimientos no optimizados fue medida en 7 puntos distintos de los contactos metálicos sobre la superficie de la celda. Hay que señalar que la celda solar tuvo $0 \mu A$ en toda la superficie cuando el panel estaba apagado.

	Medio panel μA	Panel completo μA
1	0,077	0,101
2	0,091	0,12
3	0,079	0,096
4	0,068	0,082
5	0,082	0,101
6	0,095	0,125
7	0,082	0,113

Tabla 4.4: Resumen de corrientes obtenidas.

A pesar que los valores de corriente obtenidos son demasiado pequeños, la celda ensayada es capaz de producir flujo, al ser sometida al panel. Los contactos utilizados para estas mediciones no son los mejores que pueden haber; producto del bajo nivel de corriente; los contactos pueden afectar las mediciones realizadas. Los valores de corriente para una celda solar optimizada en trabajos paralelos con procesos similares son de aproximadamente 120 mA en una geometría similar (1 in^2), utilizando etapas semejantes a este trabajo, pero optimizadas desde el punto de vista de reactivos, hornos, campanas, geometría de los contactos y características de un ambiente adecuado de AM 1,5 para los contactos eléctricos [6] [11]. Los valores obtenidos con la medida realizada en el laboratorio sólo se utilizan para demostrar que se obtuvo una celda solar (existencia de flujo de corriente), pero no es posible comparar los valores con los demás trabajos.

Después que se ensayó la primera probeta fabricada, se decidió realizar cuatro probetas nuevas tomando en cuenta los factores que influían en la correcta fabricación de la celda solar. Estos factores contemplan tiempos de fabricación de las celdas, limpieza durante y entre procesos, mejor definición de la máscara, correcta deposición de resina, deposición uniforme de capa n, capa p y contactos. Se logró obtener mejoras considerables en los aspectos que se tenía cierto grado de control, logrando un dispositivo final mejorado. Los ensayos a las cuatro probetas mejoradas se presentan en el gráfico 4.28 y en las tablas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8. Las probetas 1 y 2 fueron difundidas en dos etapas y las probetas 3 y 4 en una etapa. En las probetas 1 y 2 se obtienen flujos de corriente superiores a los medidos en la primera celda. La primera celda obtuvo un pick de $0,125 \mu\text{A}$, por otro lado la probeta 1 tiene un pick de $0,071 \text{ mA}$ y un promedio de $0,069 \text{ mA}$, la probeta 2 un pick de $2,15 \text{ mA}$ y un promedio de $1,99 \text{ mA}$. A su vez, hay una diferencia entre la probeta 1 y 2, la probeta 2 tiene casi 3 veces más flujo de corriente que la probeta 1. Los análisis de los flujos de corriente se basan principalmente en la reacción de la celda ante la exposición del panel encendido completamente.

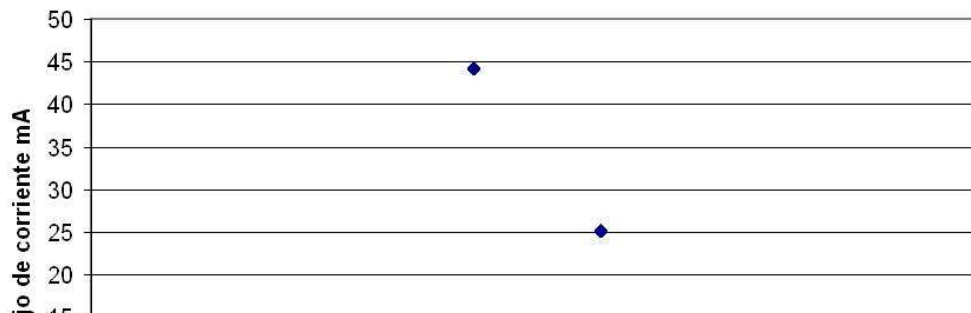


Figura 4.28: Resumen comparativo de flujos de corriente obtenido en las diferentes probetas ensayadas.

	Medio panel	Panel completo
	<i>mA</i>	<i>mA</i>
1	0,054	0,068
2	0,052	0,069
3	0,048	0,065
4	0,050	0,069
5	0,052	0,072
6	0,052	0,071

Tabla 4.5: Flujos de corriente de juntura con contacto metálico, probeta 1 de dos etapas.

	Medio panel	Panel completo
	<i>mA</i>	<i>mA</i>
1	1,74	2,02
2	1,73	2,00
3	1,72	2,02
4	1,72	2,02
5	1,51	1,74
6	1,81	2,15

Tabla 4.6: Flujos de corriente de juntura con contacto metálico, probeta 2 de dos etapas.

En las probetas 3 y 4 se midieron flujos de corriente muy superiores a los registrados en las probetas 1 y 2, sobre todo superiores a los de la primera celda. Para la probeta 3 se obtuvo un pick de 49,2 *mA* con un promedio de 44,2 *mA*. Para la probeta 4 se obtuvo un pick de 26,6 *mA* con un promedio de 25,1 *mA*. El flujo de corriente de la probeta 3 es aproximadamente 20 veces mayor que el de la probeta 2 y casi el doble que la probeta 4, el flujo de corriente de la probeta 3 se considera un éxito relevante en las mejoras realizadas a los procesos de fabricación. Hay que señalar que las probetas 1 y 2 fueron fabricadas con 2 etapas de difusión y las probetas 3 y 4 fueron fabricadas con 1 etapa de difusión.

	Medio panel	Panel completo
	<i>mA</i>	<i>mA</i>
1	35,4	43,7
2	32,3	42,1
3	34,2	48,0
4	24,3	35,1
5	34,5	49,2
6	33,6	47,1

Tabla 4.7: Flujos de corriente de junta con contacto metálico, probeta 3 de una etapa.

	Medio panel	Panel completo
	<i>mA</i>	<i>mA</i>
1	18,5	22,9
2	18,1	25,0
3	18,4	24,9
4	21,4	26,1
5	21,6	26,6

Tabla 4.8: Flujos de corriente de junta con contacto metálico, probeta 4 de una etapa.

El rango de eficiencia en el cual se encuentra la probeta 3 se puede estimar a grandes rasgos, comparando flujos de corriente y eficiencias de tecnologías similares. Éste es el caso de la celda obtenida por Nair Stern [6], que tiene una densidad de corriente de $217,246 \text{ mA/in}^2$ con una eficiencia de 16,9%. La celda de Nair Stern fue fabricada con procesos similares a los que se utilizaron en la fabricación de las probetas ensayadas. Acorde a esto se puede estimar que la eficiencia de la probeta 3 que tiene una densidad de corriente de $48,70 \text{ mA/in}^2$ obteniendo una eficiencia de 3,79% y la de la probeta 4 que tiene una densidad de corriente de $28,78 \text{ mA} \in^2$ obteniendo una eficiencia de 2,24%, aproximadamente. Se realizó un análisis similar, con una celda patrón de marca Sunpower, modelo A300. Esta celda tiene una eficiencia de 20%, y obtuvo una densidad de corriente de $130,55 \text{ mA/in}^2$ en el sistema utilizado para medir las probetas. De estos valores se estimó que la eficiencia de la probeta 3 fue de 7,46% y de la probeta 4 fue de 4,41%. Hay que tener claro que los valores dados son estimaciones y no se deben asumir como los valores exactos. Hay que recalcar que los valores de eficiencia descritos son **estimaciones**, para obtener valores de forma rigurosa se debe caracterizar por medio de la curva V-I y curva V-P. La caracterización de la curva V-I se realizará solo a la probeta 3 y se presenta en el subcapítulo 4.6.3.

4.6.2. Mediciones de flujo de corriente para probetas con contacto polimérico

Una variante a utilizar en contactos metálicos es depositar un polímero conductor en el frente y respaldo de la juntura. Una vez fabricada la juntura de aluminio, silicio y fósforo. Se procedió a depositar el polímero Poli[1,2- di-(2-tienil)vinileno] en solución líquida y se realizó el cortocircuito entre la capa p y n sumergiendo los bordes en cloroformo. Se procedió a medir realizando el contacto sobre la capa n con polímero depositado. Para poder cuantificar la variación del flujo de corriente provocada por el polímero se realizaron medidas sobre la juntura antes y después de la deposición del polímero. En las tablas 4.9, 4.10, 4.11 y 4.10 se resumen los flujos de corrientes obtenidos en las mediciones.

En los resultados realizados a la probeta 5 se observa que antes de la deposición del polímero se tenía un flujo promedio de $0,71 \text{ mA}$ y un pick de $0,99 \text{ mA}$, incrementando la corriente una vez depositado el polímero a un flujo de $2,41 \text{ mA}$ y un pick de $3,32 \text{ mA}$. Claramente hubo un aumento en el flujo de corriente producto de la deposición del polímero. Este aumento es superior al obtenido con las probetas 1 y 2 con contactos metálicos, pero inferior a las probetas 3 y 4.

	Medio panel <i>mA</i>	Panel completo <i>mA</i>
1	0,22	0,5
2	0,37	0,8
3	0,26	0,59
4	0,28	0,67
5	0,23	0,99

Tabla 4.9: Flujos de corriente de juntura antes de la deposición de polímero, probeta 5.

	Medio panel <i>mA</i>	Panel completo <i>mA</i>
1	0,7	1,93
2	0,82	1,97
3	1,2	2,73
4	1,49	3,12
5	0,62	1,39
6	1,61	3,32

Tabla 4.10: Flujos de corriente de juntura después de la deposición de polímero, probeta 5.

Del mismo modo que la probeta 5, se observó un aumento en el flujo de corriente de la probeta 6, pero en un rango bastante inferior que la probeta 5. Antes de la deposición del polímero se obtuvo un flujo de $7,4$

μA promediado y un pick de $7,84 \mu A$, después de la deposición del polímero se obtuvo un promedio de $72 \mu A$ y un pick de $100,6 \mu A$. La probeta 5 se encuentra en el rango de mA y la probeta 6 en el rango de μA . La probeta 5 fue fabricada por medio de 2 etapas de difusión y la probeta 6 por 1 etapa de difusión.

	Medio panel	Panel completo
	μA	μA
1	3,07	6,75
2	3,54	7,66
3	3,69	7,84

Tabla 4.11: Flujos de corriente de juntura antes de la deposición de polímero, probeta 6 de una etapa.

	Medio panel	Panel completo
	μA	μA
1	27,7	63
2	28,2	63,4
3	48	100,6
4	32,4	54,8
5	35,1	78,2

Tabla 4.12: Flujos de corriente de juntura después de la deposición de polímero, probeta 6 de dos etapas.

4.6.3. Curva V-I y cálculo de eficiencia de probeta 3.

Las mediciones hechas a la probeta 3, se realizaron bajo la incidencia del panel encendido completamente, el cual entregaba $650 W/m^2$. El circuito utilizado para determinar la curva V-I fue el circuito con fuente (ver figura 3.13). Las mediciones realizadas a la probeta 3 entregaron los valores que se presentan en la tabla 4.13.

V [V]	I [A]
0,486	0
0,426	0,0068
0,378	0,0118
0,302	0,0202
0,275	0,0231
0,246	0,0266
0,199	0,031
0,177	0,033
0,157	0,0346
0,055	0,0439

Tabla 4.13: Valores de voltaje y corriente obtenidos de la probeta 3 con circuito con fuente bajo 650 W/m^2 de radiación incidente.

Con estos valores fue posible determinar la curva V-I y la curva V-P que se presentan en la figura 4.29. De estas curvas fue posible determinar los valores I_{SC} , V_{OC} , I_{MP} y V_{MP} , presentados en la tabla 4.14.

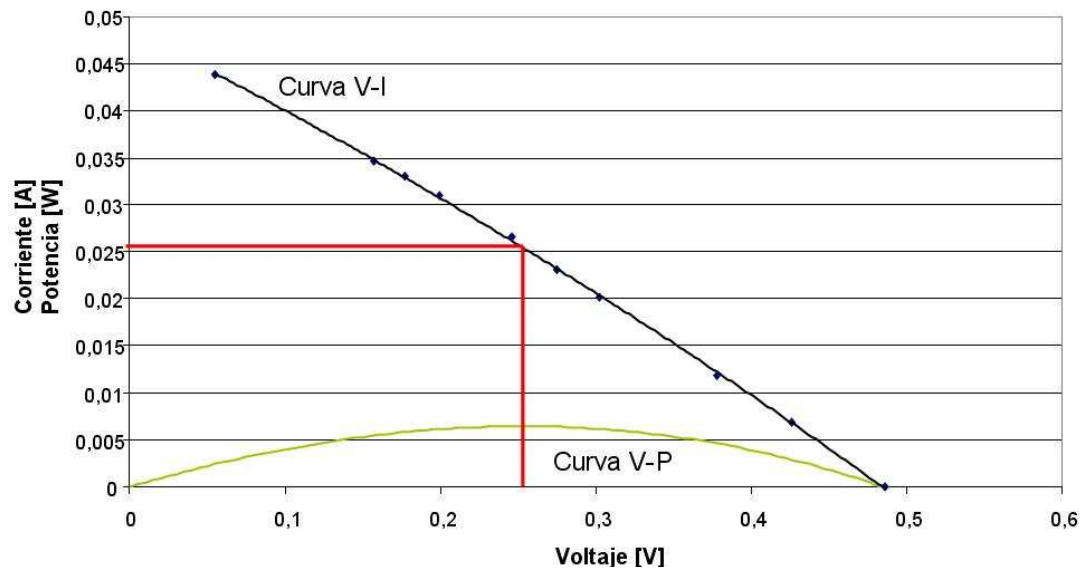


Figura 4.29: Curva V-I y curva V-P para probeta 3.

Isc [A]	0,0486
Voc [V]	0,484
Imp [A]	0,026
Vmp [V]	0,252

Tabla 4.14: Valores I_{SC} , V_{OC} , I_{MP} y V_{MP} , de la probeta 3.

Con los valores expuestos en la tabla 4.14, las ecuaciones 2.4 y 2.5, y un valor de potencia de entrada de 0,419 W, fue posible determinar el factor de forma y eficiencia de la probeta 3. El factor de forma obtenido fue de **27,3 %** y una eficiencia de **1,5 %**.

Capítulo 5

Conclusiones

De las mejoras obtenidas en el aumento del flujo de corriente entre la primera celda ensayada y las seis probetas definitivas, se puede concluir que el procedimiento de limpieza y la no contaminación de las probetas durante los diferentes procesos, es uno de los factores que debería influir mayormente sobre los flujos de corriente que puede entregar la celda solar definitiva. Las modificaciones a los procedimientos apuntan a minimizar la contaminación de probetas, tratando de realizar limpieza de probetas antes de cada procedimiento. En este sentido, otro factor que colabora con un mejor trabajo de la celda solar es reducir los tiempos muertos entre cada etapa de fabricación. Producto que esta memoria es la primera que estudia esta área en la Universidad de Chile, se encontraron una serie de inconvenientes del punto de vista de equipamiento, ocasionando largos periodos entre cada etapa llevando a una celda final con una baja eficiencia.

Se obtuvieron resultados bastante satisfactorios para el proceso de texturización. La diferencia existente en las caracterizaciones entre las primeras texturizaciones y las probetas con textura definitiva, afirma la correcta dirección en las modificaciones realizadas durante el proceso. Se lograron obtener principalmente pirámides de base en el rango de 1 a 2 micrones con una cierta homogeneidad en la formación de pirámides, logrando intervenir más del 50% del área inicial del sustrato.

En la metalización de la capa p y contactos metálicos, se logró depositar aluminio de forma uniforme y continua sobre el sustrato de silicio.

Se logró definir el volumen óptimo de solución de fósforo a depositar, con tal de no contaminar la capa p y garantizar el recubrimiento de la superficie de la capa n. Junto a esto se determinaron variables de tiempo y rotación del spinner con tal de obtener una película uniforme y continua de fósforo sobre el sustrato. Se realizaron dos tipos de difusión para la capa n, el primero a la vez con la difusión de aluminio y el segundo de forma independiente. Para deducir con cuál de los dos procedimientos, se realizaron ensayos de flujo de corriente en tres probetas con dos etapas de difusión y tres probetas con una etapa de difusión. De los resultados expuestos para las probetas con contacto metálico se obtuvo mejores flujos de corrientes en

dispositivos con difusión de una etapa.

Según la literatura, se esperaban mayores flujos de corriente en dispositivos con dos etapas de difusión [6]. El comportamiento de los flujos de corriente existente en probetas con una etapa y de dos etapas no permite determinar cual de los dos procesos de difusión es mejor, sólo se puede mencionar que el más alto flujo de corriente se obtuvo en probetas con una etapa de difusión y se debe volver a realizar estudios con celdas de dos etapas de difusión.

Se pudo obtener una correcta deposición de resina que llevó a la fabricación de contactos metálicos definidos, y sumado a las mejoras realizadas a los otros procedimientos se logró producir una celda solar con un flujo de corriente de $48,7 \text{ mA}/\text{in}^2$.

Se logró estudiar una celda híbrida compuesta por una juntura inorgánica de aluminio, silicio y fósforo, y un contacto orgánico de un polímero llamado Poli[1,2- di-(2-tienil)vinileno]. Se pudo determinar aumento de flujos de corriente del orden de 2 a 3 mA, debido a la deposición del polímero en la juntura. Es necesario seguir estudiando el comportamiento de este tipo de polímero, ya que puede ser utilizado como capa antireflectante y por su fácil deposición simplifica varias etapas de construcción. Para dispositivos con contacto polimérico se obtuvo mejores flujos de corriente en dispositivos con difusión de dos etapas.

Se puede afirmar que se obtuvo una celda solar de bajo costo, posiblemente una de las primeras celdas solares basada en tecnología de silicio producida completamente en Chile, con procedimientos, reactivos y equipos que en su mayoría son de bajo costo. La eficiencia del dispositivo se determinó en 1,5 % de eficiencia. Este valor se determinó por medio de la curva V-I y curva V-P en un equipo dispuesto para medir obleas. Hay que señalar que este equipo no cumple con la norma AM1,5G publicada por ASTM G173-03, que describe las variables de presión, masa de aire, temperatura, etc, que debería estar sujeto el dispositivo al momento de ser caracterizado.

Por ultimo, se deben mencionar las etapas siguientes para mejorar los estudios relacionados a celdas solares en nuestra facultad. Para el caso de esta memoria es necesario completar y mejorar las etapas de construcción de la celda solar con el fin de obtener mejores flujos de corriente. La celda fabricada no tiene capa antireflectante, por ende es recomendable continuar la fabricación de la celda con tal de disminuir la reflexión. Igualmente, es importante seguir con el estudio de celdas híbridas y de materiales inorgánicos, para esto se debe mejorar el nivel tecnológico de los equipos utilizados para la fabricación del dispositivo final presentado en esta memoria. Instalaciones que permitan el trabajo con estándares de limpieza alto, equipo de cuatro contacto, horno con flujo perpendicular a la zona en difusión, etc., ayudarían bastante para obtener resultados con eficiencias por sobre el 10%. Con el mejoramiento de instalaciones y nivel tecnológico llevara a un aumento de la eficiencia del dispositivo por medio de la mejora de los contactos metálicos, disminución de resistencias en el cuerpo de la celda, disminución de impurezas, mejoramiento del gradiente de difusión de Al y P, y la minimización del contacto lateral entre capas.

Bibliografía

- [1] Poortmans, Jef and Arkhipov, Vladimir “*Thin film solar cells fabrication, characterization and applications*”, John Wiley & Sons, Ltda, 2006.
- [2] Markvart, Tom; Castañer, Luis “*Solar Cells: Materials, manufacture and operation*”, Elsevier, 2005.
- [3] Messenger, Roger; Ventre, Jerry “*Photovoltaic Systems Engineering*”, Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [4] Würfel, Peter “*Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*”, Wiley-VCH, 2005.
- [5] Brendel, Rolf “*Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells: Physics and Technology*”, Wiley-VCH, 2003.
- [6] Stern, Nair “*Células solares de silício de alto rendimento: Optimizações, teóricas e implementações experimentais utilizando processos de baixo custo*”, Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, 2007.
- [7] Santos, Ricardo “*Caracterização elétrica de células solares de tripla Junção-GaN/P/GaAs/Ge*”, Ministerio da ciencia e tecnologia, Instituto nacional de pesquisas espaciais, 2006.
- [8] Tamasi, Mariana “*Celdas Solares para uso Espacial: Optimización de procesos y caracterización*”, Tesis para optar al título de Dr. en Ciencia y tecnología-Mención Física, 2003.
- [9] Radefeld, Bernardo “*Fabricação de células solares*”, Relatório final de atividades, Instituto de Física Gleb Wataghin, 2002.
- [10] Callister, William “*Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*”, Departamento de Ciencia de los materiales e Ingeniería, Universidad de Utah, Editorial Reverté.
- [11] Rodrigues Ramos, Canan “*Otimização do emissor n+ e da metalização por deposição química para células solares industriais*”, Pontificia Universidade Católica do rio grande do sul, 2006.
- [12] Tavares Lopes, Alexandre “*Microfabricação a base de materiais crescidos por PECVD*”, Departamento de Engenharia de sistemas eletrônicos, Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo.

- [13] Rojas Fuentes, Vania *Electro síntesis de 1,2- di-(2-tienil)vinileno*, Tesis para optar al título profesional de Químico Industrial, Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile, 2009.
- [14] Castillo Miranda, Juan Pablo *Sistema fotovoltaico para aplicaciones móviles de tracción eléctrica*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile, 2008.
- [15] http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/
- [16] http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2002/solarcells_spanishA.htm
- [17] <http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/rca.html>
- [18] www.barnstead.com

Apéndice A

Tablas de datos obtenidos por método de cuatro contactos.

A.1. Datos obtenidos por el método de cuatro contactos para contactos transversales.

	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]
1	5,4	1,34	0,2	1,34E-03	-4,1	-0,11	-0,15	-1,10E-04
2	10,2	3,38	0,375	3,38E-03	-6	-0,15	-0,15	-1,50E-04
3	15	5,82	0,535	5,82E-03	-9,4	-0,63	-0,22	-6,30E-04
4	20	8,67	0,65	8,67E-03	-13,3	-2,49	-0,34	-2,49E-03
5	23	10,58	0,735	1,06E-02	-17,2	-4,91	-0,485	-4,91E-03
6	27,2	13,23	0,82	1,32E-02	-20,5	-6,98	-0,595	-6,98E-03
7	31,8	16,3	0,96	1,63E-02	-23,2	-8,74	-0,705	-8,74E-03
8	35,7	19,05	1,08	1,91E-02	-25,5	-10,155	-0,77	-1,02E-02
9	41,2	22,9	1,285	2,29E-02	-28,1	-11,84	-0,845	-1,18E-02
10	45,1	25,6	1,415	2,56E-02	-30,6	-13,51	-0,935	-1,35E-02
11	49,7	28,8	1,605	2,88E-02	-33,1	-15,07	-1,025	-1,51E-02
12	51,5	30,1	1,75	3,01E-02	-34,5	-15,73	-1,065	-1,57E-02
13	55	32,5	1,91	3,25E-02	-40,5	-19,76	-1,245	-1,98E-02
14	60,3	35,8	2,33	3,58E-02	-42,3	-20,6	-1,29	-2,06E-02
15	65	39,1	2,54	3,91E-02	-47,4	-23,8	-1,445	-2,38E-02
16	67,3	39,9	2,94	3,99E-02	-50,65	-25,1	-1,545	-2,51E-02
17	69	41,1	3,055	4,11E-02	-53,7	-26,1	-1,65	-2,61E-02
18	71,5	42,4	3,185	4,24E-02	-55,8	-27	-1,73	-2,70E-02
19	73,5	43,6	3,35	4,36E-02	-60,1	-28,9	-1,895	-2,89E-02
20	76,7	45,6	3,525	4,56E-02				

	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]
1	6,6	0,39	0,28	3,90E-04	-8,6	-1,24	-0,11	-1,24E-03
2	11,5	1,4	0,29	1,40E-03	-13,4	-4,42	-0,35	-4,42E-03
3	15,8	2,92	0,34	2,92E-03	-17,2	-7,12	-0,45	-7,12E-03
4	20,7	5,26	0,44	5,26E-03	-21,4	-10,13	-0,58	-1,01E-02
5	25,8	8,15	0,55	8,15E-03	-24,1	-12,05	-0,66	-1,21E-02
6	30,8	11,43	0,66	1,14E-02	-27,1	-14,12	-0,76	-1,41E-02
7	34,4	14,19	0,77	1,42E-02	-29,1	-15,45	-0,85	-1,55E-02
8	38,4	17,75	0,88	1,78E-02	-31,2	-16,7	-0,91	-1,67E-02
9	40,3	20	0,96	2,00E-02	-32,8	-17,6	-0,95	-1,76E-02
10	43,4	23,3	1,09	2,33E-02	-34,5	-18,5	-1,02	-1,85E-02
11	45,9	26,1	1,19	2,61E-02	-40,1	-22	-1,18	-2,20E-02
12	48,6	29,1	1,36	2,91E-02	-42,8	-23,2	-1,27	-2,32E-02
13	51,5	31,8	1,47	3,18E-02	-45,6	-24,5	-1,37	-2,45E-02
14	54,9	34,8	1,77	3,48E-02	-48,9	-25,6	-1,46	-2,56E-02
15	57,6	36,9	1,99	3,69E-02	-52,8	-27,1	-1,6	-2,71E-02
16	61,1	39,6	2,04	3,96E-02	-56,4	-28,7	-1,68	-2,87E-02
17	64,6	41,9	2,18	4,19E-02	-58,4	-29,5	-1,78	-2,95E-02
18	69,3	44,9	2,46	4,49E-02	-62,1	-31,5	-1,9	-3,15E-02
19	72,1	46,6	2,73	4,66E-02	-68,7	-35,5	-2,19	-3,55E-02
20	76,7	49,3	3,06	4,93E-02	-71,6	-36,8	-2,34	-3,68E-02

A.2. Datos obtenidos por el método de cuatro contactos para contactos puntuales.

	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]
1	3,1	0,065	0,14	6,50E-05	-5,5	-0,035	-0,09	-3,50E-05
2	5,3	0,195	0,25	1,95E-04	-8,9	-0,24	-0,18	-2,40E-04
3	10,4	0,85	0,49	8,50E-04	-11,6	-0,692	-0,25	-6,92E-04
4	16,2	2,64	0,75	2,64E-03	-16,2	-2,2	-0,39	-2,20E-03
5	20,7	4,53	0,95	4,53E-03	-22,5	-4,77	-0,58	-4,77E-03
6	25,6	6,93	1,18	6,93E-03	-24,9	-5,85	-0,68	-5,85E-03
7	29,5	9,12	1,36	9,12E-03	-27,7	-7,09	-0,81	-7,09E-03
8	32	10,62	1,5	1,06E-02	-30,8	-8,77	-0,95	-8,77E-03
9	35,2	12,52	1,65	1,25E-02	-34,4	-10,82	-1,12	-1,08E-02
10	38,5	14,66	1,86	1,47E-02	-38,5	-13,34	-1,36	-1,33E-02
11	41,9	16,98	2,09	1,70E-02	-41	-15,04	-1,5	-1,50E-02
12	46,1	19,95	2,36	2,00E-02	-45,4	-18,23	-1,65	-1,82E-02
13	48,1	21,65	2,5	2,17E-02	-49,1	-21,3	-1,96	-2,13E-02
14	50,4	23,6	2,75	2,36E-02	-52,8	-24,8	-2,39	-2,48E-02
15	52,9	26,65	3,12	2,67E-02	-57,5	-29,1	-2,95	-2,91E-02
16	56,6	31	3,88	3,10E-02	-62,2	-33,45	-3,68	-3,35E-02
17	60,1	34,6	4,28	3,46E-02	-65,9	-36,8	-4,41	-3,68E-02
18	62	36,6	4,64	3,66E-02	-67,2	-38,1	-4,71	-3,81E-02
19	64,2	39	5,06	3,90E-02	-70,1	-40,1	-5,2	-4,01E-02
20	71,9	45,5	6,18	4,55E-02	-73	-42	-5,74	-4,20E-02

	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]	Vf [V]	Vr [V]	Vm [A]	Im [A]
1	7,2	0,41	0,26	4,10E-04	-6,4	-0,88	-0,19	-8,80E-04
2	9,3	1,05	0,36	1,05E-03	-11,3	-2,96	-0,38	-2,96E-03
3	12,3	2,14	0,49	2,14E-03	-17,4	-6,24	-0,68	-6,24E-03
4	16,6	3,94	0,69	3,94E-03	-19,8	-7,6	-0,8	-7,60E-03
5	22	7,02	0,95	7,02E-03	-23,6	-9,76	-1	-9,76E-03
6	26,4	9,15	1,15	9,15E-03	-26,7	-11,46	-1,14	-1,15E-02
7	28,3	10,25	1,25	1,03E-02	-29	-12,66	-1,26	-1,27E-02
8	30,6	11,29	1,46	1,13E-02	-32,5	-14,48	-1,45	-1,45E-02
9	34,6	13,48	1,7	1,35E-02	-35,5	-15,96	-1,59	-1,60E-02
10	39,2	16,42	1,89	1,64E-02	-38,4	-17,16	-1,72	-1,72E-02
11	44	19,67	2,18	1,97E-02	-42,8	-19,52	-2,04	-1,95E-02
12	46,7	21,5	2,35	2,15E-02	-44,8	-20,2	-2,17	-2,02E-02
13	50,5	24,6	2,7	2,46E-02	-47,1	-21,3	-2,24	-2,13E-02
14	53,7	27,5	3	2,75E-02	-50,9	-23,7	-2,55	-2,37E-02
15	56,5	30,1	3,33	3,01E-02	-53,6	-25,7	-2,84	-2,57E-02
16	58,5	32	3,71	3,20E-02	-57,8	-28,9	-3,31	-2,89E-02
17	62,5	35,4	4,33	3,54E-02	-60,1	-30,8	-3,59	-3,08E-02
18	65,9	38,2	4,83	3,82E-02	-62,6	-33,2	-3,98	-3,32E-02
19	64,6	38,4	5,52	3,84E-02	-65,3	-35,5	-4,43	-3,55E-02
20	71,2	41,8	6,1	4,18E-02	-67,8	-37,5	-4,86	-3,75E-02

Apéndice B

Datasheet de P509 y plano de máscara.

B.1. Datasheet de solución de fósforo P509.

B.2. Contactos metálicos.