

# FABRICACIÓN SIMPLIFICADA Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS ESENCIALES (20–62)

## DIODO RECTIFICADOR EN SILICIO

PROYECTO INNOVACIÓN DOCENTE BÁSICOS I (FIDO 2020–21)

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TECNOLOGÍA DE COMPUTADORES



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

# ÍNDICE

	Pág.
Introducción a la unión PN	
1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio	
1.1 Corte y limpieza de la muestra de silicio .....	4
1.2 Deposición de Spin on Dopant (SoD) de boro (B) .....	5
1.3 Difusión de boro. Dopado tipo $p^+$ .....	6
1.4 Deposición de SoD de fósforo (P) .....	7
1.5 Difusión de fósforo. Dopado tipo $n^+$ .....	8
1.6 Limpieza final y resultado .....	9
2. Caracterización eléctrica	
2.1 Setup de medida .....	10
2.2 Curva I-V .....	11
2.3 Resistencia paralelo .....	12
2.4 Resistencia serie .....	14
2.5 Ajuste exponencial .....	15
2.6 Medidas en temperatura .....	16
3. Caracterización estructural	
3.1 Espectroscopia Raman.....	17

# Introducción a la unión PN

Es un **dispositivo semiconductor bipolar** de dos terminales que idealmente permite el paso de **corriente en un solo sentido**, desde el terminal de ánodo (A) al cátodo (K).



Se forma mediante la unión de un material semiconductor con dopado con impurezas tipo *N*, como fósforo (*P*) o arsénico (*As*) para inducir un exceso de electrones (-), con un semiconductor con dopado tipo *P*, normalmente boro (*B*) para crear exceso de huecos (+).

La conducción de corriente se debe al proceso de **difusión**, donde los portadores, electrones o huecos, se desplazan de zonas con concentraciones altas a regiones con concentraciones bajas.



# Introducción a la unión PN

Es un **dispositivo semiconductor bipolar** que idealmente permite el paso de corriente en un solo sentido, desde el terminal de ánodo (A) al cátodo (K).



Se forma mediante la unión de un material semiconductor con dopado con impurezas tipo n, como fósforo (P) o arsénico (As) para inducir un exceso de electrones (-), con un semiconductor con dopado tipo p, normalmente boro (B) para crear exceso de huecos (+).

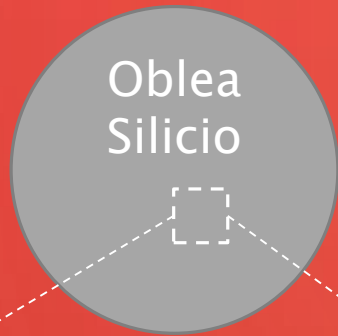
La conducción de corriente se debe al proceso de **difusión**, donde los portadores, electrones o huecos, se desplazan de zonas con concentraciones altas a regiones con concentraciones bajas.



# 1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio

## 1.1: Corte y limpieza de la muestra de silicio

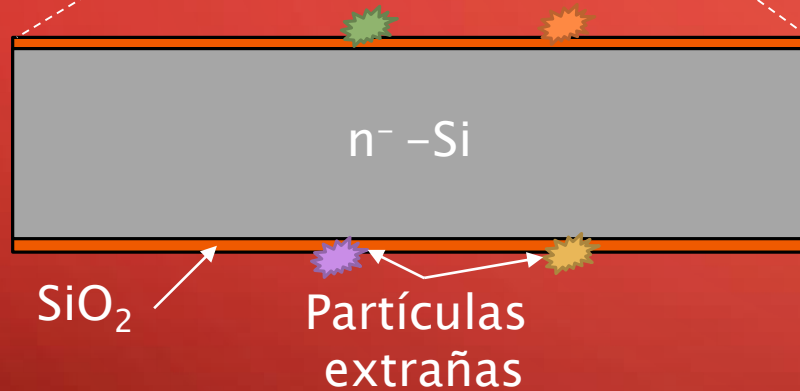
1



### Corte de la oblea

Oblea de silicio *bulk* monocristalina con dopado tipo n<sup>-</sup>  
Corte para la obtención de una muestra de silicio

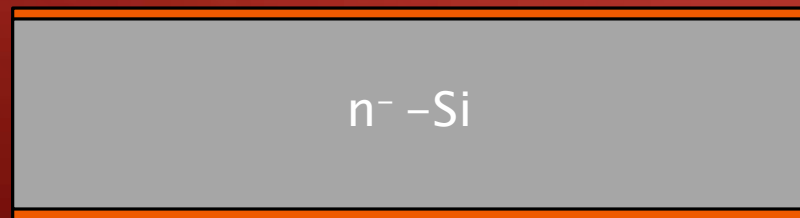
2



### Muestra de silicio

Presencia de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) recubriendo la muestra y partículas extrañas

3



### Limpieza inicial

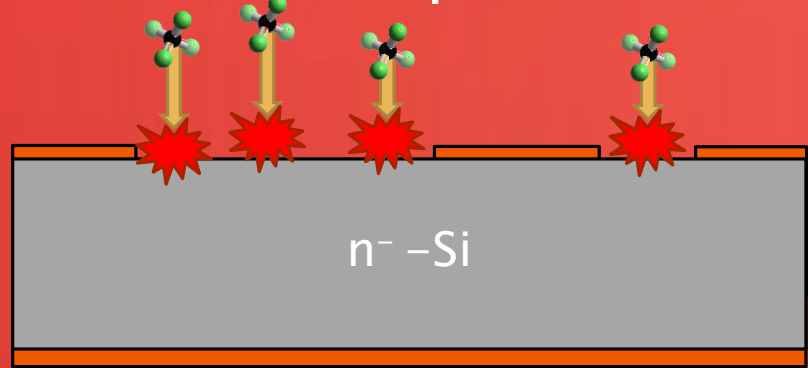
Baño: 10' acetona (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) + 10' isopropanol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O)  
30' Piraña 3:1 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)



# 1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio

## 1.2: Deposición de Spin on Dopant (SoD) de boro (B)

4



### Eliminación del óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)

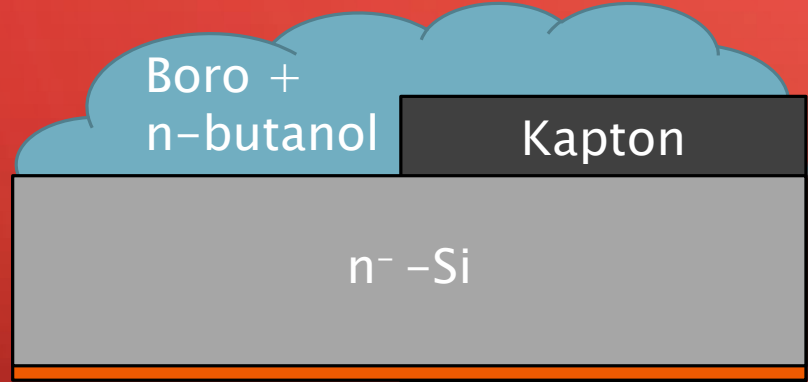
60" Grabado con iones (RIE):

tetrafluorometano (CF<sub>4</sub>) 20sccm 100W

Alternativamente baño  
en ácido fluorhídrico  
(5' HF 1%)



5

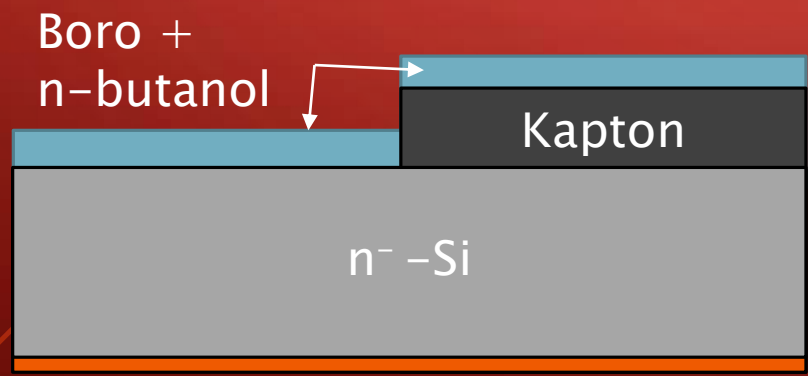


### Enmascarado y deposición

Máscara de kapton sobre la mitad de la muestra

Spin on dopant Boro: 8 gotas *Futurrex BDC1-2500*

6



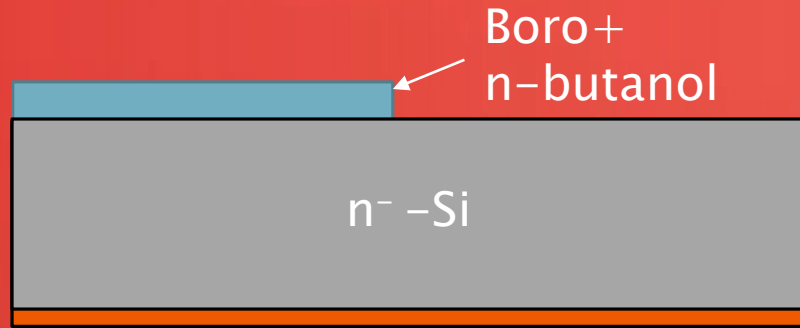
### Recubrimiento por rotación (spin-coater)

30" centrifugado a 3.000 rpm

# 1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio

## 1.3: Difusión de boro. Dopado tipo p<sup>+</sup>

7

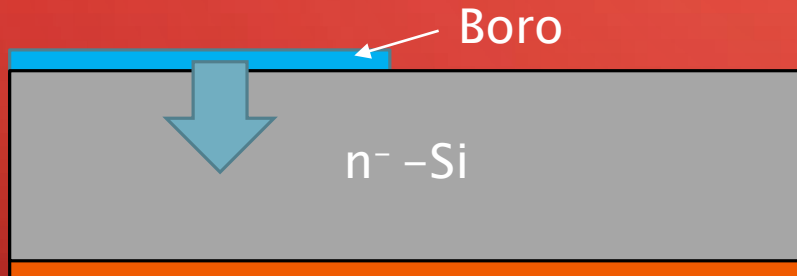


Pre-difusión. Evaporación del disolvente

Retirar kapton

Calentamiento: 20' hot-plate 220°

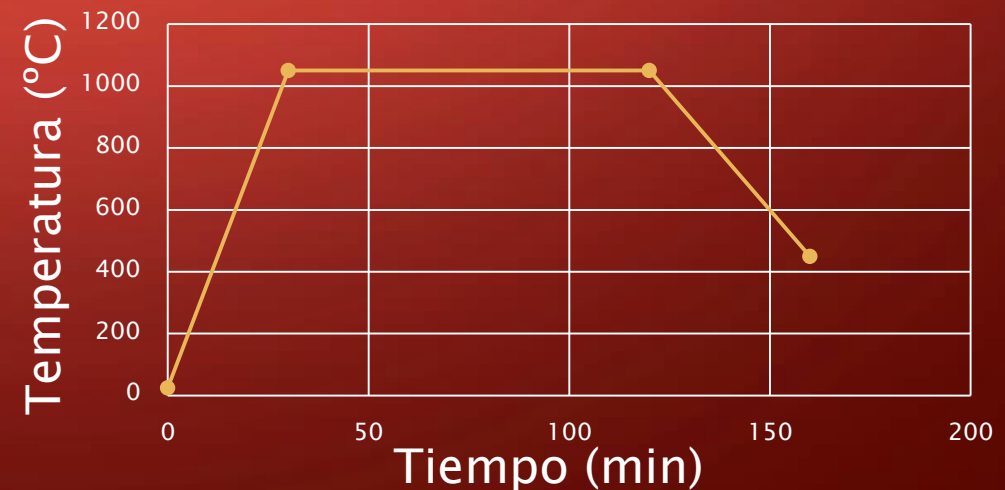
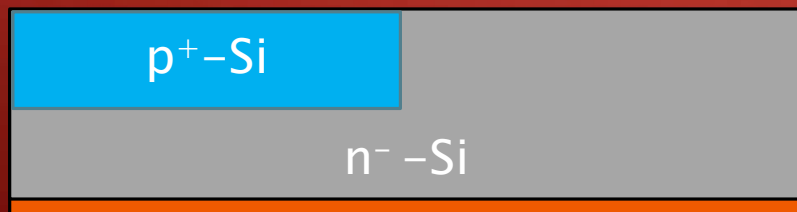
8



Difusión

Calentamiento en horno 200 sccm Ar 700 torr

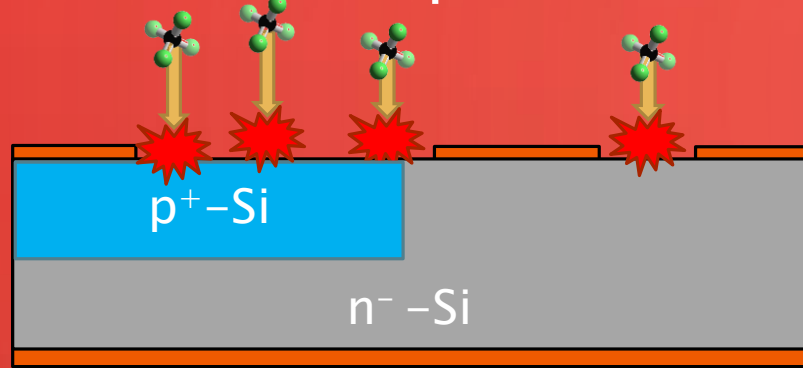
Enfriamiento lento hasta 450°



# 1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio

## 1.4: Deposición de SoD de fósforo (P)

9



### Eliminación del óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)

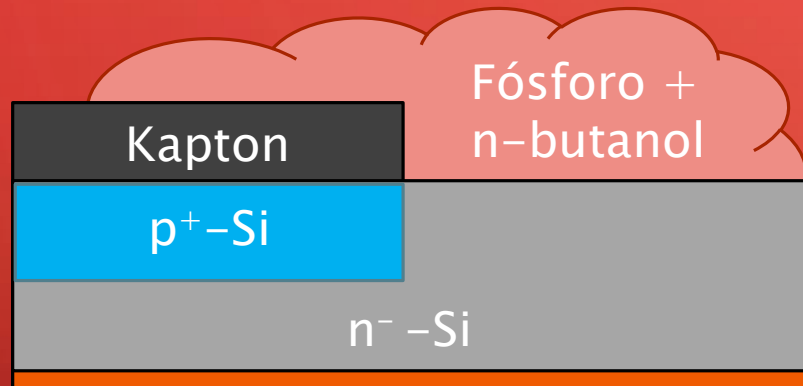
Grabado con iones (RIE):

60" tetrafluorometano (CF<sub>4</sub>) 20sccm 100W

Alternativamente baño  
en ácido fluorhídrico  
(HF 1%)



10

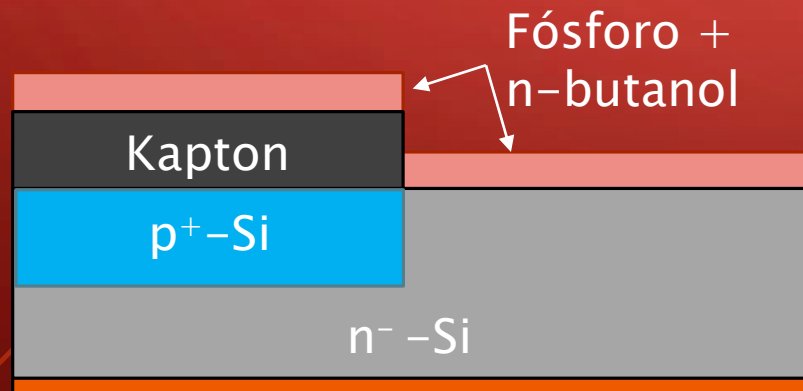


### Enmascarado y deposición

Máscara de kapton sobre la mitad de la muestra

Spin on dopant Fósforo: 8 gotas *Futurrex PDC5-2500*

11



### Recubrimiento por rotación (spin-coater)

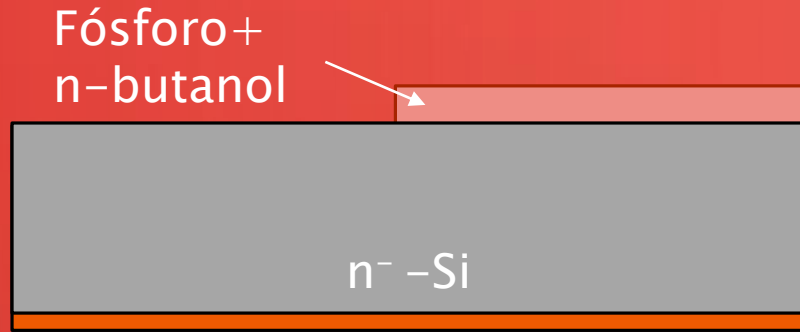
30" centrifugado a 3.000 rpm



# 1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio

## 1.5: Difusión de fósforo. Dopado tipo n<sup>+</sup>

12

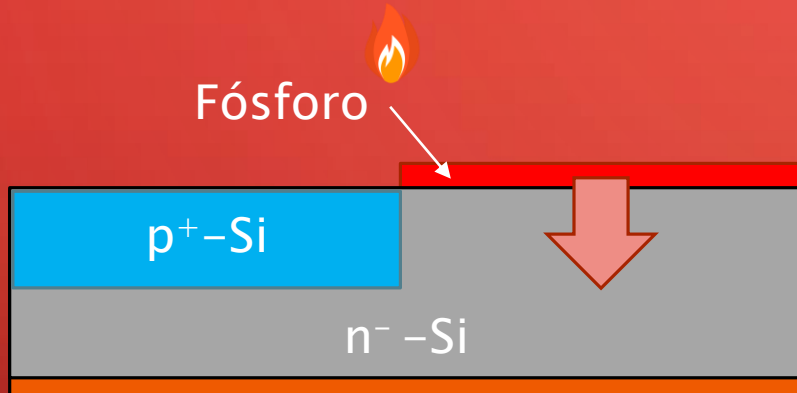


Pre-difusión. Evaporación del disolvente

Retirar kapton

Calentamiento: 20' hot-plate 220°

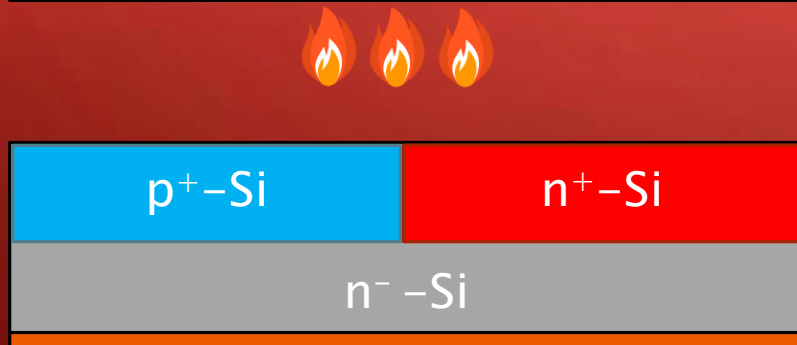
13



Difusión

Calentamiento en horno 200 sccm Ar 700 torr

Enfriamiento lento hasta 450°



# 1. Fabricación de un diodo rectificador en silicio

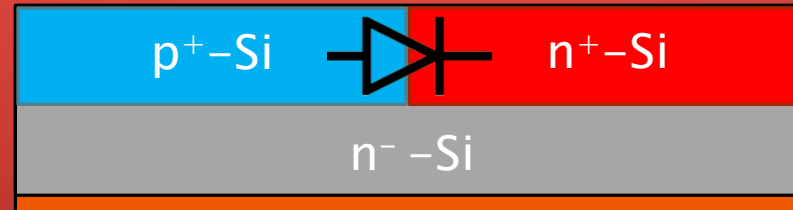
## 1.6: Limpieza final y resultado

14



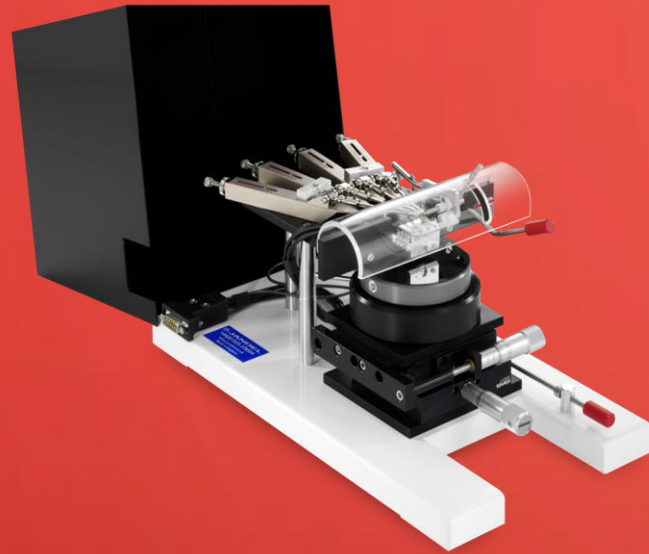
### Limpieza

30' Piraña 3:1 ( $H_2SO_4 + H_2O_2$ )



## 2. Caracterización eléctrica

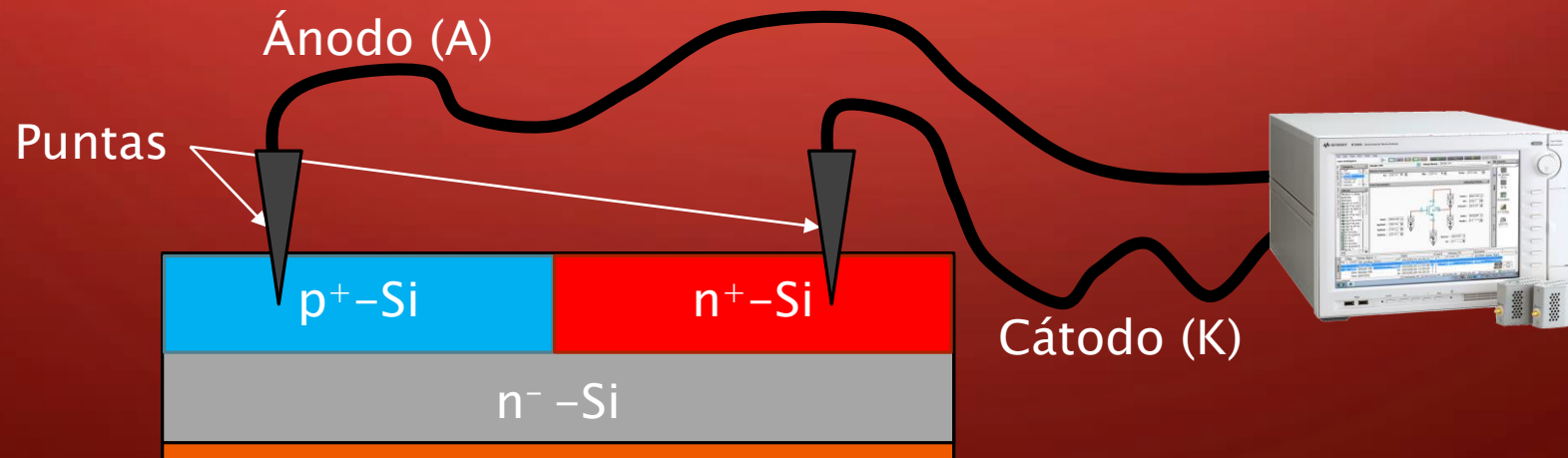
### 2.1: Setup de medida



Estación manual de 4 puntas  
*Jandel Universal Probe Station*

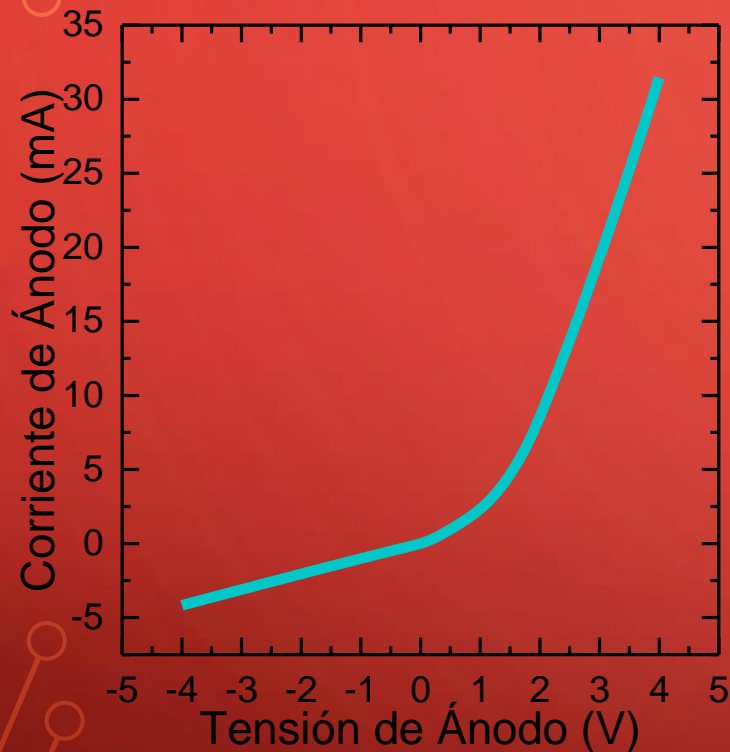


Analizador de semiconductores  
*Keysight B1500a*



## 2. Caracterización eléctrica

### 2.2: Curva I-V

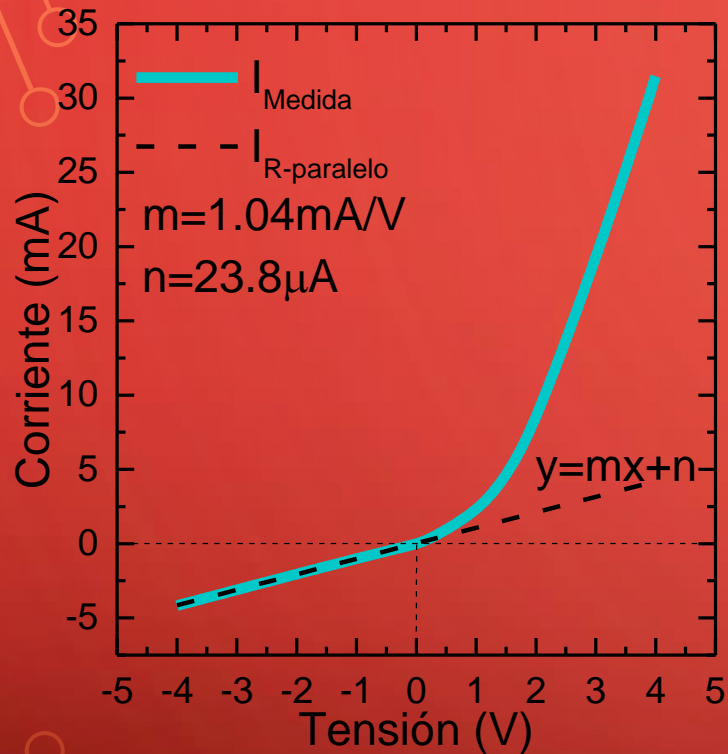


La curva de corriente DC del dispositivo se extrae variando la tensión de ánodo (A) (con el cátodo (K) a tierra) y midiendo la corriente en cada punto.

La curva resultante muestra corriente tanto para tensiones positivas como negativas dando la impresión de no funcionar bien como diodo. Sin embargo, sí se **aprecia claramente una mayor corriente para tensiones de ánodo positivas** que además crece rápidamente. Este último comportamiento es compatible con el de una unión p-n

## 2. Caracterización eléctrica

### 2.3: Resistencia paralelo



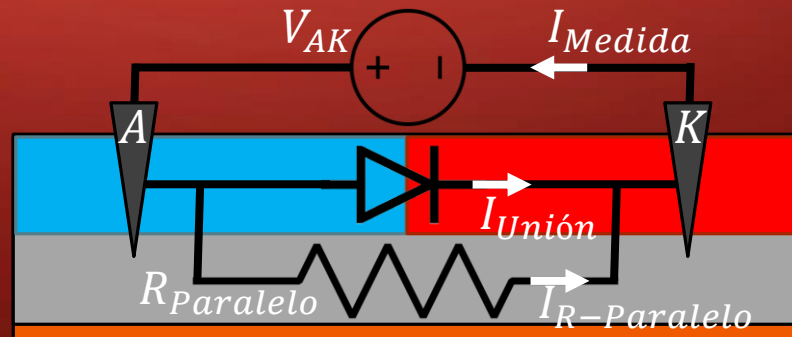
La linealidad en la corriente a tensiones negativas es propia de una resistencia ( $V=I \cdot R$ ). En particular cuando atraviesa el punto (0,0). Este efecto podría ser debido a que parte de la corriente no solo atraviesa la unión p-n sino que también circula entre ambas puntas a través de una zona de silicio no dopada.

El impacto de dicha resistencia paralelo en la corriente del diodo puede corregirse a través de:

$$I_{Unión} = I_{Medida} - I_{R-Paralelo} = I_{Medida} - \frac{V_{AK}}{R_{Paralelo}}$$

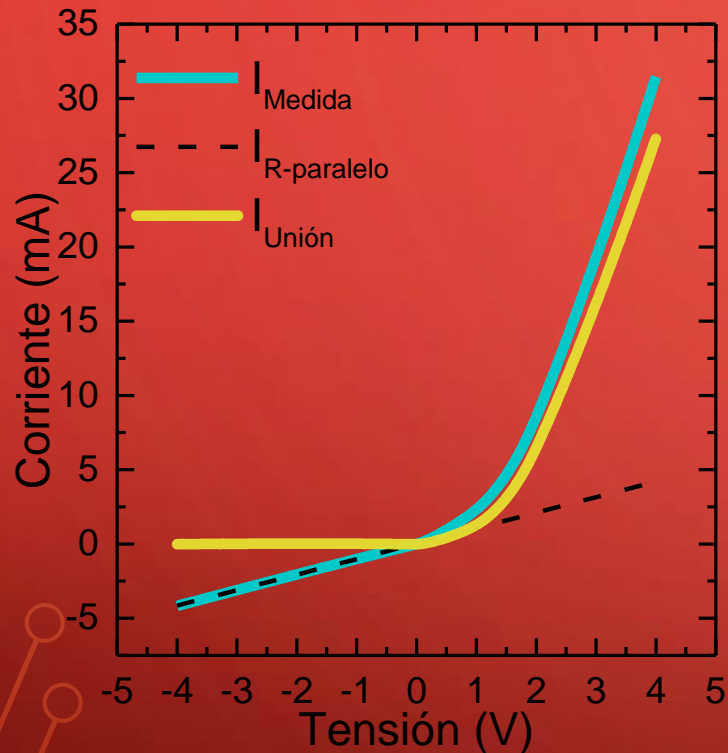
Con

$$R_{Paralelo} = \frac{1}{m} \approx 1 \text{ k}\Omega$$



## 2. Caracterización eléctrica

### 2.3: Resistencia paralelo

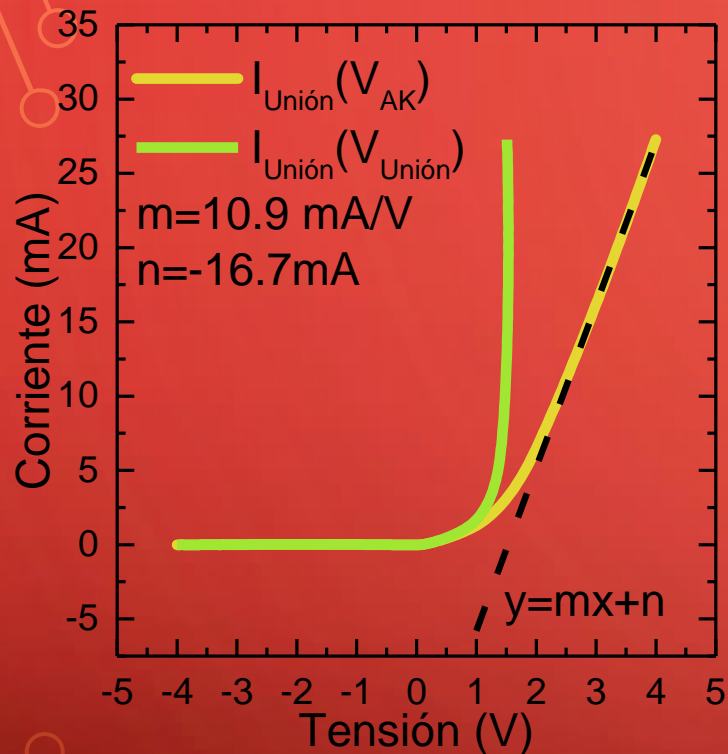


La corriente a través de la unión p-n (diodo) sí muestra la curva esperada con corriente despreciable para tensiones negativas.

La evolución de la corriente a tensiones positivas no presenta un crecimiento exponencial debido a la resistencia serie que modifica la tensión efectiva que aparece en la unión.

## 2.Caracterización eléctrica

### 2.4: Resistencia serie

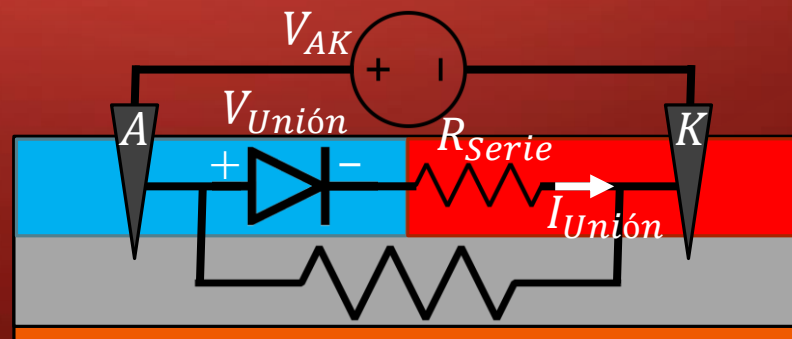


La resistencia serie se puede extraer de la pendiente cuando la unión está fuertemente polarizada en directa.

$$R_{Serie} = \frac{1}{m} \approx 91\Omega$$

Por lo que la tensión que soporta la propia unión ha de ser corregida a través de:

$$V_{Unión} = V_{AK} - I_{Unión} \cdot R_{Serie}$$



## 2.Caracterización eléctrica

### 2.5: Ajuste exponencial

La corriente teórica en la unión se puede expresar como:

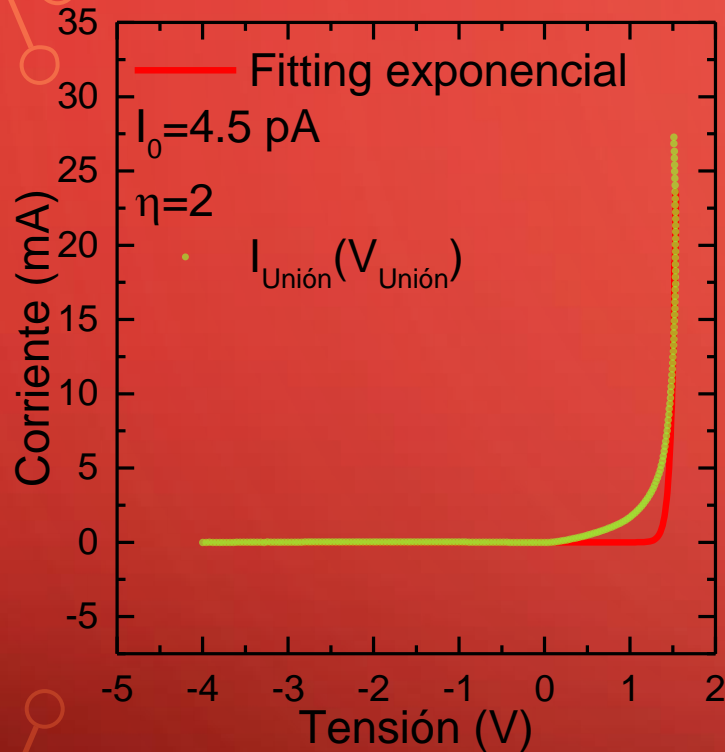
$$I_{Unión} = I_0 \cdot \left( e^{\frac{V_{Unión}}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

Con  $V_T \approx 25.8\text{mV}$  a temperatura ambiente. Dado que habitualmente  $\eta \approx 2$  en diodos de silicio se obtiene el ajuste exponencial en rojo.

La tensión umbral del diodo se puede extraer por regresión lineal en la zona activa donde se obtiene un valor de:

$$V_\gamma = 1.45\text{V}$$

Este valor tan alto, por encima de la anchura de banda prohibida del silicio de 1.12 eV, sugiere la presencia de no uno sino de dos uniones p-n en serie creados tras las dos difusiones.





## 2.Caracterización eléctrica

### 2.6: Medidas en temperatura

# 3. Caracterización estructural

## 3.1: Espectroscopia Raman