

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES

TRABAJO FIN DE MASTER

DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CONTACTO METÁLICO EN CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ESPACIALES



Estudiante: Begoña, González, Gaizka

Director: Jimeno, Cuesta, Juan Carlos

Curso: 2022-2023

Fecha: 22 de mayo de 2023 en Bilbao

Resumen

La transición ecológica y la lucha contra los efectos del cambio climático han contribuido positivamente a la mejora de las características en células fotovoltaicas. El aumento de la eficiencia y resistencia a las condiciones espaciales fue promoviendo a su vez que el mercado de este sector fuera evolucionando gracias a su creciente utilización. Hasta hace relativamente poco, la inmensa mayoría de células fotovoltaicas que se empleaban en misiones espaciales estaban construidas sobre un sustrato de silicio. El silicio es un material barato y asequible, sin embargo, tiene grandes limitaciones físicas en el espacio. Surge así, la necesidad de construir nuevas células espaciales sobre un nuevo sustrato que sea capaz de soportar las condiciones adversas y exigentes del espacio. A estas nuevas células las llamaremos células multiunión o epitaxiales.

A lo largo del proceso de construcción de una célula solar, la metalización de la cara frontal de la oblea tiene un gran peso en la eficiencia final de la misma. Es por eso que en este trabajo diseñaremos una malla metálica frontal óptima, fabricaremos la malla metálica sobre obleas de silicio y arseniuro de galio y finalmente caracterizaremos el efecto de la metalización estudiando la influencia de las resistencias de contacto y de línea. La caracterización de las resistencias se realizará mediante TLM y un método desarrollado por el grupo.

Palabras clave: Contacto metálico, malla metálica, células fotovoltaicas espaciales, células multiunión, arseniuro de galio, resistencia de contacto, resistencia de línea, TLM.

Laburpena

Trantsizio ekologikoak eta klima-aldaketaren ondorioen aurkako borroka eragin positiboa izan dute zelula fotovoltaikoen ezaugarriak hobetzeko. Eraginkortasuna eta baldintza espazialekiko erresistentzia handitzeak, aldi berean, sektore horren merkatua garatzen joatea sustatu zuen, gero eta gehiago erabiltzen zelako. Duela gutxi arte, misio espazialean erabiltzen ziren zelula fotovoltaiko gehienak silizio-substratu baten gainean eraikita zeuden. Silizioa material merkea eta eskuragarria da, baina muga fisiko handiak ditu espazioan. Hori dela eta, espazioaren baldintza kaltegarri eta zorrotzak jasateko gai izango den substratu berri baten gainean zelula espazial berriak eraikitze beharra sortu da. Zelula berri horiei batasun anitzeko zelulak edo epitaxialak esango diegu. Eguzki-zelula bat eraikitze prozesuan zehar, oblearen aurrealdearen metalizazioak pisu handia du haren azken eraginkortasunean.

Horregatik, lan honetan aurrez aurreko sare metaliko ezin hobea diseinatuko dugu, siliziozko obleen eta galio-arseniuroaren gaineko sare metalikoa fabrikatuko dugu eta, azkenik, metalizazioaren efektua ezaugarrituko dugu, ukipen eta linea-erresistentzien eragina aztertuz. Erresistentziak karakterizatzeko, TLM eta taldeak garatutako metodo bat erabiliko dira.

Hitz-gakoak: metalezko kontaktua, metalezko sarea, zelula fotovoltaiko espazialak, lotura anitzeko zelulak, galio arseniuroa, kontaktu-erresistentzia, lineako erresistentzia, TLM.

Abstract

The ecological transition and the fight against the effects of climate change have contributed positively to the improvement of the characteristics of photovoltaic cells. The increase in efficiency and resistance to space conditions promoted the evolution of the market in this sector thanks to its growing use. So far, the vast majority of photovoltaic cells used in space missions were built on a silicon substrate. Silicon is a cheap and affordable material, however it has severe physical limitations in space. This way arises the need to build new space cells on a new substrate that is capable of standing the adverse and demanding conditions of space. We will call these new cells multijunction or epitaxial cells.

During the construction process of a solar cell, the metallization of the front face of the wafer has a very important weight in its final efficiency. That's why in this work we will design an optimal front metal mesh, we will fabricate the metal mesh on silicon wafers and gallium arsenide and finally we will characterize the effect of metallization studying the influence of contact and line resistances. The characterization of the resistances will be carried out by means of TLM and a method designed by our team.

Key-words: Metal contact, space photovoltaic cells, multijunction cells, gallium arsenide, contact resistance, line resistance, TLM.

Índice

Resumen	2
Laburpena.....	3
Abstract	4
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas	11
Lista de acrónimos.....	12
1. Introducción	14
2. Contexto	15
3. Objetivos y alcance.....	16
4. Beneficios	17
4.1. Beneficios técnicos	17
4.2. Beneficios económicos	17
4.3. Beneficios sociales	17
5. Estado del arte	18
5.1. Historia y evolución de las células espaciales.....	18
5.2. Tipos de sustratos	19
5.2.1. Silicio (Si).....	19
5.2.2. Arseniuro de Galio (GaAs)	20
5.2.3. Epitaxia	20
5.3. ¿Por qué obleas epitaxiales?	21
5.3.1. Capas que la componen y grosor de las mismas.....	22
5.3.2. Funcionamiento.....	24
5.4. Importancia de las células espaciales	24
5.5. Mercado.....	24
5.6. Efecto de la metalización en células solares.....	25
5.6.1. Efecto de la metalización en la corriente de cortocircuito (Isc).....	26
5.6.2. Efecto de la metalización en la tensión de circuito abierto (Voc).....	27
5.6.3. Efecto de la metalización en el Fill Factor (FF)	28
5.6.4. Efecto de la metalización en la eficiencia (η)	28
5.7. La resistencia serie (RS)	28
5.7.1. Resistencia de línea metálica (RL)	30

5.7.2.	Resistencia de contacto (RC)	31
6.	Análisis de alternativas	34
6.1.	Deposición por serigrafía	34
6.2.	Deposición en alto vacío	34
6.3.	Deposición electroquímica (Recrecimiento)	35
6.4.	Comparativa	36
7.	Análisis de riesgos	37
7.1.	Riesgo de ruptura de una oblea (A)	37
7.2.	Riesgo de daños en la superficie de una oblea (B)	37
7.3.	Riesgo de avería en una máquina o equipo (C)	37
7.4.	Riesgo de retraso en la planificación (D)	38
7.5.	Riesgo de caracterizar las medidas (E)	38
7.6.	Riesgo de limitación tecnológica (F)	38
7.7.	Matriz probabilidad-impacto	39
8.	Descripción de la solución propuesta	40
8.1.	Diseño del contacto metálico frontal	40
8.1.1.	Limitaciones en el diseño	41
8.1.2.	Diseño propuesto	42
8.2.	Fabricación	44
8.2.1.	Decapado y pulido con CPX	44
8.2.2.	Difusión	47
8.2.3.	Fotolitografía	49
8.2.4.	Metalización	53
8.2.5.	Recocido	55
8.2.6.	Medidas de resistencia de contacto	57
8.2.7.	Recrecimiento	59
8.2.8.	Fabricación de la tanda 315	60
8.2.9.	Resumen de fabricación	68
8.3.	Caracterización	69
8.3.1.	Medidor de cuatro puntas	69
8.3.2.	Modelado de línea de transmisión (TLM)	70
8.3.3.	Metodología realizada en el laboratorio. "R back"	72

8.3.4.	Caracterización de la resistencia de contacto en los pads después del recocido	74
8.3.5.	Medidas de resistencias de contacto después del recocido de la tanda 315, TLM.....	76
8.3.6.	Medidas de resistencias de contacto después del recocido de la tanda 315. Metodología realizada en el laboratorio, “R back”	76
8.3.7.	Medidas de resistencias de contacto después del recocimiento de la tanda 315. Metodología realizada en el laboratorio, “R back”	77
9.	Metodología seguida en el proyecto	78
9.1.	Grupo de trabajo.....	78
9.2.	Recursos.....	78
9.3.	Tareas y recursos del trabajo.....	79
9.4.	Diagrama Gantt.....	82
10.	Presupuesto.....	83
10.1.	Amortizaciones.....	83
10.2.	Horas internas	84
10.3.	Gastos.....	84
10.4.	Resumen.....	85
11.	Conclusiones.....	85
12.	Bibliografía.....	86

Lista de figuras

Figura 1. Evolución de las células fotovoltaicas	19
Figura 2. Espectro de absorción del silicio en condiciones AM1.5.....	20
Figura 3. Bandas de absorción de célula multiunión [2]	21
Figura 4. Absorción de longitudes de onda de los sustratos [3]	22
Figura 5. Estructura por capas de nuestra epitaxia	23
Figura 6. Área cubierta de metal vs área de la oblea	27
Figura 7. Componentes de la resistencia serie en una célula solar. R_{post} (Resistencia del contacto metal-semiconductor posterior), R_b (Resistencia del semiconductor/base), R_e (Resistencia de la capa del emisor), R_c (Resistencia de contacto), R_l (Resistencia de línea metálica), R_{bus} (Resistencia del bus metálico)[17]	29
Figura 8. Línea metálica con resistividad ρm por la que circula una corriente I uniforme	30
Figura 9. Esquema de circulación de corriente, del emisor del semiconductor al metal para extraer la resistencia de contacto	32
Figura 10. Longitud de transferencia.....	33
Figura 11. Estructura para nuestra definición de R_c	33
Figura 12. Deposición por serigrafía.....	34
Figura 13. Máquina de alto vacío del laboratorio	35
Figura 14. Deposición electroquímica	36
Figura 15. Relación de aspecto.....	40
Figura 16. Esquema de un diseño de contacto superior que muestra barras y dedos [21]	41
Figura 17. Simulación del diseño propuesto	43
Figura 18. Diseño de la malla metálica frontal.....	43
Figura 19. Obleas de Si vírgenes	44
Figura 20. Mesa de trabajo para CPX	45
Figura 21. Baño en ácido fluorhídrico	46
Figura 22. Obleas de Si después del decapado/pulido.....	46
Figura 23. Oblea GaAs vírgen después del HF	47
Figura 24. Horno de cuarzo del laboratorio para la difusión del fósforo	48
Figura 25. Oblea en el spinner	49
Figura 26. Obleas en bandejas con resina recién depositada	50
Figura 27. Obleas en bandejas con resina seca (Después del horno)	50

Figura 28. Máscara empleada para la litografía	51
Figura 29. Oblea con resina antes en máquina de litografía.....	51
Figura 30. Oblea de silicio después de la litografía	52
Figura 31. Oblea de GaAs después de la litografía	52
Figura 32. Stack metálico cara frontal	53
Figura 33. Disposición de las obleas en el planetario de la campana evaporadora	53
Figura 34. Oblea de silicio después de la metalización	54
Figura 35. Oblea de GaAs después de la metalización	54
Figura 36. Oblea de silicio después de la limpieza con acetona	55
Figura 37. Horno (central) de recocido	56
Figura 38. Oblea 3 (izquierda) y oblea 4 (derecha) después del recocido	57
Figura 39. Izquierda: oblea 1(tras metalización), Derecha: oblea 1(tras recocido). Microscopio en x50	58
Figura 40. Oblea de silicio con corte	58
Figura 41. Setup para el recrecimiento. Cátodo (amarillo), ánodos (azul)	59
Figura 42. Oblea 4 tras el recrecido 2mA durante 40 minutos	60
Figura 43. Aumento del espesor de la malla metálica, oblea 3, cell_d	62
Figura 44. Oblea 3. Recrecimiento 1	63
Figura 45. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 1.....	63
Figura 46. Oblea 3. Recrecimiento 2	64
Figura 47. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 2.....	64
Figura 48. Oblea 3. Recrecimiento 3	65
Figura 49. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 3.....	65
Figura 50. Oblea 3. Recrecimiento 4	66
Figura 51. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 4.....	66
Figura 52. Oblea 3. Recrecimiento 5	67
Figura 53. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 5.....	67
Figura 54. Resumen de fabricación	68
Figura 55. Medidor de cuatro puntas (4PP)	69
Figura 56. Ejemplo del patrón de metal. Pads idénticos separados a diferentes distancias	71
Figura 57. Ejemplo de una gráfica TLM	71
Figura 58. Estructura de medida “R back”	72

Figura 59. Recrecido en oblea 4	75
Figura 60. Caracterización de la tanda 315 después del recocido. TLM	76
Figura 61. Diagrama Gantt del proyecto	82

Lista de tablas

Tabla 1. Comparativa de las alternativas a la metalización	36
Tabla 2. Matriz probabilidad-impacto	39
Tabla 3. Características de las obleas de Silicio y Arseniuro de Galio	44
Tabla 4. Tiempos de las obleas en el recocido	57
Tabla 5. Resistividad tanda 315 después de difusión	61
Tabla 6. Matriz de recocido tanda 315	61
Tabla 7. Resistencias medidas con TLM en pads después del recocido.....	74
Tabla 8. Grupo de trabajo.....	78
Tabla 9. Recursos.....	78
Tabla 10. Listado de tareas.....	79
Tabla 11. Amortizaciones	83
Tabla 12. Horas internas.....	84
Tabla 13. Gastos	84
Tabla 14. Presupuesto total.....	85

Lista de acrónimos

TiM	Instituto de Tecnología Microelectrónica
GaAs	Arseniuro de Galio
LPE	Epitaxia en fase líquida
Zn	Zinc
MOCVD	Deposición de vapor químico orgánico metálico
Si	Silicio
Ge	Germanio
V_{oc}	Tensión de circuito abierto
InGaP	Fosfuro de Galio e Indio
DSS	Deployable Space Systems
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
FF	Fill Factor
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
S_{eff}	Velocidad de recombinación superficial
I_{mp}	Corriente de máxima potencia
V_{mp}	Tensión de máxima potencia
P_{mp}	Potencia de máxima potencia
η	Eficiencia
R_s	Resistencia serie
R_{post}	Resistencia de contacto metal-semiconductor posterior
R_b	Resistencia de semiconductor-base
R_e	Resistencia de emisor
R_c	Resistencia de contacto
R_l	Resistencia de línea metálica

R_{bus}	Resistencia de bus metálico
AuGe	Oro germanio
L	Longitud de línea metálica
W	Anchura de la línea metálica
t	Espesor de la línea metálica
l_T	Longitud de transferencia
ρ_m	Resistividad de la línea metálica
P_Ω	Pérdidas óhmicas
TLM	Transmission Model Line
CPX	Chemical Polishing X
RCA	Radio Corporation of America
Ni	Niquel
4PP	Four Point Probe
ρ_c	Contacto específico de la resistencia
CBKR	Resistencia Kelvin de puente cruzado
CER	Resistencia de extremo de contacto
TLTR	Resistencia de derivación de línea de transmisión

1. Introducción

Las células fotovoltaicas son dispositivos compuestos por materiales semiconductores, como el silicio o el germanio que tienen la propiedad única de transmitir corrientes eléctricas cuando se exponen a la luz. Son un componente esencial de los paneles solares y están diseñadas para capturar la energía de la luz solar y transformarla en corriente eléctrica.

La transición ecológica y la lucha contra los efectos del cambio climático han contribuido positivamente a la mejora de las características en células fotovoltaicas. El aumento de la eficiencia y resistencia a las condiciones espaciales fue promoviendo a su vez que el mercado de este sector fuera evolucionando gracias a su creciente utilización. La energía solar fotovoltaica en la mayoría de los satélites y naves espaciales se usa como fuente principal de alimentación para hacer funcionar los sensores, telemetría, calentamiento, sistemas de refrigeración, etc. Incluso en algunos casos se llega a utilizar para la propulsión de la propia nave espacial.

Hasta hace relativamente poco, la inmensa mayoría de células fotovoltaicas que se empleaban en misiones espaciales estaban construidas sobre un sustrato de silicio. El silicio es un material barato y asequible, pero tiene grandes limitaciones físicas en el espacio. De hecho, en el espacio, una célula debe ser de alta eficiencia, porque el área disponible para el montaje de las células es restringida. Además, debe presentar una buena tolerancia al daño por radiación solar y ultravioleta, entre otras cosas.

Surge así, la necesidad de construir nuevas células espaciales sobre un nuevo sustrato que sea capaz de soportar las condiciones adversas y exigentes del espacio. A estas nuevas células las llamaremos células multiunión o epitaxiales. Estas células están formadas por múltiples capas de materiales que pueden tener diferentes *bandgaps*. Por lo tanto, responderán a múltiples longitudes de onda de luz, capturando y convirtiendo parte de la energía que de otro modo se perdería. Las células multiunión han mejorado las eficiencias de las células solares III-V. Hoy en día, estas eficiencias superan ya el 30%.

Por otra parte, el proceso de metalización de las células consiste en la creación de una malla compuesta por los dedos metálicos de la parte frontal y los *busbar* de la cara posterior. Los *busbar* son los terminales por donde se extrae la corriente fotogenerada. La metalización de la cara frontal de la oblea tiene una gran influencia en la eficiencia final de la célula.

Es por eso que en este trabajo diseñaremos una malla metálica frontal óptima, fabricaremos la malla metálica sobre obleas de silicio y arseniuro de galio y finalmente caracterizaremos el efecto de la metalización estudiando la influencia de las resistencias de contacto y de línea.

2. Contexto

Este proyecto se ha desarrollado en el seno del grupo de investigación TiM (Instituto de Tecnología Microelectrónica), al que pertenezco desde hace varios años. Este grupo está formado por profesores e investigadores de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, así como estudiantes del máster de ingeniería de telecomunicaciones. El grupo centra sus actividades en el ámbito de la microelectrónica y la energía solar fotovoltaica, en concreto, en el diseño, desarrollo y construcción de células espaciales fotovoltaicas, donde se centrará este trabajo.

Algunos ejemplos de proyectos realizados por el grupo son los siguientes:

- n-line Alkaline Texturization of Crystalline Silicon Wafers
- Ink-jet printing of silicon solar
- Turn-key lines for Back Contact Solar Cells
- Screen printed diffusions and contacts for ultra-thin silicon wafers
- SkyPlus Solar key Technologies to Power Low Orbit Satellites

Durante éstos últimos años hemos estado trabajando muy de cerca con obleas de estructura epitaxial y desde TiM nos ha llamado especialmente la atención la importancia de los contactos metálicos en las obleas epitaxiales. Sin estos contactos bien diseñados y construidos las células pueden llegar a obtener unos rendimientos muy inferiores a los esperados, además de estar construidas sobre una estructura menos compacta y frágil.

Con esto en mente, y con la ambición de solucionar un problema que lleva arrastrándose durante varios años, desde TiM hemos decidido abordar este problema en el trabajo que se expone a continuación.

Gracias a los resultados obtenidos en este proyecto, TiM dispondrá de información clave que podrá usar para mejorar el diseño de los contactos metálicos en futuras obleas espaciales.

3. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo es el de diseñar y mejorar la malla metálica de la cara frontal de células solares espaciales basadas en obleas epitaxiales. Un diseño pobre aumenta los valores de las resistencias de línea y de contacto y afecta negativamente a la eficiencia de las células. Definir un diseño eficiente del contacto y los pasos para su fabricación suponen un avance clave en la industria de los semiconductores.

Durante el proceso de diseño, fabricación y caracterización de la malla obtendremos los siguientes objetivos secundarios:

- Revisar y mejorar los métodos de fabricación actuales, así como las posibles alternativas a los productos y disoluciones químicas utilizadas en los mismos.
- Determinar la mejor técnica de medida de entre las posibles para caracterizar las resistencias de línea y de contacto.
- Demostrar experimentalmente la fabricación de la malla metálica sobre obleas de Silicio y Arseniuro de Galio.
- Reducir la cantidad de oro utilizada en la fabricación de la malla metálica para abaratar costes.

Este trabajo se limita al estudio del contacto metálico de la cara frontal, así como de su diseño, desarrollo y caracterización de las resistencias de línea y de contacto.

4. Beneficios

Los beneficios que aporta este proyecto son de carácter técnico, económico y social.

4.1. Beneficios técnicos

La construcción de una malla metálica eficiente, implica un aumento en el rendimiento de las células fotovoltaicas. Esta mejora favorece al aprovechamiento de la energía solar. Además, la caracterización de las resistencias de línea y de contacto arrojarán resultados que permitirán a TiM perfeccionar sus procesos de fabricación.



4.2. Beneficios económicos

La carrera espacial y el aumento del número de satélites que se envían al espacio ha provocado un incremento de la inversión en tecnologías satelitales. Esto implica tener satélites con mejores equipos de transmisión, equipos de procesamiento de datos y sistemas de generación de energía. Es evidente que de nada sirve tener los mejores equipos si luego no funcionan por falta de energía. Los paneles solares espaciales basados en epitaxias ofrecen la garantía que otros paneles no podrían dar en entornos tan adversos como el espacio. Gracias a su alto rendimiento, su nivel de calidad y su alta resistencia a la radiación solar los paneles solares espaciales se han ganado un hueco en el mercado.



4.3. Beneficios sociales

La investigación que hay detrás de esta tecnología fomenta la creación de empleo digno y en igualdad entre hombres y mujeres.

Por otra parte, el uso de estas células espaciales aumenta la vida útil de los nuevos satélites que se envían al espacio. Al mantenerlos en órbita durante más tiempo reducimos la huella de carbono que se produce en su fabricación y además evitamos que se genere más basura espacial.



5. Estado del arte

5.1. Historia y evolución de las células espaciales

Desde los primeros satélites cuya fuente de alimentación se basaba en la energía solar, las células solares se convirtieron en la principal fuente de energía. Los primeros paneles estaban basados en células solares de silicio monocristalino con una eficiencia aproximada del 10%. Mejoras en el diseño y la tecnología de las células de Si, como la fabricación de células con mayor fotosensibilidad de longitud de onda corta, la reducción de las pérdidas ópticas debido al texturizado de la superficie frontal y la mejora del recubrimiento antirreflectante entre otras, aumentaron la eficiencia hasta un 14%. La eficiencia de las células espaciales de Silicio llegó a alcanzar hasta un 18%.

A principios de la década de 1960, se descubrió que las células solares basadas en GaAs con la unión p-n con difusión de Zn garantizaban una mayor estabilidad de la temperatura y una mayor resistencia a la radiación.

En las décadas siguientes, mediante la epitaxia en fase líquida (LPE) de las heteroestructuras de AlGaAs-GaAs, su eficiencia se incrementó de la misma forma que su resistencia a la radiación. La tecnología LPE se utilizó en la producción a gran escala de paneles espaciales. En diversos experimentos, durante 15 años en órbita, la degradación del conjunto era inferior al 30%, a pesar de estar sometido a condiciones severas. El perfeccionamiento de la tecnología LPE condujo a un aumento de la eficiencia del 24,6%.

Para las heteroestructuras de AlGaAs-GaAs se ha estado empleando la deposición de vapor químico orgánico metálico (MOCVD) que posibilita la fabricación de estructuras multicapa en reactores de alto rendimiento con capas de una composición específica y un espesor preciso. La MOCVD es capaz de producir capas monocristalinas en sustratos de silicio y germanio. En el caso del Germanio, se ajusta bastante bien a la red de material GaAs. Por lo tanto, el crecimiento epitaxial de GaAs con una alta calidad se llevó a cabo mediante MOCVD, y esta es ahora la técnica básica para el crecimiento de células solares multicapa de una sola unión de AlGaAs-GaAs-Ge y de multiunión de GaInP-GaAs-Ge.

Las células multiunión han mejorado las eficiencias de las células solares III-V. Las pérdidas ópticas y óhmicas han provocado que sus eficiencias siguieran siendo relativamente bajas. Afortunadamente, hoy en día, estas eficiencias superan ya el 40%.

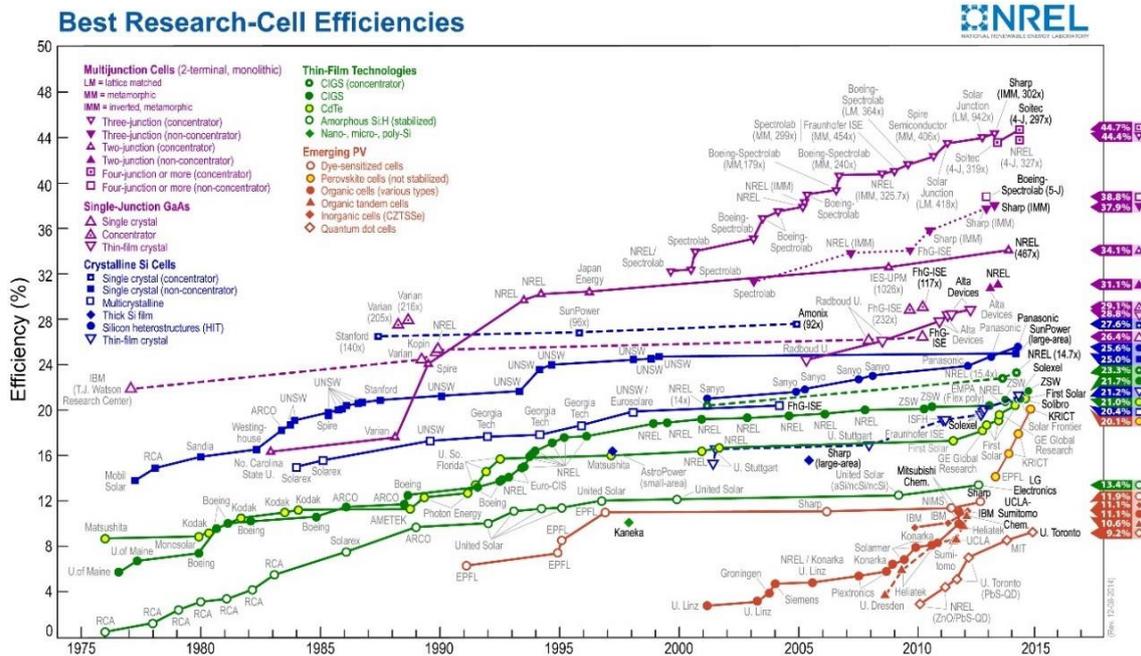


Figura 1. Evolución de las células fotovoltaicas

5.2. Tipos de sustratos

5.2.1. Silicio (Si)

Se puede decir que la energía solar es la número uno de las energías limpias, ya que no hay otra que sea tan abundante como nuestro sol. La célula solar basada en silicio fue inventada en 1954 como un medio importante para el desarrollo espacial del universo y la competencia entre estadounidenses y soviéticos en la década de 1960. En la década de 1990, las células solares basadas en silicio se comercializaron industrialmente a gran escala y la instalación de células solares en viviendas personales o instalaciones públicas se impulsó significativamente. Las células solares basadas en silicio cubren el 90 % del mercado actual [1]. Las células solares de Si se utilizaban habitualmente en el pasado para aplicaciones de paneles solares espaciales. En la actualidad, se siguen empleando para algunas misiones espaciales de bajo coste y baja potencia.

Entre sus principales características destaca una eficiencia máxima del 15% en condiciones de prueba estándar AM0 y una duración de 3 a 5 años. Además, el rendimiento de estas células se degrada en entornos de muy alta radiación. O lo que es lo mismo, no son las más adecuadas para enviar al espacio.

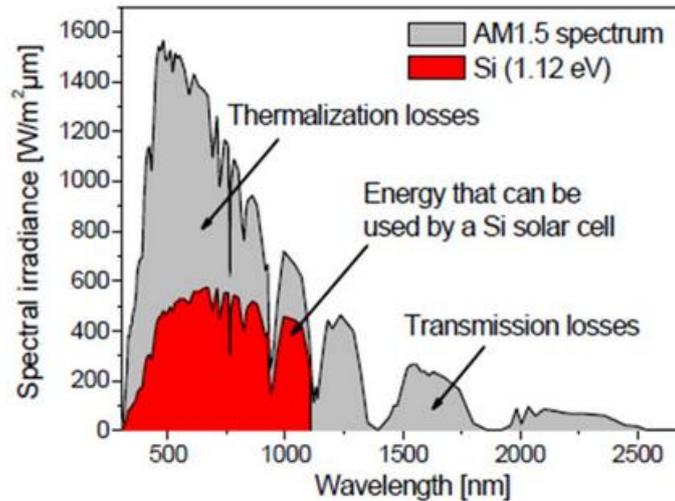


Figura 2. Espectro de absorción del silicio en condiciones AM1.5

Por otro lado, el coeficiente de temperatura es relativamente grande, lo que implica grandes reducciones en la eficiencia de estas células cuando se someten a altas temperaturas.

5.2.2. Arseniuro de Galio (GaAs)

El arseniuro de galio (GaAs) es el material semiconductor III-V más utilizado ya que tiene técnicas de crecimiento eficientes, como la movilidad de electrones y la banda prohibida.

En comparación con el Si, el GaAs da un poco más de potencia al dispositivo. Se trata de un semiconductor de banda prohibida directa y su eficiencia de conversión es de aproximadamente 27% en condiciones de 1 AM0 y supera la eficiencia del Si.

El GaAs se utiliza usualmente como material de sustrato para el crecimiento epitaxial de otros semiconductores III-V, incluidos el arseniuro de indio y galio, el arseniuro de aluminio y galio y otros.

5.2.3. Epitaxia

Actualmente, las células solares de mayor eficiencia disponibles para uso espacial son las células de triple unión que consisten en GaInP, GaAs y Ge o algún derivado.

La elección del sustrato, el método epitaxial, los conceptos de crecimiento y el procesamiento posterior al crecimiento determina la arquitectura de la célula solar y ofrece una amplia gama para diferentes diseños y soluciones. Actualmente, destacan las celdas solares de triple unión $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ emparejadas en celosía. En ellas, todos los semiconductores compuestos III-V tienen la misma constante de red que el sustrato de Ge, lo que facilita el crecimiento de cristales con material de alta calidad.

Estas células están formadas por múltiples capas de materiales y pueden tener diferentes bandgaps. Por lo tanto, responderán a múltiples longitudes de onda de luz, capturando y convirtiendo parte de la energía que de otro modo se perdería en la relajación.

La luz de una longitud de onda particular no interactúa fuertemente con materiales que son de una banda prohibida grande. Por tanto, se puede crear una celda de unión múltiple al superponer los diferentes materiales uno sobre el otro. De esta forma, las longitudes de onda más cortas, que tienen la banda prohibida más grande, se absorberán en la parte superior. Como los fotones tienen que atravesar la celda para alcanzar la capa adecuada para ser absorbidos, se deben usar conductores transparentes para recolectar los electrones que se generan en cada capa.

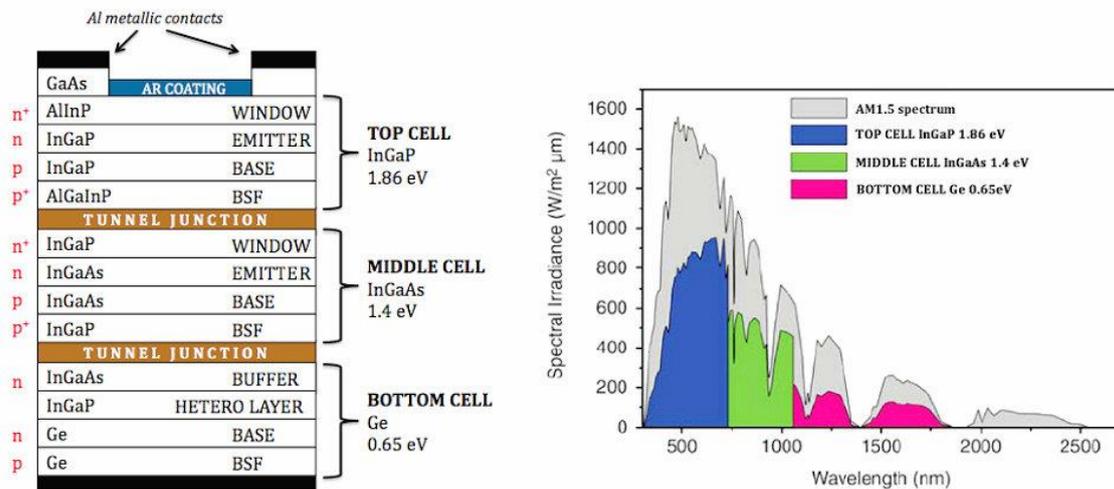


Figura 3. Bandas de absorción de célula multiunión [2]

5.3. ¿Por qué obleas epitaxiales?

Las células solares de triple unión $Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ cuentan con una eficiencia de en torno al 30% AMO y tienen un VOC de 2,26 V. Además, la banda prohibida directa de 1,43 eV es casi ideal para la conversión de energía solar. Otra ventaja adicional de operar a alto voltaje y baja corriente es que se obtiene una excelente resistencia a la radiación y por ende son las obleas más recomendables para aplicaciones espaciales.

Por otro lado, poseen un coeficiente de temperatura más pequeño que las celdas de silicio, lo que implica un mejor rendimiento. Las nuevas celdas multifuncionales III-V han permitido una reducción en el tamaño y la masa de la matriz solar. Es decir, se podrían incorporar más y mejores células en un espacio más pequeño.

Las características principales que debe tener una célula para poder usarse en misiones espaciales son las siguientes [4]:

- Deben ser de alta eficiencia porque el área disponible para el montaje de las células es restringida.
- Buena tolerancia al daño por radiación causado por partículas cargadas en el espacio, especialmente en los cinturones de radiación natural alrededor de la Tierra.
- Tolerancia a la radiación ultravioleta intensa o a la degradación del oxígeno atómico.
- Las matrices de células también deben tener un peso mínimo, lo que requiere que el peso de la celda sea el mínimo posible.
- Debido a que la única pérdida de calor del satélite es por radiación, las temperaturas de la celda deben reducirse tanto como sea posible volviendo a radiar las longitudes de onda infrarrojas más allá del borde de absorción del material celular.

Afortunadamente gracias al uso de células solares espaciales construidas sobre obleas epitaxiales es posible cumplir con todos estos requisitos.

5.3.1. Capas que la componen y grosor de las mismas

La elección de los materiales para cada subcélula está determinada por los requisitos para la coincidencia de celosía, la coincidencia de corriente y las propiedades optoelectrónicas de alto rendimiento.

Además, como las subcélulas están conectadas en serie, se suman los voltajes de las mismas. También, se implementan diodos de túnel que sirven como una interconexión de baja resistencia y alta transparencia entre las diferentes subcélulas.

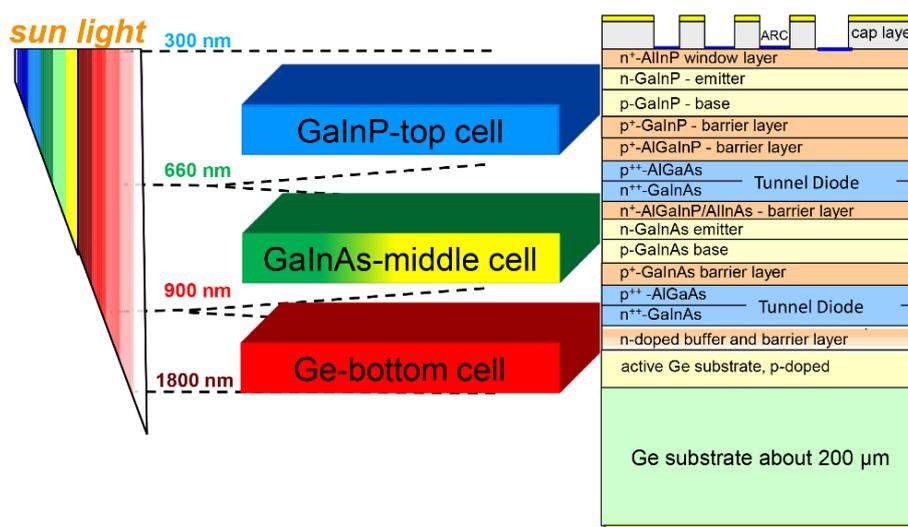


Figura 4. Absorción de longitudes de onda de los sustratos [3]

En las células solares multiunión, cada subcélula está conectada eléctricamente en serie, lo que significa que la misma corriente fluye a través de cada unión. Los materiales

utilizados se ordenan de manera que los bandgaps decrezcan, lo que permite que la luz con una longitud de onda menor ($hc / \lambda < e \cdot E_g$) se transmita a las subcélulas inferiores. Para asegurar un equilibrio adecuado en la generación de electricidad en cada subcélula, se deben elegir bandgaps apropiados que permitan coincidir la generación de corriente actual.

Las capas deben ser eléctricamente óptimas para un alto rendimiento. Lo cual, requiere el uso de materiales con fuertes coeficientes de absorción α (λ), altas duraciones de portadores minoritarios y altas movilidades μ .

Por lo tanto, los materiales utilizados habitualmente para las células solares de unión múltiple:

- **InGaP** para la subcélula superior ($E_g = 1.8 - 1.9$ eV).
- **InGaAs** para la subcélula intermedia ($E_g = 1.4$ eV).
- **Germanio** para la subcélula inferior ($E_g = 0,67$ eV). Empleado principalmente por su constante reticular, robustez, bajo costo, abundancia y facilidad de producción.

En nuestro caso, la epitaxia está construida siguiendo el siguiente esquema:

Layer	Material	Thickness(nm)
Contact	InGaAs	400
Window	AlInP	30
Base+Emitter	GaInP	970
	AlGaInP	75
TJ	AlGaAs/GaAs	50
Window	AlGaAs	30
Base+Emitter	InGaAs	3150
	GaInP	120
TJ	AlGaAs/GaAs	50
Blocking layer	AlGaInP	10
Buffer	InGaAs	500
	GaInP	50
Base	p-Ge substrate	

Figura 5. Estructura por capas de nuestra epitaxia

5.3.2. Funcionamiento

Las células solares tradicionales están hechas de material semiconductor, como silicio, y tienen dos capas: una de tipo n con una alta concentración de electrones y otra de tipo p con una concentración baja. Cuando la luz solar incide en la capa de tipo n, se genera una corriente eléctrica que fluye hacia la capa de tipo p y puede ser utilizada para obtener energía. Este proceso solo ocurre si los fotones tienen suficiente energía. Las células solares de una sola unión tienen una limitación: no pueden extraer toda la energía de la luz.

Las células solares multiunión tienen varias capas de diferentes materiales semiconductores y múltiples uniones p-n, lo que permite que la corriente eléctrica fluya en respuesta a diferentes longitudes de onda de la luz. Estas células son más eficientes que las células de una sola unión en la conversión de luz solar en electricidad, ya que pueden convertir una mayor cantidad de energía.

5.4. Importancia de las células espaciales

La energía solar fotovoltaica se utiliza ampliamente en la industria espacial desde su inicio y es la fuente principal de energía de los satélites y naves espaciales, incluyendo sensores, telemetría, calefacción, refrigeración y hasta propulsión.

Las células espaciales deben operar en un amplio rango de intensidad y temperatura de la luz solar. La mayoría de las células proporcionan energía a los satélites que orbitan cerca de la Tierra, pero otras misiones, ya sea hacia o lejos del Sol, son importantes. Además de operar en el entorno espacial, las células solares deben funcionar con alta fiabilidad, porque el éxito de la misión satelital depende críticamente de la energía suministrada por las celdas [4].

Las células solares de silicio, a pesar de ser adecuadas en aplicaciones espaciales, presentan ciertas limitaciones. Generalmente tienen menores eficiencias y mayores daños significativos por radiación que otros materiales nuevos. Debemos pensar que las células espaciales están expuestas a la radiación solar más grande de todas y por eso los materiales que se deben usar son los que encontramos en las obleas de tipo epitaxial.

A partir del siglo XXI se llevaron al espacio nuevas células solares con mejores eficiencias y mayor resistencia a la radiación, como las basadas en uniones de GaAs. La tecnología de triple unión es la estructura de célula más utilizada actualmente y nos ofrece una eficiencia de hasta el 30%. Además, estructuras de células más avanzadas con 4, 5 o 6 uniones están alcanzando eficiencias superiores al 40% de ahí su importancia de incorporarlas en los satélites. [5]

5.5. Mercado

La evolución en las capacidades de las células con respecto a su eficiencia y resistencia a las condiciones espaciales fue promoviendo que el mercado de esta tecnología fuera evolucionando gracias a su creciente utilización. La energía solar fotovoltaica en la mayoría de los satélites y naves espaciales se usa como fuente principal de alimentación

para hacer funcionar los sensores, telemetría, calentamiento, sistemas de refrigeración, etc. Incluso en algunos casos se llega a utilizar para la propulsión de la propia nave espacial.

En este aspecto, el primer satélite en integrar estas células solares en el espacio fue el satélite estadounidense Vanguard I, lanzado al espacio en 1958 [6]. Fue el cuarto satélite puesto en órbita y el primero que utilizaba la energía solar. Se trataba de un satélite pequeño, pesaba aproximadamente 1,5 kg, medía 16 cm de diámetro e incluía antenas de 76 cm de ancho. Vanguard I contaba con 6 celdas solares de Si que generaban aproximadamente 1 vatio, el cual se utilizaba para enviar señales de radio a la Tierra. Transmitía a una frecuencia de radio de 108.3 MHz y estuvo activo durante más de seis años. En comparación con los satélites anteriores que incorporan baterías que alcanzaban un total de 20 días activos.

El crecimiento se podría considerar lento, aproximadamente se lanzaban entre 60 y 100 satélites. Sin embargo, desde 2010 el número de satélites ha aumentado de forma significativa. A nivel mundial se lanzan del orden de 300 satélites pequeños con un peso menor de 500 Kg al año. Las previsiones del mercado señalan que en torno al año 2025 se lancen aproximadamente 900 satélites al año. Según el director del Centro de Ciencia y Tecnología Espaciales de la Universidad de Massachusetts, alrededor de 7941 satélites artificiales pertenecientes a 105 países estaban orbitando en nuestro planeta en el año 2021 [7]. La mayoría se utilizan para observar la Tierra o para comunicarse por Internet.

Empresas como Amazon han creado el Proyecto Kuiper, que consiste en una constelación de 3236 satélites mediante los cuales pretende proporcionar banda ancha de alta velocidad y acceso para todo el mundo. Sin olvidar la empresa Starlink, fundada por Elon Musk, la cual ya ha lanzado 1700 satélites en órbita baja. Esta empresa se fundó como proyecto de SpaceX para la creación de una constelación de satélites de Internet con el objetivo de proporcionar servicio Internet de banda ancha, baja latencia y cobertura a nivel mundial a bajo coste. Según varios medios de comunicación, esta empresa tendría permiso para lanzar otros 7500 satélites a nuestra órbita baja [8].

Respecto a nivel de mercado en España, DHV Technology diseña y fabrica paneles solares para operaciones espaciales. A nivel europeo, AzurSpace es el líder en el desarrollo y producción de células solares de múltiples uniones para aplicaciones espaciales y a nivel mundial el proveedor Deployable Space Systems (DSS), entre otros.

5.6. Efecto de la metalización en células solares

El proceso de metalización consiste en la creación de una malla compuesta por los dedos metálicos de la parte frontal y los *busbar* de la cara posterior. Los *busbar* son los terminales por donde se extrae la corriente fotogenerada. Como hemos comentado en anteriores secciones, este trabajo se centra exclusivamente en la parte frontal de las obleas.

Las mejoras en el proceso de metalización frontal en relación a la tecnología y diseño de las mallas, tienen una gran influencia en la eficiencia final de la célula y es justo ahí donde radica la importancia de este proceso.

En la fase de metalización todavía hay mucho que mejorar. Actualmente existen diferentes alternativas para realizar este proceso. Las obleas se pueden metalizar mediante serigrafía, tecnologías *inkjet* [9], PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) o mediante campana de evaporación.

Aunque sobre el proceso de metalización nos centraremos más en detalle en el apartado de fabricación, simplemente decir que, en nuestro caso, la metalización se realiza mediante una campana de evaporación.

La figura de mérito no es más que una cifra que permite cuantificar el rendimiento o eficiencia de algo. Si hablamos de células solares, las figuras de mérito más representativas son la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto, el factor de llenado (*fill factor*) y la eficiencia de la célula [10].

A continuación, se explica la influencia de cada una de las figuras de mérito en la metalización frontal.

5.6.1. Efecto de la metalización en la corriente de cortocircuito (I_{sc})

Se define la corriente de cortocircuito, I_{sc} , como el valor de corriente obtenido cuando la tensión aplicada en la carga es nula, es decir:

$$I_{SC} = I|_{V=0}$$

El efecto de la metalización sobre la corriente de cortocircuito I_{sc} , es básicamente el efecto por la sombra causada por las líneas metálicas. Estas líneas reducen el área efectiva de la célula, lo que implica una menor generación de pares electrón/hueco y fotocorriente [12].

La corriente fotogenerada es proporcional al área activa de la célula cuyo valor se corresponde con la superficie sin recubrimiento metálico, dedos metálicos y *busbars* frontales bajo los cuales no se genera fotocorriente.

Podemos definir el factor de sombra f , como:

$$f = \frac{A_{metal}}{A_{efectiva}}$$

El A_{metal} representa la superficie de la célula cubierta por metal y $A_{efectiva}$, el área total de la célula solar donde hay emisor o metal que contacte.

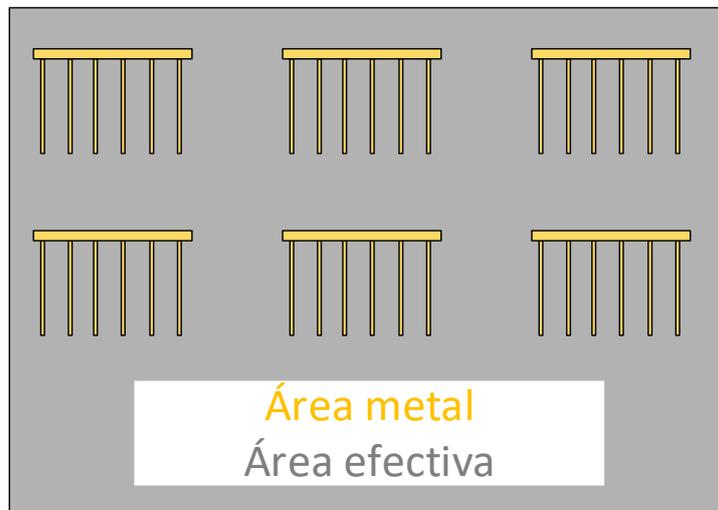


Figura 6. Área cubierta de metal vs área de la oblea

Para realizar un diseño óptimo de los dedos metálicos trataremos de minimizar las sombras reduciendo la anchura de los dedos metálicos.

5.6.2. Efecto de la metalización en la tensión de circuito abierto (V_{oc})

Otra figura de mérito relevante es la tensión de circuito abierto V_{oc} . Se la define como el valor de tensión cuando la corriente que circula por la carga es nula.

$$V_{OC} = V|_{I=0}$$

Interesa maximizar la corriente fotogenerada y minimizar la corriente de recombinación en el emisor para así obtener buenos valores de tensión de circuito abierto.

De forma resumida, podemos decir que la interfaz entre el metal y el silicio contribuye a la velocidad de recombinación superficial (S_{eff}) de los portadores minoritarios, lo que limita el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la eficiencia total alcanzable [11]. Para minimizar la velocidad de recombinación superficial (S_{eff}) en áreas metalizadas es fundamental controlar correctamente la concentración de dopaje y las características del contacto entre el metal y el silicio [11].

Al igual que sucede en el caso de la corriente de cortocircuito, interesa minimizar el área metalizada mediante la creación, por ejemplo, de dedos más estrechos [12]. Por otro lado, interesa minimizar la superficie de contacto entre el metal y el semiconductor para disminuir la corriente de recombinación en el emisor.

En cualquier caso, la influencia de la tensión de circuito abierto es prácticamente despreciable.

5.6.3. Efecto de la metalización en el Fill Factor (FF)

El factor de llenado o Fill Factor es la relación entre la potencia máxima extraíble de la célula y la que se obtendría en el caso ideal en el que la curva IV fuese un rectángulo perfecto. Se define como:

$$FF = \frac{P_{mp}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

Donde I_{mp} y V_{mp} son los valores de corriente y tensión relativos al punto de máxima potencia, P_{mp} . Es, además, el punto de corriente-tensión donde se quiere tener funcionando la célula solar.

El efecto de la metalización sobre el FF se debe principalmente a la influencia de la resistencia serie. Para mejorar el valor del FF nos interesa minimizar la resistencia serie. Por ejemplo, se podría minimizar optimizando el diseño de la metalización o utilizando tecnologías que proporcionen valores bajos de resistividad de línea metálica o resistencia de contacto entre el metal y el emisor de la célula [12].

5.6.4. Efecto de la metalización en la eficiencia (η)

Por último, se define la eficiencia de la célula η , como la relación entre la potencia generada y la potencia incidente.

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}} = \eta(FF, V_{OC}, I_{SC})$$

El proceso de metalización influye directamente y de manera significativa sobre la eficiencia de la célula debido a la dependencia del FF, I_{sc} y V_{oc} . Por una parte, la sombra generada por el recubrimiento metálico tiene una fuerte influencia en la reducción del valor de la corriente de cortocircuito, I_{sc} . Este factor de sombra también influye en bajadas del valor del valor de la tensión de circuito abierto V_{oc} . Sin embargo, el parámetro de metalización que más influye en la V_{oc} , no es el área metalizada en sí, sino la superficie de contacto entre el metal y el emisor, cuyo valor puede ser menor que la propia superficie metalizada. Este valor de V_{oc} , también tiene una influencia sobre el FF, siendo ambos términos proporcionales [12]. Sobre el FF, el valor que más influencia tiene es la resistencia serie, la cual es altamente dependiente de características de la metalización.

5.7. La resistencia serie (R_s)

La resistencia serie es un parámetro muy dependiente del proceso de metalización y tiene una gran influencia en la eficiencia de la célula solar a través del FF. Como es de esperar, es preferible tener un valor bajo de R_s para evitar así la pérdida eficiencia de conversión y de energía a través de una disminución de la corriente de cortocircuito [16].

Definimos la resistencia serie, R_s , como una componente parásita de la célula solar que viene definida, entre otros motivos, por el proceso de metalización, el cual es el

responsable de generar grandes pérdidas de potencia en la célula [12]. El valor de la resistencia serie viene fijado por la resistencia de capa del emisor, el diseño del contacto metálico, la anchura de los dedos metálicos, la resistividad de la malla metalizada y la resistencia de contacto metal-semiconductor.

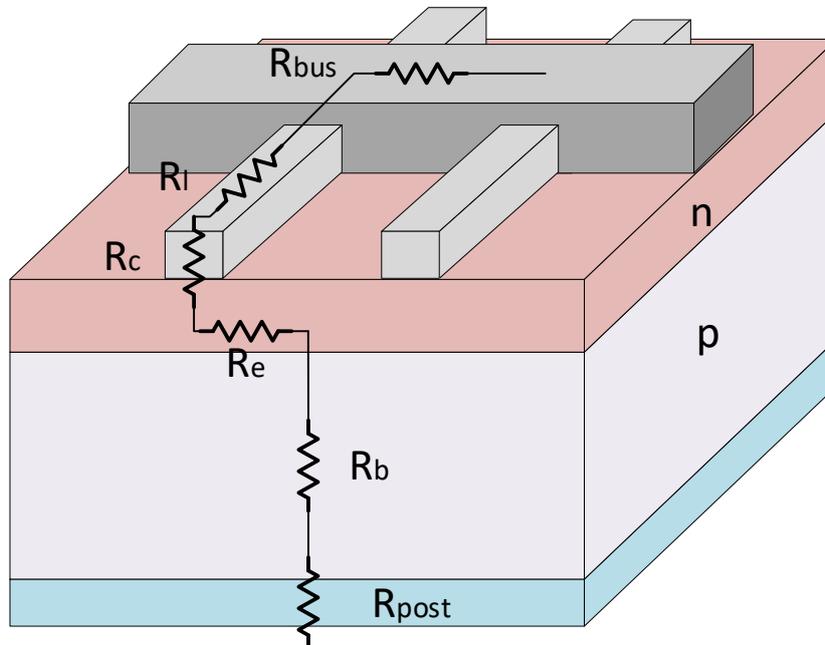


Figura 7. Componentes de la resistencia serie en una célula solar. R_{post}(Resistencia del contacto metal-semiconductor posterior), R_b(Resistencia del semiconductor/base), R_e(Resistencia de la capa del emisor), R_c(Resistencia de contacto), R_l(Resistencia de línea metálica), R_{bus}(Resistencia del bus metálico)[17]

Para cada tipo de zona por la que circula corriente, se puede considerar un tipo de resistencia serie u otra. Tenemos, por lo tanto, la R_{posterior} o resistencia por contacto posterior, R_b o resistencia de base, R_e o resistencia de emisor y R_l como resistencia de línea metálica. A su vez se debe considerar el efecto de la resistencia de contacto, R_c, la cual se genera debido al salto de potencial entre el metal (AuGe) y el semiconductor (AsGa). Es así que la resistencia serie se puede descomponer mediante la siguiente ecuación:

$$R_s = R_{post} + R_b + R_e + R_l + R_c + R_{bus}$$

La resistencia R_b, o de base refleja las pérdidas óhmicas en la base y depende de su resistividad, grosor y en ocasiones, de la geometría de la malla metálica. En células monofaciales su influencia no suelen ser muy importante, pues la distancia recorrida por la corriente es corta. Sin embargo, en las ocasiones en que el recorrido de la corriente hasta el contacto se prolongue, su aportación a la resistencia serie aumenta [13].

Por otra parte, la resistencia del emisor frontal depende de la resistividad de la capa del emisor, así como de su geometría. Por lo general, es una componente importante sobre todo cuando tenemos emisores poco dopados.

Sin embargo, en el caso de la metalización frontal, sólo nos interesa estudiar la resistencia de línea y de contacto al estar directamente influenciadas por el proceso de metalización.

A continuación, se explican más en detalle las resistencias de línea y de contacto.

5.7.1. Resistencia de línea metálica (RL)

La resistencia de línea metálica representa las pérdidas resistivas existentes debidas a la circulación de corriente eléctrica por los contactos metálicos y las interconexiones [12]. Para caracterizar el término de la resistencia de línea a continuación se dibuja una línea metálica rectangular por la que circula corriente eléctrica con distribución uniforme.

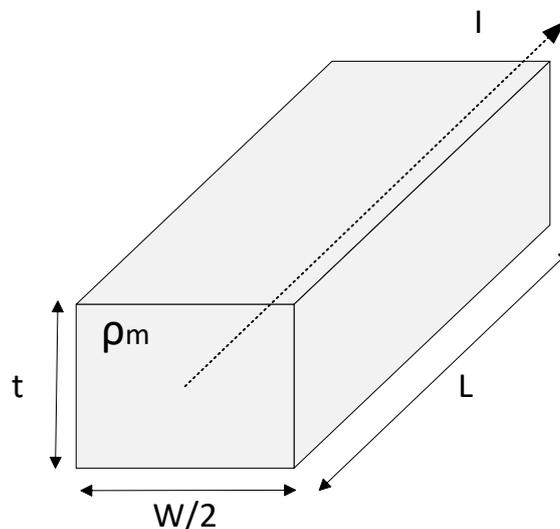


Figura 8. Línea metálica con resistividad ρ_m por la que circula una corriente I uniforme

Los parámetros geométricos y el parámetro eléctrico correspondientes a la línea de la figura son los siguientes:

- L (um): Longitud de la línea metálica
- W (um): Anchura de la línea metálica
- t (um): Espesor de la línea metálica
- ρ_m ($\Omega \cdot \text{cm}$): Resistividad de la línea metálica

La corriente que circula por la línea metálica se puede definir como:

$$I(x) = J_{sc} \cdot L \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{x}{L}$$

Resolviendo la ecuación de las pérdidas Óhmicas podemos relacionar la corriente con la resistencia efectiva de línea.

$$\begin{aligned}
 P_{\Omega} &= I^2 \cdot R_{ef} = \left(J_{sc} \cdot L \cdot \frac{d^2}{2} \right)^2 \cdot R_{ef} = \int_0^L I^2(x) \cdot \rho(x) \cdot dx \rightarrow \\
 &\rightarrow \left(J_{sc} \cdot L \cdot \frac{d^2}{2} \right)^2 \cdot R_{ef} = \left(J_{sc} \cdot L \cdot \frac{d^2}{2} \right)^2 \cdot \int_0^L \left(\frac{x}{L} \right)^2 \cdot \frac{\rho \cdot dx}{t \cdot W/2} \rightarrow \\
 &\rightarrow R_{ef} = \frac{1}{3} \cdot \frac{x^3}{L^2} \Big|_0^L \cdot \frac{\rho}{t \cdot W/2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{L^3}{L^2} \frac{\rho}{t \cdot W/2}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, se puede definir la resistencia de línea como:

$$R_l(\Omega) = \frac{L \cdot \rho_m}{3 \cdot t \cdot W}$$

La resistencia de línea es totalmente dependiente de la geometría de los dedos. Según la expresión, a mayores espesores y menores resistividades se obtendrían mejores resultados. Además, si tenemos en cuenta el factor sombra deberíamos aumentar la anchura de los dedos y mantener una separación pequeña entre los mismos, de esta forma también se reduciría el valor de la resistencia de línea.

5.7.2. Resistencia de contacto (RC)

La resistencia de contacto se produce por el salto de potencial entre el metal y el semiconductor [12]. La resistencia de contacto depende de la resistividad específica del contacto, de la resistencia de la capa del emisor y metal implicados y también de la geometría [13]. Pero también depende en gran parte de la concentración del dopaje cerca de la superficie del semiconductor [19]. Los valores bajos en la resistencia de contacto están asociados con un fuerte dopaje. De ahí, que la resistividad de contacto R_c entre los contactos metálicos de silicio cristalino y las obleas de silicio subyacentes sean de vital importancia para la eficiencia de las células [14].

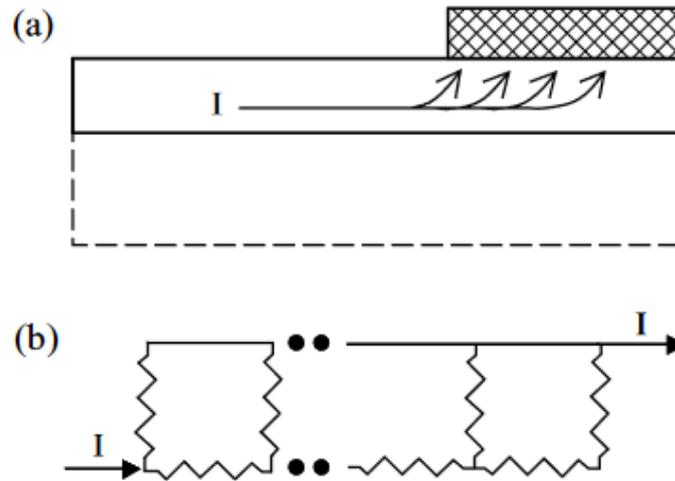


Figura 9. Esquema de circulación de corriente, del emisor del semiconductor al metal para extraer la resistencia de contacto

Un concepto importante en la comprensión de los efectos de la resistencia de contacto es el de la longitud de transferencia (ver *Figura 10*). Supongamos que una corriente eléctrica fluye por un semiconductor, paralela a la superficie, según una dirección que denominaremos por eje x . Si sobre el semiconductor depositamos un contacto metálico, situándose el límite inicial del contacto en $x=0$, la corriente eléctrica pasará mayoritariamente del semiconductor al metal, obteniéndose para la corriente en el metal [19]:

$$I_M(x) = I_{M0} \left(1 - \exp\left(\frac{-x}{l_T}\right) \right)$$

Donde l_T es la longitud de transferencia, que puede expresarse por:

$$l_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_e + R_m}} \quad \text{o como} \quad l_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sm}}}$$

Siendo R_s y R_m las resistividades de capa del semiconductor y metal respectivamente (en Ω/\square). Y R_{sm} la definimos como la resistencia bajo la metalización en las mismas unidades.

Longitud de transferencia

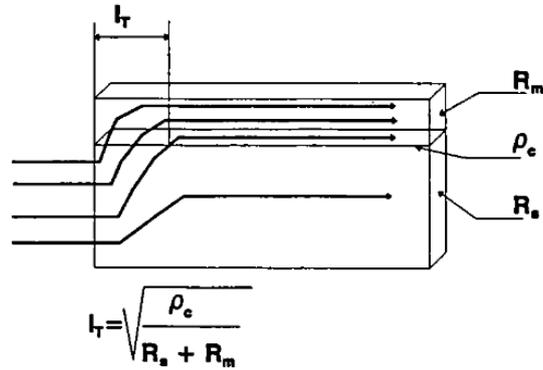


Figura 10. Longitud de transferencia

Siguiendo el dibujo que se muestra a continuación y teniendo en cuenta la explicación de la longitud de transferencia definimos la resistencia del contacto frontal como:

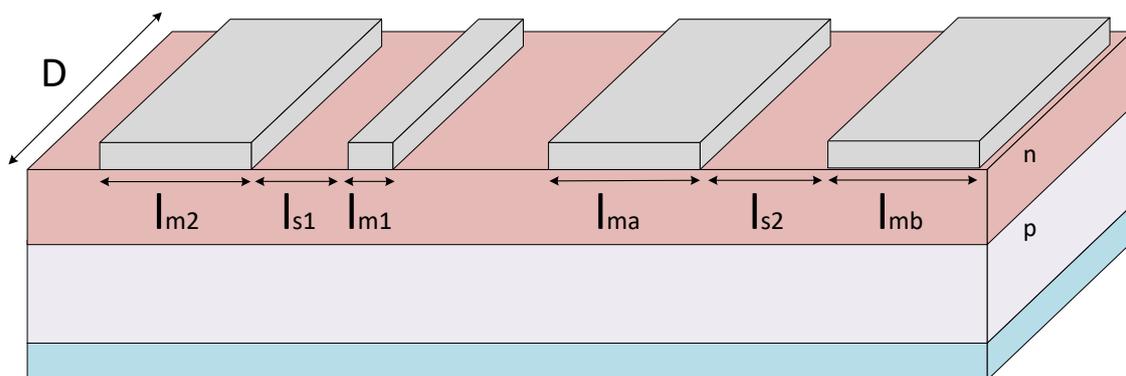


Figura 11. Estructura para nuestra definición de R_c

$$R_{cf} = \frac{R_{sm} \cdot l_t}{D \cdot \tanh \frac{d}{l_t}}$$

$$R_{cb} = \frac{R_{sm} \cdot l_t}{D \cdot \sinh \frac{l_m}{l_t}}$$

Aunque sobre la caracterización de la resistencia de contacto hablaremos más adelante simplemente destacar que R_{cf} lo emplearemos cuando los dedos metálicos sean relativamente anchos y R_{cb} cuando los dedos metálicos sean muy pequeños.

6. Análisis de alternativas

En este apartado se compararán las diferentes técnicas para depositar metal en las obleas en función de la productividad, eficiencia y coste económico.

6.1. Deposición por serigrafía

Por un lado, encontramos la deposición por serigrafía, la cual está orientada a la fabricación a gran escala de células solares y está ampliamente extendida en la industria [20]. Es además una técnica relativamente barata si tenemos en cuenta las otras alternativas e incluso nos permite obtener buenas resistencias de contacto.

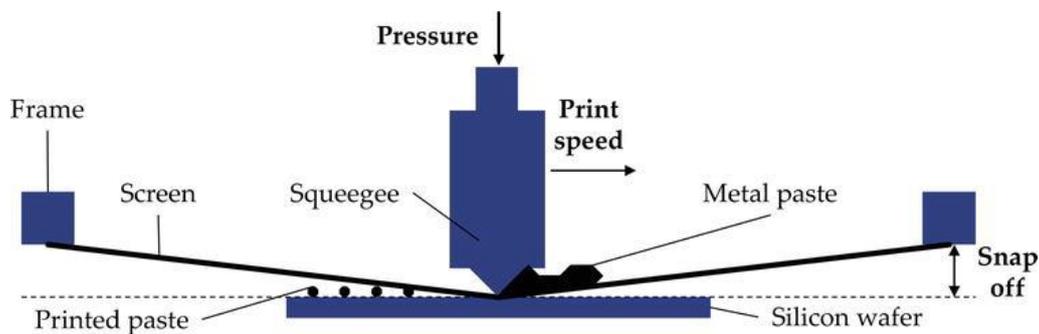


Figura 12. Deposición por serigrafía

Actualmente, la deposición por serigrafía es el método más utilizado para la metalización de obleas a escala industrial.

6.2. Deposición en alto vacío

Por otra parte, encontramos la evaporación de metales en alto vacío, que, aunque no se considera viable para la producción en masa de células solares, proporciona muy buenos parámetros de metalización. La deposición en alto vacío es una tecnología muy bien controlada y establecida para el proceso de células solares. Es una técnica ampliamente usada en los laboratorios.

De forma resumida, el proceso se realizaría de la siguiente forma. Primero se introduce el sustrato con el dibujo de la malla metálica que vamos a metalizar en la campana de alto vacío. A continuación, evaporamos las partículas de metal; esta evaporación puede realizarse mediante diferentes métodos como el de un cañón de electrones o por el efecto Joule. Una vez hayamos evaporado los metales siguiendo el *stack* metálico de la cara frontal extraemos las obleas y eliminaríamos la fotoresina sobrante.

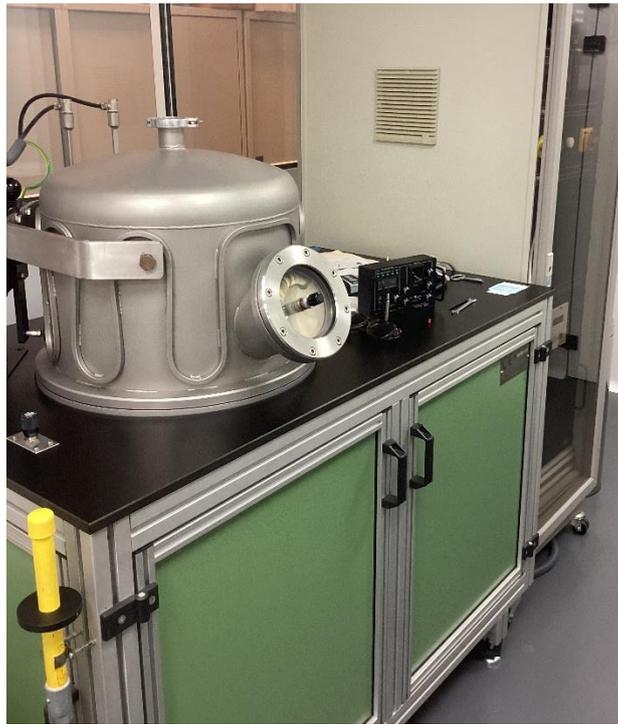


Figura 13. Máquina de alto vacío del laboratorio

Por lo general, la capa de metales evaporados está limitada a un grosor determinado. Es así, que es imprescindible aplicar un último proceso de recrecimiento electrofítico.

Los equipamientos necesarios para la producción para esta tecnología son relativamente caros y la velocidad de procesado es lenta, por lo que no se considera económicamente viable para la producción masiva de células. Su uso queda limitado a células en las que se busque obtener una alta eficiencia de metalización y buenos valores de resistencias de contacto.

6.3. Deposición electroquímica (Recrecimiento)

La técnica de recrecimiento consiste en la deposición electroquímica de metal mediante la circulación de iones metálicos por una disolución química [12]. Esta circulación se realiza desde el ánodo hasta la superficie de la célula solar, que será el cátodo donde son depositados. De esta forma, se genera un proceso químico de reducción y oxidación, por el cual el espesor de las líneas metálicas aumenta hasta una cantidad de metal determinada.

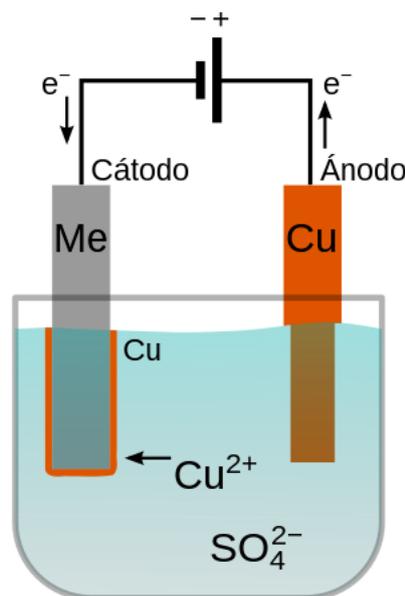


Figura 14. Deposición electroquímica

Debemos mencionar que, para poder utilizar esta técnica, previamente debe existir una base metálica donde poder recrecer. Además, esta tecnología puede presentar problemas de adherencia y el denominado *overplating*, que consiste en la deposición de metal en zonas no deseadas.

6.4. Comparativa

Pese a su alto coste económico y su baja productividad, la evaporación en alto vacío es la técnica preferida para metalizar la cara frontal de las obleas. Esta decisión es debida a que en este trabajo se pretende conseguir la máxima eficiencia en la metalización y esto sólo se puede conseguir mediante el alto vacío. Para caracterizar la resistencia de contacto y de línea necesitaremos tener el mejor contacto posible.

Tabla 1. Comparativa de las alternativas a la metalización

	Productividad	Eficiencia	Coste económico
Serigrafía	Muy alta	Alta	Bajo
Alto vacío	Muy baja	Muy alta	Muy alto
Recrecimiento	Media	Alta	Medio

7. Análisis de riesgos

Todo proyecto está expuesto a una serie de riesgos y deben ser analizados para poder anticipar las soluciones. Los riesgos se definen como aquellos eventos que pueden tener un impacto sobre el proyecto. Tras la identificación de los riesgos se procederá a evaluar la probabilidad de ocurrencia e impacto para su posterior representación en una tabla. Por último, se explicarán los planes de contingencia de cada riesgo. El objetivo de estos planes es disminuir la probabilidad de ocurrencia de los riesgos o en caso de que estos se den, establecer un plan para llevarlos a cabo.

7.1. Riesgo de ruptura de una oblea (A)

Al trabajar en un laboratorio estamos en constante contacto y manipulación de las obleas. Hay procesos que se realizan de manera manual y esto por supuesto implica consecuencias. La oblea se puede caer al suelo o partirse en dos por un pequeño golpe. Aproximadamente 1 de cada 5 obleas no suele llegar al paso final.

- Probabilidad de ocurrencia: Media
- Impacto: Alto
- Plan de contingencia: Las obleas han de ser manipuladas con mucho cuidado en cualquiera de los pasos del proceso de fabricación. Es el riesgo con mayor impacto de todos ya que si se rompe una oblea en una de las etapas finales el proceso habrá sido en vano.

7.2. Riesgo de daños en la superficie de una oblea (B)

La superficie de la oblea está sometida constantemente a agentes externos que pueden dañar o agrietar la superficie de la misma. Un ejemplo de ello es la manipulación de las obleas mediante pinzas. Las pinzas suelen dejar marcas visibles e incluso pueden dañar la malla metálica de la oblea. Por otra parte, el polvo, las grasas y otros tipos de contaminación pueden influir en la calidad final de la metalización. La caracterización de las resistencias de contacto y de línea implican la colocación de puntas metálicas en la superficie de la oblea y también aumentan la probabilidad de daños en la superficie en las obleas.

- Probabilidad de ocurrencia: Media-Alta
- Impacto: Medio
- Plan de contingencia: En este caso, al igual que en el riesgo (A), las obleas se deben manipular con extra cautela. Además, será fundamental mantener limpias las obleas antes de pasar al siguiente paso de fabricación. Finalmente, las resistencias de contacto y de línea se medirán lo más rápido posible para reducir la exposición de la superficie de las obleas a otros agentes.

7.3. Riesgo de avería en una máquina o equipo (C)

La campana de alto vacío y los hornos para la difusión y recocido son las máquinas que mayor probabilidad tienen de averiarse. En concreto, la campana de alto vacío es una

máquina antigua y que suele disparar el diferencial por la inmensa cantidad de energía que consume.

- Probabilidad de ocurrencia: Alta
- Impacto: Bajo
- Plan de contingencia: Que salte o no salte el diferencial es algo que no depende de nosotros, es aleatorio y puede ocurrir en cualquier momento. La solución es apagar y encender de nuevo la máquina y repetir el proceso. Rara vez salta el diferencial una segunda vez.

7.4. Riesgo de retraso en la planificación (D)

Siempre que se efectúa un proyecto, es muy importante el factor tiempo. Los retrasos en cualquier tarea o paso de la planificación son un hecho importante a tener en cuenta. Un retraso en una tarea implica que todas las tareas posteriores que dependan de la retrasada comiencen más tarde de lo previsto.

Si se acerca la fecha límite y aún queda mucho por hacer en el proyecto, la planificación se pone en riesgo. Esto puede conllevar a una mala realización y ejecución del trabajo o a un cambio de planificación que repercute a todo el equipo y al trabajo en sí.

- Probabilidad de ocurrencia: Media
- Impacto: Medio
- Plan de contingencia: La mejor solución es establecer una planificación en la que se identifiquen, de manera clara, las tareas a realizar y las fechas de finalización de las mismas. Asimismo, es importante mantener un contacto con los integrantes del equipo semanalmente para un seguimiento correcto del trabajo.

7.5. Riesgo de caracterizar las medidas (E)

Existe el impredecible riesgo de que cuando caractericemos las resistencias no obtengamos los resultados esperados. Incluso existe la posibilidad de que no podamos medir las resistencias.

- Probabilidad de ocurrencia: Media
- Impacto: Medio-Alto
- Plan de contingencia: Para la medida de la resistencia de contacto post-recocido usaremos TLM. El TLM nos dará mayor precisión en esta fase. Sin embargo, para medir la resistencia de contacto al final del proceso usaremos la metodología planteada por TiM.

7.6. Riesgo de limitación tecnológica (F)

La calidad de la resistencia de contacto y de línea está en gran parte determinada por la tecnología de metalización. Esto significa que a pesar de usar una tecnología muy efectiva no vamos a poder reducir los valores de la resistencia obtenida más allá de un rango.

- Probabilidad de ocurrencia: Baja
- Impacto: Medio
- Plan de contingencia: Usaremos la técnica de evaporación para depositar los metales en la oblea. Es una de las técnicas con las que podemos obtener mejores resultados.

7.7. Matriz probabilidad-impacto

Los riesgos de este proyecto se pueden resumir en la siguiente tabla.

Tabla 2. Matriz probabilidad-impacto

		Impacto			
		Bajo	Bajo-Medio	Medio-Alto	Alto
Probabilidad	Baja	F	F	D	D
	Baja-Media	F	D	D	D
	Media-Alta	D	D	B, E	A
	Alta	C	D	E	E

8. Descripción de la solución propuesta

8.1. Diseño del contacto metálico frontal

El diseño del contacto superior implica no sólo la minimización de la resistencia del dedo y bus, sino la reducción global de las pérdidas asociadas con el contacto superior. Estos incluyen pérdidas resistivas en el emisor, pérdidas resistivas en el contacto superior metálico y pérdidas por sombreado.

Las características críticas del diseño de contacto superior que determinan la magnitud de estas pérdidas, son el espaciamiento de los dedos y de las barras, la relación entre altura y anchura del metal, la anchura mínima de la línea metálica y la resistividad del metal [21]. Estos se muestran en la siguiente figura.

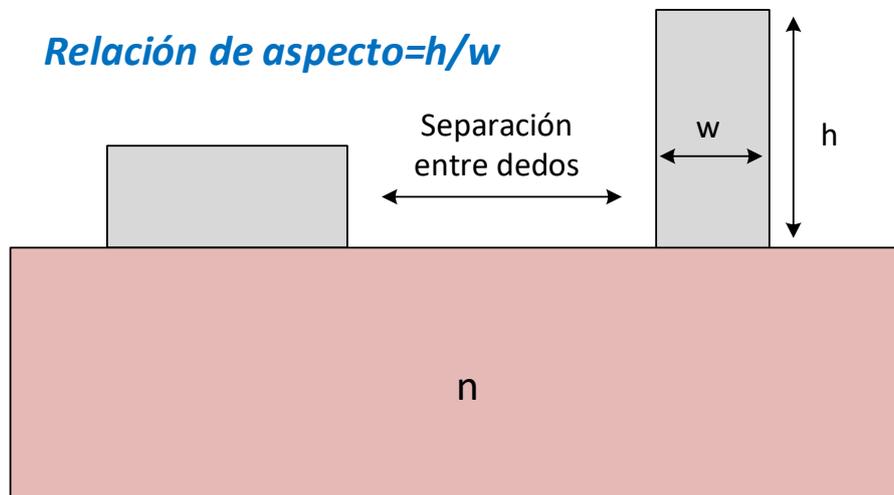


Figura 15. Relación de aspecto

El espaciamiento de los dedos y los buses es un factor importante en el diseño del contacto superior. La pérdida de potencia del emisor depende del cubo de la separación de línea, y, por lo tanto, una corta distancia entre los dedos es deseable para una baja resistencia del emisor. Es decir, el aumento del espaciamiento de los dedos y los buses puede aumentar la resistencia y, por lo tanto, aumentar las pérdidas en el contacto superior.

La resistencia de la malla está determinada por la resistividad del metal utilizado para hacer el contacto metálico, el patrón de la metalización y la relación del esquema de metalización. En las células solares son deseables una baja resistividad y una alta relación entre altura-anchura del metal, pero en la práctica están limitadas por la tecnología de fabricación. El stack metálico empleado para la fabricación de nuestras obleas es de oro de germanio, níquel y oro y es además una arquitectura muy estudiada y aceptada en el sector.

Las pérdidas de sombreado son causadas por la presencia de metal en la superficie superior de la célula solar que impide que la luz entre en la célula solar [22]. Las pérdidas

de sombreado están determinadas por la transparencia de la superficie superior, que para una superficie superior plana se define como la fracción de la superficie superior cubierta por metal. La transparencia está determinada por el ancho de las líneas metálicas en la superficie y por la separación de las líneas metálicas. Una limitación práctica importante es el ancho de línea mínimo asociado con una tecnología de metalización particular. Para transparencias idénticas, una tecnología de anchura de líneas estrechas puede tener un espaciado de dedos más estrecho, reduciendo así las pérdidas de resistencia del emisor. La relación entre la altura y la anchura del metal también es importante en el diseño del contacto superior. Una relación más alta puede reducir la resistencia, pero también puede aumentar las pérdidas por sombreado.

Aunque para el diseño de nuestras células espaciales no tiene gran importancia, realmente existen múltiples esquemas para el contacto superior. De hecho, por cuestiones económicas y prácticas la mayoría de patrones son sencillos y simétricos [21]. Un esquema de contacto simétrico se puede definir por las siguientes reglas de diseño:

- La anchura óptima de la barra colectora, W_B , se da cuando la pérdida resistiva en la barra colectora es igual a su pérdida por sombreado.
- Una barra colectora cónica tiene pérdidas más bajas que una barra colectora de ancho constante.
- Cuanto menor es la celda unitaria, menor es la anchura de dedo, W_F , menor es la separación de los dedos, S , y menores son las pérdidas.

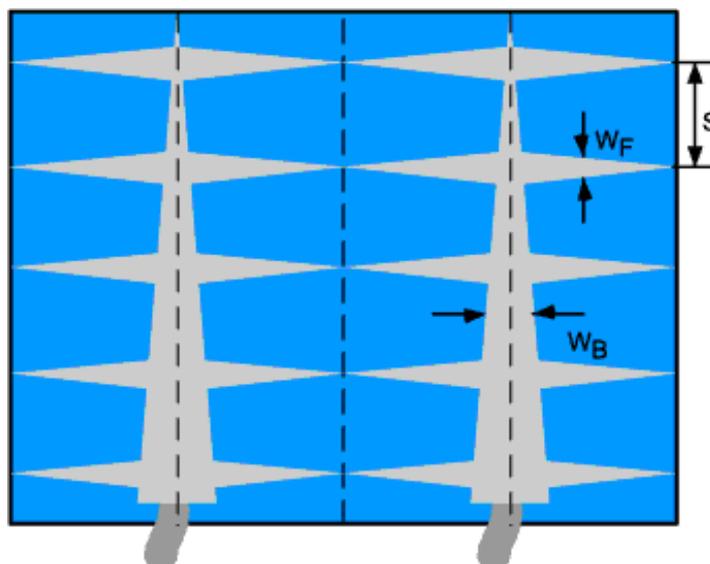


Figura 16. Esquema de un diseño de contacto superior que muestra barras y dedos [21]

8.1.1. Limitaciones en el diseño

Idealmente el diseño de la cara metálica frontal se podría describir de la siguiente manera: una oblea con un número muy alto de buses de contacto, un número elevado de dedos de grosor nanométrico, dedos muy finos pero muy altos o incluso líneas de busbar muy estrechas y de baja resistencia. Pero la realidad es que existen diferentes

motivos por los que es físicamente imposible hacer un diseño perfecto. En nuestro caso el diseño metálico frontal está limitado por las siguientes razones:

- Se limita el número de buses a 3, debido a la complejidad que conllevaría tener que realizar una soldadura para un número elevado de buses.
- La lámpara de Xenón empleada en el laboratorio a pesar de ser muy práctica es muy antigua y las longitudes de onda que emite no permiten hacer grabados de alta precisión. Por lo tanto, la anchura de los dedos no puede ser inferior a 10 micras por limitación tecnológica.
- Uno de los objetivos que ha tenido TiM en el transcurso de este proyecto es el de intentar obtener dedos con alturas de 5 micras. Puede parecer poco, pero 5 micras es una altura muy alta para unos dedos tan estrechos. Por experiencia sabemos que llegar a las 5 micras es muy complicado, los dedos se rompen o se caen. Sin embargo, ya se consiguió en alguna tanda llegar a las 3 micras, lo cual no está nada mal. Nos limitaremos a recrear metal hasta las 3 micras para evitar que los dedos se caigan y se rompan.

8.1.2. Diseño propuesto

El diseño que se propone en este trabajo es el resultado de una hoja de cálculo muy extensa que recoge los parámetros a tener en cuenta a la hora de diseñar la malla. Estos valores, parámetros y datos han sido previamente analizados y calculados teóricamente siguiendo las ecuaciones correspondientes. Sin entrar en grandes detalles, los factores principales que se han tenido en cuenta para el diseño de la malla metálica frontal son los siguientes: resistencia de contacto, resistencia serie, resistencia de la base, resistencia del emisor, resistencia del busbar, resistencia de los dedos, espectro del sol en el espacio "AM0", propiedades del Germanio, GaAs y AlInP, curvas de corriente vs tensión, factor de idealidad, nivel de iluminación o el factor de sombra.

Las características más importantes del diseño propuesto son las siguientes:

- Número de dedos: 70
- Número de buses: 2
- Anchura de los dedos: 10 micras
- Anchura del busbar: 470-10 micras
- Número de pads: 2
- Anchura de los pads: 0,8 milímetros
- Altura y anchura de la célula: 60 x 30 cm
- Geometría del bus: Geometría triangular
- Profundidad del busbar: 14 cm
- Factor de sombra: 2,2814 %
- Resistencia serie total: $2,02 \Omega \cdot cm^2$
- Corriente máxima generada: 397 mA
- Tensión máxima generada: 2,098 V
- Potencia máxima generada: 0,833 W
- Eficiencia total: 32,005 %

En la siguiente imagen se muestran las curvas I-V (Corriente vs tensión) y la potencia generada por nuestro futuro panel fotovoltaico. Como acabamos de mencionar, con este diseño se pueden generar hasta 0,833W de potencia en una superficie de 60 x 30 centímetros, lo cual es un muy buen resultado.

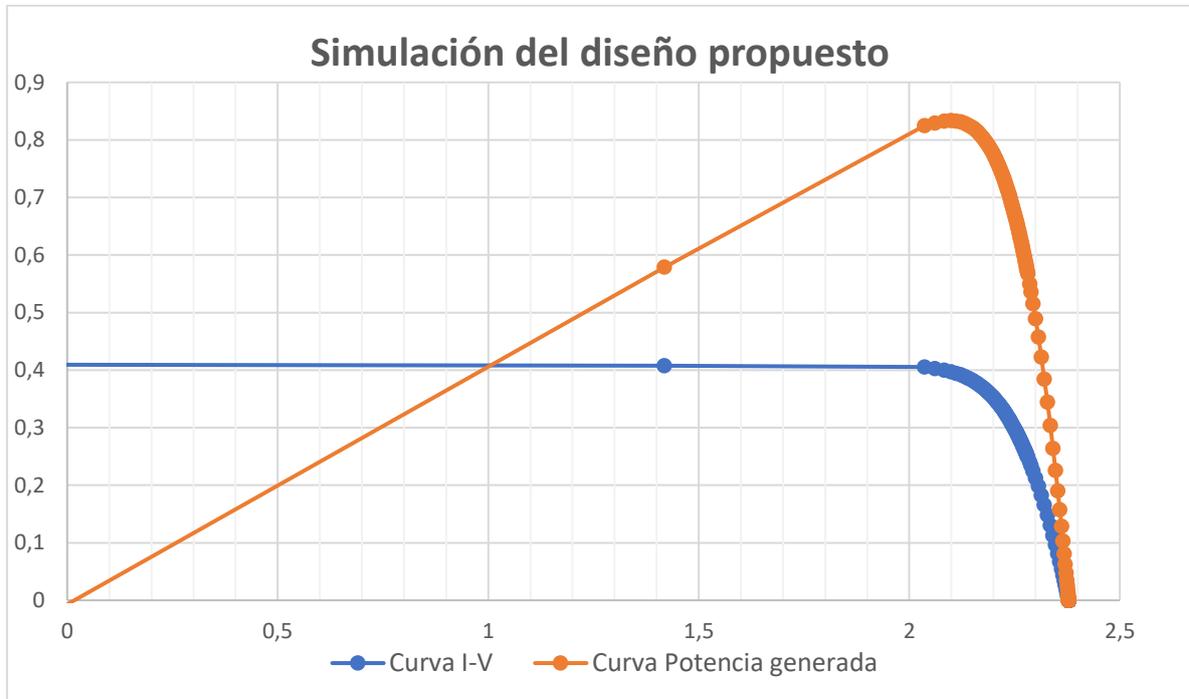


Figura 17. Simulación del diseño propuesto

Por otra parte, en la siguiente imagen se muestra en detalle los planos del diseño final de nuestra malla metálica frontal.

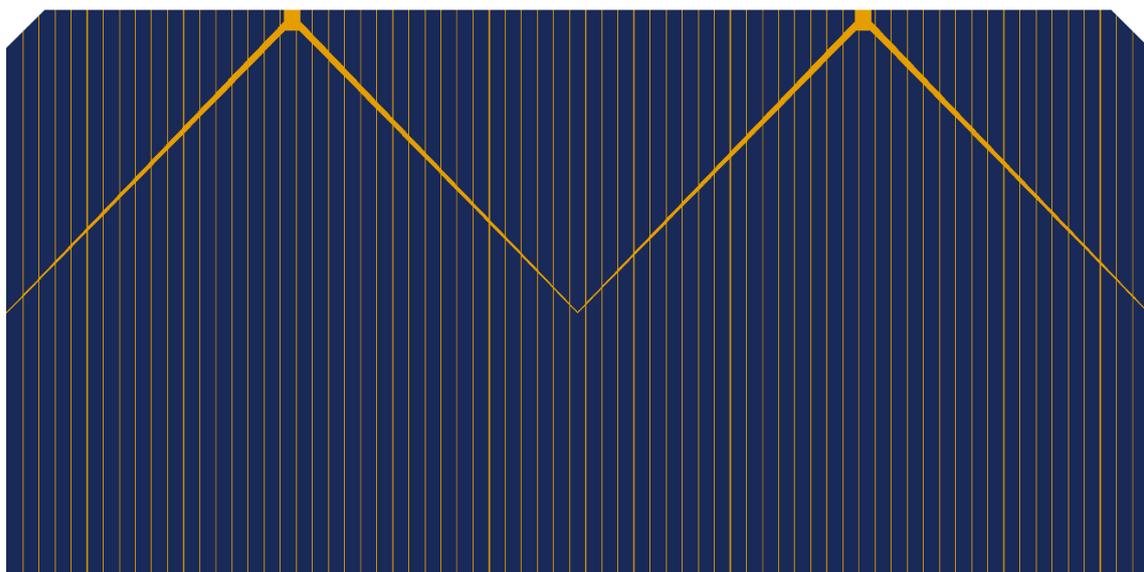


Figura 18. Diseño de la malla metálica frontal

8.2. Fabricación

Para la fabricación de la malla metálica de la cara frontal utilizaremos 4 obleas de Si y 1 de GaAs con las siguientes características:

Tabla 3. Características de las obleas de Silicio y Arseniuro de Galio

Oblea	Silicio (Si)	Arseniuro de Galio (GaAs)
Diámetro	100 ± 0,8 mm	100 ± 0,5 mm
Grosor	440 ± 30 um	755 ± 25 um
Tipo de dopante	N	N
Resistividad	50 Ω/□	100-225 Ω/□

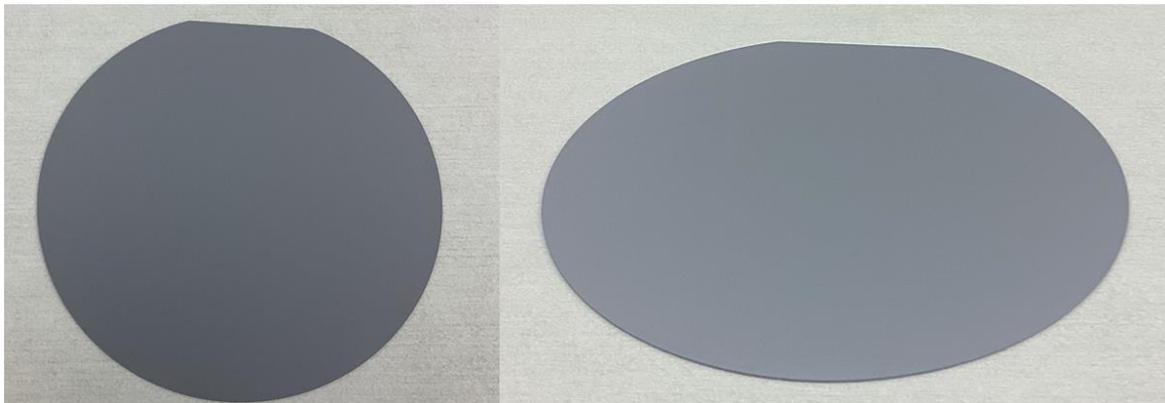


Figura 19. Obleas de Si vírgenes

A continuación, se explican los pasos que he seguido para construir la malla metálica.

8.2.1. Decapado y pulido con CPX

En la mayoría de los casos, las superficies de las obleas que llegan al laboratorio han sido alteradas o dañadas de alguna forma. Se estima que las primeras 20 micras de la superficie son electrónicamente inertes. Además, pueden tener aceites, manchas, grasas o incluso micro fisuras. Por lo tanto, es imprescindible eliminar esa capa mediante un proceso químico. De esta forma, las obleas pierden esas primeras micras de superficie y se convierten en electrónicamente activas. A este proceso lo llamaremos decapado y pulido.

La mezcla que usaremos para decapar y pulir las obleas es la mezcla conocida como CPX o “Chemical Polishing X”, la cual está compuesta a su vez por los siguientes químicos:

- Ácido nítrico: Permite oxidar la oblea rápidamente.
- Ácido fluorhídrico: Elimina el óxido que se acaba de crear debido a la reacción de la oblea con el ácido nítrico.
- Ácido acético: Estabilizador de la disolución.
- Ácido fosfórico: Estabilizador de la disolución.

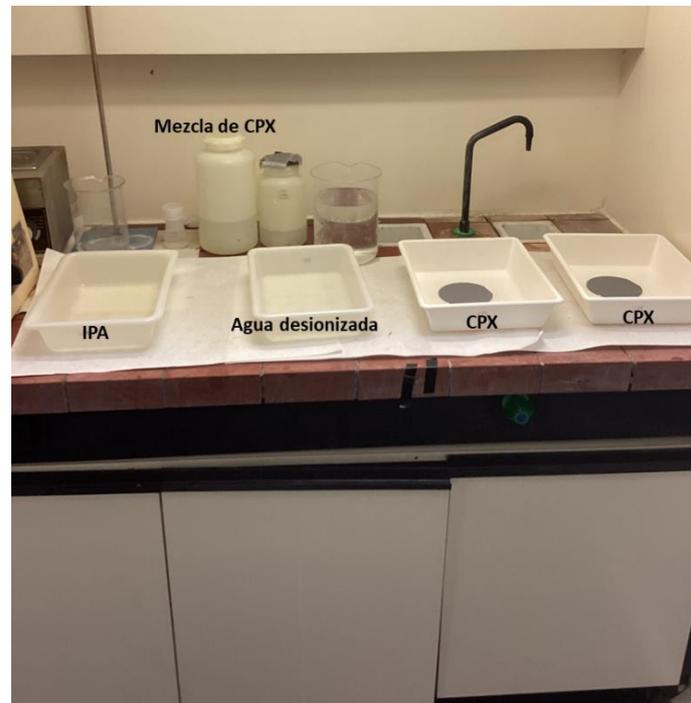


Figura 20. Mesa de trabajo para CPX

El CPX es una disolución potencialmente peligrosa que desprende un humo naranja mientras reacciona con la oblea. Por lo tanto, para evitar consecuencias en nuestra salud es de vital importancia mantener los extractores de la sala en funcionamiento, mientras utilizamos unos guantes especiales para este tipo de soluciones, unas gafas y una máscara con filtro de carbono. La duración del decapado y pulido es de unos 10 minutos, dependiendo de lo bien que se haya realizado la mezcla.

A continuación, se hace una pequeña limpieza de óxido en ácido fluorhídrico tal y como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 21. Baño en ácido fluorhídrico

Después del decapado las obleas de silicio tienen el siguiente aspecto.

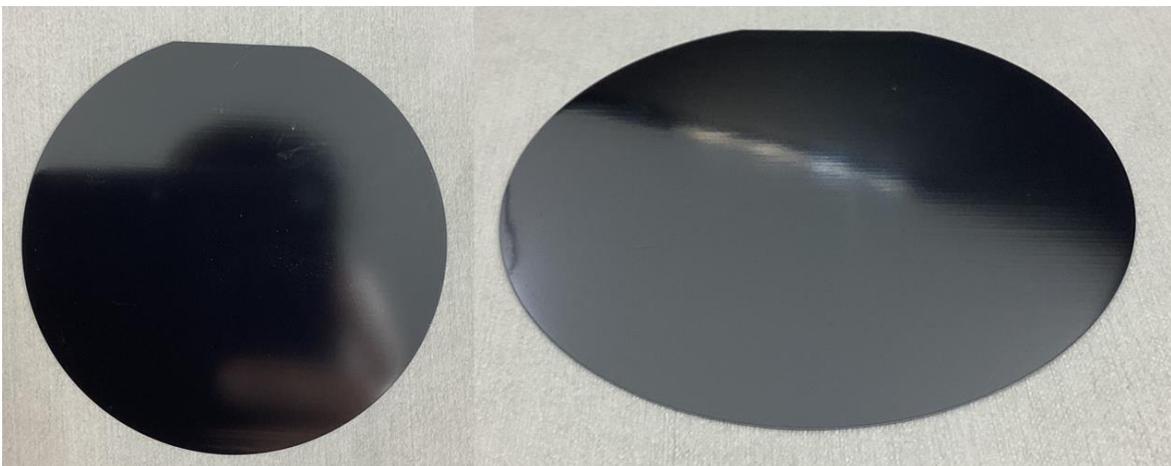


Figura 22. Obleas de Si después del decapado/pulido

Por otra parte, la oblea de GaAs no requiere de decapado, solo de un baño de ácido fluorhídrico con el objetivo de eliminar el posible óxido que contenga la capa exterior.

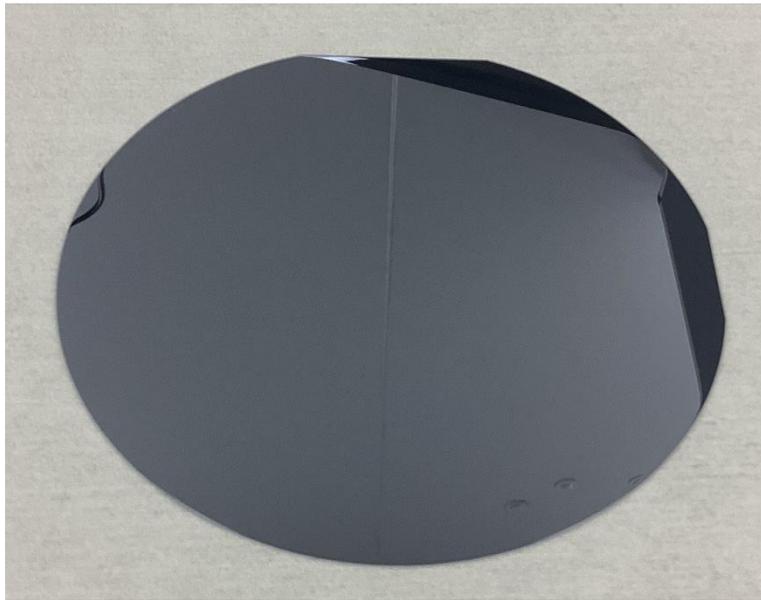


Figura 23. Oblea GaAs vírgen después del HF

Entre el decapado y el siguiente paso es obligatorio hacer una limpieza general de las obleas. El RCA (*Radio Corporation of America*) es un estándar de limpieza de obleas que debe realizarse antes de los pasos de procesamiento a alta temperatura de obleas de silicio en la fabricación de semiconductores. Para la limpieza de nuestras obleas realizaremos el RCA 1 y a continuación el RCA 2.

8.2.1.1. RCA 1

El RCA 1 es un baño químico que permite eliminar contaminantes orgánicos. Está compuesto por $NH_3:H_2O_2:H_2O$.

8.2.1.2. RCA 2

El RCA 2 es un baño químico que permite eliminar contaminantes metálicos. Está compuesto por $HCl:H_2O_2:H_2O$.

Una vez limpias las obleas pasamos inmediatamente a la difusión. Cuanto menos tiempo pase del fin de la limpieza al siguiente paso mejor.

8.2.2. Difusión

Los hornos de difusión son utilizados en una variedad de procesos para modificar las características de los semiconductores en dispositivos electrónicos. Entre estos procesos se encuentran la difusión, oxidación, recocido, aleación y sinterización, que se utilizan en la fabricación de circuitos integrados a gran escala, dispositivos discretos, electrónica de potencia, dispositivos optoelectrónicos e industrias de fibra óptica.

El proceso de difusión es uno de los principales objetivos de estos hornos, ya que permite dopar las obleas semiconductoras a altas temperaturas. Durante este proceso, se difunde el fósforo y el boro en la oblea de silicio, lo que permite cambiar y controlar

el tipo, la concentración y la distribución de impurezas en el semiconductor. Esto se utiliza para establecer regiones con diferentes características eléctricas, lo que es esencial para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos modernos.



Figura 24. Horno de cuarzo del laboratorio para la difusión del fósforo

En nuestro caso, mediante el medidor de cuatro puntas hemos obtenido resistividades de $50 \Omega/\square$ en las obleas de silicio. Se trata de valores muy bajos y buenos y, por lo tanto, no será necesario realizar el paso de la difusión.

Antes de introducir la tanda de obleas en el horno se deberíamos realizar previamente una serie de difusiones con el objetivo de dopar las paredes del horno de átomos de fósforo. Mínimo es necesario hacer 3 o 4 difusiones previas, de lo contrario, lo más probable es que la difusión no se realice correctamente.

La receta o programa que utilizaríamos en el caso de realizar la difusión se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Establecemos el caudal de los gases.
2. Calentamos el horno de los 550°C del reposo hasta los 750°C que es la temperatura donde podemos introducir las obleas.
3. Introducimos las obleas poco a poco.
4. La temperatura aumenta hasta los 875°C .
5. Se estabilizan las temperaturas y los gases.
6. Se realiza la difusión.

7. Extraemos las obleas poco a poco.

8.2.3. Fotolitografía

La fotolitografía es el procedimiento para transferir dibujos o patrones y grabarlos en un material por medio de la luz y de agentes químicos.

Podemos dividir este proceso en tres bloques: Deposición de resina, litografía y revelado.

8.2.3.1. Deposición de resina

Impregnaremos las obleas con una fotoresina positiva. Las fotoresinas positivas son aquellas que aumentan su solubilidad en un determinado disolvente en las zonas que fueron expuestas a la luz.

Esta resina debe esparcirse de forma uniforme por toda la superficie de la oblea. Para ello utilizaremos un "Spinner". El spinner hace que la oblea gire a una gran velocidad sobre su eje central, provocando así una fuerza centrífuga que extiende la resina (en estado líquido) por toda la oblea de forma uniforme.

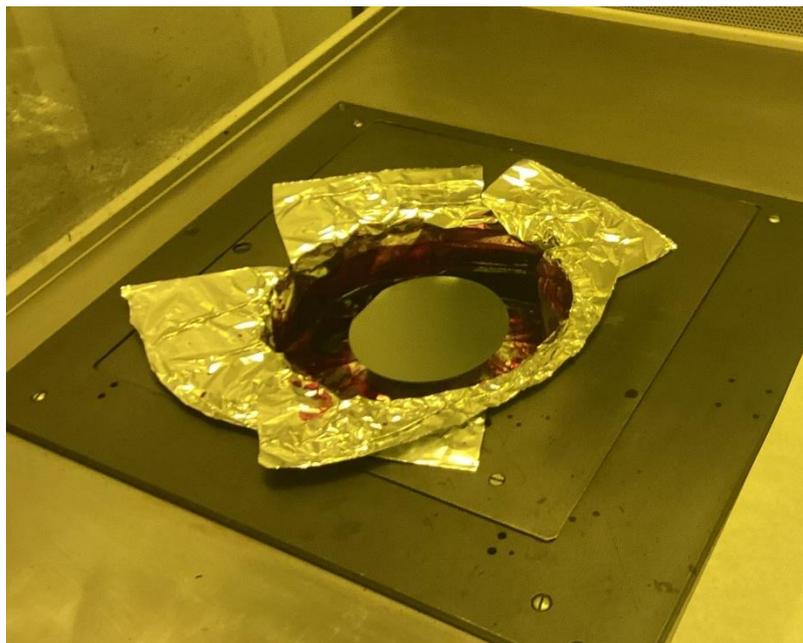


Figura 25. Oblea en el spinner

Una vez hallamos depositado la resina en todas las obleas, las colocaremos en unas bandejas que introduciremos en un horno para el secado de la resina.



Figura 26. Obleas en bandejas con resina recién depositada

A continuación, introducimos las obleas en un horno a 95°C durante 30 minutos.



Figura 27. Obleas en bandejas con resina seca (Después del horno)

8.2.3.2. Litografía

En este bloque trataremos de transferir el dibujo de la máscara que aparece en la Figura 28. Máscara empleada para la litografía



Figura 28. Máscara empleada para la litografía

Limpiamos con un paño de Isopropanol 2 la máscara y la introducimos en la máquina de litografía junto con la oblea.



Figura 29. Oblea con resina antes en máquina de litografía

En este punto iluminaremos la oblea con la lámpara de Xenón 15 segundos. Después de los 15 segundos sacamos la oblea de la máquina y pasamos al siguiente bloque.

8.2.3.3. Revelado

Finalmente, se introducen las obleas en un líquido revelador que reacciona químicamente con la fotoresina expuesta a la luz de la lámpara de Xenón. Este proceso tarda entre 4 y 5 minutos dependiendo de la cantidad de resina que se haya impregnado previamente. Ahora las obleas ya tienen un el dibujo de la máscara impreso.

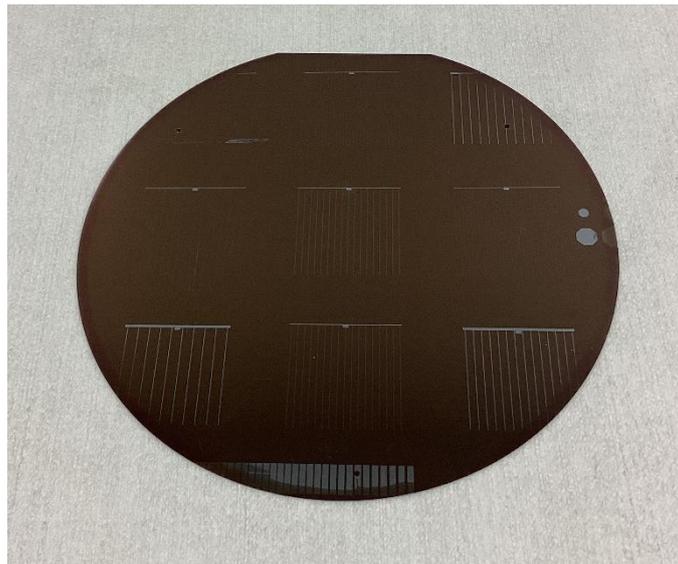


Figura 30. Oblea de silicio después de la litografía



Figura 31. Oblea de GaAs después de la litografía

8.2.4. Metalización

El stack metálico que se desea obtener es el siguiente:

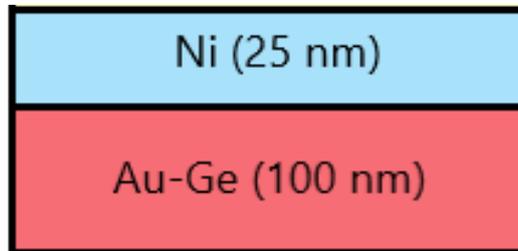


Figura 32. Stack metálico cara frontal

Lo primero es realizar un vacío previo hasta alcanzar los ($1e10^{-3}$ mbar). Después se realiza un alto vacío ($1e^{-3}$ a $1e^{-7}$ mbar) o incluso un ultra alto vacío ($1e10^{-7}$ a $1e10^{-12}$ mbar). Después procederemos a la deposición del AuGe. Para ello, primero circula corriente a través del filamento de tungsteno del cañón de electrones, el cual emite electrones debido al calentamiento. Los electrones son acelerados hacia el crisol, aplicando un voltaje de 6.7 kV. Los electrones generados son dirigidos mediante un campo magnético, la energía producida del haz de electrones se transfiere al material depositado, consiguiendo su evaporación y que se deposite sobre el sustrato.

Para depositar 100nm de AuGe se necesita 1 minuto. En el caso del Níquel, necesitaremos depositar un 25% del grosor de la capa de AuGe, para que sea un stack eficiente. Por eso, en este caso, evaporaremos el material durante 50 segundos.



Figura 33. Disposición de las obleas en el planetario de la campana evaporadora

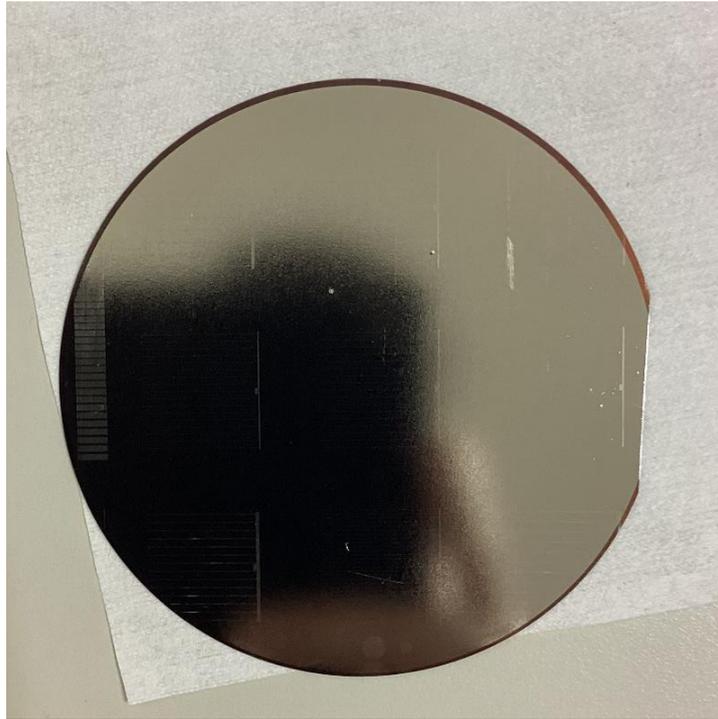


Figura 34. Oblea de silicio después de la metalización

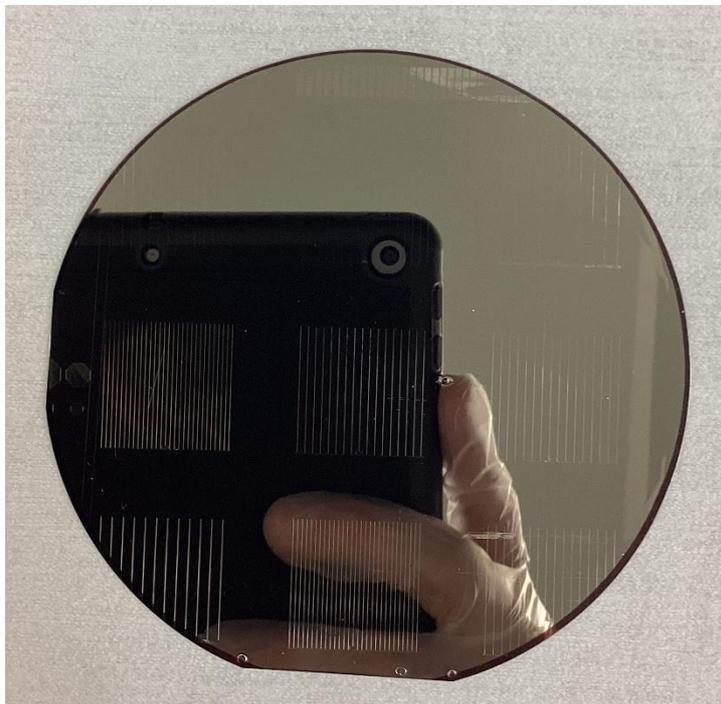


Figura 35. Oblea de GaAs después de la metalización

Finalmente, y con el objetivo de eliminar las zonas metalizadas donde no habrá dedos, pasaremos las obleas por un largo baño de acetona que nos permitirá eliminar la resina de las zonas que no fueron expuestas a luz. De esta forma el metal que se depositó encima de la resina también será eliminado, dejando la oblea de la siguiente forma.

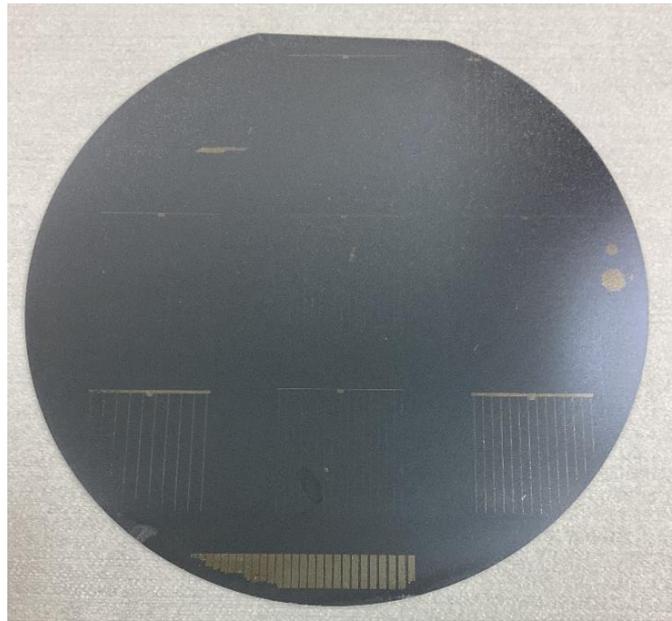


Figura 36. Oblea de silicio después de la limpieza con acetona

8.2.5. Recocido

El recocido es un tratamiento térmico cuya finalidad es el ablandamiento, la recuperación de la estructura o la eliminación de tensiones internas generalmente en metales. Cualquier metal que haya sido tratado tiene como resultado una alteración de las propiedades físicas del mismo. El recocido consiste en calentar el metal hasta una determinada temperatura para después dejar que se enfríe lentamente, habitualmente, apagando el horno y dejando el metal en su interior para que su temperatura disminuya de forma progresiva. El proceso finaliza cuando el metal alcanza la temperatura ambiente. Mediante la combinación de varios trabajos en frío y varios recocidos se pueden llegar a obtener grandes deformaciones en metales que, de otra forma, no se podrían conseguir.



Figura 37. Horno (central) de recocido

El siguiente paso del proceso consiste en un recocido en forming-gas (90% N₂ y 10% H) para mejorar la calidad de los contactos metálicos. Además, el recocido sirve para recomponer enlaces rotos entre el silicio y el óxido frontal pasivador, gracias al hidrógeno atómico que circula en el gas. Por lo tanto, la finalidad de este paso es la de aumentar la adherencia de los metales con el sustrato contribuyendo así a la reducción de la resistencia de contacto.

El horno tiene un sistema de control que permite crear recetas, creando funciones variables de temperatura en forma de rampas crecientes o decrecientes, regulando las resistencias calefactoras mediante los sensores de temperatura. Los gases se introducen en el horno por la parte posterior y estos están controlados por válvulas que permiten o no el paso del gas y por caudalímetros que dejan pasar un determinado flujo de gas, los cuales se pueden regular para controlar el proceso.

Antes de realizar el recocido es necesario cargar las paredes del horno durante 30 minutos inyectando el forming-gas. Teniendo en cuenta nuestra experiencia en este apartado y siguiendo los consejos de [15] se ha realizado la siguiente tabla para el recocido de las obleas. De esta forma, se podrá ver cuál es el mejor tiempo para este proceso.

Tabla 4. Tiempos de las obleas en el recocido

400 °C			
1 minuto	2 minutos	3 minutos	5 minutos
GaAs(i)	GaAs(g,h)		GaAs(b)
Oblea 4	Oblea 2	Oblea 3	Oblea 1

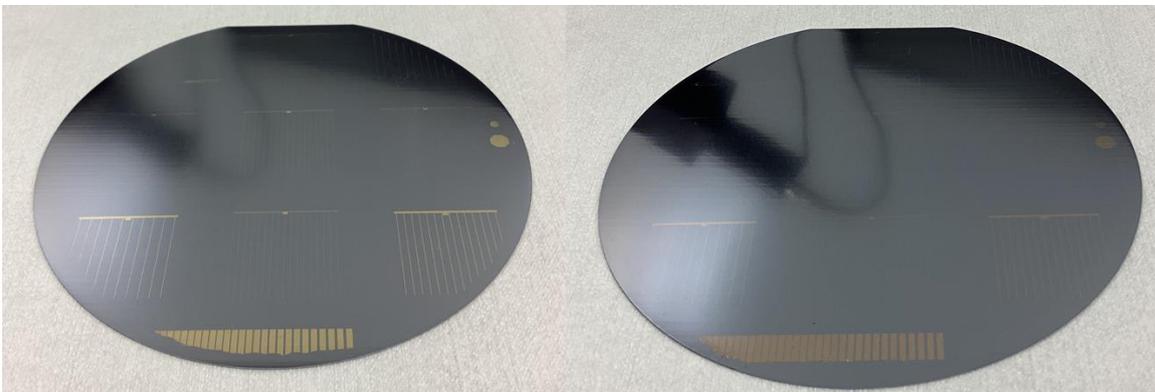


Figura 38. Oblea 3 (izquierda) y oblea 4 (derecha) después del recocido

Como se puede ver en la imagen, el color del metal cambia según el tiempo que haya estado en el horno con el forming-gas.

8.2.6. Medidas de resistencia de contacto

Llegados a este punto debemos comprobar que las obleas se hayan fabricado de forma correcta y que en este punto podamos medir las resistencias de contacto mediante el método TLM.

Como se puede apreciar en las siguientes imágenes con zoom x50 en el microscopio, la metalización ha sido un éxito.

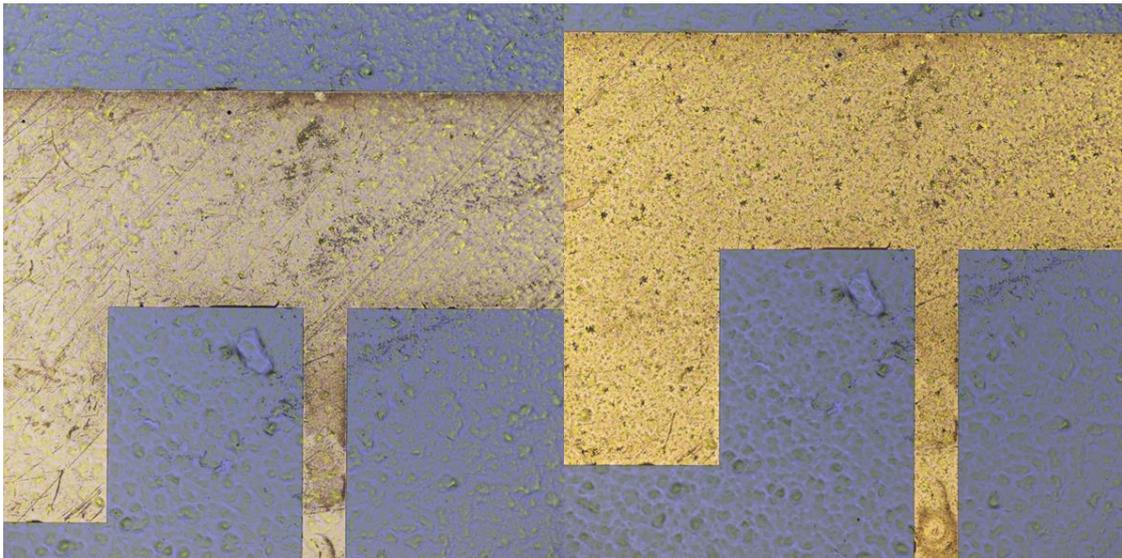


Figura 39. Izquierda: oblea 1(tras metalización), Derecha: oblea 1(tras recocido). Microscopio en x50

Para poder realizar las medidas es necesario aislar la zona TLM del resto de la oblea. Así se evita tener corrientes parásitas.

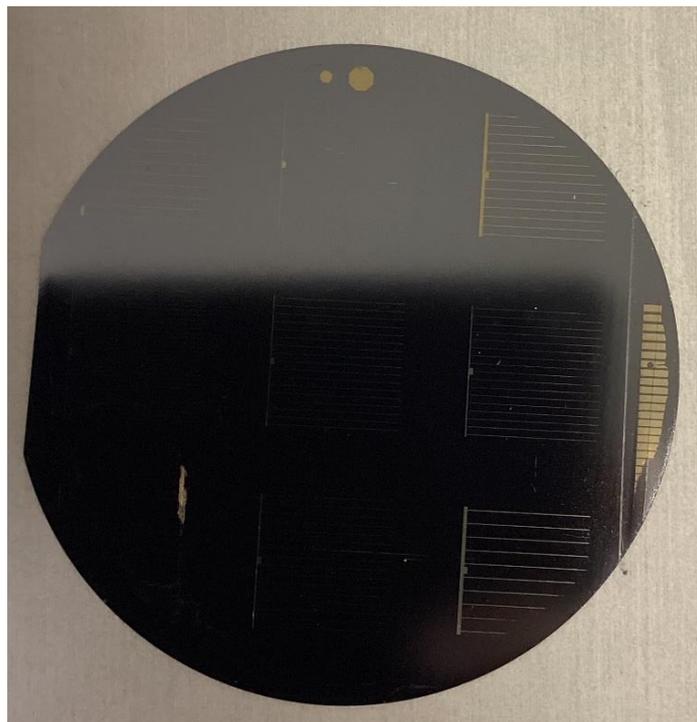


Figura 40. Oblea de silicio con corte

Sin embargo, por desgracia no se pudo medir ningún tipo de resistencia de contacto. De hecho, el metal y el sustrato se encuentran totalmente aislados el uno del otro. A pesar de que a simple vista veamos que el contacto se realizó correctamente, la realidad es que el contacto es de muy mala calidad y por lo tanto se tendrá que volver a empezar con la fabricación. (Ver el apartado 8.3.4).

El problema ha ocurrido por no haber realizado el segundo paso: la difusión. Por lo visto es obligatorio realizar este paso entre el pulido y la fotolitografía para garantizar un buen dopaje en la superficie de la oblea y así contribuir a la mejora de la resistencia de contacto.

A partir de ahora se empezará una nueva tanda con cuatro obleas de silicio de las mismas características y se realizarán los mismos pasos que en la tanda anterior, pero con la excepción de que en esta ocasión se realizará una difusión en fósforo.

En este punto debemos recalcar que la oblea de arseniuro de galio sigue siendo válida a pesar de que esté rota en cuatro fragmentos. Mientras que por una parte debemos empezar una nueva tanda con las obleas de silicio, continuaremos el proceso de fabricación con los fragmentos de GaAs.

8.2.7. Recrecimiento

Como se comenta en el apartado 6.3, la técnica de recrecimiento consiste en la deposición electroquímica de metal mediante la circulación de iones metálicos por una disolución química. En la fase de metalización, las obleas salen de la campana evaporadora con aproximadamente 125 nanómetros de espesor de metal. Esta cantidad está limitada tecnológicamente por el proceso y por lo tanto es necesario aumentar ese espesor hasta los cinco micrómetros con otra técnica. El recrecimiento nos permite aumentar desde los 125 nanómetros hasta las 5 micras que necesitamos.

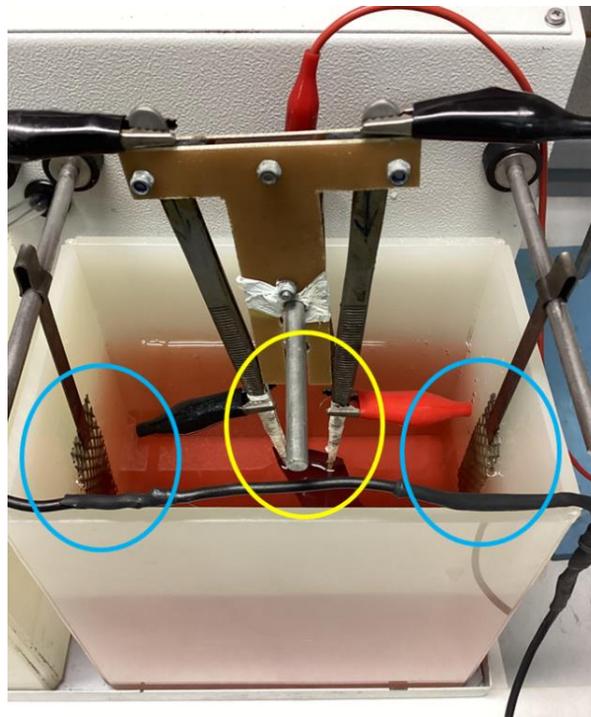


Figura 41. Setup para el recrecimiento. Cátodo (amarillo), ánodos (azul)

Como se podrá apreciar más adelante en la planificación del proyecto, el recrecimiento es una de las etapas más largas de la fabricación. Esto se debe a que para realizar el

recrecimiento de forma correcta es necesario incrementar de forma gradual la corriente que circula entre los ánodos.

Por contrapartida, debemos recordar que los contactos de las obleas son de una calidad muy mala y por lo tanto es muy complicado aumentar el tamaño de los contactos. Como se comenta en el apartado Caracterización de la resistencia de contacto en los pads después del recocido en el punto 8.3.4 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** solo fue posible recrecer unos pocos nanómetros en una de las obleas.

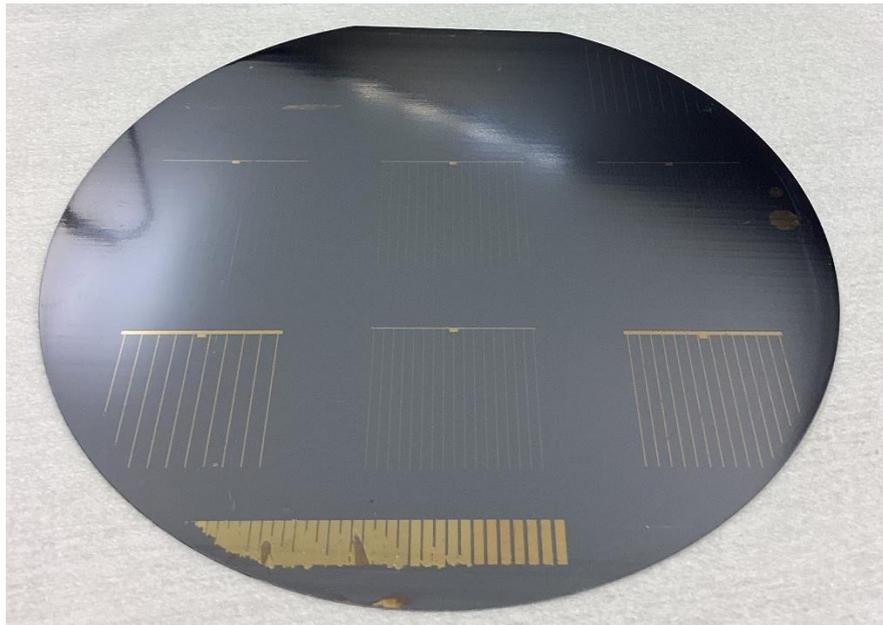


Figura 42. Oblea 4 tras el recocido 2mA durante 40 minutos

8.2.8. Fabricación de la tanda 315

Habiendo visto que las medidas no fueron las esperadas en este punto es importante empezar una nueva tanda de obleas con el objetivo de acercarnos a nuestro objetivo. Por cuestiones del laboratorio la llamaremos tanda 315. A partir de aquí, no se explicarán todos los procesos para construir la oblea al resultar repetitivo, solo nos centraremos en exponer las diferencias. En esta tanda introduciremos varios cambios respecto a la explicada anteriormente, así se pretenden solucionar los problemas que habían ocurrido. Los cambios son los siguientes:

- Realizaremos la difusión de fósforo en el horno.
- Modificaremos la matriz de recocido y aumentaremos el tiempo que las obleas pasan en el horno hasta 15 y 30 minutos.
- Todas las obleas serán esta vez de silicio.
- Después del recocido realizaremos un recocido progresivo.

8.2.8.1. Difusión de la tanda 315

Los resultados de la difusión de la tanda 315 se recogen en la siguiente tabla. Cada valor de la tabla está medido en Ω/\square .

Tabla 5. Resistividad tanda 315 después de difusión

Oblea 1		Oblea 2		Oblea 3		Oblea 4	
Cara front	Cara post						
64	67	42	44	26	26	22	22
49	66	44	45	25	25	22	22
67	27	23	43	22	22	21	22
73	72	37	41	32	26	25	24
57	71	41	26	25	33	22	22

8.2.8.2. Matriz de recocido de la tanda 315

La matriz de recocido de la tanda 315 es la siguiente.

Tabla 6. Matriz de recocido tanda 315

400 °C			
15 minutos		30 minutos	
Oblea 1	Oblea 2	Oblea 3	Oblea 4

Después del recocido procedemos a realizar las medidas de las resistencias de contacto mediante TLM y la metodología del contacto posterior desarrollada en TiM.

8.2.8.3. Recrecimiento tanda 315

En esta tanda se va a realizar un recrecimiento progresivo de las obleas. Para ello se emplearán unas corrientes y tiempos que han sido calculados previamente y que tienen en cuenta la cantidad de superficie a recrecer, la resistividad de la oblea y el baño químico en el que sumergen.

La oblea 3 tuvo una fisura y acabó rompiéndose en dos mitades. En ese caso inyectaremos unas corrientes equivalentes a la superficie restante, de esta forma evitamos meter corrientes muy elevadas. A continuación, se muestran los pasos y la evolución de la “célula d” de la oblea 3.

Durante el proceso se ha conseguido aumentar el espesor del contacto metálico desde los 100nm hasta los 3 micrómetros, lo cual supera incluso nuestras expectativas.

Uno de los beneficios de tener espesores más grandes es el de la reducción de la resistencia de contacto. Mas adelante veremos que tras repetir las medidas de resistencias después del recrecido, éstas disminuyen drásticamente.

La siguiente imagen muestra el aumento del espesor en la malla metálica. A la derecha la celda d tras el primer recrecido y a la izquierda la celda d tras el quinto recrecido.

Aumento del espesor de la malla metálica

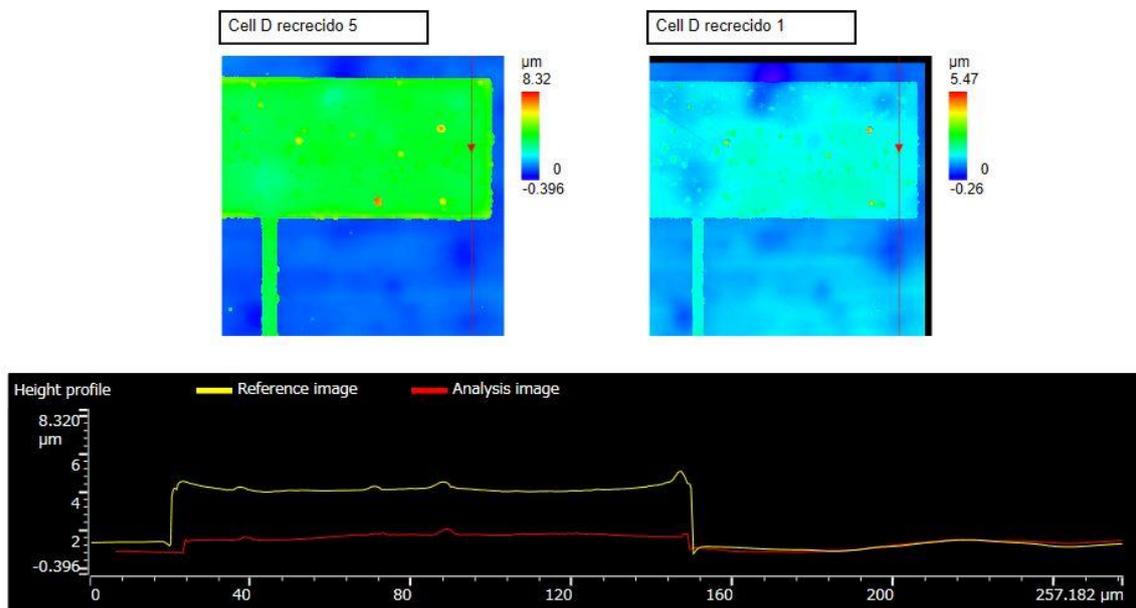


Figura 43. Aumento del espesor de la malla metálica, oblea 3, cell_d

8.2.8.3.1. Recrecimiento 1 (1mA 50' + 4mA 30')

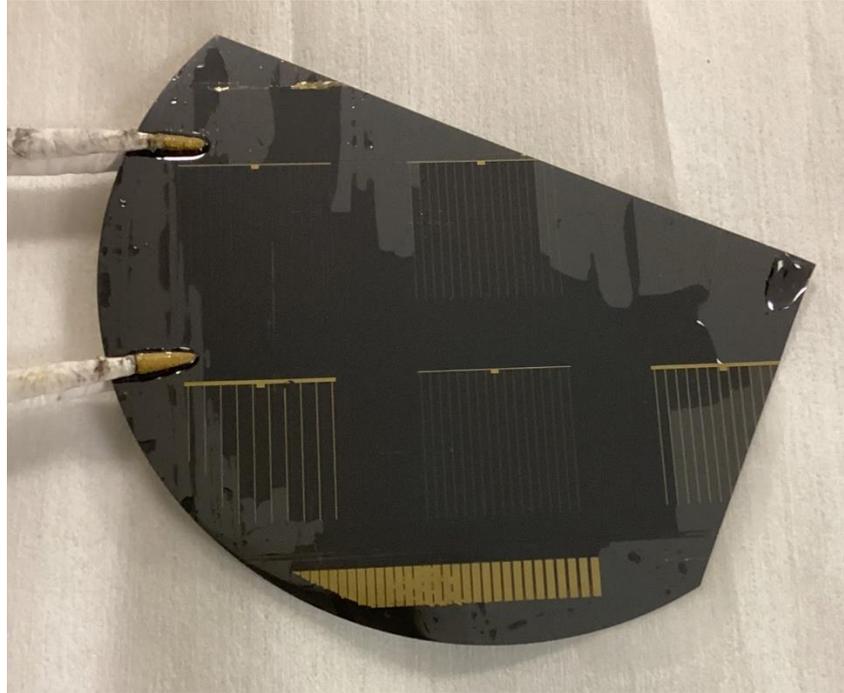
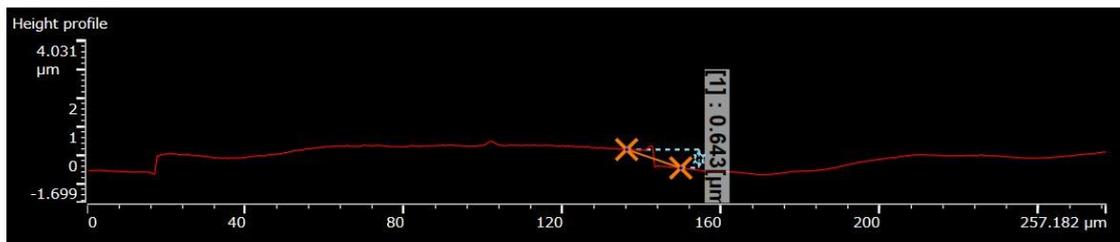
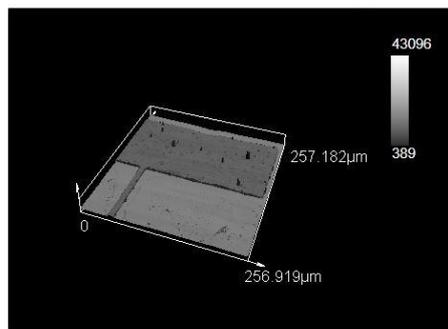
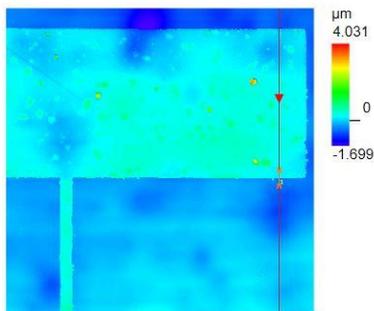


Figura 44. Oblea 3. Recrecimiento 1

En este punto se mide un espesor de 0,643 micrómetros.

Cell D (1mA 50' + 4mA 30')



No.	Result	Distance[µm]	Width[µm]	Height[µm]	Angle[°]
1		13.644	13.629	0.643	2.701

Figura 45. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 1

8.2.8.3.2. Recrecimiento 2 (4mA 30')

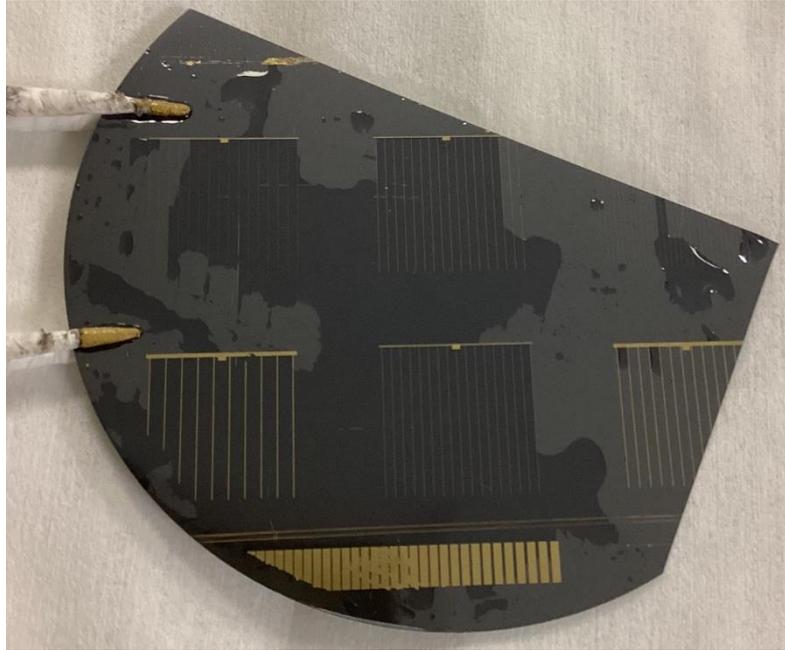
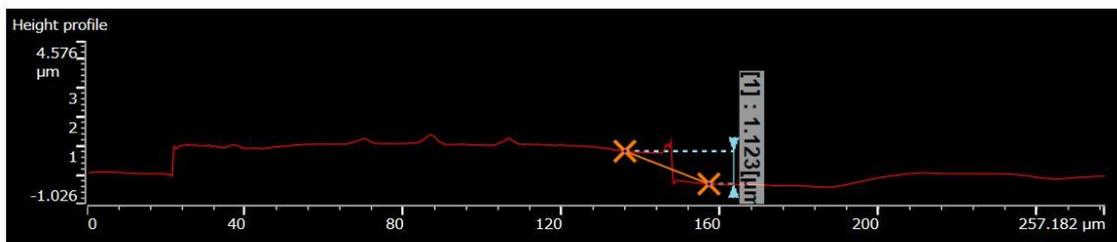
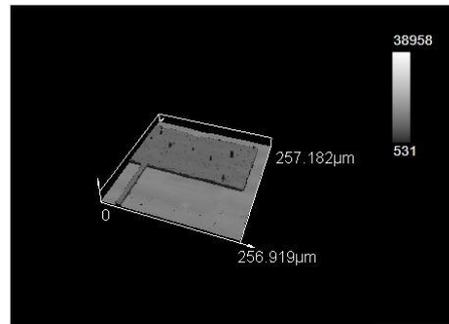
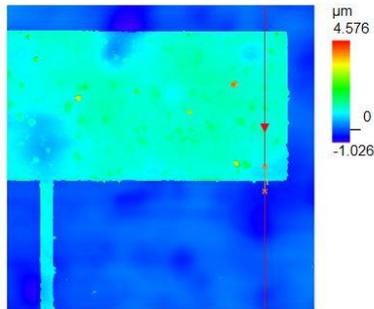


Figura 46. Oblea 3. Recrecimiento 2

En este punto se mide un espesor de 1,123 micrómetros.

Cell D (4mA 30')



No.	Result	Distance[μm]	Width[μm]	Height[μm]	Angle[°]
1		21.209	21.180	1.123	3.035

Figura 47. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 2

8.2.8.3.3. Recrecimiento 3 (5mA 30')

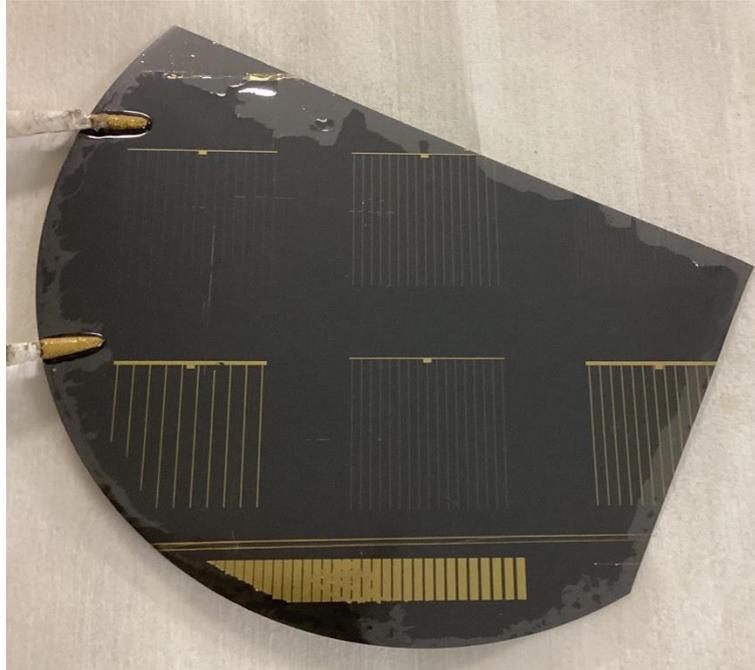
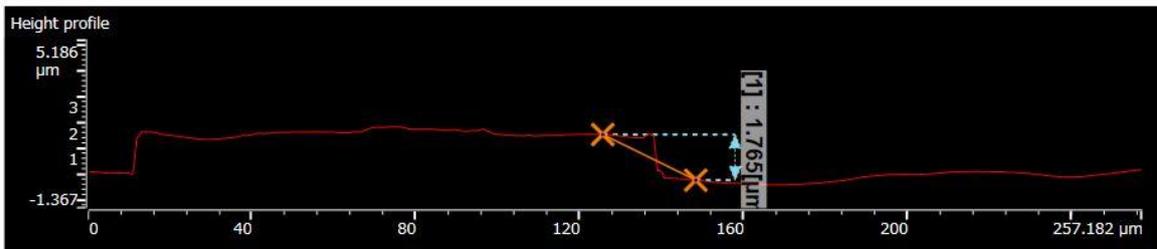
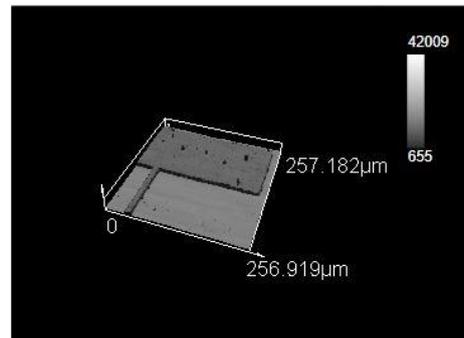
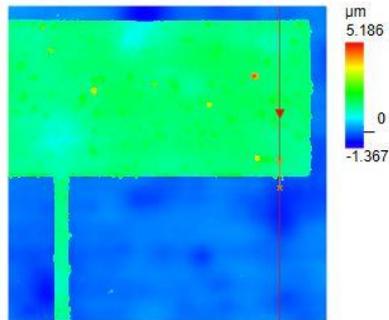


Figura 48. Oblea 3. Recrecimiento 3

En este punto se mide un espesor de 1,765 micrómetros.

Cell D (5mA 30')



No.	Result	Distance[μm]	Width[μm]	Height[μm]	Angle[°]
1		22.722	22.653	1.765	4.454

Figura 49. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 3

8.2.8.3.4. Recrecimiento 4 (6mA 30')

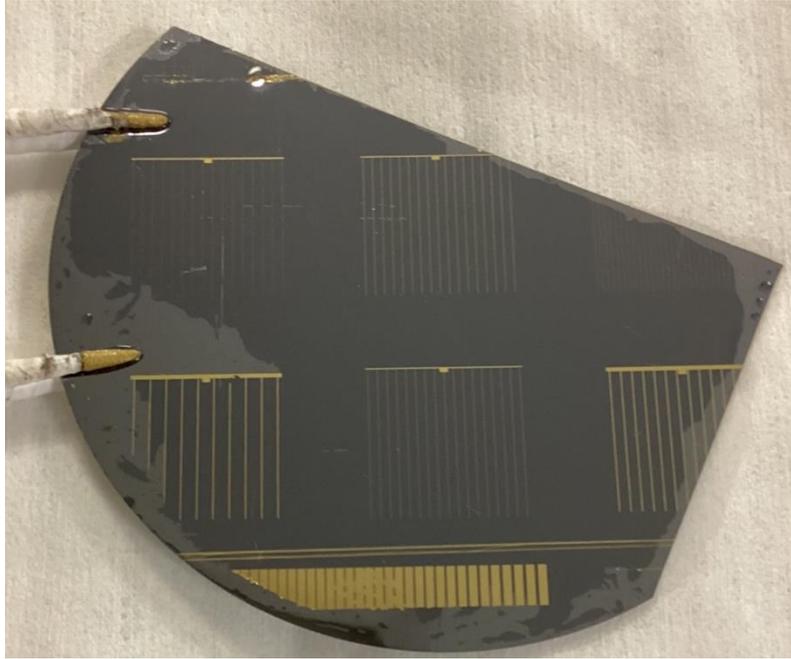


Figura 50. Oblea 3. Recrecimiento 4

En este punto se mide un espesor de 2,462 micrómetros.

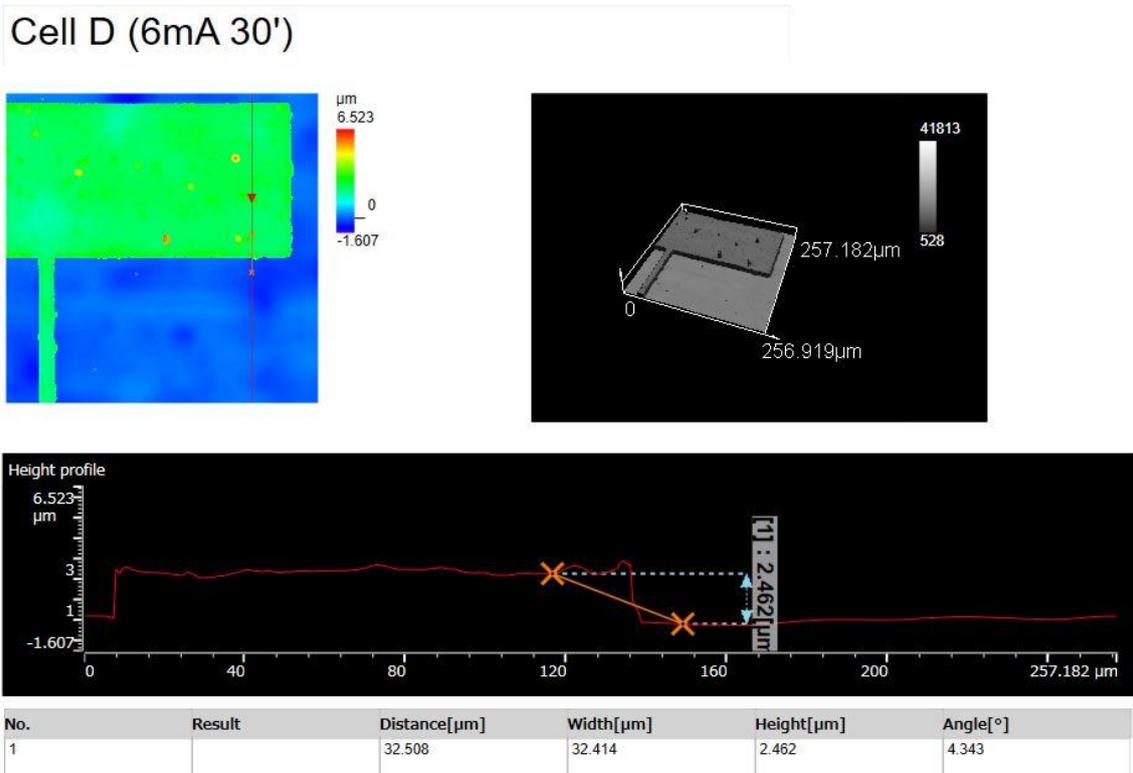


Figura 51. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 4

8.2.8.3.5. Recrecimiento 5 (6mA 10' + 7mA 20')

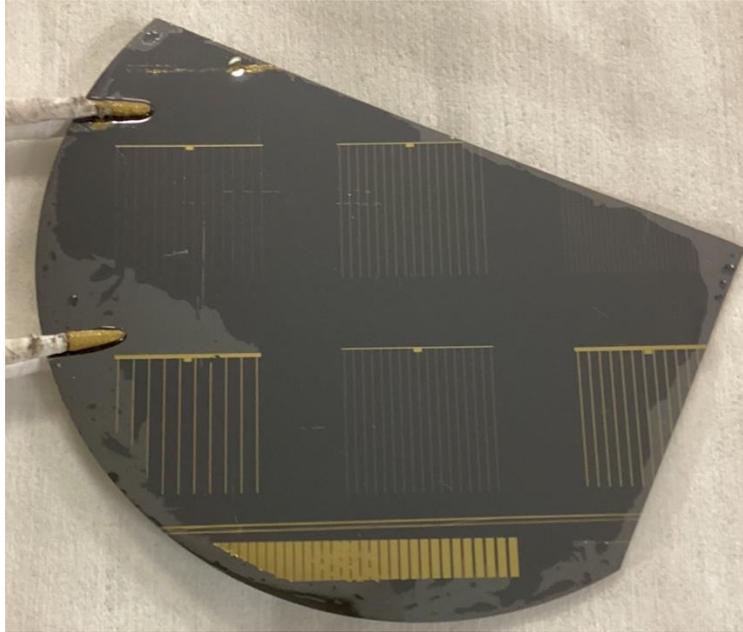


Figura 52. Oblea 3. Recrecimiento 5

Finalmente, en este punto se mide un espesor de 3,014 micrómetros.

Cell D (6mA 10' + 7mA 20')

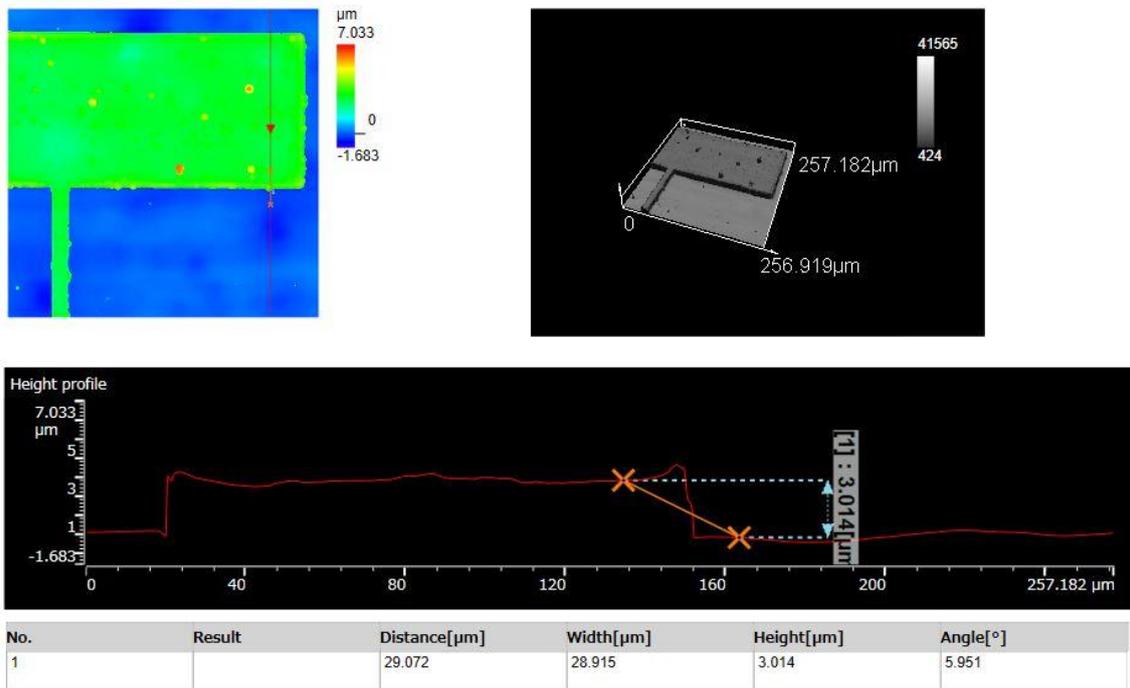


Figura 53. Espesor oblea 3 cell_d, recrecimiento 5

8.2.9. Resumen de fabricación

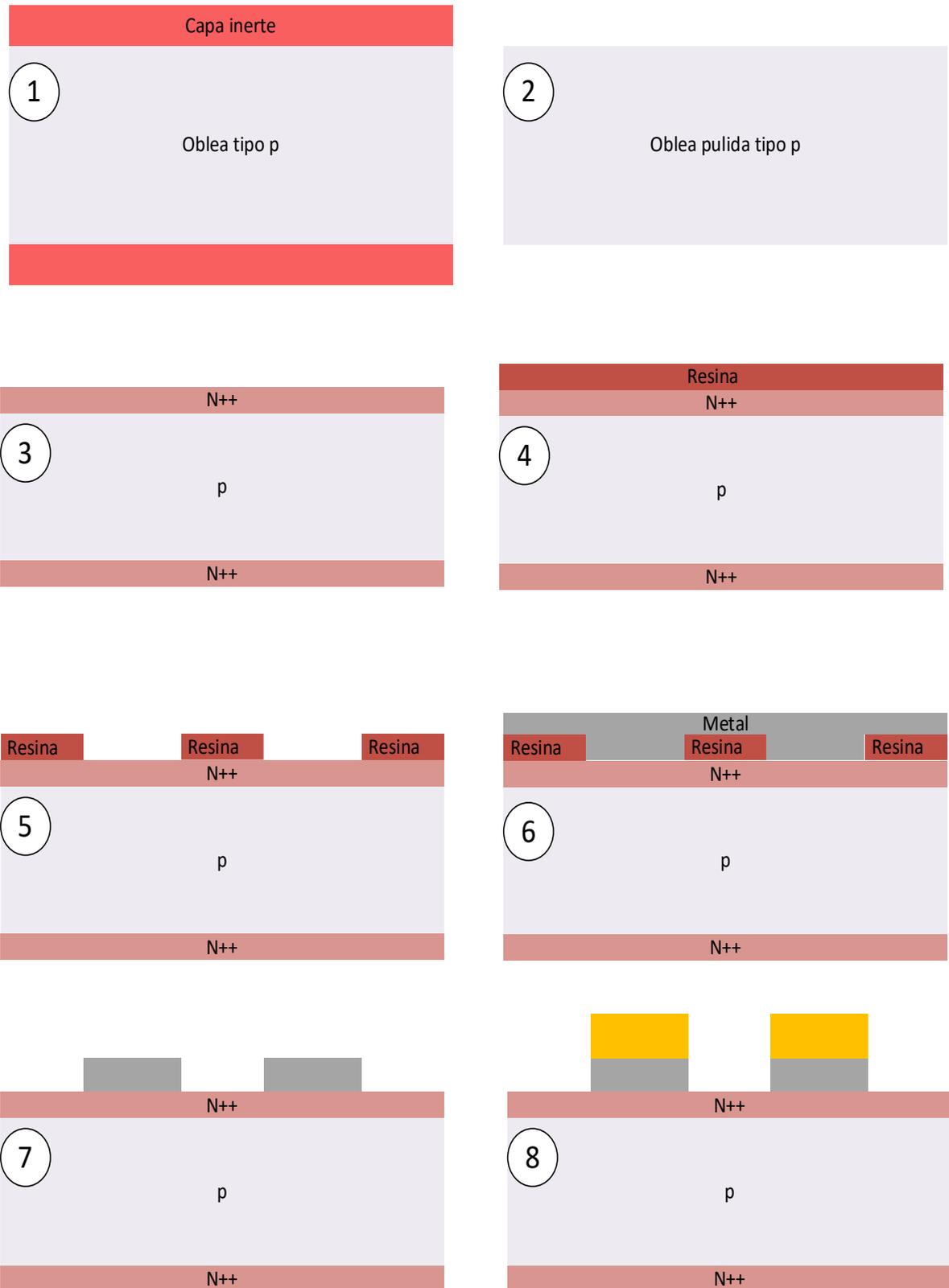


Figura 54. Resumen de fabricación

8.3. Caracterización

8.3.1. Medidor de cuatro puntas

La tecnología de medición de sonda de cuatro puntas (4PP) ha sido desarrollada hasta llegar a una técnica de metrología ampliamente utilizada en industrias de semiconductores con un rendimiento fiable y robusto desde que Valdés lo utilizó por primera vez para medir la resistividad de obleas de semiconductores en 1954 [18]. Los datos de resistencia de lámina (R_s) pueden relacionarse fácilmente con el espesor de la capa (t) y la resistividad (ρ) información siguiendo la siguiente ecuación:

$$R_s = \rho/t$$

El medidor de cuatro puntas proporciona datos sobre resistividad, espesor y uniformidad de las capas para la fabricación de dispositivos lógicos de potencia. Además, el medidor con el medidor de cuatro puntas es posible eliminar la resistencia parásita del dispositivo obteniéndose así una medida de mejor precisión.

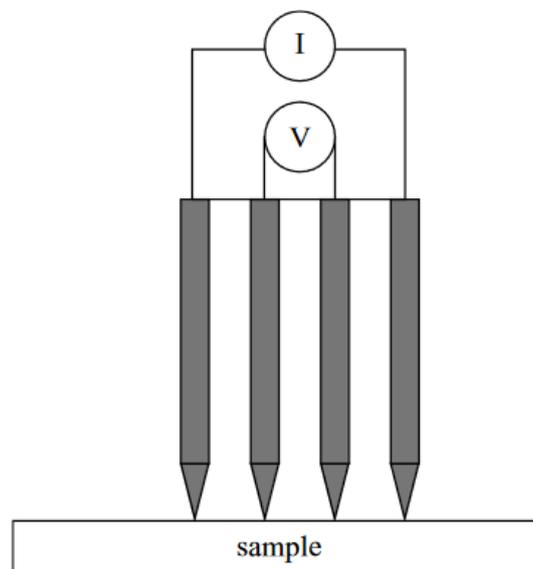


Figura 55. Medidor de cuatro puntas (4PP)

Si quisiéramos utilizar el medidor de cuatro puntas para medir la resistencia de línea de un bus recién metalizado, bastaría con apuntar a la zona que se quiere medir y colocar la punta del instrumento sobre esa zona. En ese momento, el dispositivo automáticamente nos mostrará el valor de la medida realizada. Sin embargo, apuntar sobre un dedo metálico con este instrumento es prácticamente imposible.

8.3.1.1. Ventajas

- Fácil de usar.
- Alta resolución y calidad de la medida realizada.
- Nos permitirá medir la resistividad de las obleas.

8.3.1.2. Desventajas

- Es útil para medir la resistencia de un punto concreto. Pero si se quiere medir la resistencia general de una zona, habría que realizar muchas más medidas. Estas medidas suelen desviarse de la medida original y reducen su fiabilidad.
- Es una medición semi-destructiva. Cuando pinchamos el metal con nuestras 4 puntas, el metal puede sufrir alteraciones y puede incluso desgastarse. Es importante realizar las medidas con cuidado.
- Dificultad para apuntar y medir más de una vez en un mismo punto.

Dicho esto, nos limitaremos a usar el medidor de cuatro puntas en la medida de la resistividad de la oblea, al principio del proceso de fabricación.

8.3.2. Modelado de línea de transmisión (TLM)

El modelado de líneas de transmisión (TLM) es una técnica de modelado numérico que creció rápidamente en popularidad. El modelado de línea de transmisión tiene aproximadamente 25 años, sin embargo, sus raíces se remontan a la década de 1940. El aumento del desarrollo en los últimos años se puede atribuir a desarrollos significativos en el poder de cómputo, dando lugar a áreas de aplicación que incluyen electromagnética, acústica, modelado térmico y modelado de circuitos eléctricos [23].

Como ya hemos dicho, la metalización es uno de los procesos más importantes en la producción de células solares. El contacto específico de la resistencia (ρ_c) es fundamental para la optimización del proceso y la investigación de alta eficiencia en células solares. Este parámetro revela la calidad del contacto óhmico metal-semiconductor [24]. Hay varios métodos para detectar el rendimiento de metalización de Célula solar, incluido el instrumento Corescan producido por ECN [24], fotoluminiscencia y electroluminiscencia. Los resultados medidos por los anteriores métodos realizan la medida de la resistencia en serie en su totalidad en lugar de únicamente la resistencia de contacto específica. La resistencia de contacto específica se suele detectar habitualmente usando el método TLM.

El primer paso para medir la resistencia de contacto de una unión metal-semiconductor es depositar el metal sobre el semiconductor y aplicarle una máscara que contenga alguna zona con pads idénticos separados por distancias variables. A continuación, se muestra un ejemplo del patrón.

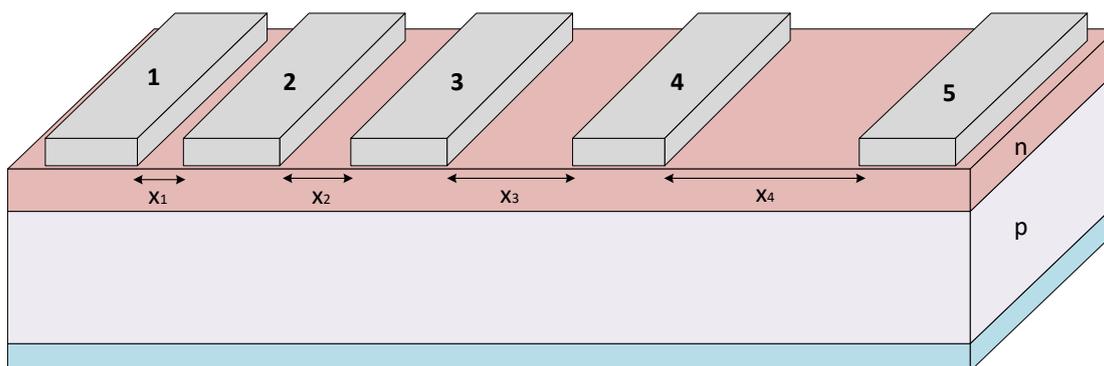


Figura 56. Ejemplo del patrón de metal. Pads idénticos separados a diferentes distancias

Las medidas realizadas son simples curvas IV que se hacen más fácilmente en una estación de sondeo utilizando un analizador de parámetros. A continuación, se aplica un voltaje entre varios pares de pads adyacentes en una fila y se mide la corriente. De ahí se calculará la resistencia; $R = V/I$.

Finalmente, como se puede ver en la siguiente figura, se representan las resistencias obtenidas en función de la distancia.

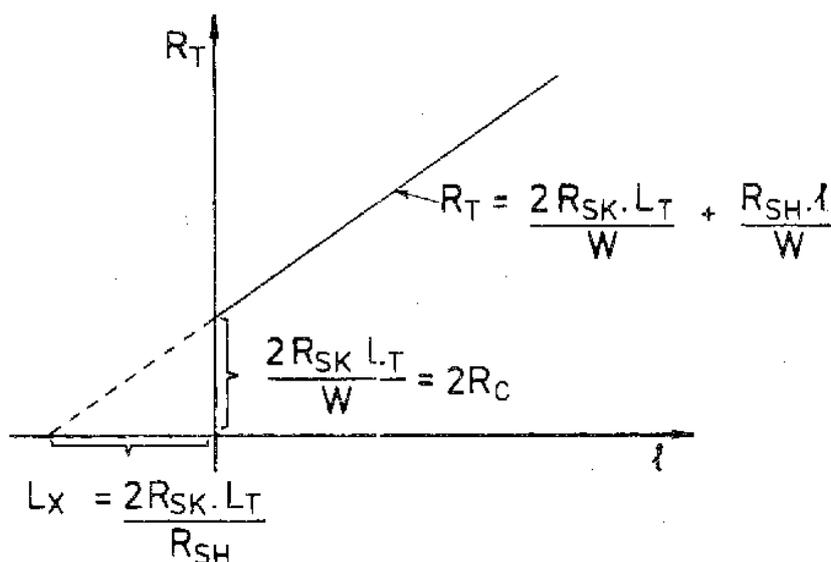


Figura 57. Ejemplo de una gráfica TLM

8.3.2.1. Ventajas

- Existe un alto conocimiento de la técnica. Además, ha habido una gran mejora en la calidad de los resultados estos últimos años. Un claro ejemplo de ello es el TLM circular [25].
- Técnica muy popular y aceptada en la comunidad científica.
- El patrón que se fotolitografiará en las obleas está específicamente diseñado para realizar medidas TLM.

8.3.2.2. Desventajas

- El TLM tradicional es una técnica que puede tomarnos más de 20 minutos fácilmente para realizar medidas en una única oblea. [24]
- Los micro manipuladores que se usan para pinchar en el metal pueden desgastar y reducir la calidad de la metalización.

Para la medición de las resistencias de contacto después del proceso de recocido, utilizaremos la técnica de TLM.

8.3.3. Metodología realizada en el laboratorio. “R back”

Existen varias estructuras de medición consideradas como tradicionales [18] [27-30]: La resistencia Kelvin de puente cruzado (CBKR), la resistencia de extremo de contacto (CER) y la resistencia de derivación de línea de transmisión (TLTR), con sus respectivas variaciones. Todos estos métodos consisten en construcciones planas en las que se inyecta una corriente desde el emisor al metal a través de dos contactos, mientras que la caída de tensión se mide con otros dos contactos. Dependiendo de la topología de la estructura es posible medir la resistencia delantera del contacto, la resistencia trasera o un valor promedio de ρ_c .

Todos los métodos indicados hasta ahora proporcionan resultados coherentes que dan una idea del grado de magnitud de la resistencia específica de contacto. Hace aproximadamente 20 años, se desarrolló en TiM una estructura de medición [26] en la que se combinan la medida de la resistencia superficial del emisor, la resistencia frontal del contacto y la resistencia trasera, evitando además la aparición de errores por desalineación mediante una sencilla técnica de auto alineación. Esta técnica será la utilizada para caracterizar las resistencias de contacto y de línea y es la que se detalla a continuación.

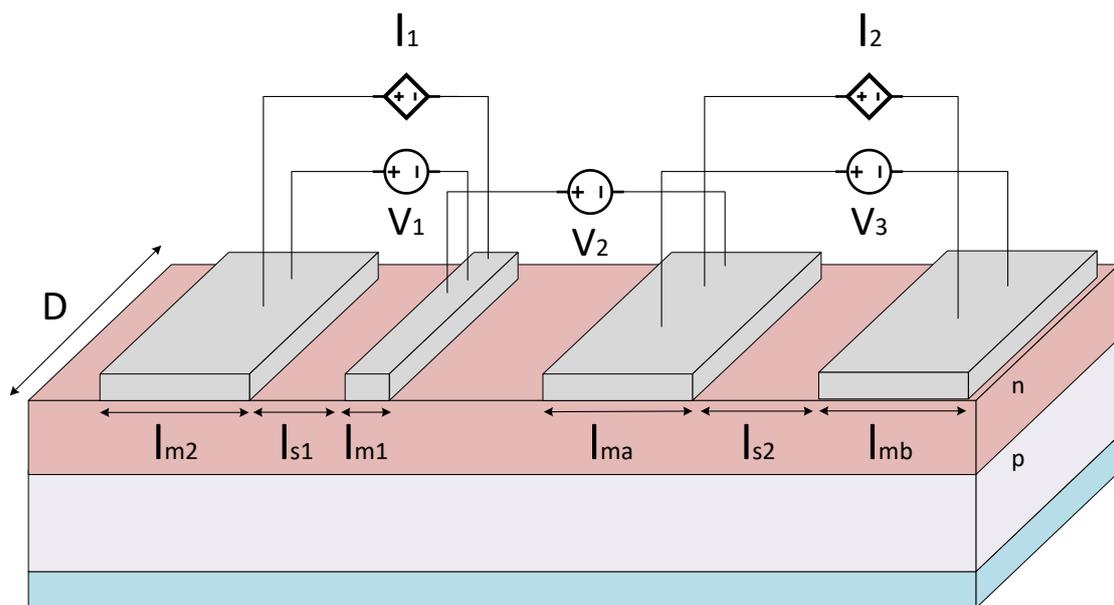


Figura 58. Estructura de medida “R back”

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad ; \quad R_2 = \frac{V_2}{I_1} \quad ; \quad R_3 = \frac{V_3}{I_2}$$

La estructura desarrollada tiene una simetría cruzada de modo que el voltaje bajo la metalización sigue la expresión:

$$\frac{d^2}{dx^2} = \frac{V}{l_t^2} \quad ; \quad l_t = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sm}}}$$

La resistencia frontal, definida como el cociente entre la diferencia de potencial entre la metalización y el emisor bajo el borde de la metalización, tiene la siguiente forma:

$$R_{cf} = \frac{R_{sm} \cdot l_t}{D \cdot \tanh \frac{d}{l_t}}$$

Por otra parte, la resistencia trasera se mide tomando la caída de potencial por debajo del otro borde de la metalización, por debajo del cual no hay paso de corriente:

$$R_{cb} = \frac{R_{sm} \cdot l_t}{D \cdot \sinh \frac{l_m}{l_t}}$$

Por ejemplo, para calcular R_1 siguiendo la estructura de la Figura 58, R_1 sería la suma de la resistencia de la línea metálica gruesa, la resistencia de la línea metálica fina y la resistencia del semiconductor entre ellas.

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{R_{sm1} \cdot l_{t1}}{D \cdot \tanh \frac{l_{m1}}{l_{t1}}} + \frac{R_{sm2} \cdot l_{t2}}{D \cdot \tanh \frac{l_{m2}}{l_{t2}}} + \frac{R_s \cdot l_{s1}}{D}$$

Por su parte, R_2 se debería únicamente por la influencia de la resistencia del semiconductor:

$$R_2 = \frac{V_2}{I_1} = \frac{R_{sm1} \cdot l_{t1}}{D \cdot \sinh \frac{l_{m1}}{l_{t1}}}$$

Y finalmente R_3 sería la resistencia total entre las dos líneas metálicas más la resistencia del semiconductor entre las líneas gruesas. La expresión quedaría de la siguiente manera:

$$R_3 = \frac{V_3}{I_2} = \frac{R_{sma} \cdot l_{ta}}{D \cdot \tanh \frac{l_{ma}}{l_{ta}}} + \frac{R_{smb} \cdot l_{tb}}{D \cdot \tanh \frac{l_{mb}}{l_{tb}}} + \frac{R_s \cdot l_{s2}}{D} \cong \frac{R_{s,max} \cdot I_{s2}}{D}$$

8.3.4. Caracterización de la resistencia de contacto en los pads después del recocido

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la resistencia medida en los pads de las 4 obleas de silicio después del recocido.

Tabla 7. Resistencias medidas con TLM en pads después del recocido

Número de Pad	R. Oblea 1 (Ω)	R. Oblea 2 (Ω)	R. Oblea 3 (Ω)	R. Oblea 4 (Ω)
2021	Aislado	20.508	Aislado	641.000
1920	Aislado	17.931	Aislado	739.240
1819	Aislado	Aislado	Aislado	9,285
1718	1.042.194	5.811	Aislado	11,913
1617	Aislado	10.465	Aislado	5,117
1516	Aislado	Aislado	Aislado	13,6
1415	123.505	Aislado	Aislado	8,16
1314	--	--	Aislado	--
1112	--	--	Aislado	--
1011	Aislado	Aislado	Aislado	4,06
910	--	Aislado	Aislado	5,49
89	--	--	Aislado	2,16
78	--	--	Aislado	6,75
67	--	--	Aislado	2,88
56	--	--	Aislado	1,72
45	--	--	Aislado	5,33

Como se puede apreciar, todas las obleas han obtenido unos resultados pésimos si tenemos en cuenta que un resultado óptimo se traduciría en una serie de resistencias que decrecen linealmente según reducimos la distancia entre los pads. O lo que es lo mismo, deberíamos obtener resultados más altos entre los pad 26-20 y valores más bajos para los pad 10-5. De esta caracterización no podemos extraer grandes conclusiones. Quizás lo único destacable de todo esto es que de entre todas las obleas metalizadas, la menos mala y salvable sería la número 4; la cual fue la que menos tiempo estuvo en el recocado.

Para contrastar los resultados obtenidos, se introdujeron la oblea 2 y 4 en un recocado a baja corriente.

Mientras que la oblea 2 no pudo recrecer debido a su alta resistencia de contacto, la oblea 4 pudo recrecer algo en los pads donde se midieron menores resistencias. En la siguiente imagen se puede apreciar las tres gamas de colores.

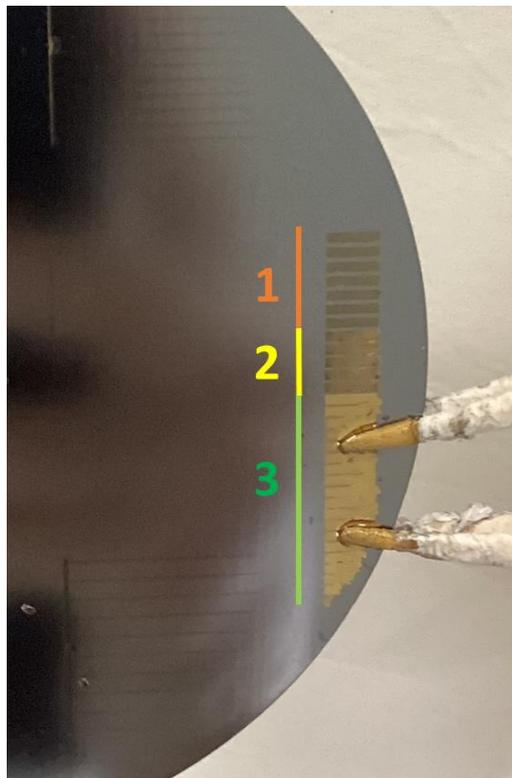


Figura 59. Recrecido en oblea 4

La región en naranja corresponde con los pads cuya resistencia de contacto es infinita, y por lo tanto no se puede recrecer. La región amarilla está compuesta por los pads cuya resistencia de contacto es muy mala. Finalmente, la región verde es la única que puede recrecer al haber obtenido unos valores bastante mejores en comparación con el resto de los pads. Llegados a este punto debemos empezar una nueva tanda de fabricación. (Ver apartado 8.2.8).

8.3.5. Medidas de resistencias de contacto después del recocido de la tanda 315, TLM

Como se puede ver en la siguiente gráfica, en general, la resistencia de contacto de la oblea 1 es muy superior a las de las obleas 2, 3 y 4. Esto se debe a que al parecer la oblea 1 tenía defectos de fábrica. De hecho, la fabricación de la oblea 1 fue defectuosa desde el principio. Este es el resultado de las resistencias de medidas por TLM.

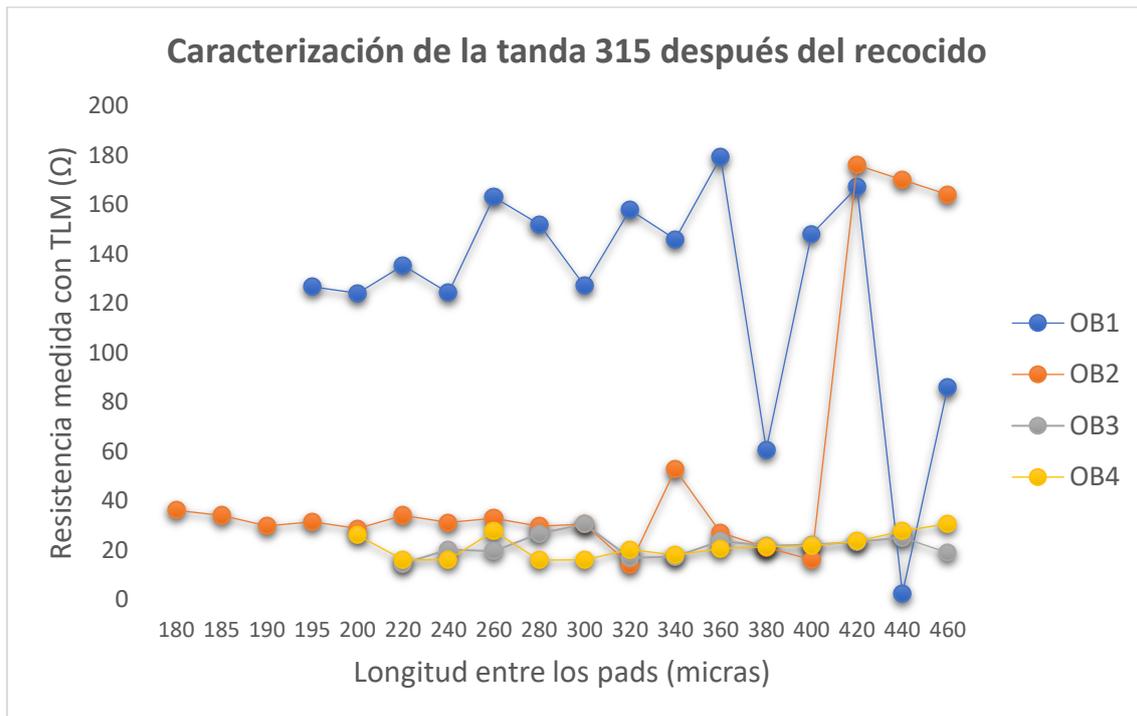


Figura 60. Caracterización de la tanda 315 después del recocido. TLM

En la tanda 315 los resultados son inmensamente mejores que en la anterior prueba. Recordemos que en la anterior tanda obtuvimos resistencias de contacto del orden de los kΩ, ahora los resultados bajan hasta los 20Ω en algunos casos. A pesar de haber mejorado los resultados drásticamente, siguen siendo valores relativamente malos.

De esta gráfica también podemos decir concluir que, aunque 15 y 30 minutos no tienen por qué ser los tiempos definitivos para un buen recocido, sí que son mucho mejores que en la tanda anterior.

8.3.6. Medidas de resistencias de contacto después del recocido de la tanda 315. Metodología realizada en el laboratorio, "R back"

En cuanto a las medidas realizadas mediante la metodología realizada en el laboratorio se han obtenido resistencias de contacto como máximo de $\rho_{c(max)} = 3 \Omega \cdot cm^2$ y mínimo $\rho_{c(min)} = 0,138 \Omega \cdot cm^2$. Sin embargo, un valor estándar para las resistencias de contacto de obleas comerciales $\rho_{c(comerciales)} = 5 m \Omega \cdot cm^2$, es decir, unas 26 veces menor a nuestras obleas.

8.3.7. Medidas de resistencias de contacto después del recrecimiento de la tanda 315. Metodología realizada en el laboratorio, “R back”

El cálculo de la resistencia de contacto final se desarrolla de la siguiente manera:

$$\frac{V}{I} = \frac{R_{sm} l_t}{D \sinh h \cdot \frac{l_m}{l_t}} \rightarrow \frac{V}{I} = \frac{R_{sm} l_m}{D \sinh \frac{l_m}{l_t} \cdot \frac{l_m}{l_t}} ; \quad x = \frac{l_m}{l_t} \rightarrow$$

$$\frac{V}{I} = \frac{R_{sm} l_m}{D \sinh x \cdot x} \rightarrow x \sinh x = \frac{R_{sm} l_m}{D \cdot \frac{V}{I}} \rightarrow x \sinh x \approx \frac{x}{2} \exp(x) \rightarrow$$

Llegamos a dos expresiones que requieren de iteraciones para ser resueltas.

$$x^k = \ln \frac{R_{sm} l_m \cdot 2}{D \cdot \frac{V}{I}} ; \quad x^{k+1} = \ln \frac{\frac{R_{sm} l_m}{D \cdot \frac{V}{I}}}{x^k}$$

En nuestro caso para los valores de: $R_{sm} = 35 \Omega/\square$, $l_m = 25 \mu m$, $D = 1 \text{ cm}$ y el valor medido $\frac{V}{I} = 0,11$ con $x = \frac{l_m}{l_t} = 0,75$, despejamos el valor de la longitud de transferencia.

$$l_t = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sm}}} = 3,33 \cdot 10^{-3} \rightarrow \rho_c = 0,388 \text{ m} \Omega \cdot \text{cm}^2$$

De esta forma se obtiene un valor de resistencia de contacto mejor incluso que las células comerciales más avanzadas terrestres. Aproximadamente 10 veces mejor.

9. Metodología seguida en el proyecto

En este apartado se va a explicar el desarrollo de la metodología que se ha seguido durante el desarrollo del proyecto. Para ser exactos, primero se van a dar detalles del grupo de trabajo y de los recursos que son necesarios y seguidamente se va a proporcionar una pequeña descripción de las diferentes fases y tareas realizadas durante todo el proceso del trabajo.

9.1. Grupo de trabajo

El grupo de trabajo que ha formado parte en la realización de este proyecto es el siguiente:

Tabla 8. Grupo de trabajo

Nombre	Puesto	Misión
Gaizka Begoña González	Estudiante de máster	Realizar lo propuesto por el director y redactar el documento del proyecto
Juan Carlos Jimeno Cuesta	Director de proyecto	Determinar los objetivos, dirigir y corregir el proyecto

9.2. Recursos

Para el desarrollo del proyecto, es necesario planificar la elección de recursos, ya que, sin ellos, no podría llevarse a cabo el desarrollo del mismo. Los recursos materiales que han sido utilizados en este proyecto son los siguientes:

Tabla 9. Recursos

Material
Ordenador
Gases
Hornos de difusión y recocido

Obleas de silicio y Arseniuro de Galio
Microscopio
Micro manipuladores
Disoluciones químicas
Campana evaporadora
Lámpara de Xenon

9.3. Tareas y recursos del trabajo

El proyecto se puede organizar en 6 paquetes de trabajo cada uno con las siguientes tareas:

Tabla 10. Listado de tareas

Paquete de trabajo	Tarea	Duración	Comienzo	Fin	Recursos
1	Definición del proyecto	2 días	01/02/23	02/02/23	
1.1	Definición de los objetivos	2 días	01/02/23	02/02/23	Ordenador
1.2	Definición de las tareas	2 días	01/02/23	02/02/23	Ordenador
1.3	Establecer los medios necesarios	2 días	01/02/23	02/02/23	Ordenador
2	Estudio inicial	22 días	03/02/23	06/03/23	
2.1	Estudio de la resistencia de línea y de contacto	7 días	03/02/23	13/02/23	Ordenador

2.2	Estudio de las técnicas de metalización	7 días	14/02/23	22/02/23	Ordenador
2.3	Estudio de las técnicas de medida de las resistencias	8 días	23/02/23	06/03/23	Ordenador
3	Diseño	14 días	07/03/23	24/03/23	
3.1	Diseño del excel de la malla metálica	2 sem.	07/03/23	20/03/23	Ordenador, Excel
3.2	Optimización del diseño de la malla metálica	4 días	21/03/23	24/03/23	Ordenador, Excel
4	Fabricación	35 días	07/03/23	17/04/23	
4.1	Predifusión	7 días	07/03/23	15/03/23	Horno de cuarzo
4.2	Decapado y RCA	1 día	16/03/23	16/03/23	Disoluciones químicas, baños químicos
4.3	Difusión	1 día	16/03/23	16/03/23	Horno de cuarzo
4.4	Litografía	2 días	17/03/23	20/03/23	Lámpara de Xénon, Resina
4.5	Metalización	2 días	21/03/23	22/03/23	Campana evaporadora, lingotes de metal
4.6	Limpieza	2 días	23/03/23	24/03/23	Acetona
4.7	Recocido	2 días	27/03/23	28/03/23	Horno de cuarzo
4.8	Recrecimiento	14 días	29/03/23	17/04/23	Concentrado de oro, máquina

					para electrodeposición
5	Caracterización	41 días	17/03/23	05/05/23	
5.1	Resistividad post difusión	1 día	17/03/23	17/03/23	Medidor 4 puntas
5.2	TLM resistencias contacto y resistencias de línea	4 días	23/03/23	28/03/23	Microscopio, micromanipuladores, polímetros, Excel, fuente de alimentación
5.3	Caracterización final resistencias de contacto y de línea	14 días	18/04/23	05/05/23	Microscopio, micromanipuladores, polímetros, Excel, fuente de alimentación
6	Documentación	76 días	01/02/23	17/05/23	
6.1	Estructura	1 día	01/02/23	01/02/23	Ordenador
6.2	Redacción de la memoria	76 días	01/02/23	17/05/23	Ordenador, Word

9.4. Diagrama Gantt

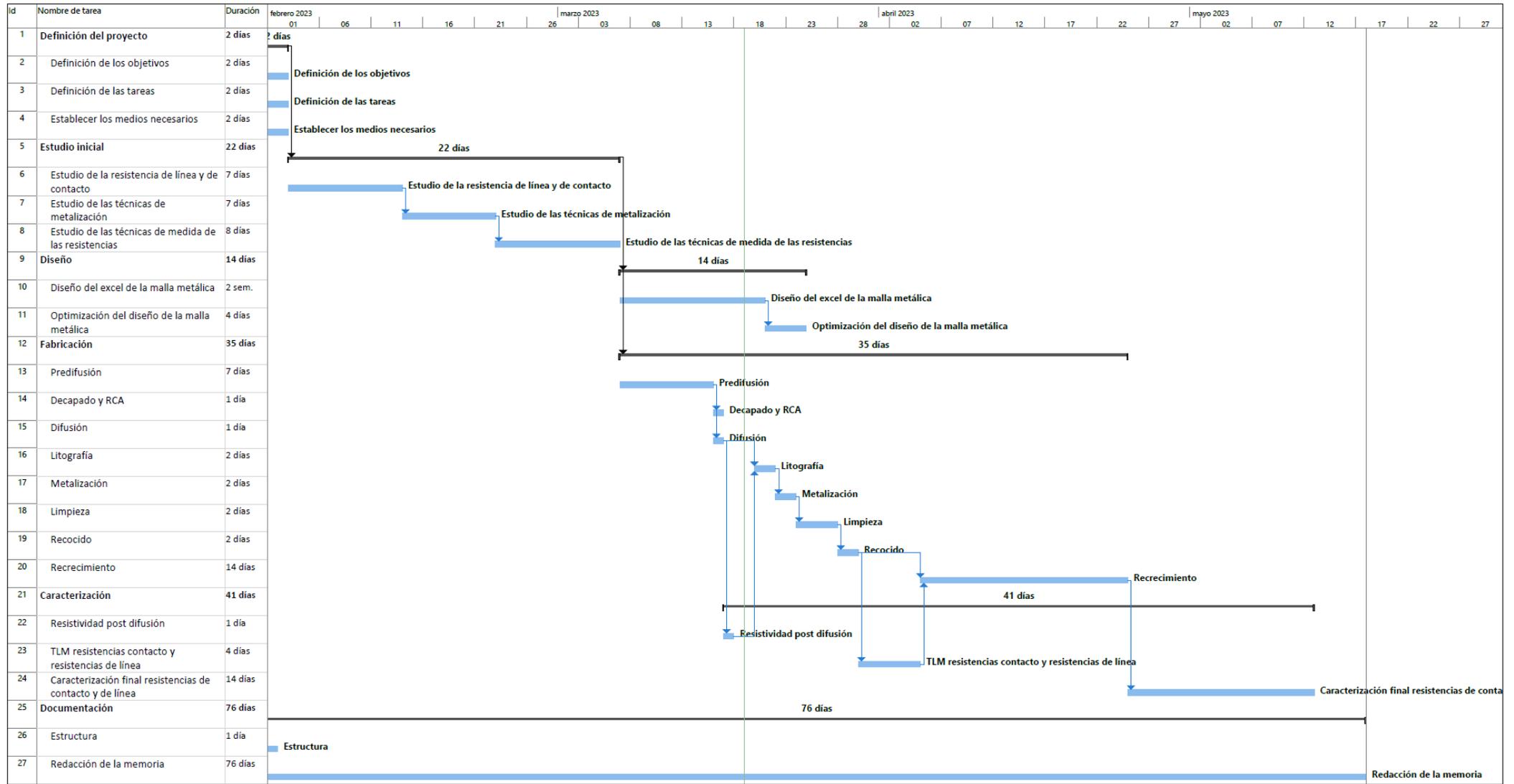


Figura 61. Diagrama Gantt del proyecto

10. Presupuesto

El presupuesto de este Trabajo Fin de Máster se divide en tres partidas:

- Amortizaciones: se indicarán los gastos correspondientes a aquellos equipos que se usan en este trabajo pero que van a poder usarse en trabajos futuros.
- Horas internas: corresponde al gasto que suponen las personas que trabajan en el proyecto por las horas que le dedican al mismo.
- Gastos: se incluirán aquellos gastos que se realizan para este proyecto exclusivamente.

10.1. Amortizaciones

Tabla 11. Amortizaciones

Recursos	Precio unitario (€)	N.º de unidades	Vida útil (horas)	Uso (horas)	Coste total (€)
Licencia Microsoft Office	80	1	1500	250	13,33
Portátil Huawei	925	1	40.000	500	11,56
Campana evaporadora	60.000	1	116.800	2.555	1.312,5
Microscopio Olympus	120.000	1	67.520	50	88,86
Lámpara de litografía	45.000	1	153.300	40	11,74
Hornos de cuarzo	7.500	2	87.600	5.110	875
				Subtotal	2.313

10.2. Horas internas

Tabla 12. Horas internas

Puesto	N.º de horas (h)	Coste (€/h)	Coste total (€)
Ingeniero Junior	600	20	12.000
Director	100	50	5.000
		Subtotal	17.000

10.3. Gastos

Tabla 13. Gastos

Concepto	Coste total (€)
Material de oficina	15
Gases	800
Productos químicos	300
Metales	175
Obleas	120
Subtotal	1.410

10.4. Resumen

Tabla 14. Presupuesto total

Partida	Coste total (€)
Amortizaciones	2.313
Horas internas	17.000
Gastos	1.410
Total	20.723

11. Conclusiones

Después de la caracterización de las obleas de la primera tanda se concluye que es obligatorio realizar una difusión en fósforo para garantizar una buena calidad en el contacto metálico.

Por otra parte, hemos visto que mediante TLM no es posible obtener los valores de la resistencia de contacto de forma precisa, sin embargo, sí que es útil como aproximación.

Finalmente destacar que el tiempo que deben estar las obleas de silicio en el recocido debe ser de entre 15 y 30 minutos.

Dicho todo esto, podemos decir que el trabajo ha sido un éxito. Además de haber realizado un primer diseño del contacto metálico, se han conseguido fabricar satisfactoriamente obleas de silicio y de arseniuro de galio en las que se han medido valores de resistencias de contacto muy pequeñas.

12. Bibliografía

- [1] Zhuang T, Wang Y, Wang X-F. Chlorophyll-derived, cyclic tetrapyrrole-based purpurins as efficient near-infrared-absorption donor materials for dye-sensitized and organic solar cells. En: High-Efficiency Solar Cells. Cham: Springer International Publishing; 2014. p. 319-55.
- [2] Tecnología de células fotovoltaicas de unión múltiple – HiSoUR Arte Cultura Historia [Internet]. Hisour.com. [citado 14 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.hisour.com/es/multi-junction-photovoltaic-cell-technology-39624/>
- [3] Kohler B. Insolight bringt die Sonne auf den Punkt [Internet]. SSES. 2020 [citado 14 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.sses.ch/de/insolight-bringt-die-sonne-auf-den-punkt/>
- [4] Iles P. Evolution of space solar cells. Sol Energy Mater Sol Cells [Internet]. 2001;68(1):1-13.
- [5] Cárdeno JCV. CÉLULAS SOLARES para Aplicaciones Espaciales [Internet]. ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD | Web Project Office. Alter Technology Group; 2018 [citado 14 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://wpo-altertechnology.com/es/celulas-solares/>
- [6] NASA - NSSDCA - Spacecraft - Details [Internet]. Nasa.gov. [citado 14 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1958-002B>
- [7] Europa Press. 2021 bate todos los récords de lanzamiento de satélites. 2021 [citado 14 de mayo de 2023]; 12. Disponible en: <https://www.europapress.es/ciencia/misiones-espaciales/noticia-2021-bate-todos-records-lanzamiento-satelites-20210920170946.html>
- [8] Holgado R. Elon Musk tiene permiso para lanzar otros 7.500 satélites Starlink a nuestra órbita baja [Internet]. 20bits. 2022 [citado 14 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.20minutos.es/tecnologia/actualidad/elon-musk-tiene-permiso-para-lanzar-otros-7-500-satelites-starlink-a-nuestra-orbita-baja-5082183/>
- [9] Li Z, Chen R, Yao Y, Zhang W, Wang X, Perez-Wurfl I, et al. Patterning and metallization of silicon solar cells by inkjet-printed functional ink on a photoresist layer. En: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE; 2014.
- [10] Weiner EC, Micha DN, Jakomin R, Pinto LD, Pires MP, Souza PL. Improving the figures of merit of intermediate band solar cells by controlling the capping procedure of the quantum dots. En: 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE; 2016.

- [11] Jeong MS, Min KH, Choi S, Kang MG, Jeong KT, Lee ET, et al. Correlation between the open-circuit voltage and recombination loss at metal-silicon interfaces of crystalline silicon solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* [Internet]. 2020;210(110519):110519.
- [12] Jorge Martín. (2014). Metalización de células solares y tecnología inkjet printing. Tesis doctoral.
- [13] Federico Recart. (2001). Evaluación de la serigrafía como técnica de metalización para células solares eficientes. Tesis doctoral.
- [14] Gabor AM, Gregory G, Payne AM, Janoch R, Anselmo A, Yelundur V, et al. Dependence of solar cell contact resistivity measurements on sample preparation methods. En: 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE; 2016.
- [15] Albert G. Baca and Carol I.H Ashby. (2005). Sandia National Laboratories, New Mexico, USA. Fabrication of GaAs Devices. Pag 215.
- [16] Loulou M, Turkestan MKA, Brahmi N, Abdelkrim M. Current dependence of series and shunt resistances of solar cells. En: 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC). IEEE; 2018.
- [17] Ebong A, Chen N. Metallization of crystalline silicon solar cells: A review. En: High-Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies. IEEE; 2012.
- [18] Ye Q, Cui J, Yu L, Shapoval T, Flach F, Haupt R, et al. Highly-stable four-point-probe metrology in implant and epitaxy processes. En: 25th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC 2014). IEEE; 2014.
- [18] Meier DL, Schroder DK. Contact resistance: Its measurement and relative importance to power loss in a solar cell. *IEEE Trans Electron Devices* [Internet]. 1984;31(5):647-53.
- [19] Juan Carlos Jimeno Cuesta. (1995). Metalización serigráfica de células solares. Pag 37.
- [20] G. Schubert, J. Hoornstra, G. Beaucarne, “Metallization Trends for cell manufacturing”, Photon’s 4th PV Production Equipment Conference, Munich, March 2009.
- [21] H. B. Serreze, «Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations», 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Washington, D.C., USA, pp. 1-8, 1978.
- [22] Utpadl Gangopadhyay, Kyunghae Kim, Prabir Kanti Basu, Suresh Kumar Dhungel, Sungwook Jung, Junsin Yi. Front Surface Grid Design for High Efficiency Solar Cells. *Transactions on Electrical and electronic Materials*, Vol 6, No 2, (2005).

- [23] Duffy AP. Transmission-line modelling (TLM) as a high frequency numerical modelling tool. En: IEE Colloquium on High Frequency Electromagnetic Modelling Techniques. IEE; 1995.
- [24] Zeng F, Feng Y, Liang Z, Shen H. Specific contact resistance measurements on C-Si solar cells by novel TLM method. En: 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE; 2012.
- [25] Reeves GK. Specific contact resistance using a circular transmission line model. Solid State Electron [Internet]. 1980;23(5):487-90.
- [26] G. Bueno, F. Recart, J.C. Jimeno, R. Gutierrez, F. Hernando. Universidad del País Vasco. Assessment of Contact Resistance in Screen-printed metallisations. 14th European photovoltaic solar energy conference. Barcelona. Spain. (1997)
- [27] Loh WM, Swirhun SE, Schreyer TA, Swanson RM, Saraswat KC. Modeling and measurement of contact resistances. IEEE Trans Electron Devices [Internet]. 1987;34(3):512-24. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1486668>
- [28] Gillenwater RL, Hafich MJ, Robinson GY. The effect of lateral current spreading on the specific contact resistivity in D-resistor Kelvin devices. IEEE Trans Electron Devices [Internet]. 1987;34(3):537-43. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1486671>
- [29] Stavitski N, Klootwijk JH, Van Zeijl HW, Boksteen BK, Kovalgin AY, Wolters RAM. N. Stavitski, Student Member, IEEE, J.H. Klootwijk, Member, IEEE [Internet]. Utwente.nl. [citado 14 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/5463631/stavitski.pdf>
- [30] Scorzoni A, Finetti M, Grahn K, Suni I, Cappelletti P. Current crowding and misalignment effects as sources of error in contact resistivity measurements—Part I: Computer simulation of conventional CER and CKR structures. IEEE Trans Electron Devices [Internet]. 1987;34(3):525-31. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1486669>