

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**Implementación de un sistema de medición
de resistividad eléctrica en películas delgadas
semiconductoras por el método de Van der
Pauw**

Tesis para optar el grado de Magister en Física

AUTOR

Luis Angel Conde Mendoza

ASESOR

Roland Weingärtner

JURADO

Dr. Amaru Töfflinger

MSc. Andrés Guerra

LIMA-PERÚ
2017



A mis padres



Agradecimientos

Deseo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Concytec) por el financiamiento en estos dos años y a la doctora María Elena López por su confianza y su apoyo de permitirme participar en este programa de maestría.

Al MSc. Andres Guerra y al Dr. Amaru Toefflinger por su asesoría y consejos durante el desarrollo del proyecto.

Al profesor Francisco Rumiche y Vanessa Estrada de la maestría de ciencia de los materiales por el préstamo de sus equipos y accesorios.

A mis compañeros de laboratorio Carlos, Jorge, Luis, y Paul por su ayuda en la obtención de muestras y por los años que compartimos en la maestría.

Resumen

La resistividad eléctrica es una propiedad física intrínseca e independiente del tamaño o forma de un material, que nos da información acerca de cómo se comporta el material al paso de la corriente eléctrica. Por el valor de la resistividad de un material, se le puede clasificar como conductor, semiconductor o aislante.[1]

En la presente tesis se realiza el estudio de la resistividad eléctrica en los semiconductores, los métodos de medición de resistividad, los factores de corrección que se deben tener en cuenta para una medición más precisa y los detalles de la implementación de un sistema de medición de resistividad por el método de Van der Pauw.

El método de Van der Pauw se puede utilizar para medir la resistividad de materiales en forma de películas delgadas sin importar la forma del material, consiste en hacer fluir una corriente constante por dos puntos en la periferia y se mide el voltaje en otros dos puntos. Con los datos obtenidos se resuelve la ecuación de Van der Pauw y se obtiene la resistividad.

Finalmente, se presentan las resultados de las medidas de resistividad para muestras cuadradas de silicio de alto dopaje, y además se hace un estudio de los resultados obtenidos cuando la medición se hace en contactos sobre el área superficial de la muestra, incumpliendo la condición de usar contactos en la periferia, y los efectos que esto conlleva.

Abstract

The electrical resistivity is an intrinsic property independent of the size or shape of a material, which gives us information about how the material behaves at the rate of electric current. For the value of the resistivity of a material, it can be classified as conductor, semiconductor or insulation.[1]

In this thesis will be done the study of the electrical resistivity in the semiconductors, the methods of measurement of resistivity, the correction factors that are very important for a more accurate measurement and the details of the implementation of a measurement system of resistivity by the Van der Pauw method.

The Van der Pauw method can be used to measure the resistivity of materials in the form of thin films regardless of the shape of the material. It consists of flowing a constant current through two points at the periphery and measuring the voltage at two other points. With the data obtained the Van der Pauw equation is solved and the resistivity is obtained.

Finally, we present the results of the resistivity measurements for square samples of high doping silicon, and also a study of the results obtained when the measurement is made in contacts on the surface area of the sample, failing to use contacts in the periphery, and the effects that this entails.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	2
2.1. Resistividad	2
2.2. Materiales semiconductores	5
2.2.1. Semiconductor intrínseco	5
2.2.2. Semiconductor extrínseco	8
2.2.3. Resistividad en un semiconductor	10
2.2.4. Unión metal-semiconductor	13
2.3. Métodos de medición de la resistividad	16
2.3.1. Método de los cuatro puntos	16
2.3.2. Factores de corrección	20
2.3.2.1. Factor de corrección G	20
2.3.2.2. Factor de corrección C	21
2.3.2.3. Factor de corrección K	23
2.3.3. Método de Van der Pauw	25
3. Detalles experimentales	31
3.1. Método experimental	31
3.2. Implementación del sistema	35
3.2.1. Sistema 1	35
3.2.1.1. Equipamiento y accesorios	35
3.2.1.2. Diagrama de bloques	36
3.2.1.3. Circuito conmutador	37

3.2.1.4.	Panel de control	39
3.2.2.	Sistema 2	41
3.2.2.1.	Equipamiento	41
3.2.2.2.	Diagrama de bloques	42
3.2.2.3.	Circuito conmutador	43
3.2.2.4.	Panel de control	44
3.2.3.	Prueba de medición	46
3.3.	Preparación de la muestra	47
3.3.1.	Corte y limpieza de las muestras	47
3.3.2.	Deposición de contactos	48
3.3.3.	Tratamiento térmico	49
4.	Resultados y discusión	50
4.1.	Caracterización de contactos	50
4.1.1.	Silicio tipo-p de bajo dopaje	51
4.1.2.	Silicio tipo-n de bajo dopaje	54
4.2.	Medidas de resistividad	57
4.2.1.	Silicio tipo-p de bajo dopaje	57
4.2.1.1.	En los vértices	57
4.2.1.2.	En los lados	57
4.2.2.	Silicio tipo-n de bajo dopaje	58
4.2.2.1.	En los vértices	58
4.3.	Efectos de las medidas sobre la superficie de la muestra	59
4.3.1.	Silicio tipo-p de bajo dopaje	60
4.3.2.	Silicio tipo-n de bajo dopaje	63

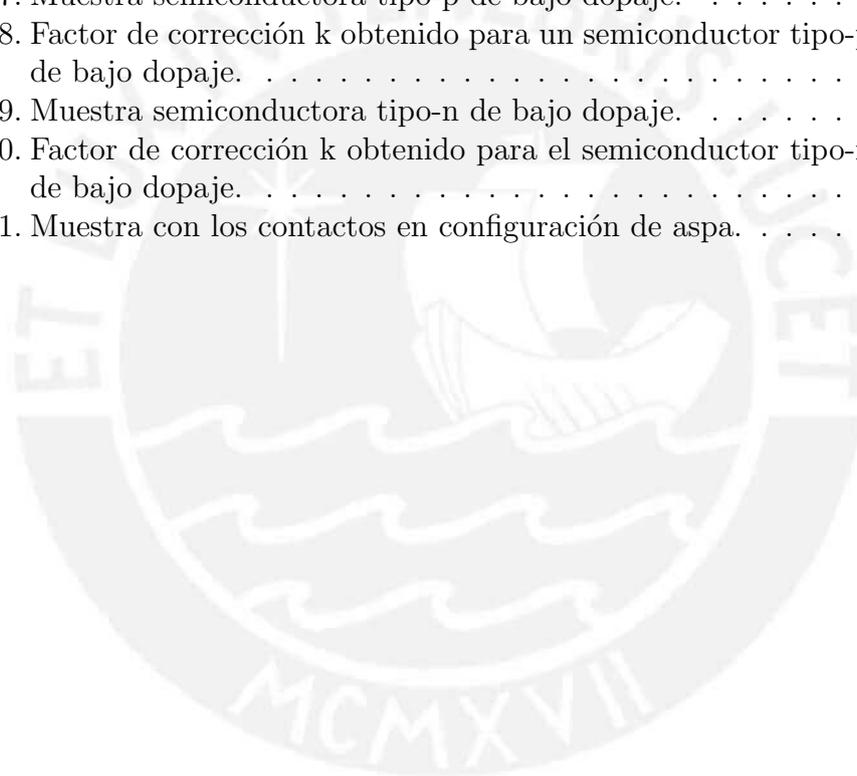
Índice de figuras

2.1. Barra conductora de longitud L y sección transversal con área $A = W * t$ sometida a un potencial eléctrico externo.	2
2.2. Clasificación de algunos elementos y compuestos por su resistividad (conductividad). Extraído de [1].	4
2.3. Estructura tridimensional del silicio.	5
2.4. Representación bidimensional del silicio intrínseco. (a) a baja temperatura. (b) a temperatura ambiente .Extraído de [1]. . .	6
2.5. Semiconductor intrínseco. (a) Diagrama de bandas (b) Densidad de estados (c) Función de distribución de Fermi (d) Concentración de portadores. Gráfico extraído de [1]	7
2.6. Concentración de portadores intrínsecos para el silicio y el arseniuro de galio en función de la temperatura. Gráfico extraído de [2].	7
2.7. Representación bidimensional de un semiconductor (a) tipo-n y (b) tipo-p. Gráfico extraído de [1]	8
2.8. Semiconductor tipo-n. (a) Diagrama de bandas (b) Densidad de estados (c) Función de distribución de Fermi (d) Concentración de portadores. Gráfico extraído de [1]	9
2.9. Semiconductor tipo-p. (a) Diagrama de bandas (b) Densidad de estados (c) Función de distribución de Fermi (d) Concentración de portadores. Gráfico extraído de [1]	9
2.10. Potencial eléctrico externo aplicado a una barra semiconductor.	10
2.11. Diagrama de bandas de un semiconductor intrínseco sometido a un potencial eléctrico externo.	11
2.12. Movilidad de los electrones y huecos vs la concentración. Gráfico extraído de [2]	11
2.13. Concentración de impurezas en silicio tipo-p y tipo-n vs la resistividad a temperatura ambiente. Gráfico extraído de [2]. .	12
2.14. Unión metal-semiconductor. (a) Antes del contacto (b) Después del contacto. Gráfico extraído de [2].	14

2.15. (a) Dispositivo con dos uniones metal-semiconductor. (b) Circuito equivalente.	15
2.16. Electrones fluyendo a través de la unión por tunelaje.	15
2.17. Método de los cuatro puntos en un volumen semi-infinito.	16
2.18. Dispersión de la corriente dentro de un volumen semi-infinito.	17
2.19. Dispersión de la corriente dentro de una superficie semi-infinita de espesor t	18
2.20. Factor de corrección $G(t/s)$. Línea azul: ecuación 2.44. Línea roja: ecuación 2.46.	21
2.21. Muestras finitas para el método de los cuatro puntos: (a) rectangular (b) circular.	21
2.22. Factor de corrección $C(d/s)$ para una muestra circular y cuadrada.	23
2.23. Factor de corrección $K(t/s)$ para un arreglo cuadrado dentro de una muestra de lados a y d , y de espesor t	24
2.24. Gráfica del factor de corrección $k(s/d)$ para una muestra cuadrada ($a/d = 1,0$).	25
2.25. Primera configuración de van der Pauw.	26
2.26. Segunda configuración de van der Pauw.	27
2.27. Resistencias características de van der Pauw	28
2.28. Factor de corrección f de Van der Pauw.	30
2.29. (a) Forma de trébol. (b) Forma cuadrada con los contactos en los vértices. (c) Forma cuadrada con los contactos en los lados. (d) Forma cuadrada con los contactos internos. Gráficos extraídos de [13].	30
3.1. Primeras cuatro configuraciones para obtener la resistencia característica R_A	32
3.2. Segundas cuatro Configuraciones para obtener la resistencia característica R_B	33
3.3. Función $g(x)$	34
3.4. Diagrama de bloques para las mediciones de corriente-voltaje del sistema 1.	36
3.5. Diagrama de bloques para el método de Van der Pauw del sistema 1.	36
3.6. Tarjetas (a) Keithley 7055 y (b) Keithley 7059, instaladas dentro del scanner Keithley 705 con sus respectivos arreglos para las permutaciones.	37
3.7. Conexiones internas de las tarjetas en el Scanner 705, cuando el canal 1 esta cerrado en ambas tarjetas se obtiene la primera configuración $R_{21,34}$	38

3.8. Panel de control para las mediciones de corriente-voltaje de ocho combinaciones con el sistema 1.	39
3.9. Panel de control para las mediciones de Van der Pauw con el sistema 1.	39
3.10. Sistema 1 para mediciones de corriente-voltaje y de resistividad por el método de Van der Pauw.	40
3.11. Keithley 2450 (a) Frontal (b) Posterior.	42
3.12. Diagrama de bloques para el sistema 2.	42
3.13. Conexiones y canales de la tarjeta Keithley 7708.	43
3.14. Parte posterior del sistema 2 mostrando las conexiones.	43
3.15. Panel de control para las mediciones de corriente-voltaje de ocho combinaciones con el sistema 2.	44
3.16. Panel de control para las mediciones de Van der Pauw con el sistema 2.	44
3.17. Sistema 2 para mediciones de corriente-voltaje y de resistividad por el método de Van der Pauw.	45
3.18. Método de Van der Pauw en una lamina circular de oro.	46
3.19. Muestra de silicio y la máscara en el recipiente ultrasónico.	47
3.20. Muestra adherida en la máscara.	47
3.21. Evaporadora Balzers.	48
3.22. Deposición de los contactos de aluminio.	48
3.23. Muestra con los contactos depositados.	49
3.24. Tratamiento térmico	49
4.1. Mediciones de 8-IV para el primer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-p de bajo dopaje.	51
4.2. Mediciones de 8-IV para el segundo caso de la configuración aspa para el silicio tipo-p de bajo dopaje.	51
4.3. Mediciones de 8-IV para el tercer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-p de bajo dopaje.	52
4.4. Mediciones de 8-IV para el primer caso de la configuración cruz para el silicio tipo-p de bajo dopaje.	52
4.5. Mediciones de 8-IV para el segundo caso de la configuración cruz para el silicio tipo-p de bajo dopaje.	53
4.6. Mediciones de 8-IV para el tercer caso de la configuración cruz para el silicio tipo-p de bajo dopaje.	53
4.7. Mediciones de 8-IV para el primer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.	54
4.8. Mediciones de 8-IV para el segundo caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.	54

4.9. Mediciones de 8-IV para el tercer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.	55
4.10. Mediciones de 8-IV para el cuarto caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.	55
4.11. Mediciones de 8-IV para el quinto caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.	56
4.12. Contactos ubicados en los vértices de la muestra.	57
4.13. Contactos ubicados en los lados de la muestra.	58
4.14. Contactos ubicados en los vértices de la muestra.	58
4.15. Configuraciones en (a) aspa y (b) cruz.	59
4.16. Muestra semiconductor tipo-p de bajo dopaje.	60
4.17. Muestra semiconductor tipo-p de bajo dopaje.	61
4.18. Factor de corrección k obtenido para un semiconductor tipo-p de bajo dopaje.	62
4.19. Muestra semiconductor tipo-n de bajo dopaje.	63
4.20. Factor de corrección k obtenido para el semiconductor tipo-n de bajo dopaje.	64
4.21. Muestra con los contactos en configuración de aspa.	65



Índice de tablas

2.1. Factor de corrección $C(d/s)$ para diferentes geometrías de muestras. Datos extraídos de [11].	22
2.2. Factor de corrección $k(d/s)$ para diferentes tamaños de muestras. Datos extraídos de [3].	24
3.1. Lista de equipos y accesorios para el sistema 1.	35
3.2. Lista de equipos y accesorios para el sistema 2.	41
3.3. Resultados de medición de la medición de resistividad de la lámina de oro.	46
4.1. Resultados de medidas de resistividad para un silicio de bajo dopaje tipo-p en los vértices.	57
4.2. Resultados de medidas de resistividad para un silicio de bajo dopaje tipo-p en los lados.	57
4.3. Resultados de medidas de resistividad para un silicio de bajo dopaje tipo-n en los vértices.	58
4.4. Resultados de resistencias características para un silicio tipo-p de bajo dopaje de $8mm^2$ en configuración de aspa	60
4.5. Resultados de resistencias características para un silicio tipo-p de bajo dopaje de $8mm^2$ en configuración de cruz	61
4.6. Resultados de resistencias características para un silicio tipo-n de bajo dopaje de $18mm^2$ en configuración de aspa.	63

Capítulo 1

Introducción

Desde 1947 con la invención del transistor en los laboratorios Bell, los semiconductores han sido de gran interés para el desarrollo de componentes y dispositivos electrónicos, que han dado paso a la tecnología actual y a la industria electrónica.

Los semiconductores tienen la propiedad de ser conductores o aislantes dependiendo de su temperatura o de la cantidad de impurezas que contenga el semiconductor. Inicialmente se utilizó germanio en los laboratorios Bell para la fabricación de transistores. En la actualidad el material semiconductor más usado es el silicio por ser más tolerante al calor que el germanio y por ser uno de los materiales más abundantes en el planeta. Al silicio se le encuentra como material fundamental en la fabricación de diodos, LEDs, circuitos integrados, celdas solares, transistores, microprocesadores, etc.

Para el diseño y posterior construcción de un dispositivo o componente electrónico se requiere una medida precisa de sus propiedades electrónicas, una propiedad importante a medir es la conductividad (resistividad) del material.

El objetivo de esta tesis es la implementación de un sistema para la medición de la resistividad de materiales semiconductores y comprobar los efectos debido a la ubicación de los contactos en el área superficial de la muestra durante la medición de la resistividad.

En el capítulo dos revisaremos la teoría de resistividad, materiales semiconductores y los métodos de medición de resistividad. Luego, en el capítulo tres describiremos los detalles de la implementación del sistema de medición de resistividad por el método de Van der Pauw. Finalmente, en el capítulo cuatro se presentan los resultados experimentales de las medidas de resistividad en películas delgadas semiconductoras y de las medidas cuando se varían la ubicación de los contactos en el área superficial de la muestra.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se hace primero una revisión de los conceptos clásicos de resistividad, resistencia y resistencia superficial. Estas características eléctricas permiten clasificar los materiales. En la segunda parte se presenta una introducción de los materiales semiconductores y de sus propiedades. En la tercera parte se hace una revisión de los métodos para medir la resistividad y de los factores de corrección.

2.1. Resistividad

La resistividad eléctrica de un material es una propiedad física intrínseca e independiente de su tamaño o forma, que nos da información acerca de cómo se comporta el material al paso de la corriente eléctrica. Se le representa por la letra griega rho (ρ) y su unidad es ohm.centímetro ($\Omega - cm$).

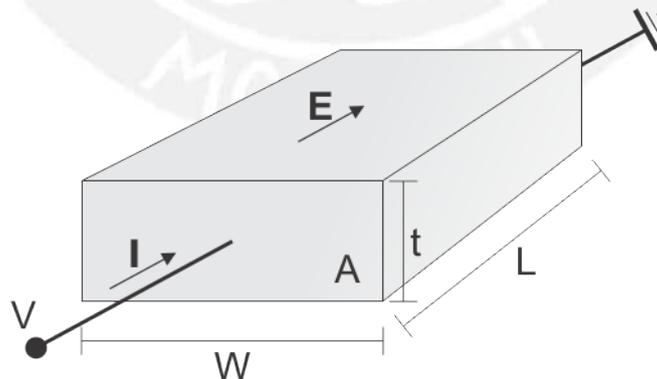


Figura 2.1: Barra conductora de longitud L y sección transversal con área $A = W * t$ sometida a un potencial eléctrico externo.

Por ejemplo, si se le somete a un potencial eléctrico externo V a una barra conductora de longitud L y de área transversal A como en la figura (2.1), se producirá un campo eléctrico interno E dentro de la barra que es igual al producto de la resistividad de la barra por la densidad de corriente eléctrica

$$E = \rho j \quad (2.1)$$

También, el campo eléctrico E es igual al potencial eléctrico aplicado entre la longitud de la barra

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.2)$$

Al igualar las ecuaciones (2.1) y (2.2)

$$\rho = \frac{V}{jL} \quad (2.3)$$

y como la densidad de corriente j es igual a la corriente eléctrica I entre el área transversal A de la barra

$$j = \frac{I}{A} \quad (2.4)$$

Reemplazando (2.4) en (2.3) se encuentra la ecuación para calcular la resistividad eléctrica de una barra, que está en función de sus dimensiones, del potencial eléctrico y de la corriente eléctrica aplicada

$$\rho = \frac{AV}{LI} \quad (2.5)$$

A la inversa de la resistividad se le conoce como conductividad, se le representa por la letra griega sigma (σ) y su unidad es en Siemens por centímetro (S/cm).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.6)$$

Se define una nueva cantidad R que es igual a la relación del voltaje y de la corriente aplicada, esta relación es conocida como la "ley de ohm".

$$\rho = \frac{AR}{L} \quad (2.7)$$

Despejando R

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.8)$$

Por lo tanto, la resistencia eléctrica R de la barra es directamente proporcional a sus dimensiones.

También se puede definir otra nueva cantidad denominada resistencia superficial R_s , tomando t como el espesor de la barra,

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (2.9)$$

La resistencia superficial es una cantidad muy usada en la electrónica planar donde el espesor es muy pequeño comparado con su longitud. La resistencia superficial tiene unidades de ohmios por cuadrado[4].

Dependiendo de la resistividad (conductividad), los materiales se pueden clasificar como aislantes, semiconductores y conductores como se les representa en la figura 2.2

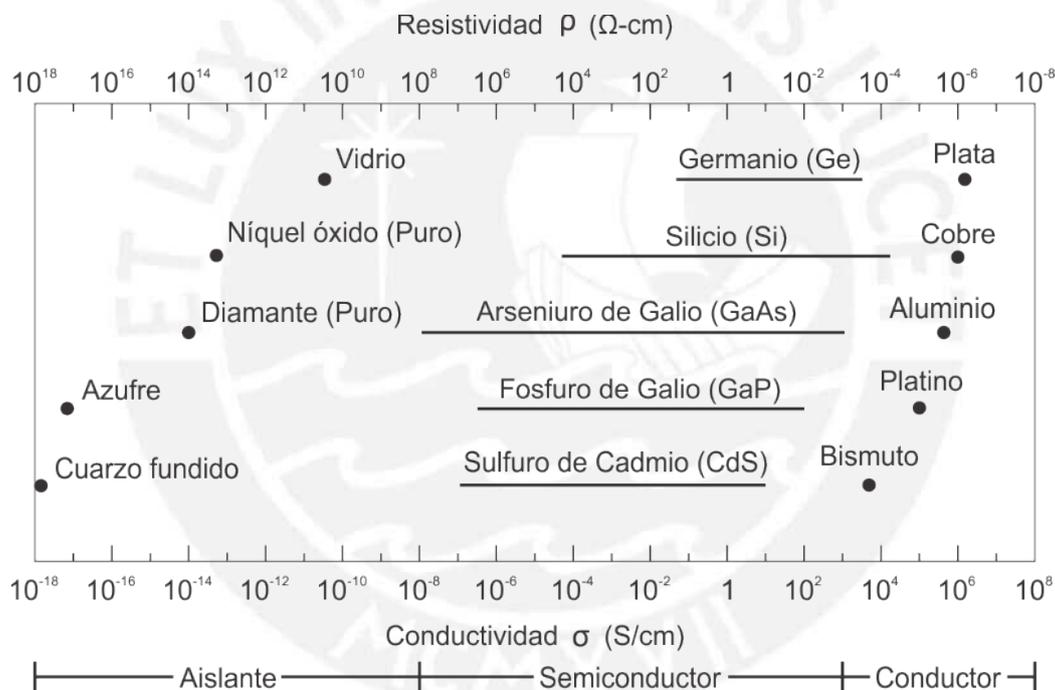


Figura 2.2: Clasificación de algunos elementos y compuestos por su resistividad (conductividad). Extraído de [1].

Como se puede ver en la figura 2.2 los materiales aislantes tienen una alta resistividad (baja conductividad). En el caso de los materiales semiconductores, estos poseen un rango de valores de resistividad entre 10^8 y $10^{-3}\Omega - cm$. Esto es debido a que las propiedades eléctricas dependen de impurezas y defectos, así como también de la temperatura en que se encuentre el material.

2.2. Materiales semiconductores

Los materiales semiconductores son elementos como el silicio y el germanio, que se encuentran en el grupo 14 de la tabla periódica, y otros compuestos como el arseniuro de galio (GaAs).

2.2.1. Semiconductor intrínseco

Un semiconductor cristalino intrínseco, es un semiconductor con muy baja densidad de impurezas. La figura 2.3 muestra la estructura de forma de diamante de la celda unitaria de silicio con sus cuatro enlaces covalentes.

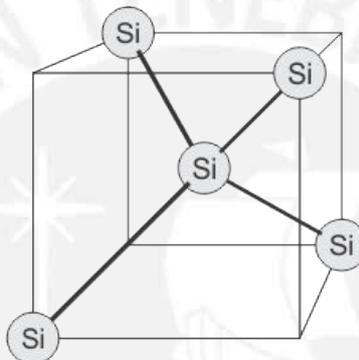


Figura 2.3: Estructura tridimensional del silicio.

La estructura de un sólido de silicio también se puede representar de forma bidimensional como en la figura 2.4(a) con todos los enlaces del silicio ocupados a temperaturas muy bajas, mientras que a temperaturas más altas los electrones pueden ganar energía térmica y se pueden liberar de sus enlaces como en la figura 2.4(b). Al estado vacante que deja el electrón se le denomina hueco, que a diferencia del electrón tiene una carga positiva y una masa efectiva un poco mayor, entonces, la conducción de un semiconductor se debe a la movilidad de los electrones denominados portadores de carga.

Por la gran cantidad de átomos que forman un semiconductor (10^{23} átomos/ cm^3) y de las interacciones entre todos ellos, los niveles energéticos más altos de todos los átomos del semiconductor se superponen para formar dos bandas de energía. La banda de energía donde se encuentran todos los electrones de valencia a $T > 0^{\circ}K$ se denomina "banda de valencia" cuando los electrones son excitados por energía térmica pasan a ocupar la "banda de conducción". La banda de valencia y la banda de conducción se encuentran separados por un gap de energía denominada "banda prohibida" donde

no existen niveles energéticos permitidos como se le representa en la figura 2.5(a)

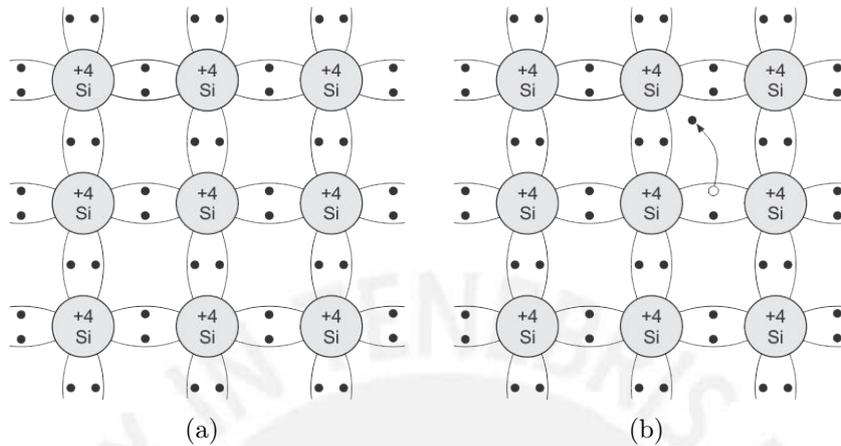


Figura 2.4: Representación bidimensional del silicio intrínseco. (a) a baja temperatura. (b) a temperatura ambiente .Extraído de [1].

En la figura 2.5(a) se representa la energía, E , de los niveles electrónicos. E_C es el nivel energético más bajo de la banda de conducción, E_V es el nivel energético más alto de la banda de valencia, la diferencia de estos niveles es igual a la energía de la banda prohibida E_g . En el caso del silicio la energía de la banda prohibida es igual a 1.11 eV y del germanio es de 0.66 eV, la energía de la banda prohibida representa la anergía mínima que necesita un electrón para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción.

En la figura 2.5(b) se representa la densidad de estados $N(E)$, que es la cantidad de estados permitidos en un intervalo de energía.

La probabilidad de encontrar un electrón a una energía E y a una temperatura T está sujeta a la distribución de Fermi:

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad (2.10)$$

E_F es el nivel de Fermi, que es el nivel energético donde la probabilidad de ocupación de un electrón es del 50% a $0^\circ K$, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en Kelvin.

En la figura 2.5(c) se representa la función distribución de Fermi a una temperatura $T > 0^\circ K$. En un semiconductor intrínseco el nivel de Fermi se encuentra casi a la mitad de la banda prohibida.

En la figura 2.5(d) se muestra la concentración de portadores en una unidad de volumen, la concentración de portadores a una temperatura dada es la misma en un semiconductor intrínseco.

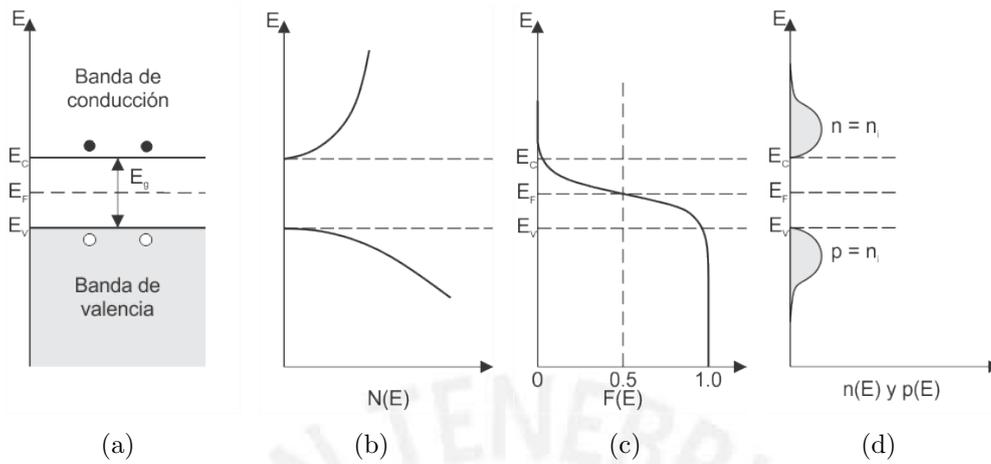


Figura 2.5: Semiconductor intrínseco. (a) Diagrama de bandas (b) Densidad de estados (c) Función de distribución de Fermi (d) Concentración de portadores. Gráfico extraído de [1]

A temperatura ambiente la densidad de portadores intrínsecos del silicio es igual a $9,65 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ como se ve en la figura 2.6.

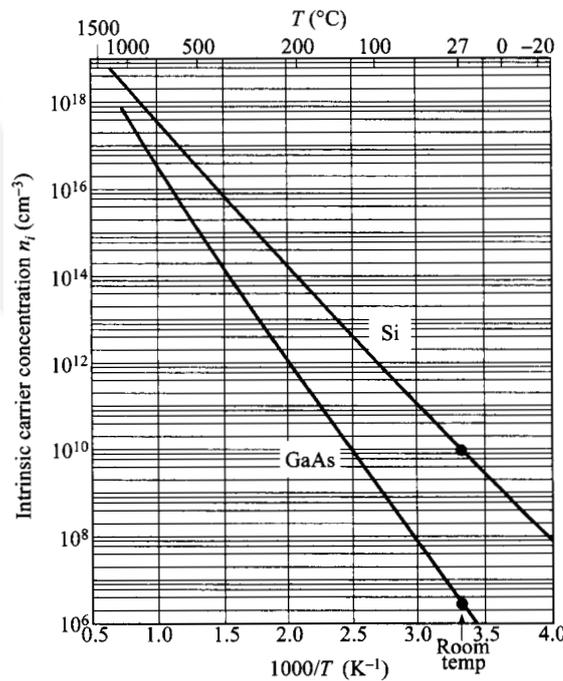


Figura 2.6: Concentración de portadores intrínsecos para el silicio y el arseniuro de galio en función de la temperatura. Gráfico extraído de [2].

2.2.2. Semiconductor extrínseco

Si a un semiconductor intrínseco se le agregan impurezas (dopado), por ejemplo, se le agrega un átomo de arseniuro o un de fósforo a una estructura de átomos de silicio como en la figura 2.7(a), el átomo de arseniuro tiene 5 electrones de valencia, entonces habría un electrón extra en la estructura cuando el arseniuro se enlaza con los otros átomos de silicio, a este tipo de semiconductor con exceso de electrones se le denomina semiconductor tipo-n.

Cuando se agrega un átomo de boro o de aluminio, elementos del grupo 13, con 3 átomos de valencia como en la figura 2.7(b) a la estructura de átomos de silicio hay una deficiencia de un electrón cuando el átomo de boro se enlaza a la estructura se tendría un hueco, a este tipo de semiconductor con exceso de huecos se le denomina tipo-p.

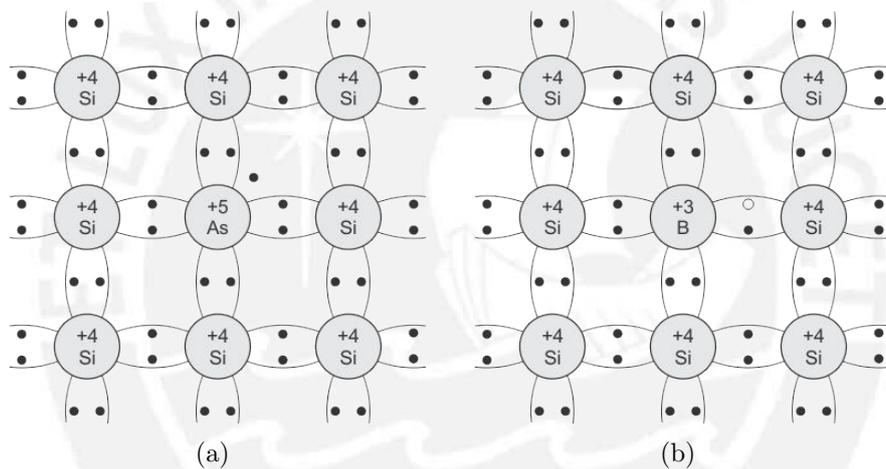


Figura 2.7: Representación bidimensional de un semiconductor (a) tipo-n y (b) tipo-p. Gráfico extraído de [1]

En la figura 2.8(a) se muestra el diagrama de bandas para un semiconductor tipo-n con una mayor cantidad de electrones en la banda de conducción y con pocos huecos en la banda de valencia a diferencia de un semiconductor intrínseco donde son de iguales cantidades. Adicionalmente, el efecto del dopaje tipo-n es el de correr el nivel de Fermi más cerca de la banda de conducción.

Se agregan estados permitidos dentro de la banda prohibida, muy cerca a la banda de conducción, producido por las impurezas que aportan más electrones como en la figura 2.8(b).

La distribución de Fermi también se desplaza más cerca a la banda de conducción, aumentando la probabilidad de encontrar electrones con una

energía mayor de la banda de conducción como en la figura 2.8(c).

La concentración de portadores por unidad de volumen aumenta en la banda de conducción por los electrones de las impurezas como en la figura 2.8(d).

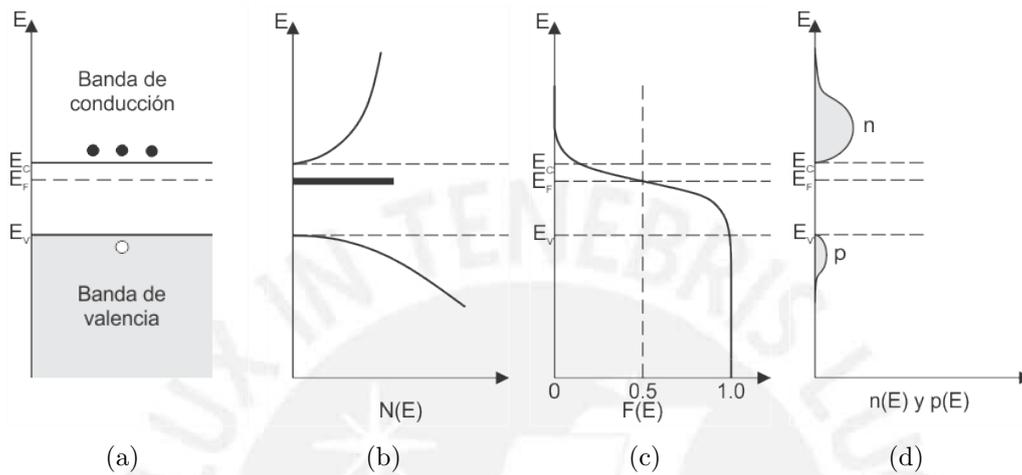


Figura 2.8: Semiconductor tipo-n. (a) Diagrama de bandas (b) Densidad de estados (c) Función de distribución de Fermi (d) Concentración de portadores. Gráfico extraído de [1]

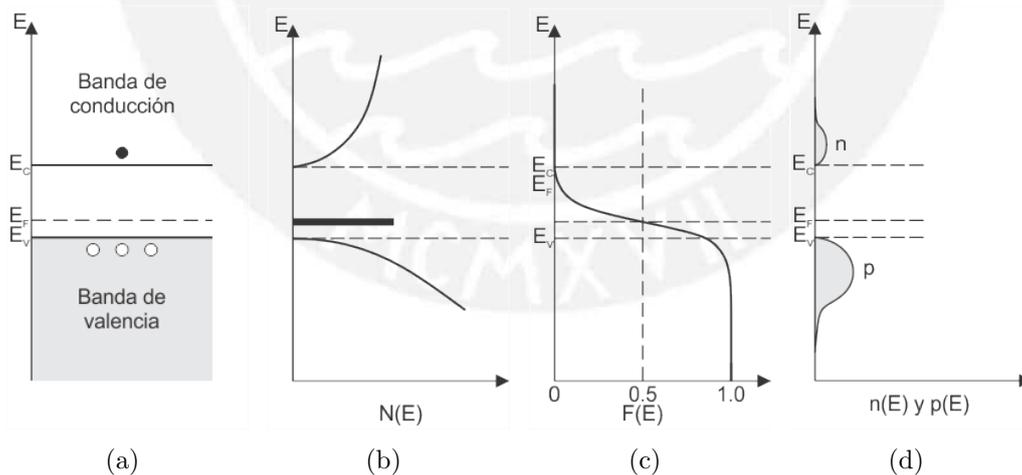


Figura 2.9: Semiconductor tipo-p. (a) Diagrama de bandas (b) Densidad de estados (c) Función de distribución de Fermi (d) Concentración de portadores. Gráfico extraído de [1]

Para el caso de un semiconductor tipo-p, es muy similar al tipo-n, con la diferencia de que por la mayor concentración de huecos en la banda de valencia (figura 2.9(a)) y los nuevos estados permitidos (figura 2.9(b)), el nivel de Fermi se desplaza más cerca a la banda de valencia como se muestra en la figura 2.9(c) y la concentración de portadores por unidad de volumen aumenta en la banda de valencia por los huecos como en la figura 2.9(d).

2.2.3. Resistividad en un semiconductor

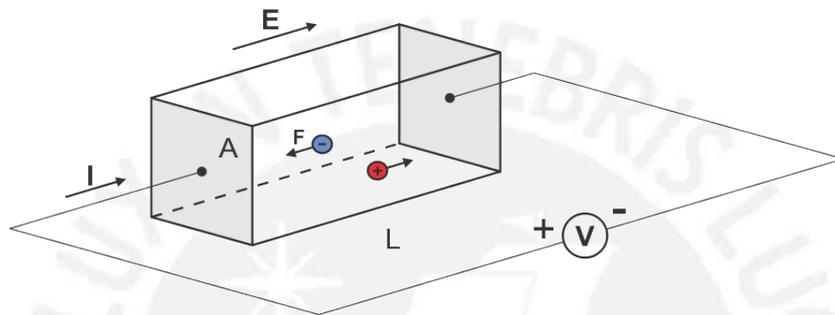


Figura 2.10: Potencial eléctrico externo aplicado a una barra semiconductor.

Cuando a una barra semiconductor se le aplica un potencial eléctrico como en la figura 2.10, se produce un campo eléctrico interno en el semiconductor que hace a los electrones y huecos adquirir una velocidad de deriva, y puedan moverse (con respecto al valor de su carga eléctrica) a favor o en contra del campo eléctrico. La velocidad de deriva es el promedio de las velocidades en que se mueven los portadores en una unidad de volumen, y se define como:

$$\bar{v} = -\frac{qE\tau_c}{m} \quad (2.11)$$

Donde q es la carga eléctrica del portador, E es el campo eléctrico producido, m es la masa efectiva del portador, que es la masa del portador dentro de una red periódica a diferencia de su masa cuando se encuentra libre, y τ_c es el tiempo medio entre colisiones de los portadores con las imperfecciones del semiconductor. Se define un factor de proporcionalidad denominado movilidad del portador $\mu = q\tau_c/m$, entonces

$$\bar{v} = -\mu E \quad (2.12)$$

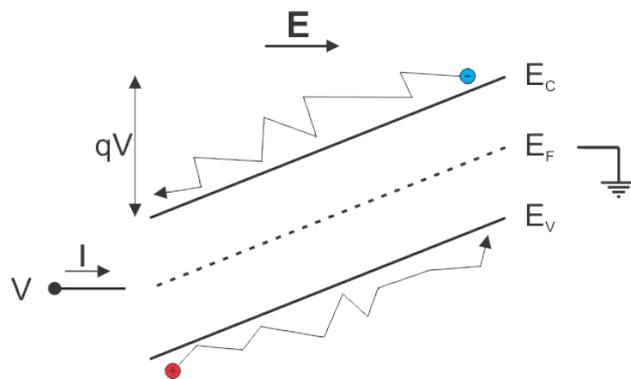


Figura 2.11: Diagrama de bandas de un semiconductor intrínseco sometido a un potencial eléctrico externo.

La figura 2.11 muestra el diagrama de bandas de un semiconductor intrínseco cuando se le aplica un potencial eléctrico externo V . La banda de valencia y la banda de conducción sufren una inclinación igual a qV , el campo eléctrico hace que los electrones se muevan hacia la izquierda y los huecos hacia la derecha mientras que colisionan con las imperfecciones del semiconductor.

La figura 2.12 muestra la movilidad de los electrones μ_n y de los huecos μ_p en función de la concentración de impurezas a temperatura ambiente, entonces, la movilidad es máxima cuando el semiconductor tiene una baja concentración de impurezas.

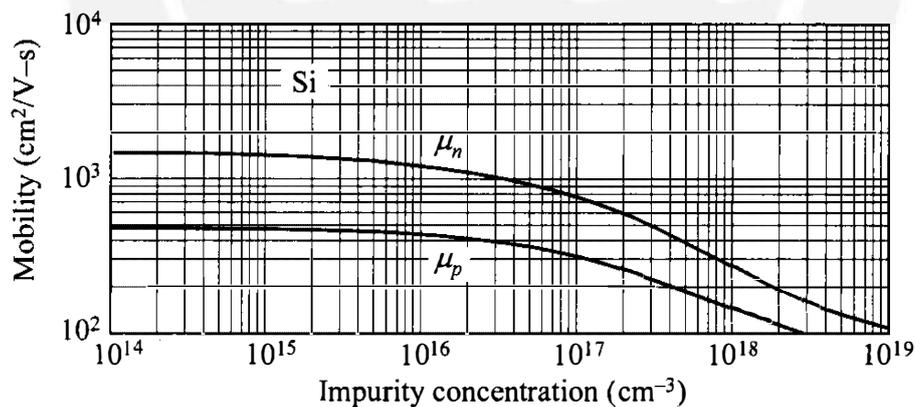


Figura 2.12: Movilidad de los electrones y huecos vs la concentración. Gráfico extraído de [2]

La densidad de corriente de electrones J_n , es igual al producto de: la carga del electrón, la concentración de impurezas, la movilidad de los electrones y del campo eléctrico,

$$J_n = qn\mu_n E \quad (2.13)$$

Como en los semiconductores hay dos tipos de concentraciones (electrones y huecos), la densidad de corriente es igual a

$$J = J_n + J_p = qn\mu_n E + qp\mu_p E \quad (2.14)$$

$$J = (qn\mu_n + qp\mu_p) E \quad (2.15)$$

La cantidad entre paréntesis es la conductividad del semiconductor, que es la relación del campo eléctrico y de la densidad de corriente

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (2.16)$$

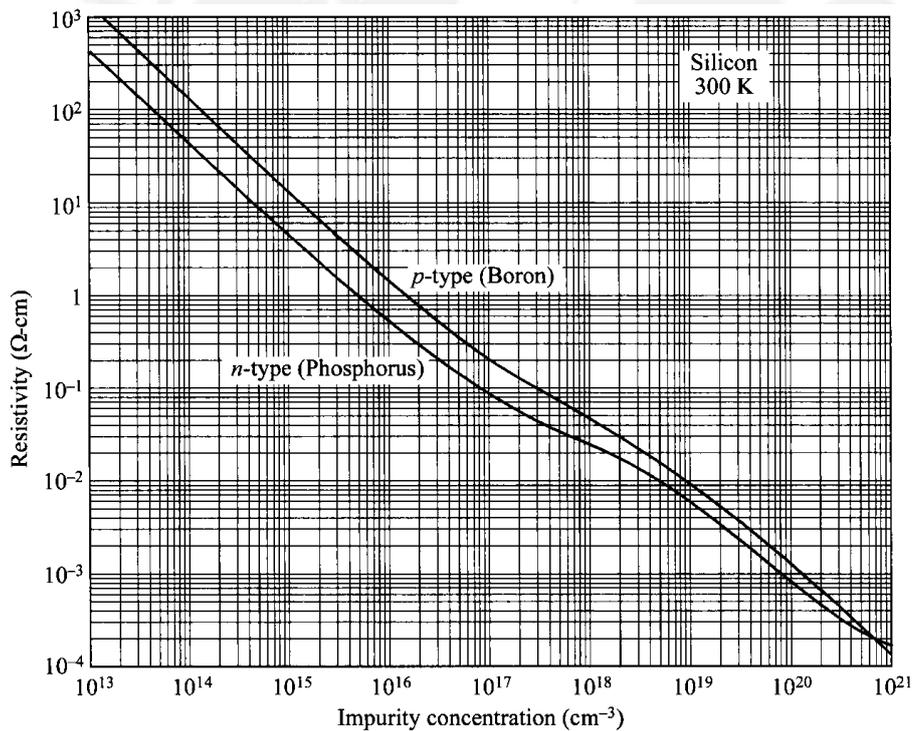


Figura 2.13: Concentración de impurezas en silicio tipo-p y tipo-n vs la resistividad a temperatura ambiente. Gráfico extraído de [2].

Como la resistividad es la inversa de la conductividad

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.17)$$

Debido a la gran diferencia de los órdenes de magnitud de la concentración de impurezas en un semiconductor extrínseco, la resistividad del silicio tipo-n será

$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n} \quad (2.18)$$

y para el silicio tipo-p

$$\rho = \frac{1}{qp\mu_p} \quad (2.19)$$

La figura 2.13 muestra la resistividad del silicio a temperatura ambiente en función de la concentración de impurezas (dopaje)

2.2.4. Unión metal-semiconductor

Una parte fundamental en la fabricación de dispositivos semiconductores es la metalización, que consiste en depositar contactos metálicos en el semiconductor para la conexión con otros componentes o dispositivos.

Los métodos más utilizados de deposición son los siguientes[5]:

- Evaporación térmica
- Pulverización catódica
- Deposición química en fase vapor

En la figura 2.14(a) se muestra el diagrama de bandas de un metal y un semiconductor tipo-n antes del contacto. La función de trabajo del metal $q\phi_m$ y del semiconductor $q\phi_s$ se define como la diferencia de energía entre el nivel de vacío y del nivel de Fermi, la afinidad electrónica del semiconductor $q\chi$ es la diferencia de energía entre el nivel de vacío y del nivel más bajo de la banda de conducción.

Después del contacto en la figura 2.14(b) se forma una barrera, con una altura igual a

$$q\phi_{Bn} = q\phi_m - q\chi \quad (2.20)$$

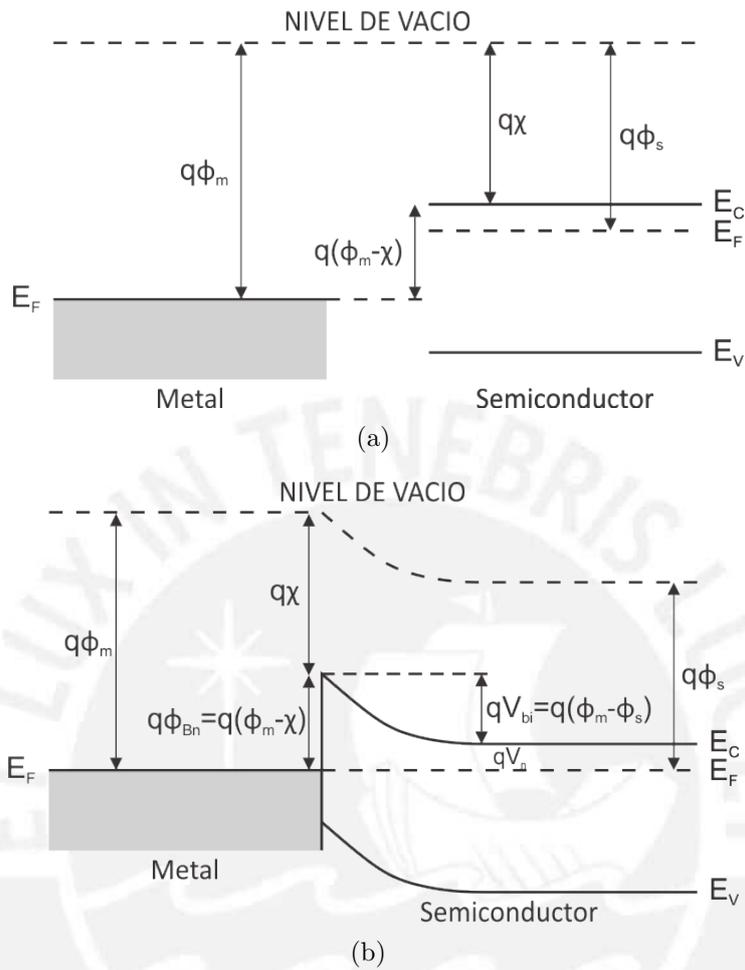


Figura 2.14: Unión metal-semiconductor. (a) Antes del contacto (b) Después del contacto. Gráfico extraído de [2].

Debido a esta barrera, la unión metal-semiconductor se comporta como un diodo, dejando el paso de la corriente en un sentido y oponiéndose al paso de la corriente por el sentido inverso. Para un dispositivo con dos uniones como en la figura 2.15(a), un circuito equivalente sería con dos diodos[6] y la resistencia del semiconductor en serie entre los diodos como en la figura 2.15(b), la resistencia total sería

$$R_T = R_C + R_S + R_C \quad (2.21)$$

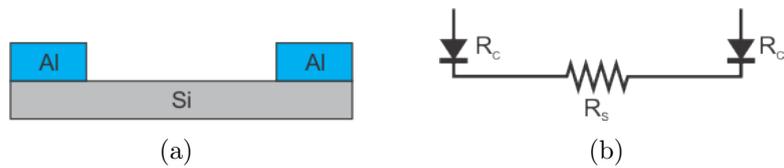


Figura 2.15: (a) Dispositivo con dos uniones metal-semiconductor. (b) Circuito equivalente.

Entonces, para una medida más precisa de la resistividad del semiconductor se debe reducir al mínimo la resistencia R_C para que no influya a la medida de resistividad. Hay diferentes métodos para reducir los efectos de la barrera de la unión metal-semiconductor, por ejemplo, si se reduce el ancho de la depleción de la unión metal-semiconductor con un semiconductor de alto dopaje, los electrones pueden fluir a través de la barrera por un efecto cuántico denominado tunelaje, que se produce cuando se tiene una barrera de la escala de 5nm y los electrones pueden traspasar la barrera por su comportamiento ondulatorio como en la figura 2.16.

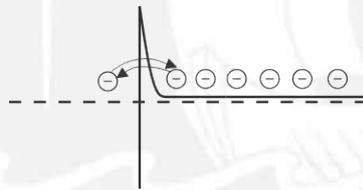


Figura 2.16: Electrones fluyendo a través de la unión por tunelaje.

2.3. Métodos de medición de la resistividad

2.3.1. Método de los cuatro puntos

El primer método para medir la resistividad de los semiconductores fue propuesto por L. Valdes [8] en el año 1951 y fue utilizado para medir la resistividad del germanio en la fabricación de transistores.

Este método es conocido como “el método de los cuatro puntos”, y consiste en tener cuatro puntas conductoras colineales 1, 2, 3 y 4 separados a unas distancias s_1 , s_2 y s_3 respectivamente, se asume un volumen semi-infinito homogéneo e isotrópico como en la figura 2.17. Se hace ingresar una corriente constante por la punta 1 y se le extrae por la punta 4, mientras se mide la diferencia de voltaje entre las puntas 2 y 3.

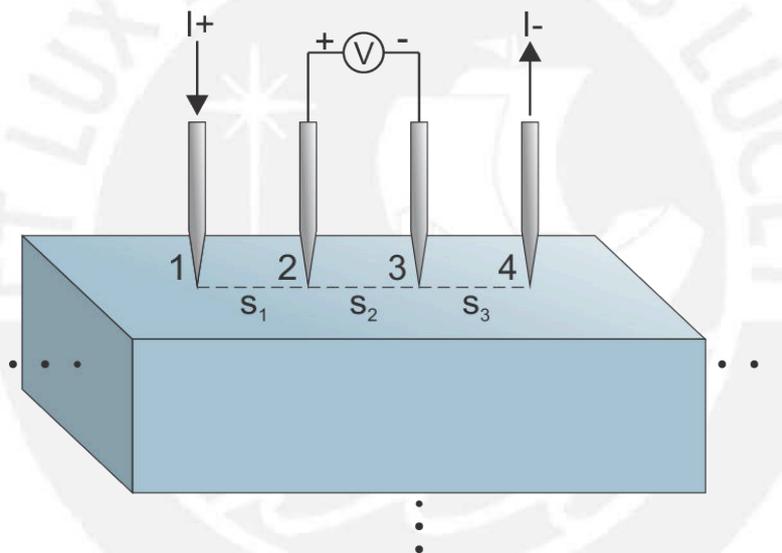


Figura 2.17: Método de los cuatro puntos en un volumen semi-infinito.

Para hallar la resistividad se debe considerar la forma en que se dispersa la corriente, por ser un volumen semi-infinito la dispersión de la corriente será en forma de una semi-esfera de radio r como en la figura 2.18

La densidad de la corriente que ingresa por la punta 1 a una distancia r será

$$j = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.22)$$

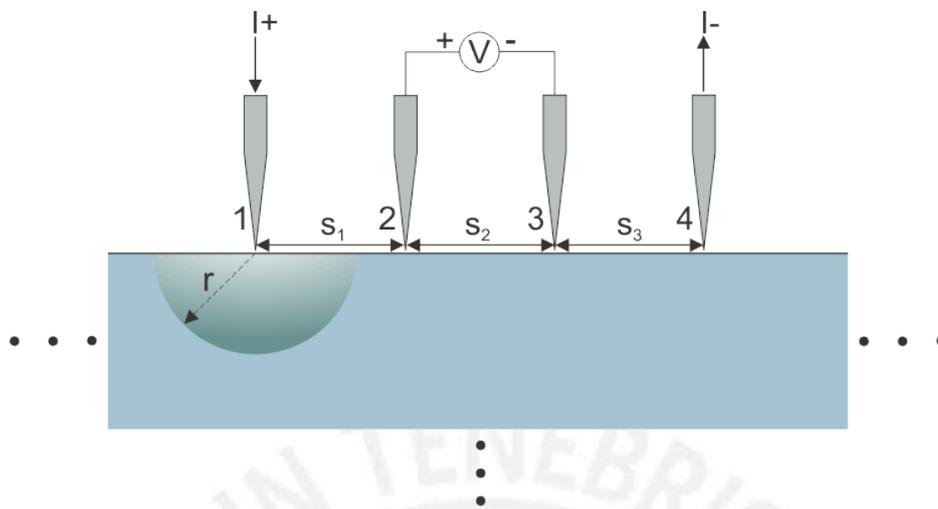


Figura 2.18: Dispersión de la corriente dentro de un volumen semi-infinito.

El campo eléctrico:

$$E = \rho j \quad (2.23)$$

entonces, el campo eléctrico a una distancia r del punto 1 será:

$$E_r = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (2.24)$$

Por la relación del potencial y del campo eléctrico

$$E_r = -\frac{dV}{dr} \quad (2.25)$$

Igualando 2.25 y 2.24

$$-\frac{dV}{dr} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (2.26)$$

Reordenando e integrando

$$\int_0^V dV = -\frac{\rho I}{2\pi} \int_0^r \frac{dr}{r^2} \quad (2.27)$$

Entonces, el potencial eléctrico desde el punto 1 a una distancia r será

$$V_r = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.28)$$

El potencial eléctrico en el punto 2, cuando la corriente ingresa por el punto 1 y sale por el punto 4

$$V_2 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi s_1} - \frac{I_{14}\rho}{2\pi(s_2 + s_3)} \quad (2.29)$$

$$V_2 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} \right) \quad (2.30)$$

y el potencial en el punto 3

$$V_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_3} \right) \quad (2.31)$$

la diferencia de potencial del punto 2 y del punto 3

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} + \frac{1}{s_3} \right) \quad (2.32)$$

La resistividad será

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} + \frac{1}{s_3} \right)} \frac{V}{I} \quad (2.33)$$

Si $s_1 = s_2 = s_3 = s$

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (2.34)$$

Se encuentra la ecuación de la resistividad de una muestra ideal de volumen semi-infinito con las cuatro puntas igualmente espaciadas.

Para el caso de una superficie delgada se le puede considerar a la forma de la dispersión de la corriente como el de un cilindro de una altura igual al espesor de la superficie semi-infinita como en la figura 2.19.

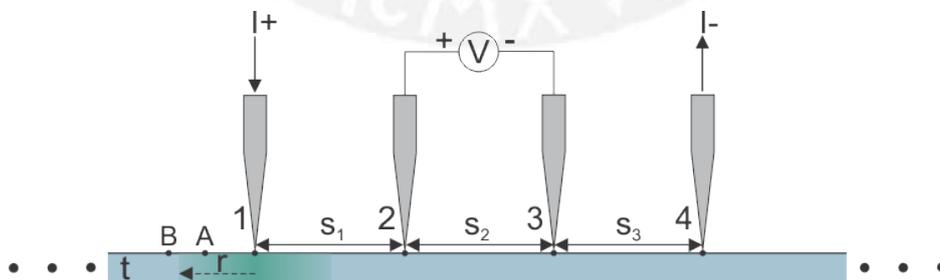


Figura 2.19: Dispersión de la corriente dentro de una superficie semi-infinita de espesor t .

La densidad de corriente será

$$j = \frac{I}{2\pi r t} \quad (2.35)$$

y el campo eléctrico

$$E = \frac{\rho I}{2\pi r t} \quad (2.36)$$

por la relación del potencial y del campo eléctrico

$$\int_{V_A}^{V_B} dV = -\frac{\rho I}{2\pi t} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r} \quad (2.37)$$

la diferencia de voltaje en los puntos B y A

$$V_{BA} = \frac{\rho I}{2\pi t} \ln \left(\frac{r_A}{r_B} \right) \quad (2.38)$$

La diferencia de potencial eléctrico en los puntos 2 y 3 cuando la corriente ingresa por el punto 1 y sale por el punto 4 en una superficie semi-infinita de espesor t

$$V_{23} = \frac{\rho I_{14}}{2\pi t} \ln \left(\frac{s_1 + s_2}{s_1} \right) - \frac{\rho I_{14}}{2\pi t} \ln \left(\frac{s_3}{s_2 + s_3} \right) \quad (2.39)$$

$$V_{23} = \frac{\rho I_{14}}{2\pi t} \ln \left(\frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_1 s_3} \right) \quad (2.40)$$

Si $s_1 = s_2 = s_3 = s$

$$\rho = \frac{\pi t V}{\ln 2 I} \quad (2.41)$$

Entonces la resistividad en una superficie semi-infinita no depende de las distancias de las puntas cuando están igualmente espaciadas.

2.3.2. Factores de corrección

Como las muestras reales no son semi-infinitas, es posible introducir los efectos de una muestra real, expresando la resistividad como[9]:

$$\rho = F \frac{V}{I} \quad (2.42)$$

Donde F es un factor de corrección, que a su vez es el producto de otros factores de corrección que dependen del espesor, dimensiones, posición de las puntas y forma de la muestra.

2.3.2.1. Factor de corrección G

La ecuación (2.42) se le puede expresar como

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \frac{V}{I} G(t/s) \quad (2.43)$$

Donde $G(t/s)$ es un factor de corrección que depende del espesor y de la distancia de las puntas en una superficie semi-infinita

Valdes [8] obtuvo el factor de corrección $G(t/s)$ por medio del método de las imágenes. Albers y Berkowitz [10] en el año 1985 obtuvieron la siguiente fórmula:

$$G(t/s) = \frac{\ln 2}{\ln \left\{ \frac{\sinh(t/s)}{\sinh(t/2s)} \right\}} \quad (2.44)$$

En la figura 2.20 (línea azul) se grafica la ecuación (2.44), donde se puede observar que cuando la proporción del espesor y de la separación de las puntas es muy pequeña ($t/s < 0,1$) el factor de corrección es igual a 1 y se obtiene la ecuación de la resistividad (2.42) para una superficie semi-infinita. Cuando t/s es mayor que 4, el factor de corrección se puede aproximar a (línea roja):

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (2.45)$$

Si se reemplaza la ecuación (2.46) en (2.43) se obtiene la ecuación de resistividad para un volumen semi-infinito[9]

$$G(t/s) \approx \frac{2s \ln 2}{t} \quad (2.46)$$

Por lo tanto, cuando la relación de la separación de las puntas y del espesor en una muestra es muy pequeña se le puede considerar como una

superficie semi-infinita y cuando es muy grande se le puede considerar como un volumen semi-infinito, a pesar de que son muestras no infinitas.

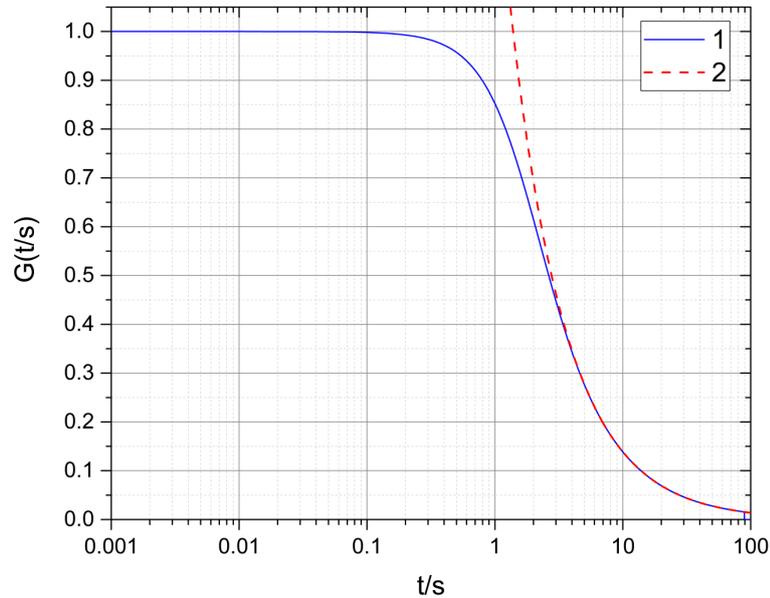


Figura 2.20: Factor de corrección $G(t/s)$. Línea azul: ecuación 2.44. Línea roja: ecuación 2.46.

2.3.2.2. Factor de corrección C

En 1957, Smits [11] calculó el factor de corrección C para muestras finitas de formas circulares y rectangulares, para usarlo en obleas y circuitos integrados por el método de las imágenes.

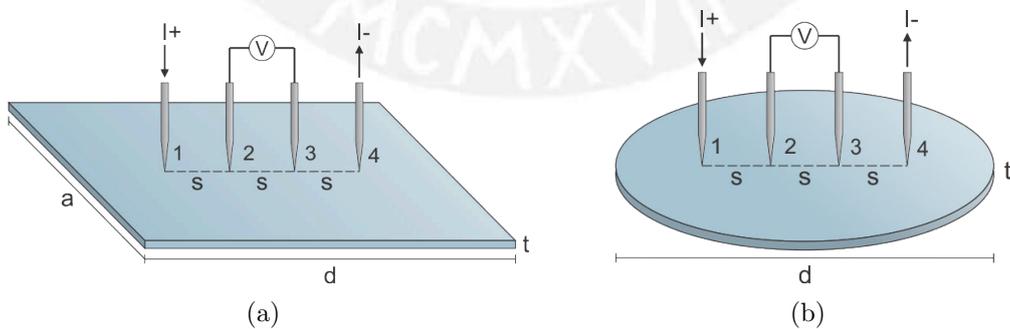


Figura 2.21: Muestras finitas para el método de los cuatro puntos: (a) rectangular (b) circular.

Se puede plantear una nueva ecuación donde se incluye el factor de corrección $C(d/s)$ que depende del tamaño de los lados y de la separación de las puntas como en la figura 2.21.

$$\rho = t G(t/s) C(d/s) \frac{V}{I} \quad (2.47)$$

Si las muestras son delgadas, el factor de corrección $G(t/s)$ se reduce a 1

$$\rho = t C(d/s) \frac{V}{I} \quad (2.48)$$

La tabla 2.1 muestra los resultados obtenidos por Smits, para una muestra circular y muestras rectangulares de diferentes proporciones de lados. Como se puede observar cuando $d/s \approx 0$ (que es un caso ideal) el factor de corrección es igual a $\pi/\ln 2$ (4.5324) en la ecuación (2.41) para la resistividad de una superficie semi-infinita.

d/s	$C(d/s)$				
	círculo	$a/d = 1$	$a/d = 2$	$a/d = 3$	$a/d \geq 4$
0.000	4.5324	4.5324	4.5324	4.5325	4.5324
0.025	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
0.050	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
0.067	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
0.100	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
0.133	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
0.200	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
0.250	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
0.333	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
0.400			2.3532	2.3541	2.3541
0.500			1.9454	1.9475	1.9475
0.571			1.7196	1.7238	1.7238
0.667			1.4788	1.4893	1.4893
0.800				1.2467	1.2248
1.000				0.9988	0.9994

Tabla 2.1: Factor de corrección $C(d/s)$ para diferentes geometrías de muestras. Datos extraídos de [11].

La figura 2.22 muestra el factor de corrección $C(d/s)$ para una muestra circular y una cuadrada ($a/d=1$).

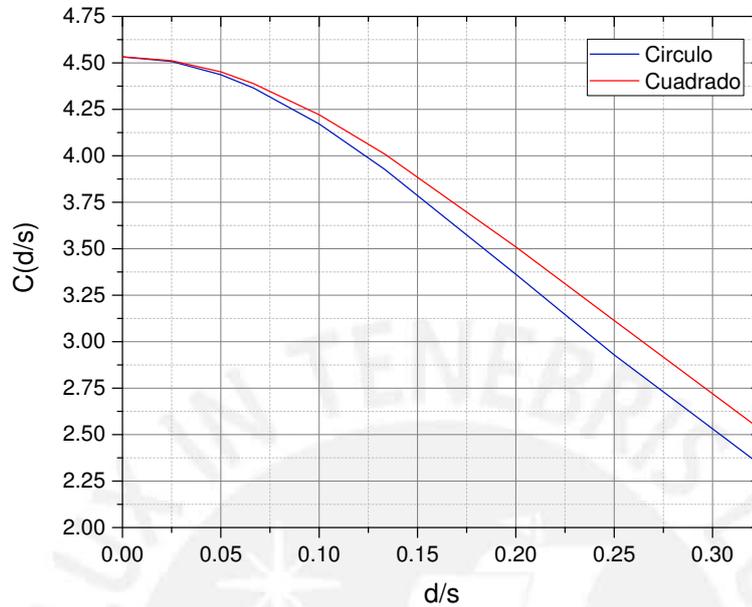


Figura 2.22: Factor de corrección $C(d/s)$ para una muestra circular y cuadrada.

2.3.2.3. Factor de corrección K

En 1970 Green y Gunn[3] encontraron el factor de corrección k como una extensión del factor de corrección $C(d/s)$ para arreglos simétricos rectangulares de las puntas dentro de una muestra rectangular como en la figura 2.23. la ecuación (2.48) quedaría

$$\rho = tK(d/s) \frac{V}{I} \quad (2.49)$$

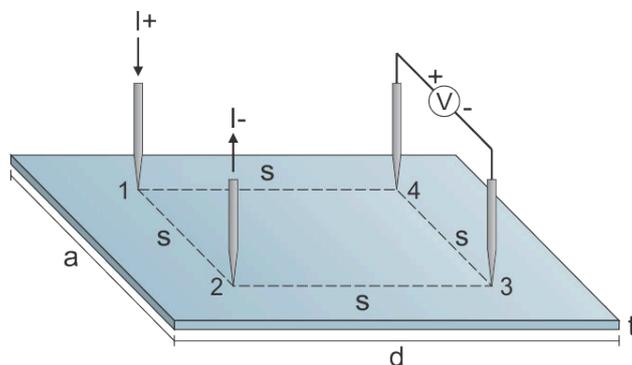


Figura 2.23: Factor de corrección $K(t/s)$ para un arreglo cuadrado dentro de una muestra de lados a y d , y de espesor t .

La tabla muestra los factores de corrección, como se puede observar cuando las puntas están en el borde ($d/s=1.0$) y cuando la muestra es un cuadrado ($a/d=1.0$) el factor de corrección se aproxima a $\pi/\ln 2$

$$\rho = \frac{\pi t V}{\ln 2 I} \quad (2.50)$$

La ecuación (2.50) se reduce a la ecuación (2.41) para una superficie semi-infinita ideal.

d/s	k(d/s)				
	a/d=1.0	a/d=1.2	a/d=1.5	a/d=2.0	a/d=4.0
1.00	4.5324	2.8667	2.0936	1.7822	1.7076
1.25	4.5477	3.3358	2.7101	2.4454	2.3810
1.50	4.6508	3.7832	3.3044	3.0939	3.0418
1.75	4.8526	4.2321	3.8710	3.7070	3.6658
2.00	5.1168	4.6701	4.3988	4.2716	4.2391
2.50	5.7028	5.4677	5.3127	5.2358	5.2157
3.00	6.2516	6.1273	6.0373	5.9896	5.9779
4.00	7.0969	7.0662	7.0350	7.0156	7.0102
5.00	7.6504	7.6495	7.6392	7.6306	7.6281
7.00	8.2581	8.2694	8.2696	8.2680	8.2673
10.0	8.6434	8.6528	8.6551	8.6550	8.6549
inf	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647

Tabla 2.2: Factor de corrección $k(d/s)$ para diferentes tamaños de muestras. Datos extraídos de [3].

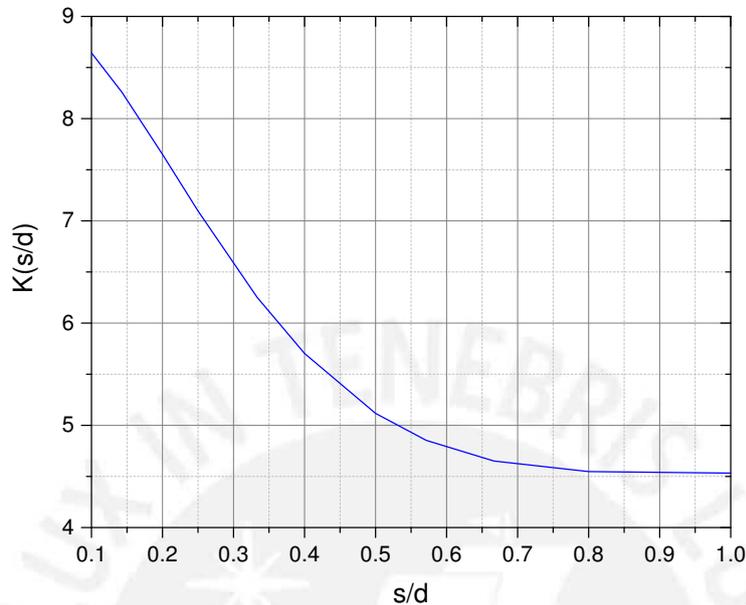


Figura 2.24: Gráfica del factor de corrección $k(s/d)$ para una muestra cuadrada ($a/d = 1,0$).

2.3.3. Método de Van der Pauw

Este método fue desarrollado por Van der Pauw[12] [13] en el año 1958 para muestras delgadas de forma arbitraria, se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Los contactos deben estar a la periferia de la muestra.
2. Los contactos deben ser lo suficientemente pequeños.
3. Las muestra debe ser lo suficientemente delgada.
4. La muestra no tiene agujeros aislados.

Primeramente, se considera una superficie semi-infinita de espesor t con las puntas en el borde, como de la figura 2.25

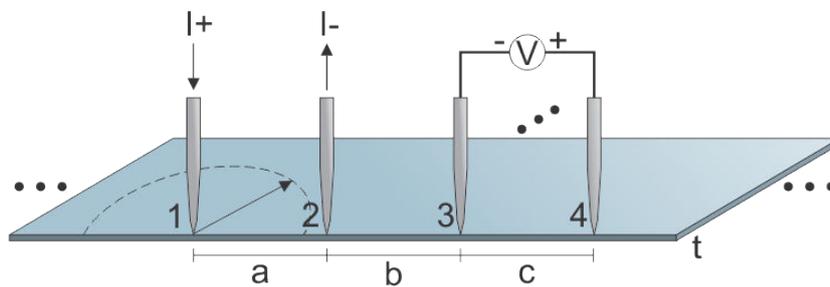


Figura 2.25: Primera configuración de van der Pauw.

La forma de dispersión de la corriente será de un semi-cilindro de altura t , la densidad de corriente cuando ingresa por la punta 1 a una distancia r , es

$$j = \frac{I}{\pi r t} \quad (2.51)$$

el campo eléctrico $E = \rho j$

$$E = \frac{\rho I}{\pi r t} \quad (2.52)$$

Por la relación del potencial y del campo eléctrico

$$E = -\frac{dV}{dr} \quad (2.53)$$

Integrando

$$V_{BA} = -\frac{\rho I}{\pi t} \int_A^B \frac{dr}{r} \quad (2.54)$$

Entonces, la diferencia de potencial de dos puntos B y A

$$V_{BA} = \frac{\rho I}{\pi t} \ln \left(\frac{r_A}{r_B} \right) \quad (2.55)$$

La diferencia de potencial de los puntos 4 y 3 cuando la corriente ingresa por el punto 1 y sale por el punto 2 como en la figura 2.25

$$V_{43} = \frac{\rho I_{12}}{\pi t} \ln \left(\frac{a+b}{a+b+c} \right) - \frac{\rho I_{12}}{\pi t} \ln \left(\frac{b}{b+c} \right) \quad (2.56)$$

$$V_{43} = \frac{\rho I_{12}}{\pi t} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right) \quad (2.57)$$

Se define una cantidad denominada resistencia característica $R_{12,43}$, cuando la corriente ingresa por el punto 1 y sale por el punto 2, y se mide el voltaje del punto 4 con respecto al punto 3

$$R_{12,43} = \frac{V_{43}}{I_{12}} = \frac{\rho}{\pi t} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right) \quad (2.58)$$

y despejando

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{12,43}} = \frac{b(a+b+c)}{(a+b)(b+c)} \quad (2.59)$$

Para una segunda configuración donde la corriente ingresa por el punto 2 y sale por el punto 3 cuando se mide la diferencia de voltaje en los puntos 1 y 2 como de la figura 2.26.

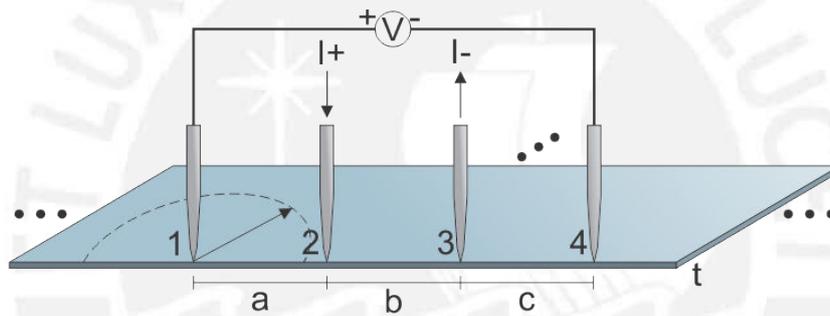


Figura 2.26: Segunda configuración de van der Pauw.

la diferencia de potencial del punto 1 y 4

$$V_{14} = \frac{\rho I_{23}}{\pi t} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{ac} \right) \quad (2.60)$$

Se define otra resistencia característica $R_{23,14}$, cuando la corriente ingresa por el punto 2 y sale por el punto 3, y se mide el voltaje del punto 1 con respecto al punto 4

$$R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} = \frac{\rho}{\pi t} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{ac} \right) \quad (2.61)$$

y despejando

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{23,14}} = \frac{ac}{(a+b)(b+c)} \quad (2.62)$$

como

$$1 = \frac{b(a+b+c)}{(a+b)(b+c)} + \frac{ac}{(a+b)(b+c)} \quad (2.63)$$

entonces la suma de las ecuaciones 2.59 y 2.62 es igual a 1

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{12,43}} + e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{23,14}} = 1 \quad (2.64)$$

y finalmente se encuentra la ecuación de van der Pauw.

Van der Pauw demostró que esta ecuación se puede extender para muestras delgadas de forma arbitraria como de la figura 2.27

Cuando $R_{12,43} = R_{23,14} = R$

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} R \quad (2.65)$$

se encuentra la ecuación (2.41) que es para una superficie ideal semi-infinita

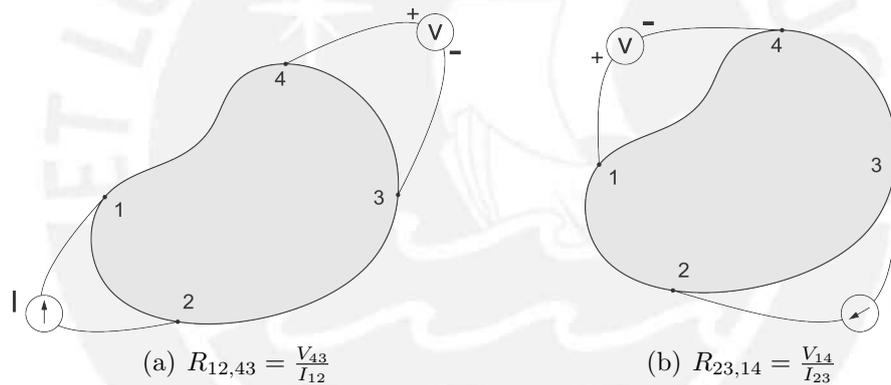


Figura 2.27: Resistencias características de van der Pauw

Con el fin de introducir efectos de inhomogeneidades a diferencia de la ecuación (2.65), se introduce un factor de corrección f que esta en función de las resistencias características

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \frac{R_{12,43} + R_{23,14}}{2} f \left(\frac{R_{12,43}}{R_{23,14}} \right) \quad (2.66)$$

si hacemos un cambio de variable

$$x_1 = \pi t R_{12,43} \quad (2.67)$$

$$x_2 = \pi t R_{23,14} \quad (2.68)$$

entonces

$$\rho = \frac{x_1 + x_2}{2 \ln 2} f \quad (2.69)$$

también

$$x_1 = \frac{1}{2} ((x_1 + x_2) + (x_1 - x_2)) \quad (2.70)$$

$$x_2 = \frac{1}{2} ((x_1 + x_2) - (x_1 - x_2)) \quad (2.71)$$

reemplazando (2.70) y (2.71) en la ecuación (2.64)

$$e^{-\frac{1}{2\rho}((x_1+x_2)+(x_1-x_2))} + e^{-\frac{1}{2\rho}((x_1+x_2)-(x_1-x_2))} = 1 \quad (2.72)$$

$$e^{-\frac{(x_1+x_2)}{2\rho}} \left(e^{-\frac{x_1-x_2}{2\rho}} + e^{\frac{x_1-x_2}{2\rho}} \right) = 1 \quad (2.73)$$

ya que, $2 \cosh(x) = e^x + e^{-x}$

$$e^{-\frac{(x_1+x_2)}{2\rho}} \left(2 \cosh \left(\frac{x_1 - x_2}{2\rho} \right) \right) = 1 \quad (2.74)$$

incluyendo una variable $f = \frac{2\rho \ln 2}{x_1+x_2}$

$$e^{-\frac{\ln 2}{f}} \left(2 \cosh \left(\frac{x_1 - x_2 \ln 2}{x_1 + x_2 f} \right) \right) = 1 \quad (2.75)$$

despejando

$$\frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left(\frac{e^{\ln 2/f}}{2} \right) \quad (2.76)$$

reemplazando las resistencias características, se encuentra la expresión matemática para el factor de corrección f de Van der Pauw

$$\frac{R_{12,43} - R_{23,14}}{R_{12,43} + R_{23,14}} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left(\frac{e^{\ln 2/f}}{2} \right) \quad (2.77)$$

Van der Pauw recomienda que para tener mediciones con un menor error, se deben usar muestras de forma simétrica, la forma de trébol como de la figura 2.29(a) es la más recomendada por minimizar los errores producidos por el tamaño del contacto, como la forma de trébol es muy difícil de producir, la forma cuadrada con los contactos en los vértices es la más aceptable como en la figura 2.29(b). Van der Pauw no recomienda usar contactos centrados

en los lados o que se encuentren en el área superficial de la muestra como en la figura 2.29(c) y 2.29(d) respectivamente.

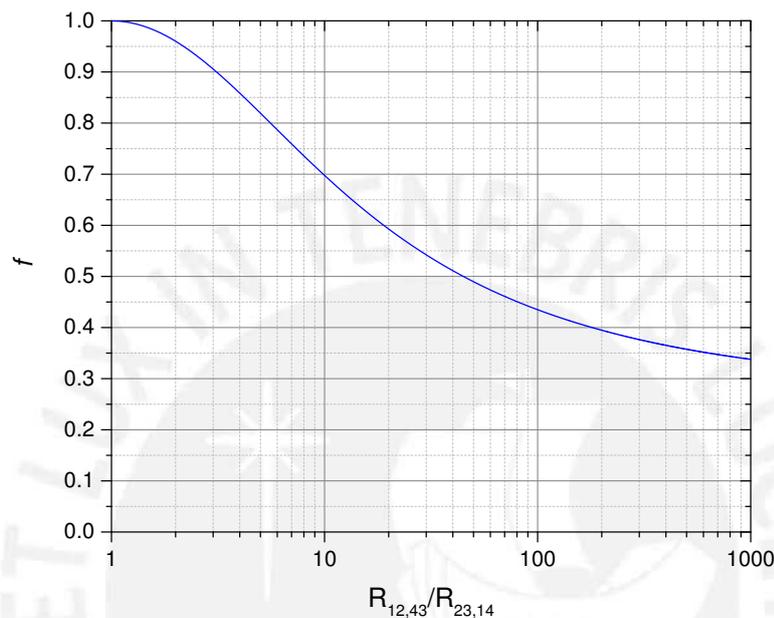


Figura 2.28: Factor de corrección f de Van der Pauw.

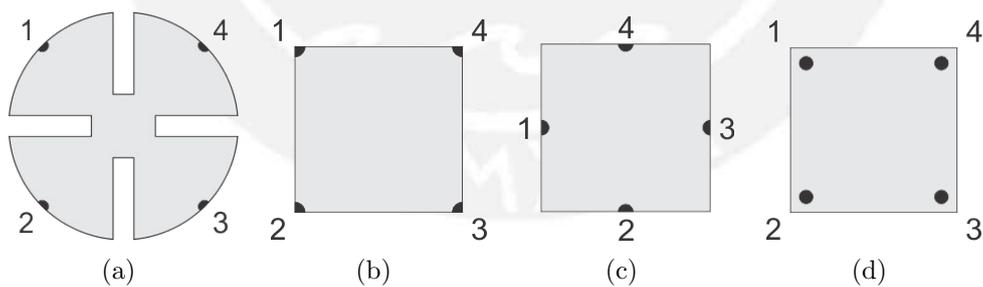


Figura 2.29: (a) Forma de trébol. (b) Forma cuadrada con los contactos en los vértices. (c) Forma cuadrada con los contactos en los lados. (d) Forma cuadrada con los contactos internos. Gráficos extraídos de [13].

Capítulo 3

Detalles experimentales

En esta sección se hace una descripción de todos los detalles de la implementación del sistema,

3.1. Método experimental

Para obtener el valor de la resistividad de una muestra se debe resolver la ecuación (2.64)

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{12,43}} + e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{23,14}} = 1 \quad (3.1)$$

Si se desea eliminar los efectos de las resistencias de los contactos y tener una seguridad de la homogeneidad en las medidas, se deben hacer ocho mediciones[14][15]. Con el promedio de las primera cuatro mediciones se obtiene la resistencia característica R_A

$$R_A = \frac{R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4} \quad (3.2)$$

y con el promedio de las otras cuatro mediciones se obtiene la resistencia característica R_B

$$R_B = \frac{R_{32,41} + R_{23,14} + R_{41,32} + R_{14,23}}{4} \quad (3.3)$$

la ecuación de Van der Pauw quedaría

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_A} + e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_B} = 1 \quad (3.4)$$

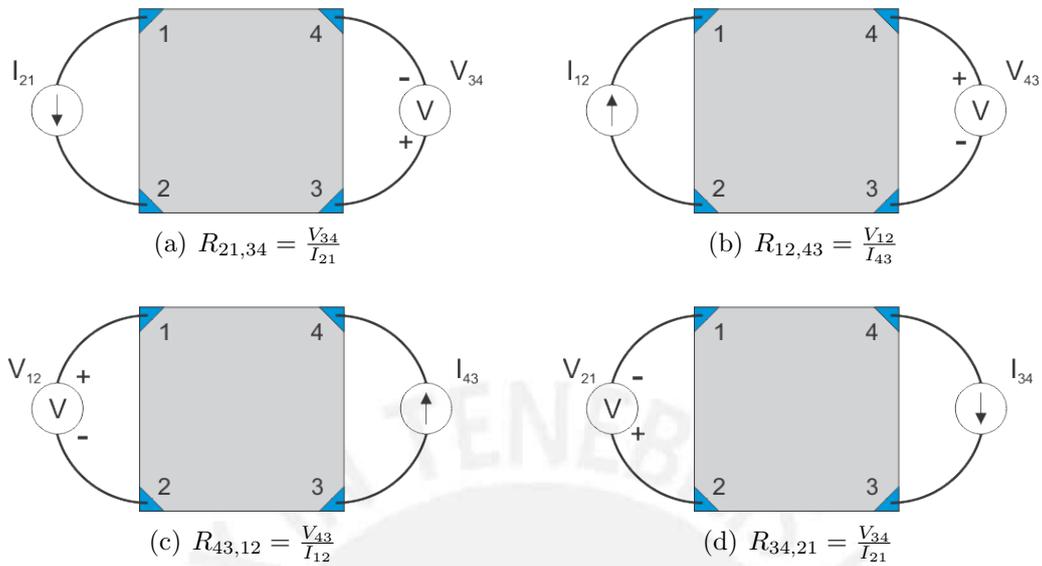


Figura 3.1: Primeras cuatro configuraciones para obtener la resistencia característica R_A .

Para una buena medición se debe comprobar que:

$$R_{21,34} = R_{12,43} \quad (3.5)$$

$$R_{43,12} = R_{34,21} \quad (3.6)$$

$$R_{32,41} = R_{23,14} \quad (3.7)$$

$$R_{23,14} = R_{23,14} \quad (3.8)$$

o al menos estas igualdades deben ser de valores muy proximos.

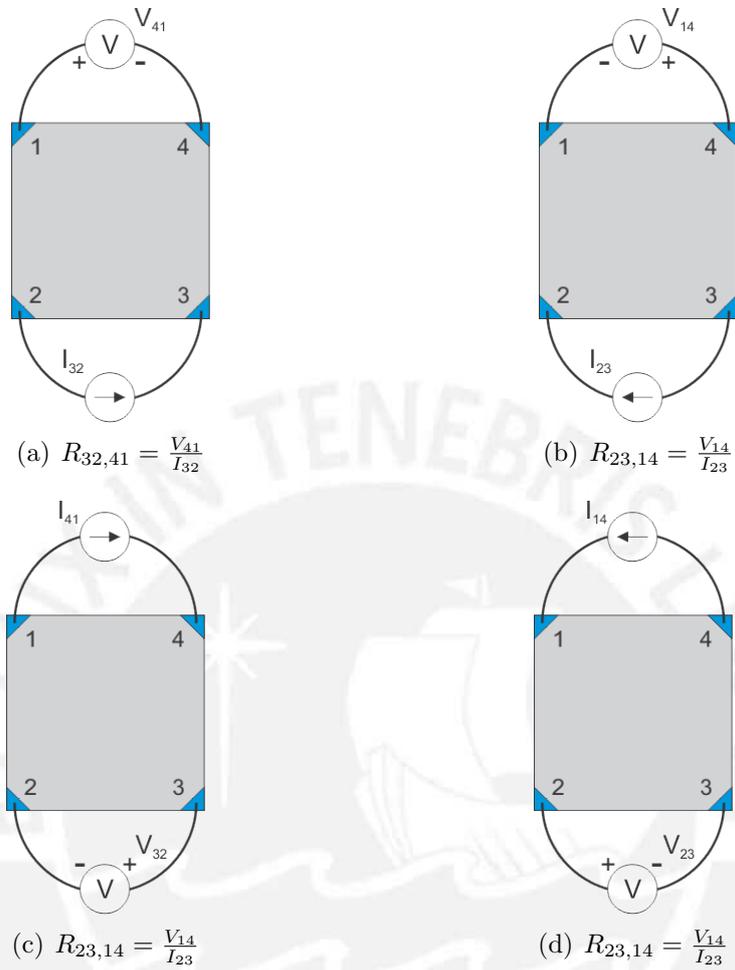


Figura 3.2: Segundas cuatro Configuraciones para obtener la resistencia característica R_B .

Como la resistividad es igual a la resistencia superficial por el espesor

$$\rho = R_s t \quad (3.9)$$

se puede reemplazar en la ecuación de Van der Pauw

$$e^{-\frac{\pi t}{R_s} R_A} + e^{-\frac{\pi t}{R_s} R_B} = 1 \quad (3.10)$$

e igualando a cero

$$e^{-\frac{\pi t}{R_s} R_A} + e^{-\frac{\pi t}{R_s} R_B} - 1 = 0 \quad (3.11)$$

Al hacer un cambio de variable $R_s = x$, se puede plantear una función $g(x)$

$$g(x) = e^{-\frac{\pi t}{x} R_A} + e^{-\frac{\pi t}{x} R_B} - 1 \quad (3.12)$$

que cuando $g(x) = 0$ se encontrará el valor de x que es igual a la resistencia superficial R_s

Por ejemplo, en la figura 3.3, se muestra la función $G(x)$ con $R_A = R_B = 6500$, donde el círculo rojo indica el punto a determinar donde $G(x) = 0$.

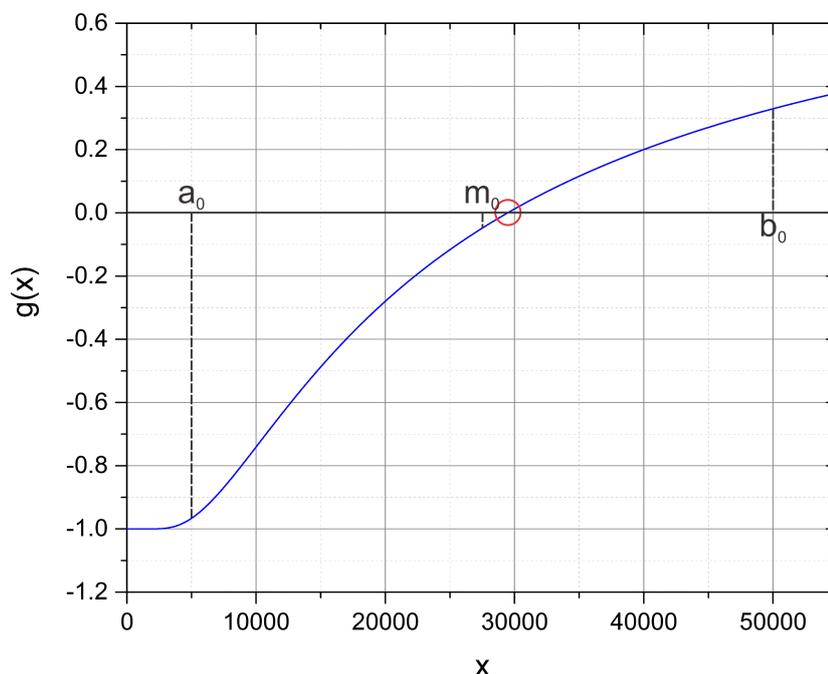


Figura 3.3: Función $g(x)$.

Para encontrar el valor de x cuando $G(x)$ es igual a 0 se usó el método de la bisección. Por ejemplo, para una primera iteración se toman dos puntos a_0 y b_0 , y se promedia para obtener un punto m_0 . Como $G(a_0).G(m_0) > 0$ y $G(m_0).G(b_0) < 0$, para la segunda iteración se hace un cambio de variables $a_1 = m_0$ y $b_1 = b_0$, y se hace el mismo procedimiento anterior. Luego de n iteraciones el punto m_n será aproximadamente igual al punto x cuando $G(x) = 0$.

3.2. Implementación del sistema

Se implementaron dos sistemas para la medición de corriente-voltaje y de Van der Pauw.

3.2.1. Sistema 1

3.2.1.1. Equipamiento y accesorios

	Características	Detalles
Fuente de corriente Keithley 220	- Corriente máxima: 100 mA - Corriente mínima: 1 nA - Voltaje máximo: 105 V	Fuente en el método de van der Pauw.
Fuente de voltaje Keithley 230	- Voltaje máximo: 101 V - Corriente máxima: 100 mA	Fuente para las medidas de corriente-voltaje.
Multímetro digital Keithley 2000	- Rangos: 10 mA, 100 mA, 1 A, 3 A - Resolución: 10 nA, 100 nA, 1 μ A, 10 μ A	En modo amperímetro.
Multímetro digital HP 34401A	- Rangos: 100 mV, 1 V, 10 V, 100V, 1000 V	En modo voltímetro.
Scanner Keithley 705	- Canales por tarjeta: 10 en modo de 2-polos, 20 en modo de 1-polo.	Conmutador programable en modo de 4-polos.
Tarjeta Keithley 7055	- Canales: 10	Accesorio con borneras para el scanner 705.
Tarjeta Keithley 7059	- Canales: 10	Accesorio con borneras para el scanner 705.
NI GPIB-USB	- Controlador GPIB de alto rendimiento. - Razones de transferencia de hasta 1.8 MB/s.	Para comunicación de los equipos con la PC.

Tabla 3.1: Lista de equipos y accesorios para el sistema 1.

3.2.1.2. Diagrama de bloques

Para el sistema de medición de corriente-voltaje se usa la fuente de voltaje Keithley 230, con el multímetro Keithley 2000 en serie para medir la corriente y el multímetro HP 34401A en paralelo para que mida el voltaje, luego la salida de la fuente se conecta a dos entradas de la tarjeta del scanner Keithley 705, y las cuatro salidas del scanner se conectan a la muestra.

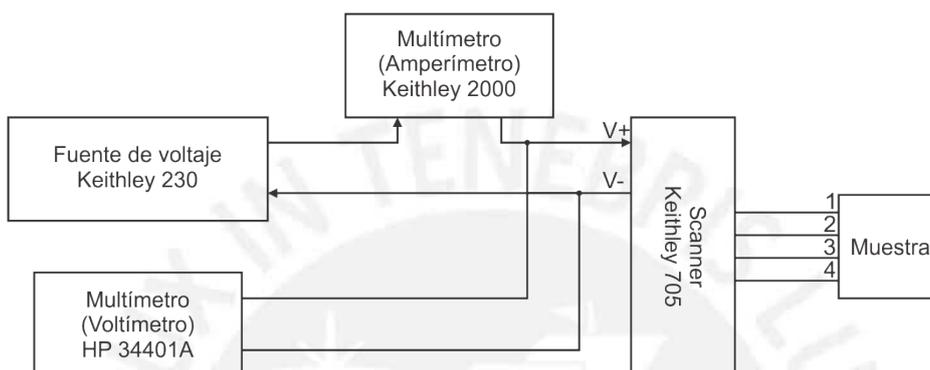


Figura 3.4: Diagrama de bloques para las mediciones de corriente-voltaje del sistema 1.

Para el sistema de medición de resistividad se usa la fuente de corriente Keithley 220 con el multímetro Keithley 2000 en serie para medir la corriente y van conectados a la primera tarjeta dentro del scanner Keithley 705. El multímetro HP 34401A se conecta a la segunda tarjeta para que mida el voltaje. Finalmente, el scanner permuta las cuatro conexiones que van a la muestra.

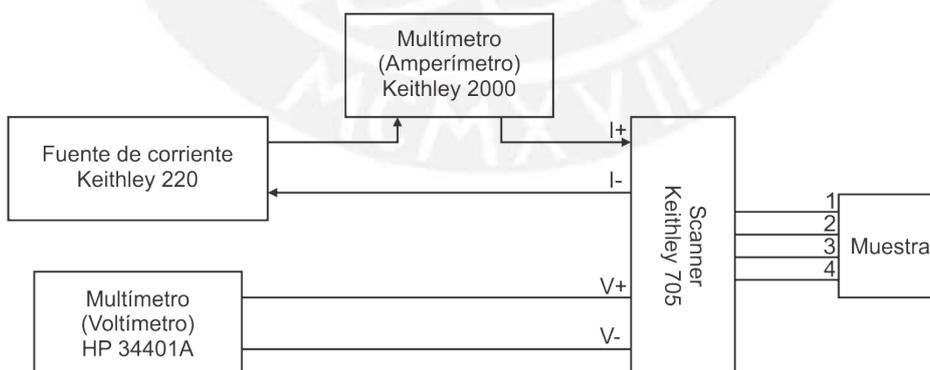
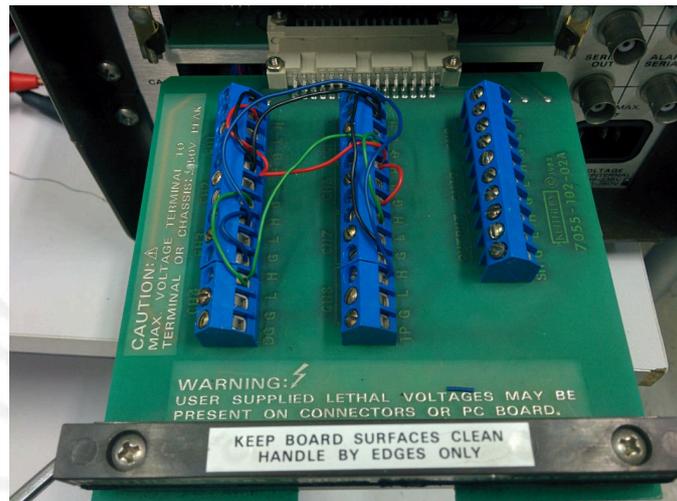


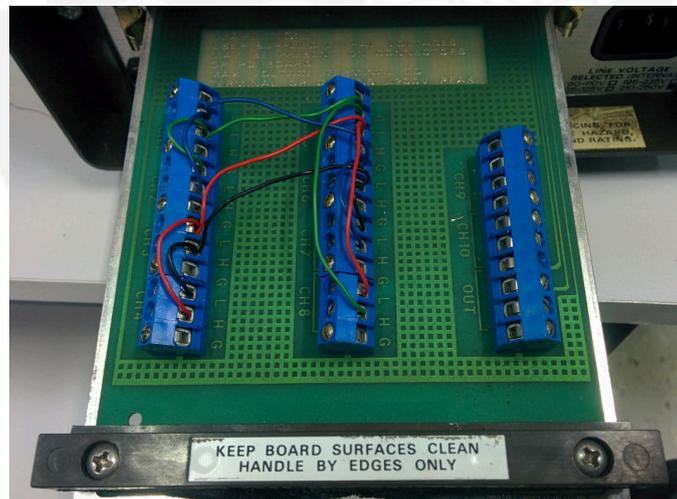
Figura 3.5: Diagrama de bloques para el método de Van der Pauw del sistema 1.

3.2.1.3. Circuito conmutador

El circuito conmutador está compuesta por las tarjetas Keithley 7055 y Keithley 7059 que están instaladas dentro del scanner Keithley 705 como en la figura 3.6 en modo de 4-polos. Cada tarjeta tiene 10 canales, por ejemplo, para obtener la primera configuración $R_{21,34}$ se cierra el canal 1 en ambas tarjetas como en la figura 3.7



(a)



(b)

Figura 3.6: Tarjetas (a) Keythley 7055 y (b) Keithley 7059, instaladas dentro del scanner Keithley 705 con sus respectivos arreglos para las permutaciones.

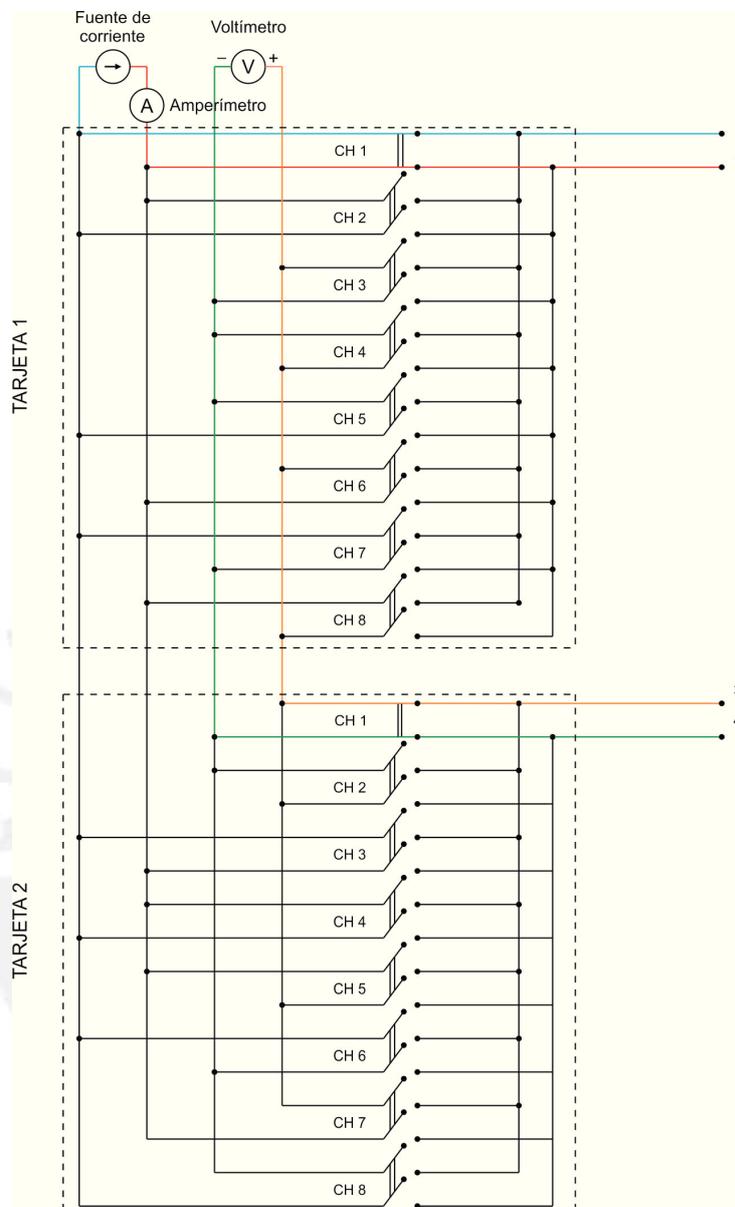


Figura 3.7: Conexiones internas de las tarjetas en el Scanner 705, cuando el canal 1 esta cerrado en ambas tarjetas se obtiene la primera configuración $R_{21,34}$.

3.2.1.4. Panel de control

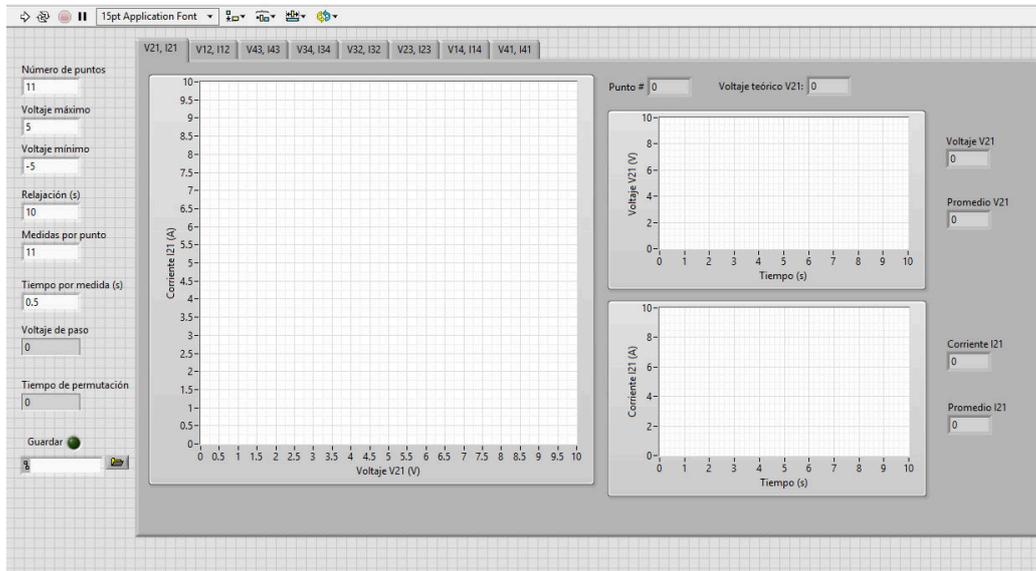


Figura 3.8: Panel de control para las mediciones de corriente-voltaje de ocho combinaciones con el sistema 1.

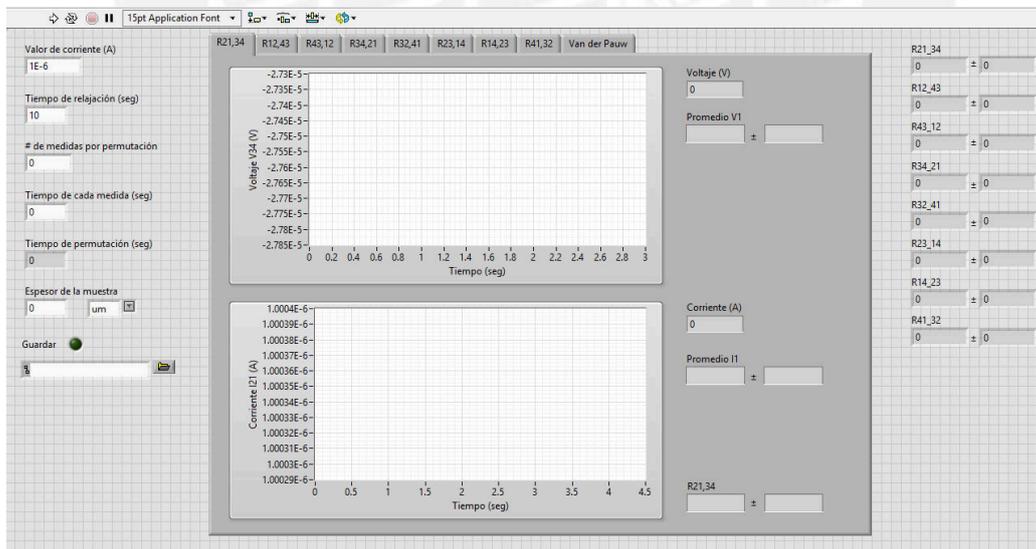


Figura 3.9: Panel de control para las mediciones de Van der Pauw con el sistema 1.



Figura 3.10: Sistema 1 para mediciones de corriente-voltaje y de resistividad por el método de Van der Pauw.

3.2.2. Sistema 2

3.2.2.1. Equipamiento

	Características	Detalles
SMU Keithley 2450	Fuente de voltaje: - Rango: 20mV, 200mV, 2V, 20V, 200V. - Resolución: 500nV, 5uV, 50uV, 500uV, 5mV. Fuente de corriente: - Rango: 10nA, 100nA, 1uA, 10uA, 100uA, 1mA, 10mA, 100mA, 1A. - Resolución: 500fA, 5pA, 50pA, 500pA, 5nA, 50nA, 500nA, 5uA, 50uA.	Se usa como fuente de corriente, fuente de voltaje, amperímetro y voltímetro.
Multímetro Keithley 2701	- Conectividad: LAN, RS232. - Número de slots: 2	Controlador para la tarjeta Keithley 2701.
Tarjeta Keithley 7709	- Tarjeta matriz 6x8, 2-polos. - Conector tipo-D de 50 pines.	Conmutador para las diferentes configuraciones.
Microscopio DinoLite	- Microscopio digital de 2MP. - Cuenta con luz blanca y ultravioleta.	Para posicionar las puntas correctamente en los contactos.
Estación de pruebas	- 4 microproscionadores XYZ. - 4 puntas de prueba de tungsteno. - Base de platino.	

Tabla 3.2: Lista de equipos y accesorios para el sistema 2.

3.2.2.2. Diagrama de bloques

En este segundo sistema de medición se usa el SMU Keithley 2450 como fuente y como instrumento de medida. El Keithley 2450 cuenta con dos bornes FORCE y dos bornes SENSE que se usan como fuente y como sensor de medida respectivamente en la parte frontal y posterior como se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11: Keithley 2450 (a) Frontal (b) Posterior.

Para el sistema de medición de corriente-voltaje solo se usan los bornes FORCE como fuente de voltaje y como amperímetro, para el sistema de Van der Pauw se usa los bornes FORCE como fuente de corriente y los bornes SENSE como voltímetro, todas las salidas del Keithley 2450 y del multímetro 2701 van conectadas a una caja de conexiones, donde el multímetro decide a que punto de la muestra va cada salida del Keithley 2450 como en la figura 3.12.

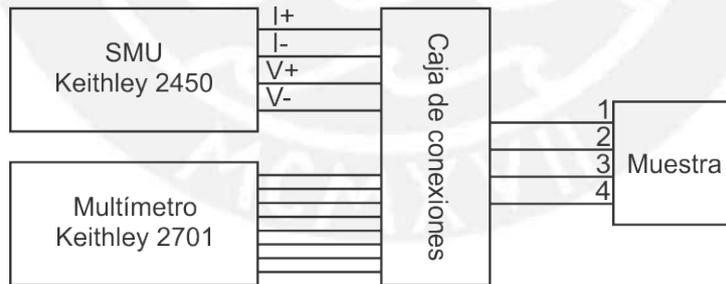


Figura 3.12: Diagrama de bloques para el sistema 2.

3.2.2.3. Circuito conmutador

El multímetro Keithley 2701 cuenta con dos slots para insertar tarjetas, en este sistema se usó la tarjeta Keithley 7709 que actúa como conmutador,

La tarjeta 7709 es una tarjeta matriz con seis filas y ocho columnas de 48 canales y una salida DB de 50 PINES, los bornes FORCE del Keithley 2450 se conectan a la primera fila de la tarjeta y los bornes SENSE se conectan a la segunda fila. Las columnas de la tarjeta van conectadas a los cuatro puntos de la muestra como en la figura 3.13, también se indica a que PIN del conector DB va cada conexión.

Por ejemplo, para obtener la primera configuración $R_{21,34}$ se cierra el canal 1 y el canal 10 como en la figura 3.13.

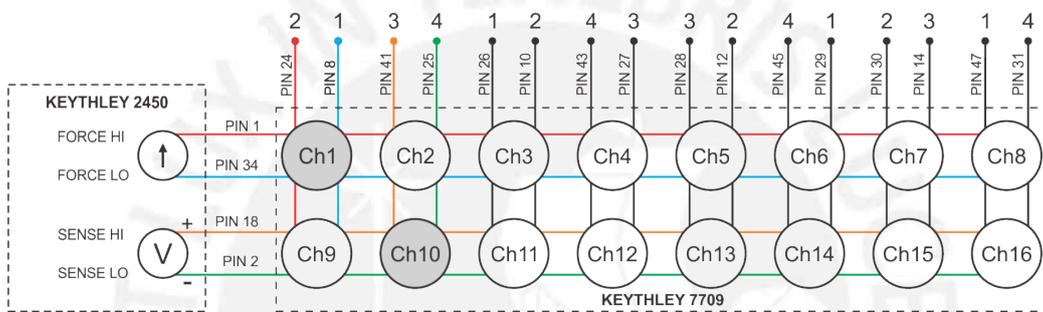


Figura 3.13: Conexiones y canales de la tarjeta Keithley 7708.



Figura 3.14: Parte posterior del sistema 2 mostrando las conexiones.

3.2.2.4. Panel de control

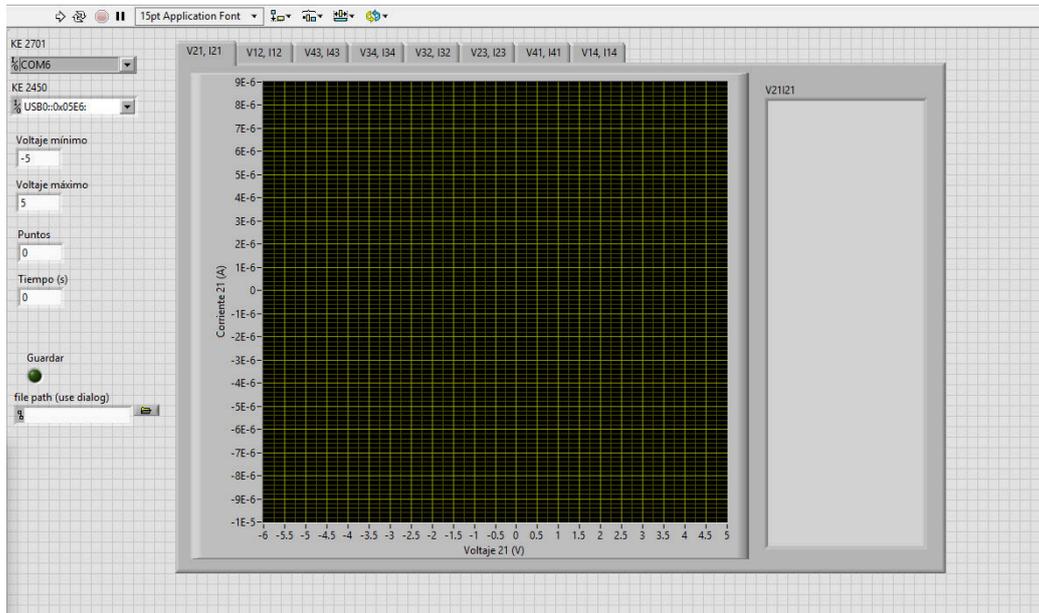


Figura 3.15: Panel de control para las mediciones de corriente-voltaje de ocho combinaciones con el sistema 2.

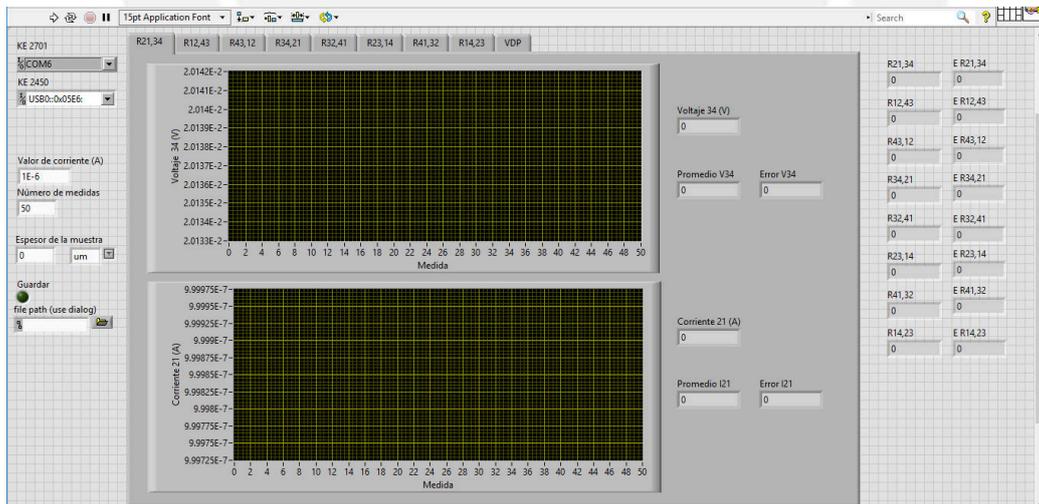


Figura 3.16: Panel de control para las mediciones de Van der Pauw con el sistema 2.



Figura 3.17: Sistema 2 para mediciones de corriente-voltaje y de resistividad por el método de Van der Pauw.

Observación: Todos los programas de medición de los sistemas 1 y 2, de corriente-voltaje y de resistividad, se encuentran adjuntos al CD incluyendo su código fuente.

3.2.3. Prueba de medición

Para unas pruebas de medición se uso una lamina de aleación de oro con un poco de platino de 0.1 mm de grosor, se utilizó el segundo sistema de van der Pauw, por que el SMU 2450 puede generar corrientes de hasta de 1A, que es necesaria para materiales de muy baja resistividad.

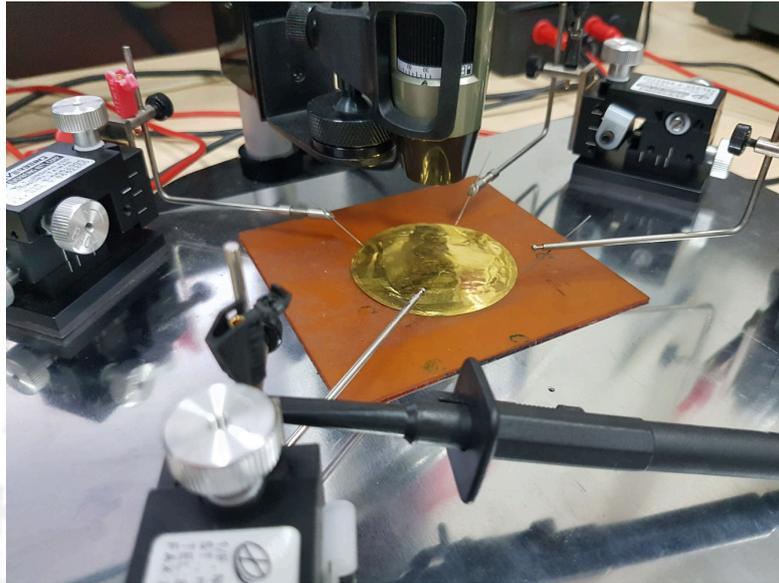


Figura 3.18: Método de Van der Pauw en una lamina circular de oro.

Para la obtención de los datos se hacen cinco medidas, en cada medida, se hacen 50 medidas por permutación en medio segundo. El resultado es el siguiente:

Corriente 1A	R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_s (Ω)	f	ρ ($\Omega - cm$)
Medida 1	1.24E-04	5.90E-05	3.97E-04	9.54E-01	4.00E-06
Medida 2	1.23E-04	5.80E-05	3.91E-04	9.53E-01	4.00E-06
Medida 3	1.20E-04	5.80E-05	3.87E-04	9.53E-01	4.00E-06
Medida 4	1.21E-04	5.80E-05	3.89E-04	9.55E-01	4.00E-06
Medida 5	1.23E-04	6.00E-05	3.96E-04	9.57E-01	4.00E-06
Promedio	1.22E-04	5.86E-05	3.92E-04	9.55E-01	4.00E-06

Tabla 3.3: Resultados de medición de la medición de resistividad de la lámina de oro.

La resistividad del oro con un poco platino es de 4.00E-06 $\Omega - cm$.

3.3. Preparación de la muestra

3.3.1. Corte y limpieza de las muestras

La muestra es cortada, de una oblea de silicio, con unas dimensiones que puedan encajar en los agujeros extremos de la máscara para que los contactos puedan ser depositados en los vértices de la muestra. La muestra y la máscara deben ser limpiadas en un recipiente ultrasónico con alcohol isopropílico por 10 minutos como se le muestra en la figura 3.19



Figura 3.19: Muestra de silicio y la máscara en el recipiente ultrasónico.

Cuidadosamente se debe retirar la muestra del recipiente ultrasónico y debe ser secada con hisopos, luego se le debe adherir a la máscara, con los agujeros de los extremos de la máscara en los vértices de la muestra como en la figura 3.20.

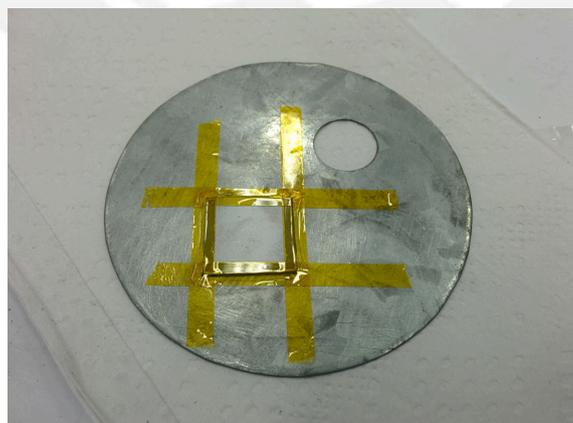


Figura 3.20: Muestra adherida en la máscara.

3.3.2. Deposición de contactos

Para la deposición de contactos se usó una evaporadora Balzers (figura 3.21). Primeramente, se colocan el material a depositar dentro de un crisol de tungsteno, que para nuestro caso son pepitas cilíndricas de aluminio de 99.9% de pureza, y la máscara con la muestra en la parte superior dentro de la cámara del Balzers (figura 3.21).

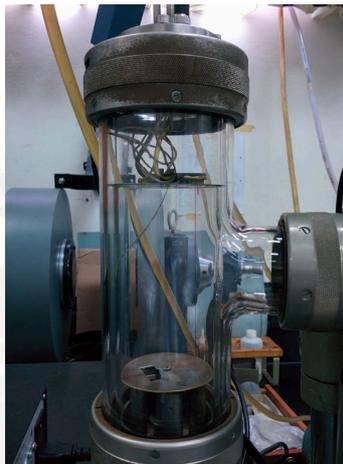


Figura 3.21: Evaporadora Balzers.

La cámara del Balzers debe estar a muy baja presión (alrededor de $3 \times 10^{-5} \text{ mbar}$) para empezar la deposición, luego en el crisol se hace fluir una corriente de 3 a 15 Amperios que hace al aluminio fundirse y luego se vaporiza hasta llegar a la máscara con la muestra como en la figura 3.22.



Figura 3.22: Deposición de los contactos de aluminio.

El resultado de la deposición de contactos es el siguiente:

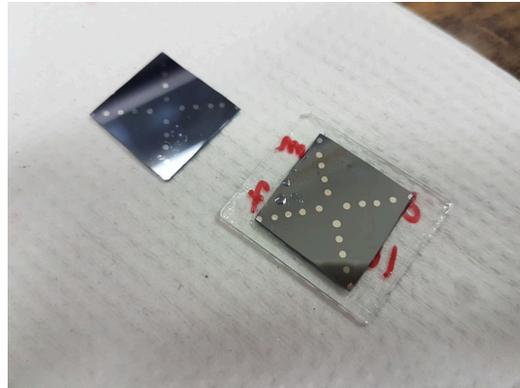


Figura 3.23: Muestra con los contactos depositados.

3.3.3. Tratamiento térmico

Para disminuir las capas de oxido entre la unión metal-semiconductor se le debe someter a la muestra a un tratamiento térmico de 500°C por 15 minutos a una presión de $4 \times 10^{-1} \text{mbar}$ dentro de un tubo de cuarzo con un flujo continuo de nitrógeno para evitar la contaminación con el agua y el oxígeno del ambiente como en la figura 3.24.



Figura 3.24: Tratamiento térmico

Capítulo 4

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos, primero las curvas de corriente-voltaje, luego las medidas de resistividad cumpliendo las condiciones de Van der Pauw y finalmente se presentan los efectos cuando se hacen medidas de resistividad dentro de la muestra en diferentes distancias y configuraciones.

4.1. Caracterización de contactos

Para la caracterización de los contactos se hicieron medidas de corriente-voltaje, haciendo variar el voltaje de -5V a 5V y midiendo la corriente en las configuraciones de los puntos que en más adelante se le harán las medidas de resistividad.

El objetivo de esta medición es obtener curvas de corriente-voltaje lineales para tener seguridad de que los contactos sean del tipo-ohmico y luego poder proceder con las medidas de resistividad.

4.1.1. Silicio tipo-p de bajo dopaje

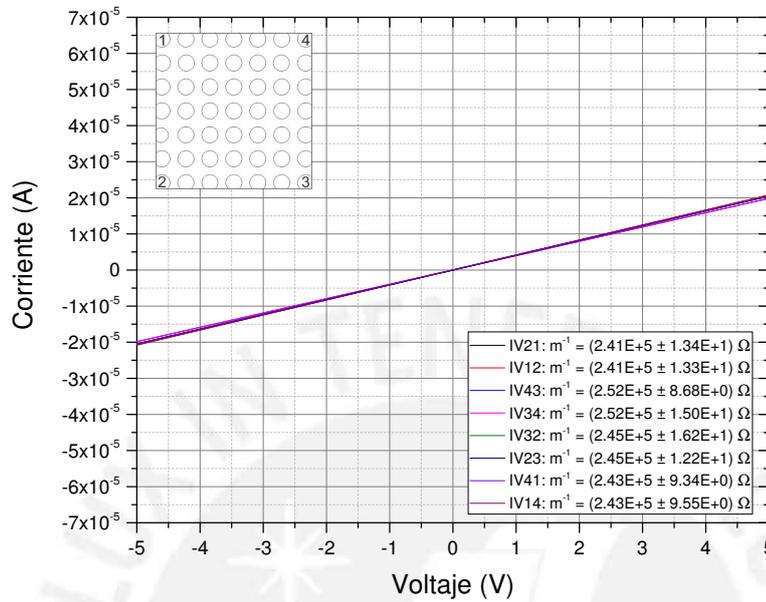


Figura 4.1: Mediciones de 8-IV para el primer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-p de bajo dopaje.

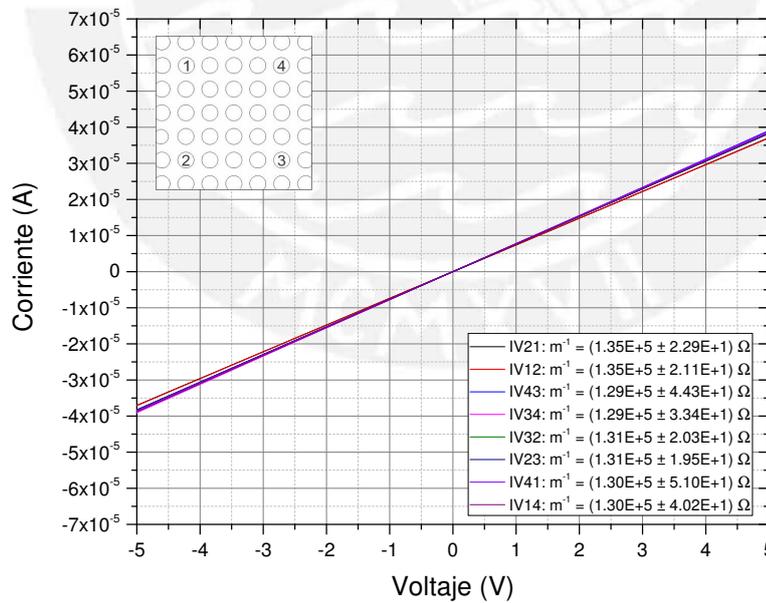


Figura 4.2: Mediciones de 8-IV para el segundo caso de la configuración aspa para el silicio tipo-p de bajo dopaje.

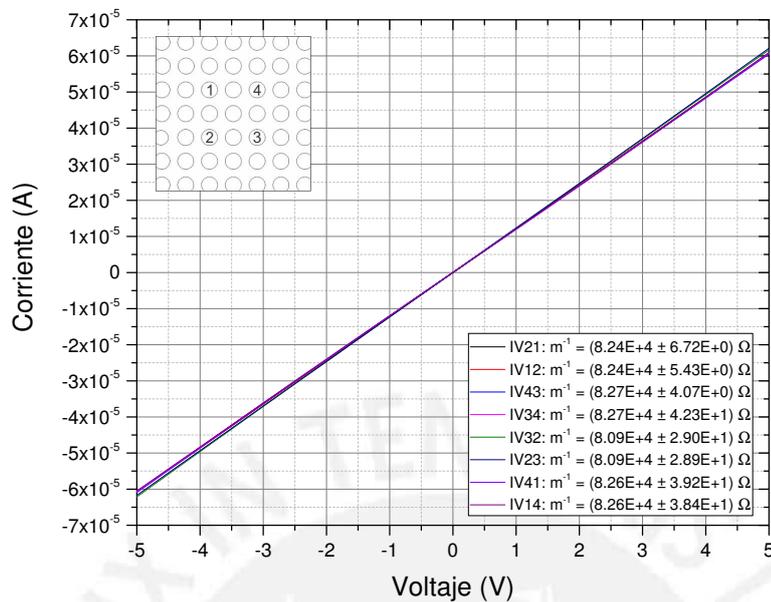


Figura 4.3: Mediciones de 8-IV para el tercer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-p de bajo dopaje.

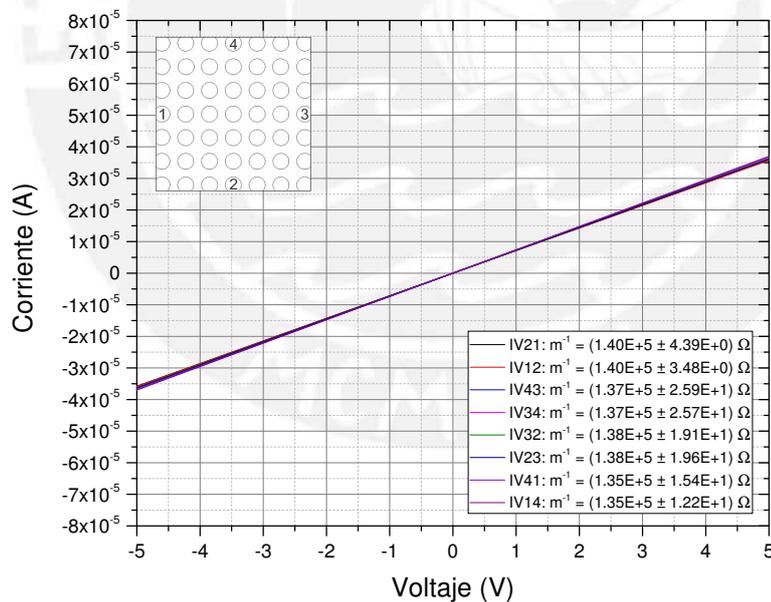


Figura 4.4: Mediciones de 8-IV para el primer caso de la configuración cruz para el silicio tipo-p de bajo dopaje.

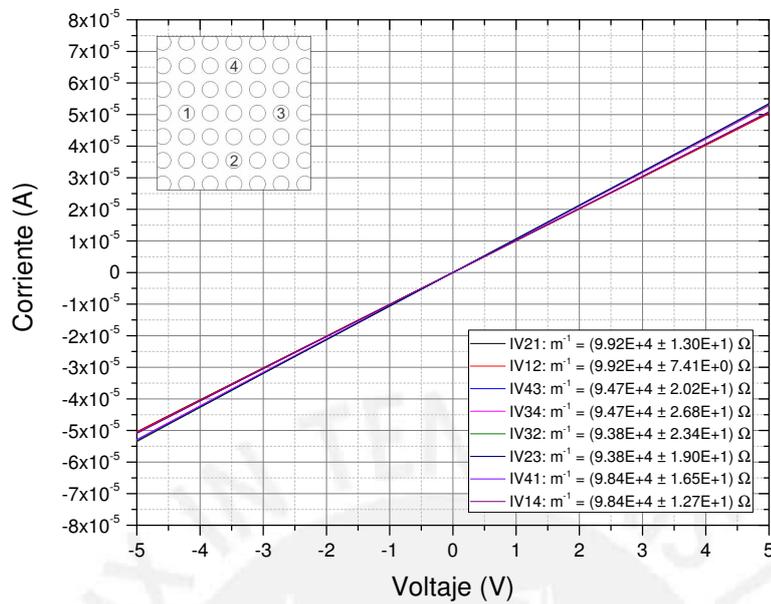


Figura 4.5: Mediciones de 8-IV para el segundo caso de la configuración cruz para el silicio tipo-p de bajo dopaje.

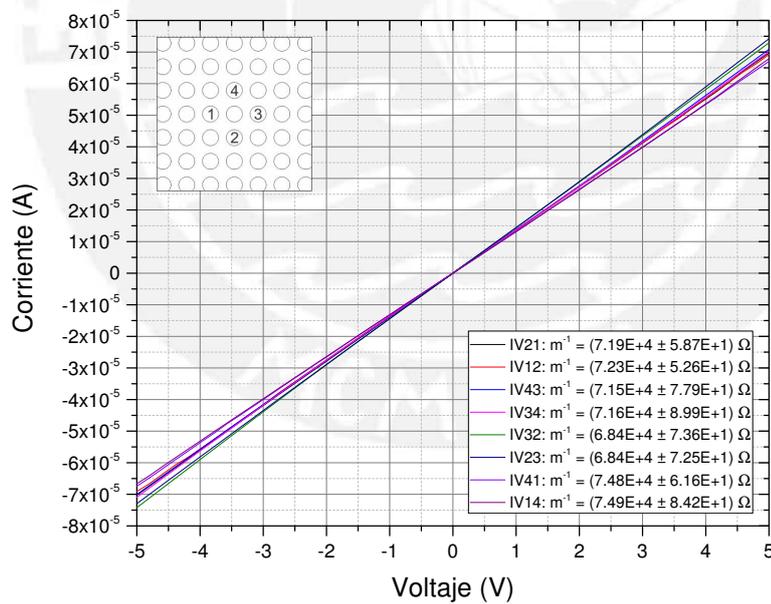


Figura 4.6: Mediciones de 8-IV para el tercer caso de la configuración cruz para el silicio tipo-p de bajo dopaje.

4.1.2. Silicio tipo-n de bajo dopaje

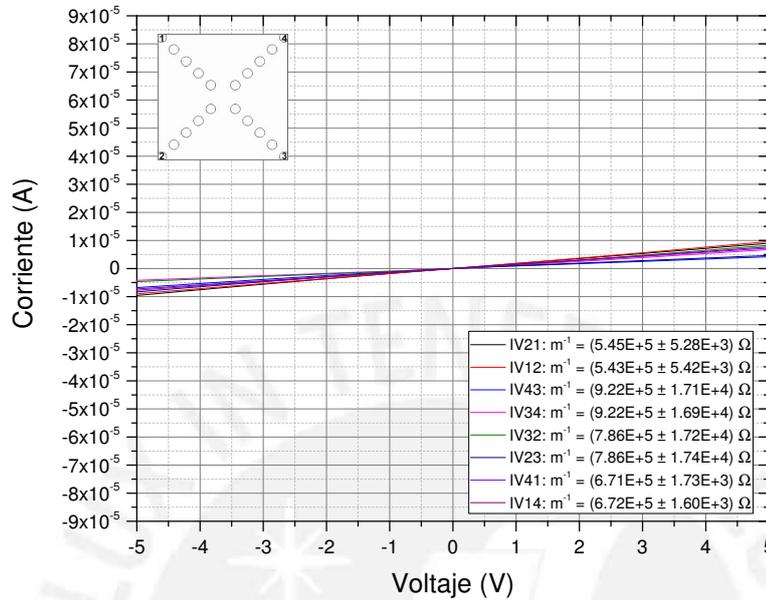


Figura 4.7: Mediciones de 8-IV para el primer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.

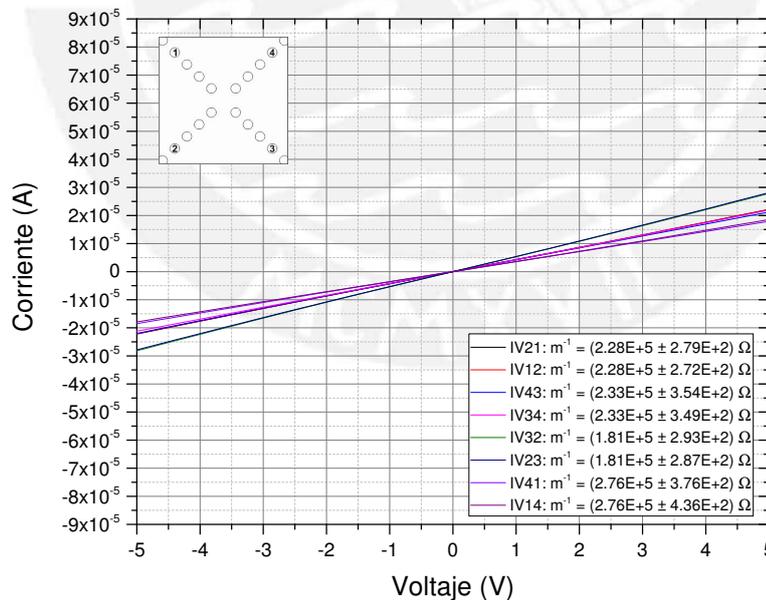


Figura 4.8: Mediciones de 8-IV para el segundo caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.

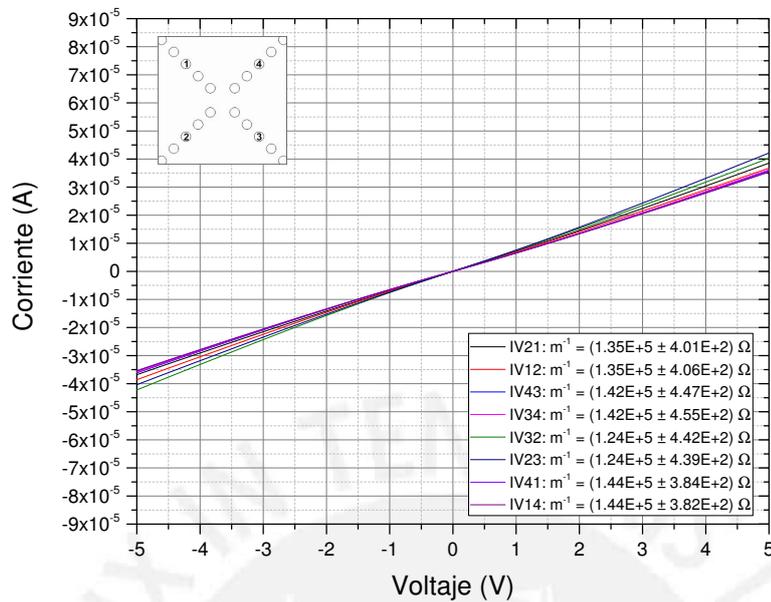


Figura 4.9: Mediciones de 8-IV para el tercer caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.

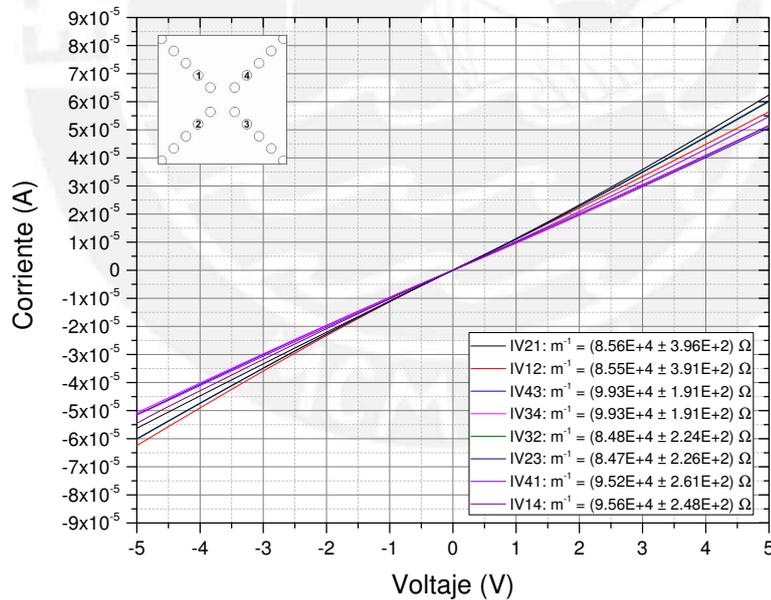


Figura 4.10: Mediciones de 8-IV para el cuarto caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.

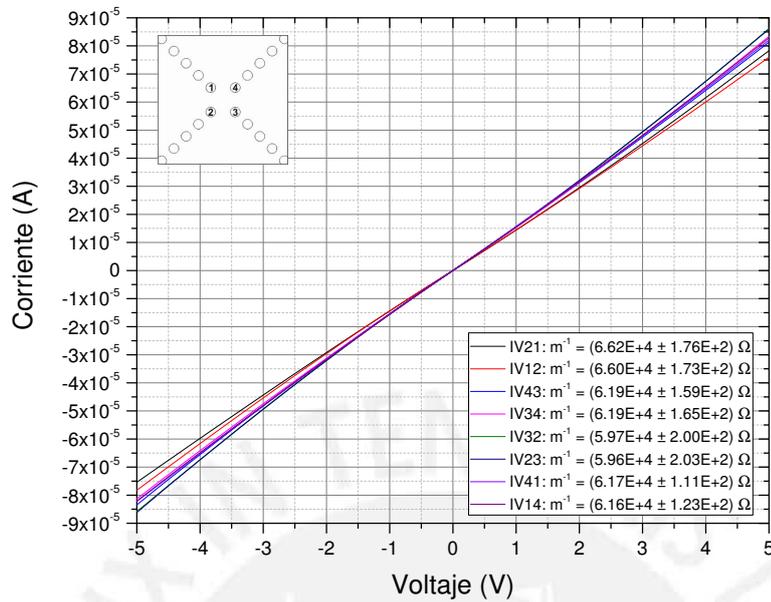


Figura 4.11: Mediciones de 8-IV para el quinto caso de la configuración aspa para el silicio tipo-n de bajo dopaje.

Con todas las curvas I-V obtenidas de los contactos se comprueba que son del tipo ohmico, por su carácter lineal, después de haber hecho un tratamiento térmico.

También se puede observar que mientras los contactos estén más cerca, la pendiente aumenta, como la resistencia se obtiene de la inversa de la pendiente de la curva I-V, y la resistencia depende de las dimensiones, cuando los contactos estén más cerca la resistencia disminuye.

4.2. Medidas de resistividad

Las medidas de resistividad se proceden cumpliendo las condiciones de Van der Pauw, haciendo las mediciones de resistividad en los contactos que se encuentran en la periferia de la muestra. Para obtener los datos se harán 50 mediciones de cada configuración en 0.5 segundos.

4.2.1. Silicio tipo-p de bajo dopaje

La muestra de silicio tipo-p es de $400\mu m$ de espesor y de lado de 7 mm.

4.2.1.1. En los vértices

Corriente	$R_A (\Omega)$	$R_B (\Omega)$	f	$R_s (\Omega)$	$\rho (\Omega - cm)$
$1 \mu A$	20094.6559	17517.4171	0.9984	85099.0746	3403.9630
$5 \mu A$	20067.6245	17501.7672	0.9984	85001.7163	3400.0687

Tabla 4.1: Resultados de medidas de resistividad para un silicio de bajo dopaje tipo-p en los vértices.

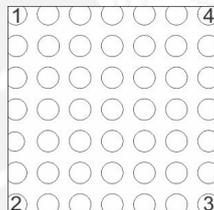


Figura 4.12: Contactos ubicados en los vértices de la muestra.

4.2.1.2. En los lados

Corriente	$R_A (\Omega)$	$R_B (\Omega)$	f	$R_s (\Omega)$	$\rho (\Omega - cm)$
$1 \mu A$	19221.2189	17432.5225	0.9992	82994.9374	3319.7975
$2 \mu A$	19204.9765	17405.9803	0.9992	82898.3131	3315.9325
$5 \mu A$	19205.0180	17400.6085	0.9988	82885.4626	3315.4185

Tabla 4.2: Resultados de medidas de resistividad para un silicio de bajo dopaje tipo-p en los lados.

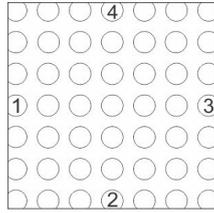


Figura 4.13: Contactos ubicados en los lados de la muestra.

Como se puede observar al medir la resistividad en los vértices, que es lo que recomienda Van der Pauw, y medir en los lados, lo cual no es recomendado, las medidas de resistividad son diferentes.

4.2.2. Silicio tipo-n de bajo dopaje

La muestra de silicio tipo-n de $625\mu\text{m}$ de espesor y de 18 mm de lado.

4.2.2.1. En los vértices

Corriente	$R_A (\Omega)$	$R_B (\Omega)$	f	R_s	ρ
$1\mu\text{A}$	16567.5757	16168.2279	0.9999	74182.9620	4636.4351
$2\mu\text{A}$	16482.9854	16291.0548	1.0000	74269.0160	4641.8135
$5\mu\text{A}$	16412.0497	16577.4932	1.0000	74756.7980	4672.2999
$10\mu\text{A}$	16304.4152	16917.3568	0.9999	75278.2659	4704.8916

Tabla 4.3: Resultados de medidas de resistividad para un silicio de bajo dopaje tipo-n en los vértices.

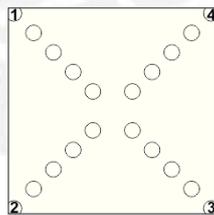


Figura 4.14: Contactos ubicados en los vértices de la muestra.

Como se pueden ver en los resultados, la resistividad no es constante cuando la corriente aplicada aumenta, esto se debe a que a mayor corriente la muestra se puede calentar, y por ser un semiconductor se vuelve menos resistivo, también la resistividad disminuye debido a la inyección de portadores mayoritarios y/o minoritarios en la muestra[7].

4.3. Efectos de las medidas sobre la superficie de la muestra

En esta sección se harán medidas de resistividad con los contactos sobre la superficie de la muestra, incumpliendo la condición de Van der Pauw, que siempre las medidas se deben hacer con los contactos en los vértices de una muestra cuadrada. Entonces, a partir de la ecuación (2.66)

$$\rho = t \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_A + R_B}{2} f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \quad (4.1)$$

se agrega el factor de corrección $k(s/d)$

$$\rho = t k\left(\frac{s}{d}\right) \frac{R_A + R_B}{2} f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \quad (4.2)$$

El factor de corrección k depende de la proporción de la distancia entre los contactos y de la longitud del lado de la muestra.

Entonces para obtener k

$$k\left(\frac{s}{d}\right) = \frac{2\rho}{t(R_A + R_B) f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)} \quad (4.3)$$

donde ρ es la resistividad medida en los vértices.

Por lo tanto, para el caso de la medida de resistividad con los contactos en los vértices, la proporción sería $s/d = 1$ como en la figura 4.15(a) y en el caso de la medida de resistividad con los contactos centrados en los lados como en la figura 4.15(b), la proporción cambiaría a $s/d = \sqrt{2}/2$ que es una distancia menor que cuando los contactos están en los vértices y por tanto una menor medida de resistencias características como se encontró en la sección 4.2.1.

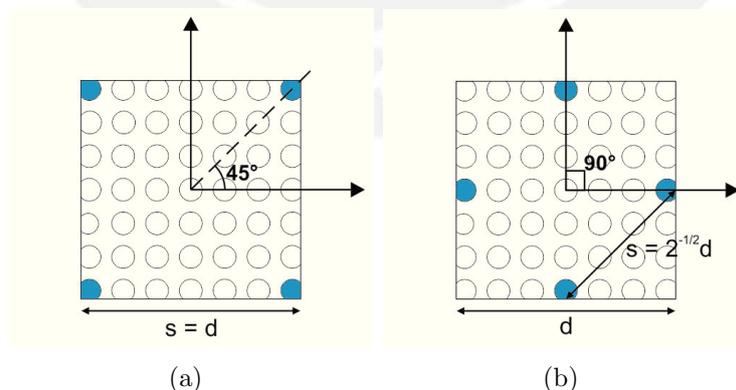


Figura 4.15: Configuraciones en (a) aspa y (b) cruz.

Además, se debe tener en cuenta el efecto del ángulo de la posición de los contactos, cuando se toma de referencia dos ejes en el centro de la muestra como en la figura 4.15.

4.3.1. Silicio tipo-p de bajo dopaje

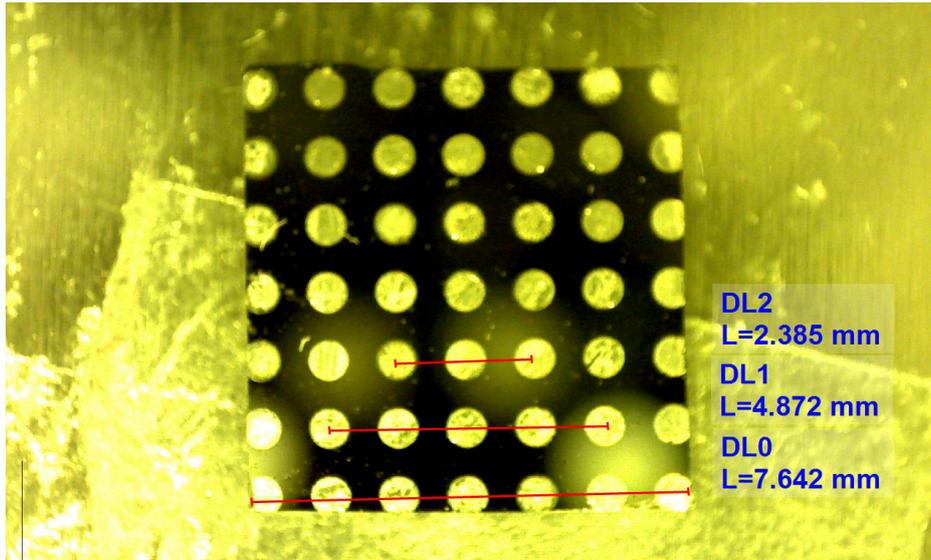


Figura 4.16: Muestra semiconductor tipo-p de bajo dopaje.

Corriente	R_A (Ω)	R_B (Ω)	f	k	s/d	Configuración
$1 \mu A$	20094.6559	17517.4171	0.9984	4.5325	1.0000	
$5 \mu A$	20067.6245	17501.7672	0.9984	4.5324		
$1 \mu A$	18575.7171	17000.5937	0.9993	4.7873	0.6383	
$5 \mu A$	18578.3821	17003.2600	0.9993	4.7811		
$1 \mu A$	13464.6195	12674.4054	0.9997	6.5133	0.3165	
$5 \mu A$	13544.0835	12743.4326	0.9997	6.4692		

Tabla 4.4: Resultados de resistencias características para un silicio tipo-p de bajo dopaje de $8mm^2$ en configuración de aspa

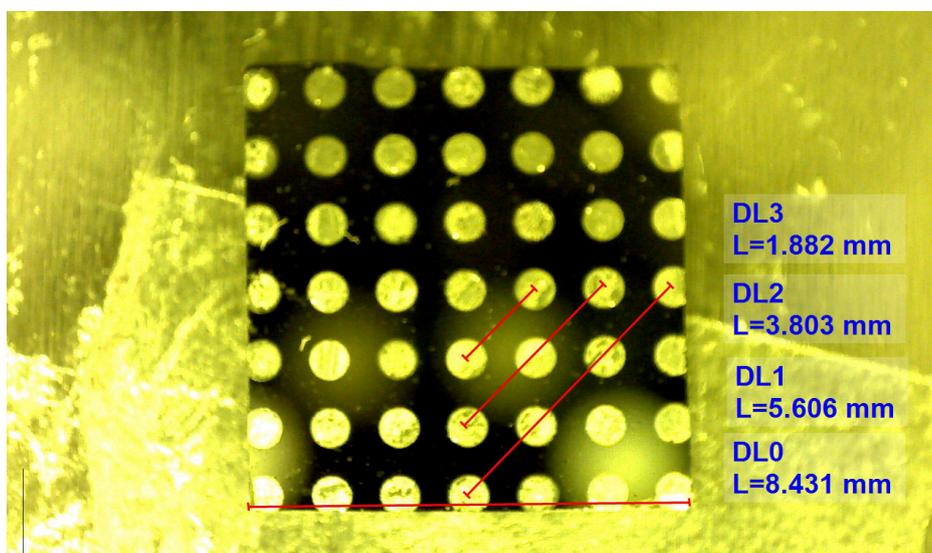


Figura 4.17: Muestra semiconductor tipo-p de bajo dopaje.

Corriente	$R_A (\Omega)$	$R_B (\Omega)$	f	k	s/d	Configuración
$1\mu A$	19221.2189	17432.5225	0.9992	4.5323	0.6643	
$2\mu A$	19204.9765	17405.9803	0.9992	4.5324		
$5\mu A$	19205.0180	17400.6085	0.9988	4.5341		
$1\mu A$	15845.3326	14981.5115	0.9997	5.3861	0.4516	
$2\mu A$	15844.6231	14958.3234	0.9997	5.3840		
$5\mu A$	15858.3546	14980.7887	0.9996	5.3775		
$1\mu A$	11191.3420	11069.0962	1.0000	7.4568	0.2239	
$2\mu A$	11194.4299	11070.0135	1.0000	7.4468		
$5\mu A$	11196.2476	11071.9387	1.0000	7.4444		

Tabla 4.5: Resultados de resistencias características para un silicio tipo-p de bajo dopaje de $8mm^2$ en configuración de cruz

Se comparan los resultados obtenidos del factor de corrección k con los resultados teóricos obtenidos por Green y Gunn [3]

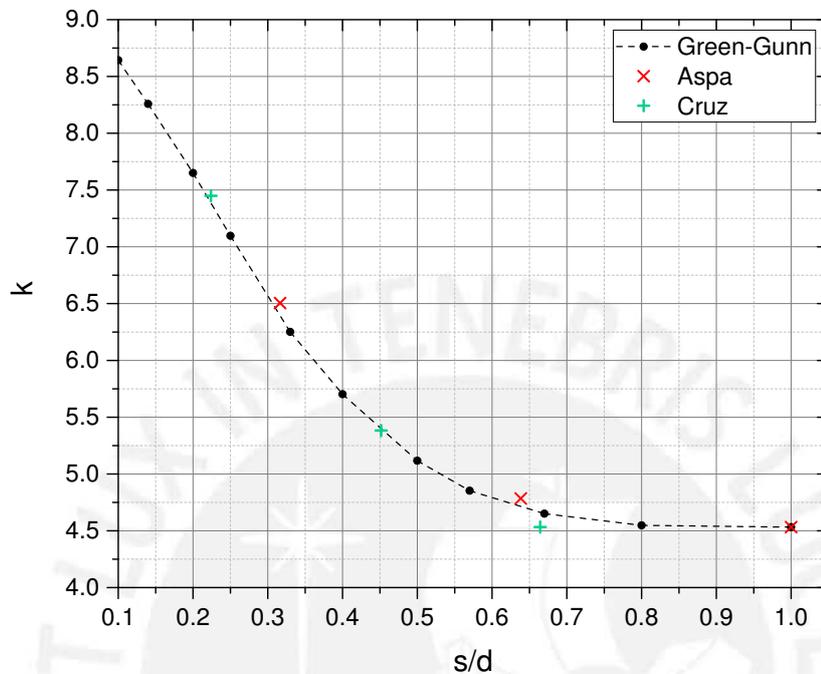


Figura 4.18: Factor de corrección k obtenido para un semiconductor tipo-p de bajo dopaje.

Como se puede observar, los resultados son muy cercanos a los resultados de Green-Gunn, pero aproximadamente el resultado es el mismo para la configuración aspa con los contactos en los vértices ($s/d=1$) y es cercano cuando los contactos están en los lados ($s/d=0.6$) en la configuración cruz.

4.3.2. Silicio tipo-n de bajo dopaje

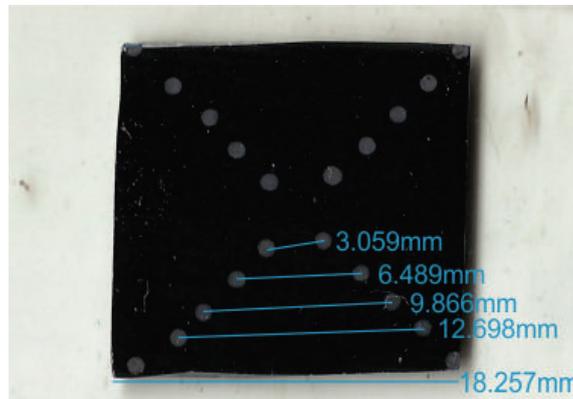


Figura 4.19: Muestra semiconductor tipo-n de bajo dopaje.

Corriente	R_A (Ω)	R_B (Ω)	f	k	s/d	Configuración
$1\mu A$	16567.5757	16168.2279	0.9999	4.5325	1.0000	
$2\mu A$	16482.9854	16291.0548	1.0000	4.5322		
$5\mu A$	16412.0497	16577.4932	1.0000	4.5322		
$10\mu A$	16304.4152	16917.3568	0.9999	4.5324		
$1\mu A$	17080.1060	14001.3321	0.9966	4.7898	0.6955	
$2\mu A$	16931.9102	13940.9724	0.9967	4.8270		
$5\mu A$	16932.7887	13958.3050	0.9968	4.8557		
$10\mu A$	16921.9188	13977.5030	0.9968	4.8879		
$1\mu A$	16538.0559	12295.2754	0.9924	5.1848	0.5415	
$2\mu A$	16484.8602	12220.0095	0.9923	5.2149		
$5\mu A$	16419.9550	12243.1953	0.9926	5.2552		
$10\mu A$	16496.6081	12291.0388	0.9925	5.2692		
$1\mu A$	13509.8339	11327.0784	0.9973	5.9897	0.3554	
$2\mu A$	13511.8930	11340.8426	0.9973	5.9926		
$5\mu A$	13663.4445	11439.9663	0.9973	5.9722		
$10\mu A$	13734.6044	11472.7306	0.9972	5.9895		
$1\mu A$	10468.5208	7426.1967	0.9899	8.3758	0.1676	
$2\mu A$	10496.1393	7445.9045	0.9899	8.3634		
$5\mu A$	10515.3206	7452.6797	0.9898	8.4066		
$10\mu A$	10489.9761	7432.6127	0.9898	8.4869		

Tabla 4.6: Resultados de resistencias características para un silicio tipo-n de bajo dopaje de $18mm^2$ en configuración de aspa.

Se comparan los resultados obtenidos del factor de corrección k con los resultados teóricos obtenidos por Green y Gunn [3]

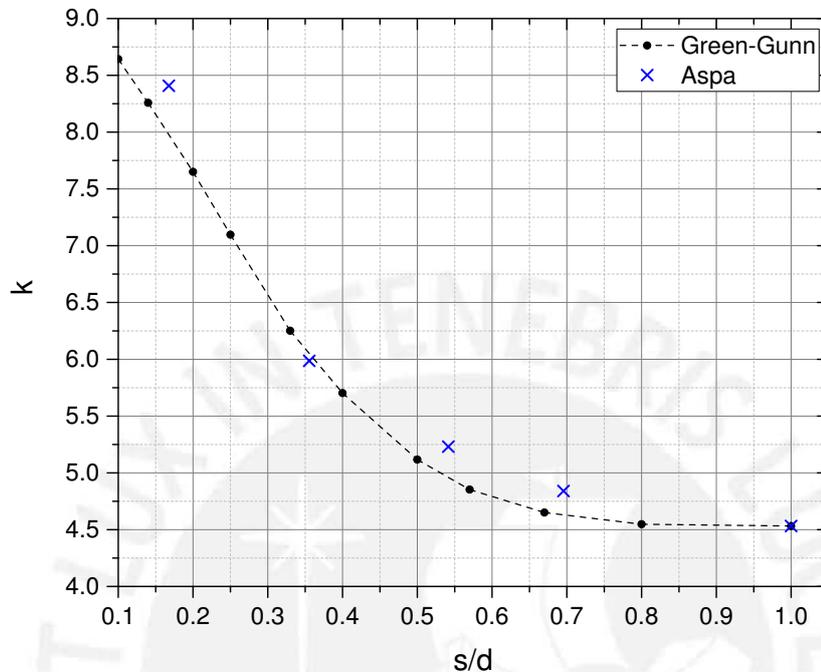


Figura 4.20: Factor de corrección k obtenido para el semiconductor tipo-n de bajo dopaje.

Como se puede observar, los resultados son algo irregulares con respecto a los resultados de Green y Gunn, debido a la falta de simetría en la ubicación de los contactos en la muestra, figura 4.19. Pero en los dos gráficos 4.18 y 4.20, coinciden que en los extremos ($s/d=1$) el factor de corrección es aproximadamente $\pi/\ln 2$.

Conclusiones

Para hallar correctamente la resistividad ρ , usando la ecuación de Van der Pauw:

$$\rho = t k_{(s=d)} \frac{R_A + R_B}{2} f_{(R_A/R_B)} \quad (4.4)$$

los contactos se deben ubicar en los vértices de la muestra de forma cuadrada como en la figura 4.21.

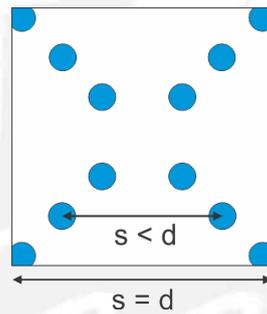


Figura 4.21: Muestra con los contactos en configuración de aspa.

Mientras que si se usa la misma ecuación (4.4) para hallar la resistividad con los contactos dentro del área superficial de la muestra ($s < d$), se está tomando en cuenta el factor de corrección $k_{(s=d)}$, que corresponde al factor de corrección de cuando los contactos se encuentran en los vértices, entonces se estaría encontrando un valor de resistividad incorrecto ρ_1

$$\rho_1 = t k_{(s=d)} \frac{R_{A1} + R_{B1}}{2} f_{(R_{A1}/R_{B1})} \quad (4.5)$$

ρ_1 es menor a ρ porque las resistencias características que se miden sobre el área superficial R_{A1} y R_{B1} son menores que las resistencias características de los vértices R_A y R_B por encontrarse a una menor distancia, como se demostró en las ecuaciones (2.28) y (2.38) que la caída de potencial depende de la distancia en que se mida.

Según los datos obtenidos en esta tesis, para obtener el valor correcto de la resistividad ρ cuando se miden las resistencias características R_{A1} y R_{B1} dentro del área superficial de la muestra se debe usar el factor de corrección $k_{(s<d)}$ en la ecuación de Van der Pauw:

$$\rho = t k_{(s<d)} \frac{R_{A1} + R_{B1}}{2} f_{(R_{A1}/R_{B1})} \quad (4.6)$$

A partir de la ecuación (4.5) también se puede hallar el valor correcto de la resistividad ρ si es que se le divide a la ecuación (4.5) por el factor de corrección $k_{(s=d)}$ y se le multiplica por el factor de corrección correcto $k_{(s<d)}$ como se muestra en la ecuación (4.7)

$$\rho = \rho_1 \frac{k_{(s<d)}}{k_{(s=d)}} \quad (4.7)$$

Por otro lado, los sistemas de control presentados y descritos en esta tesis fueron para caracterizar propiedades eléctricas de muestras cuadradas de obleas de silicio. Se puede ampliar su uso para caracterizar películas delgadas anisotrópicas producidas por pulverización catódica, sensores electrónicos, celdas solares, transistores por efecto de campo, etc.

Finalmente, en su trabajo[12][13] Van der Pauw extendió su método para obtener el factor Hall de muestras en forma de película delgada utilizando un campo magnético externo. Consideramos que este trabajo sienta las bases para ampliar la línea de investigación en caracterización de películas delgadas semiconductoras en el grupo de ciencia de los materiales de la sección física.

Bibliografía

- [1] Simon Min Sze. *Semiconductor devices: physics and technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [2] Simon M Sze and Kwok K Ng. *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons, 2006.
- [3] MA Green and MW Gunn. The evaluation of geometrical effects in four point probe measurements. *Solid-State Electronics*, 14(11):1167–1177, 1971.
- [4] Bill Wilson. *Introduction to Physical Electronics*. ORANGE GROVE TEXTS, 2009.
- [5] José María Albella and José Manuel Martínez-Duart. *Fundamentos de electrónica física y microelectrónica*. Addison-Wesley Iberoamericana, 1996.
- [6] William Shockley. *Electrons and Holes in Semiconductors: With Applications to Transistor Electronics*. D. Van Nostrand Company, Inc., 1950.
- [7] Dieter K Schroder. *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons, 2006.
- [8] L. B. Valdes. Resistivity measurements on germanium for transistors. *Proceedings of the IRE*, 42(2):420–427, February 1954.
- [9] Ilio Miccoli, Frederik Edler, Herbert Pfnür, and Christoph Tegenkamp. The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27(22):223201, 2015.
- [10] John Albers and HL Berkowitz. An alternative approach to the calculation of four-probe resistances on nonuniform structures. *Journal of the Electrochemical Society*, 132(10):2453–2456, 1985.

- [11] FM Smits. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *Bell Labs Technical Journal*, 37(3):711–718, 1958.
- [12] L. J. van der Pauw. A method of measuring the resistivity and hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. *Philips technical review*, 1958.
- [13] L. J. van der Pauw. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape. *Philips research reports*, 13(1), 1958.
- [14] Luis Eduardo Vidal Salgado et al. *Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van der Pauw*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2006.
- [15] Melo Quintero, Jhon Jaither, et al. *Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto hall DC y AC= Design and construction of a measurement system of hall effect DC and AC*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2011.