

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPERICAS DE FOTODETECTORES DE SILICIO

Marcia García A., Manuel Iglesias P. y Sara Aguilera M., IMRE-Facultad de Física, Universidad de La Habana.

RESUMEN

En este trabajo se describe el montaje de una técnica experimental que brinda la posibilidad de medir las características volt-ampéricas a diferentes temperaturas de los dispositivos que se fabrican en el laboratorio de Celdas Solares de Silicio del IMRE, en la Universidad de La Habana. Se analizan los resultados obtenidos a través de los cuales es posible identificar los mecanismos límites de recombinación, generación y transporte de portadores que existen en estos dispositivos de silicio.

ABSTRACT

An experimental technique to determinate the volt-amperical characteristics at different temperatures is described in this paper. Using this technique the I-V characteristics of photodevices produced at the "Silicon Solar Cells Laboratory" in IMRE at Havana University were measured. By analysing the results we identify the recombination, the generation and the transport mechanisms of carriers acting in these silicon photodevices.

INTRODUCCIÓN

1. Efectos de la temperatura en las características de salida de un fotosensor.

Debido a que la temperatura de trabajo de un fotosensor puede variar sustancialmente, es necesario conocer y analizar los efectos que causa la temperatura en su funcionamiento.

Las características I-V oscuras e iluminadas con la temperatura como parámetro permiten identificar los mecanismos límites de recombinación en el semiconductor, así como los de generación y transporte de portadores en este.

Los primeros estudios de los efectos de la temperatura en las características de salida y en los parámetros internos de estos dispositivos fueron hechos por Wysocky y Rappaport [1]. Otros autores han continuado estas investigaciones [2-10]; pero los resultados de las mismas y de otras realizadas a posteriori no han llevado a conclusiones muy consistentes.

Sin embargo, se ha podido verificar una tendencia general en la variación de los valores de algunos parámetros de los fotosensores (como la I_{cc} y el V_{ca} , entre otros), ante los incrementos y descensos de temperatura.

1.a EFECTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS PARÁMETROS DEL SEMICONDUCTOR.

Los parámetros del semiconductor que determinan el comportamiento de un fotodetector como función de la temperatura son: la concentración intrínseca de portadores (n_i), la longitud de difusión (L_D) que depende del tiempo de vida (τ) y de la movilidad (μ), y el coeficiente de absorción (α) que tiene una relación directa con el ancho de la banda de energía prohibida (E_g).

La concentración intrínseca de portadores juega un papel importante en la determinación del voltaje a circuito abierto (V_{ca}), el cual decrece fuertemente con el aumento de la temperatura, ya que n_i crece de la misma forma [2].

La movilidad de los portadores en la base del semiconductor decrece algo con el incremento de temperatura. En el silicio, el tiempo de vida generalmente se incrementa en algunos órdenes con el incremento de la temperatura, tanto para material tipo n como para material tipo p. Estas variaciones en los valores de la movilidad y en el tiempo de vida, en el caso del silicio, conducen a un aumento de la longitud de difusión con el aumento de la temperatura [2].

El coeficiente de absorción del silicio aumenta con el incremento de la temperatura, es decir, sufre un corrimiento hacia las bajas energías [2, 3, 11].

1.6 EFECTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS PARÁMETROS DEL DISPOSITIVO.

La corriente de cortocircuito (I_{cc}) se incrementa muy ligeramente con el incremento de temperatura, por una parte debido al aumento de la longitud de difusión y por otra, debido al aumento del coeficiente de absorción como consecuencia de la disminución del valor del ancho de la banda prohibida [2, 3, 11].

El voltaje a circuito abierto (V_{ca}) en los fotosensores de silicio decrece muy fuertemente de forma casi lineal con el aumento de la temperatura. Este decrecimiento se debe al fuerte incremento de la corriente oscura con la temperatura, a la disminución de la resistencia paralelo y a los efectos de recombinación de portadores [2]. Se ha encontrado una razón de decrecimiento de aproximadamente $-2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ para fotosensores de silicio con resistividad en la base de $\rho = 10 \text{ } \Omega\text{-cm}$ y de $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ para los de $\rho = 2 \text{ } \Omega\text{-cm}$.

La corriente oscura (I_o) generalmente está compuesta por la corriente de inyección (I_{iny}), la corriente de recombinación en la región de empobrecimiento (I_r) y en algunos dispositivos, por la corriente de tunelaje (I_{tun}).

Para dispositivos de silicio con resistividad en la base entre $1\text{-}10 \text{ } \Omega\text{-cm}$, el valor de la densidad de corriente de inyección extrapolada a $V = 0\text{V}$ es aproximadamente de 10^{-12} A/cm^2 ; mientras que el valor de la densidad de corriente de la recombinación-generación es aproximadamente de 10^{-8} A/cm^2 . Al mismo tiempo, la corriente de inyección varía con la temperatura siguiendo la dependencia $e^{qV/kt}$, mientras que la corriente de recombinación varía con la temperatura según $e^{qV/2kT}$, por lo que las primeras dominan para altos voltajes de polarización y las segundas para bajos voltajes de polarización. La corriente de tunelaje, sin embargo, es muy independiente de la temperatura.

Precisamente del análisis de las características I-V bajo polarización directa, donde la temperatura, T, es el parámetro, se pueden identificar los mecanismos de corriente dominantes para los diferentes rangos de voltaje y corriente. Para el silicio, la dependencia de la corriente oscura, I_o , y de los factores de corrección, A_i , con la temperatura, T, son conocidos para cada mecanismo [4], como muestra de la Tabla 1.

Los mecanismos 1, 2 y 5 pueden ocurrir en diodos de juntura, Schottky, M.I.S. y S.I.S.

Los mecanismos 3 y 4 ocurren generalmente en dispositivos con barrera en la superficie, como los Schottky, M.I.S. y S.I.S.

El mecanismo 1 puede identificarse fácilmente porque, además de que $A_2 = 1$ en la rama difusiva a temperatura ambiente, el gráfico $\ln(I_{O2})$ Vs $1/T$ es lineal.

El mecanismo 2 puede identificarse porque, además de ser $A_1 = 2$ en la rama recombinativa a temperatura ambiente, el gráfico $\ln(I_{O1})$ Vs $1/T$ es lineal.

El mecanismo 5 se identifica porque la dependencia del $\ln(I_{O2})$ con la temperatura T es lineal y $A_2 T = \text{cte}$ para cada temperatura; además de que, a partir de la rama recombinativa, las curvas $\ln(I)$ Vs V a diferentes temperaturas son casi paralelas.

Los mecanismos 3 y 4 ocurren en los diodos Schottky o M.I.S. y se identifican porque el gráfico $\ln(I_{O2})$ Vs $1/T$ es lineal.

Todos los mecanismos que se presentan en la Tabla 1 ocurren simultáneamente y en dependencia de la polarización y del dispositivo analizado, predominará uno o a lo sumo dos de ellos.

Además de los mecanismos clásicos de generación interna de corriente tabulados, pueden estar presentes otros mecanismos en los fotosensores. Ellos son la recombinación Auger (en materiales altamente dopados), transporte a través de las fronteras de granos (en materiales policristalinos) y fugas de corrientes en los límites de la región de carga espacial (en semiconductores amorfos y orgánicos) [4].

Finalmente debe señalarse que las características eléctricas y ópticas del silicio se degeneran mucho para temperaturas superiores a los 150°C y, por ende, se limitan las posibles aplicaciones de los fotosensores que se fabrican con este material.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de las características volt-ampéricas a diferentes temperaturas de los fotosensores de silicio fabricados en el laboratorio de Celdas Solares de Silicio del I.M.R.E., tanto en condiciones de oscuridad como de iluminación se construyó un pequeño horno que permite las variaciones de temperatura entre la ambiente y los 100°C . Las temperaturas elegidas para realizar las mediciones de las características volt-ampéricas fueron la ambiente (aproximadamente 25°C), 50, 75 y 100°C .

Los estudios se realizaron sobre fotodiodos de silicio de juntura p-n con superficie texturada y contactos de aluminio, de área pequeña (aprox. 7 mm^2).

Para analizar el comportamiento de los dispositivos bajo iluminación se midieron dos parámetros importantes: el voltaje a circuito abierto, V_{ca} y la corriente de cortocircuito, I_{cc} . El nivel de iluminación utilizado fue de 6000 lx , aproximadamente equivalente a 30 mW/cm^2 . La temperatura en la superficie de la oblea fue medida con un termopar de cobre-constantán, con una precisión de $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para el procesamiento de la data experimental fue elaborado un programa de computación en lenguaje N88-Basic que permite calcular casi todos los parámetros que pueden ser obtenidos a partir de las características directa e inversa oscuras, así como directa iluminada para cada temperatura.

2.a CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS OSCURAS EN RÉGIMEN DE POLARIZACIÓN DIRECTA A DIFERENTES TEMPERATURAS.

La Figura 1 muestra la característica I Vs V oscura bajo polarización directa, medida a diferentes temperaturas, de un fotodiodo típico de silicio elaborado en nuestro laboratorio.

Se observa que con el aumento de T ocurre un desplazamiento de las curvas, para un valor fijo de corriente, hacia voltajes menores, lo que corresponde con lo reportado por otros autores [2-12]. A partir de ellas se calcularon los valores de las R_s y R_p en sus respectivos rangos de voltaje. La resistencia R_p se determinó por la pendiente inversa de la curva I - V para voltajes entre 10 y 100 mV a cada temperatura y R_s para voltajes entre 700 y 800 mV .

La Figura 2 muestra la dependencia del $\ln(R_p)$ Vs T . La disminución lineal del logaritmo de R_p con T resulta coincidente con lo reportado en la literatura consultada [13]. Esta disminución de R_p es de esperar, como consecuencia del incremento de los efectos recombinativos (y, por tanto, de las corrientes de recombinación-generación) en la zona de baja polarización, que conllevan a una disminución de la pendiente inversa de la curva I Vs V .

La Figura 3 representa la dependencia del $\ln(I)$ Vs V , de la que pueden apreciarse fácilmente las ramas recombinativas y difusivas. A cada rama le fue calculado su factor de corrección, A_1 y A_2 , respectivamente y, por el método de Neugroschel [14], fue determinada la rama difusiva ideal, representada por una línea de puntos, cuyo factor de corrección, A_d , también fue calculado. Para cada una de las tres ramas fue calculada la corriente oscura de saturación correspondiente.

Para la temperatura ambiente, las ramas recombinativas y difusivas están muy bien diferenciadas, dominado las primeras para bajos voltajes de polarización y las segundas para altos voltajes de polarización. A medida que aumenta la temperatura, la definición entre una y otra rama se va perdiendo y para los 100 °C, es imposible distinguirlas. Las ramas difusivas reales se alejan más de las curvas I-V ideales a medida que se incrementa la temperatura, para el mismo intervalo de voltajes. Puede concluirse que para altas temperaturas, la conducción de corriente se debe al efecto combinado de los mecanismos difusivos y recombinativos en todo el rango de voltajes.

Las Figuras 4a y 4b muestran la dependencia semilogarítmica de la corriente oscura de saturación de la rama difusiva, I_{O2} , con el inverso de la temperatura y con la temperatura, respectivamente. La Figura 4c presenta la dependencia semilogarítmica de la corriente oscura de saturación de la rama recombinativa, I_{O1} , con la temperatura.

En la Figura 4a se puede apreciar una correspondencia lineal (confirmada por el factor de correlación de ajuste de la recta igual a 0.99) entre el $\ln(I_{O2})$ y $1/T$. Teniendo en cuenta lo reportado en la Tabla 1, se podría afirmar que uno de los mecanismos de transporte de corriente existentes en este tipo de dispositivo es el de recombinación y difusión en el volumen cuasineutral del semiconductor.

En la Figura 4b se observa también una dependencia lineal entre el $\ln(I_{O2})$ y T . Sin embargo, no podemos afirmar que el mecanismo de tunelaje directo interbandas o mediante niveles intermedios esté presente en el semiconductor ya que no se cumple la condición de que el producto del factor de corrección de la rama difusiva real por la temperatura (A_2T) sea constante, o por lo menos tienda a serlo, ni tampoco que las curvas $\ln(I)$ Vs V a diferentes temperaturas sean paralelas entre sí.

En la Figura 4c es fácil ver que el mecanismo de recombinación-generación de portadores en la zona de carga espacial de la juntura está presente, debido a que se cumple la linealidad en la curva $\ln(I_{O2})$ Vs $1/T$ y que el factor de corrección de la rama recombinativa a temperatura ambiente se encuentra en el intervalo (1,2).

2.b CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS OSCURAS EN RÉGIMEN DE POLARIZACIÓN INVERSA A DIFERENTES TEMPERATURAS.

La Figura 5a representa la gráfica de I Vs V a diferentes temperaturas, en condiciones de polarización inversa. En ella se puede observar una ruptura abrupta, con un valor del voltaje de ruptura bien definido de aproximadamente 9 V. La Figura 5b muestra la dependencia térmica del voltaje de ruptura.

La dependencia del $\ln(I_{O2})$ con T se representó en la Figura 6. El valor de $\partial[\ln(I_O)]/\partial T$ correspondiente resultó ser aproximadamente igual a $0.07 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, que concuerda con lo reportado por Millman [15].

2.e DEPENDENCIA DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO I_{cc} Y EL VOLTAJE A CIRCUITO ABIERTO

V_{ca} CON LA TEMPERATURA.

La Figura 7 representa la dependencia de I_{cc} con T. En ella se puede apreciar que la I_{cc} aumenta ligeramente con el incremento de la temperatura y existe una buena correspondencia lineal, dada por un factor de correlación mayor que 0.99. Este resultado concuerda con los reportados en la bibliografía consultada [2-10].

En la Figura 8 se muestra la dependencia del voltaje a circuito abierto con la temperatura para el fotodiodo estudiado. De ella se puede concluir que V_{ca} disminuye sensible y linealmente con el aumento de T y concuerda con lo observado en las Figuras 2 y 6 respecto a la disminución de R_p y al aumento de I_O con T, así como con el aumento de los efectos recombinativos en el semiconductor.

El valor de $\partial V_{ca}/\partial T$ fue de $-3.4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, que es del orden del valor reportado en la literatura referida, aproximadamente igual a $-2.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

CONCLUSIONES

1. DEL ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS OSCURAS BAJO POLARIZACIÓN DIRECTA EN EL INTERVALO DE TEMPERATURAS ENTRE $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ Y $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, SE PUEDE CONCLUIR QUE:

- Con el aumento de temperatura, la resistencia paralelo disminuye.
- En la dependencia de $\ln(I)$ con V se observa que, en la medida que aumenta la temperatura, la definición entre las ramas recombinativa y difusiva disminuye, ya que a altas temperaturas la conducción de corriente se debe al efecto combinado de los mecanismos difusivos y recombinativos en todo el rango de voltajes.
- En el dispositivo estudiado están presentes los siguientes mecanismos de transporte de corriente: recombinación-difusión en el volumen cuasineutral del semiconductor y recombinación-generación en la zona de carga espacial de la juntura.

2. DEL ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS OSCURAS BAJO POLARIZACIÓN INVERSA EN EL INTERVALO DE TEMPERATURA ESTUDIADO, SE PUEDE CONCLUIR QUE:

- El mecanismo de ruptura de la juntura es el de multiplicación por avalancha, debido a que $\partial V_r/\partial T > 0$ y $V_r > 7V$.

b) Se encontró una dependencia casi lineal entre $\ln(I_0)$ y la temperatura T y que $\partial[\ln(I_0)]/\partial T$ está en el rango de los valores reportados en la bibliografía.

3. DEL ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS BAJO ILUMINACIÓN EN EL INTERVALO DE TEMPERATURA ENTRE 25°C Y 100°C SE PUEDE CONCLUIR QUE:

a) La corriente de cortocircuito aumenta ligera y linealmente con el aumento de la temperatura.

b) El voltaje a circuito abierto disminuye sensible y linealmente con el incremento de la temperatura, y el valor de $\partial V_{ca}/\partial T$ está en el rango de los valores reportados en la bibliografía consultada.

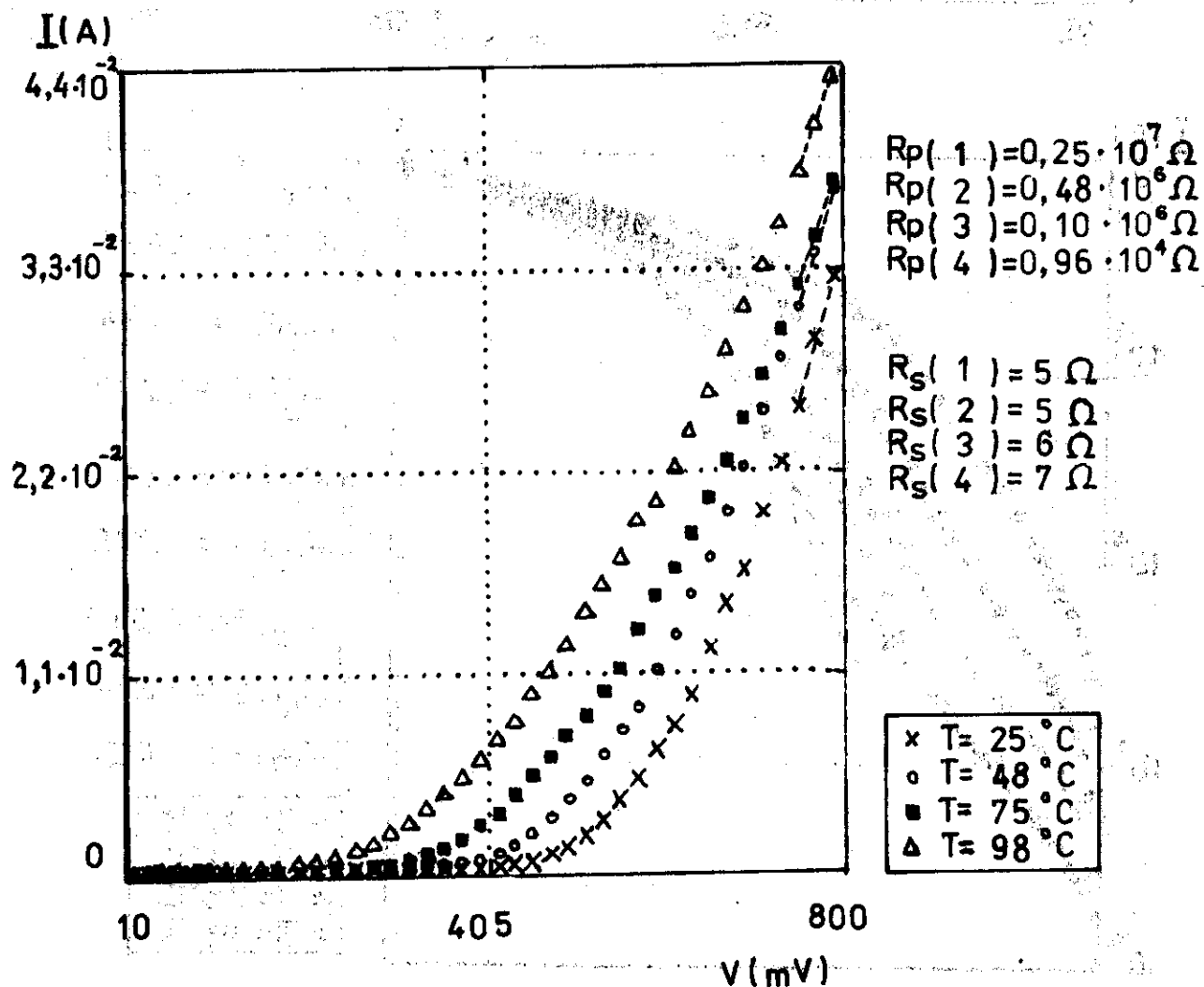


Figura 1. Característica voltampérica oscura en régimen de polarización directa a diferentes temperaturas de un fotodiodo de Si típico.

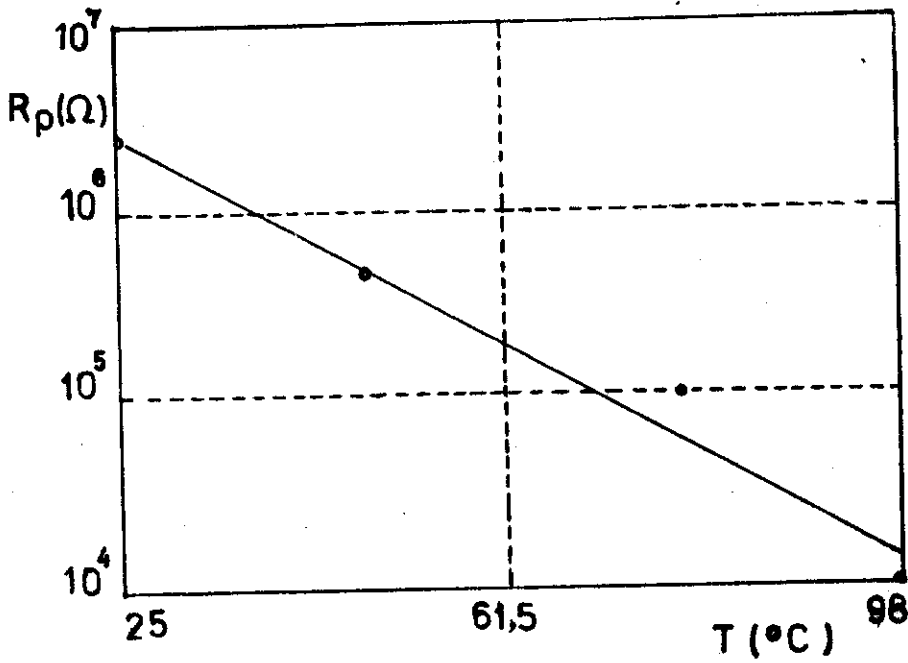
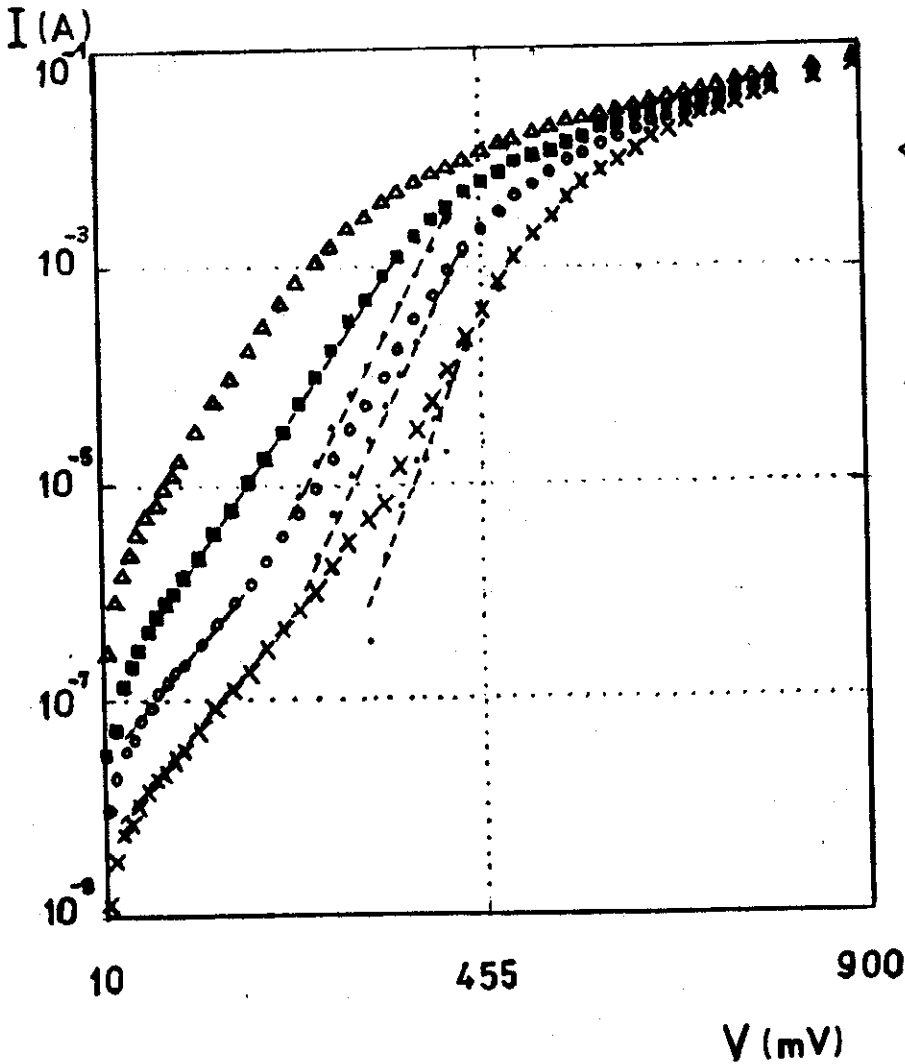


Figura 2. Dependencia semilogarítmica de la resistencia de paralelo R_p con la temperatura..



- $A_1(1) = 1,947$
 - $A_1(2) = 1,758$
 - $A_1(3) = 1,374$
 - $A_2(1) = 1,237$
 - $A_2(2) = 1,311$
 - $A_2(3) = 1,290$
 - $A_d(1) = 0,910$
 - $A_d(2) = 1,024$
 - $A_d(3) = 1,094$
- × $T = 25^\circ\text{C}$
 - $T = 48^\circ\text{C}$
 - $T = 75^\circ\text{C}$
 - ▲ $T = 98^\circ\text{C}$

Figura 3. Dependencia semilogarítmica de la corriente con el voltaje en régimen de polarización directa y en condiciones de oscuridad.

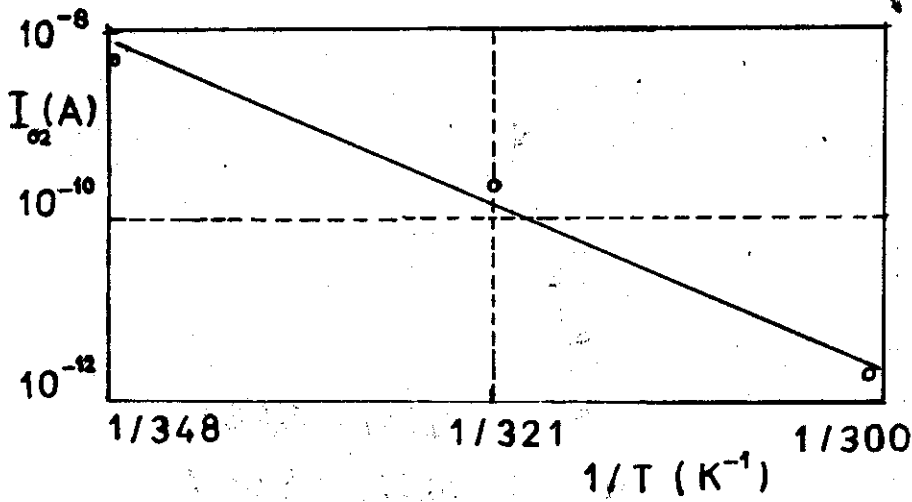


Figura 4a. Dependencia semi-logarítmica de la corriente oscura de saturación de la rama difusiva, I_{02} , con el inverso de la temperatura.

$A(1)T(1) = 271,2$
 $A(2)T(2) = 328,7$
 $A(3)T(3) = 380,7$

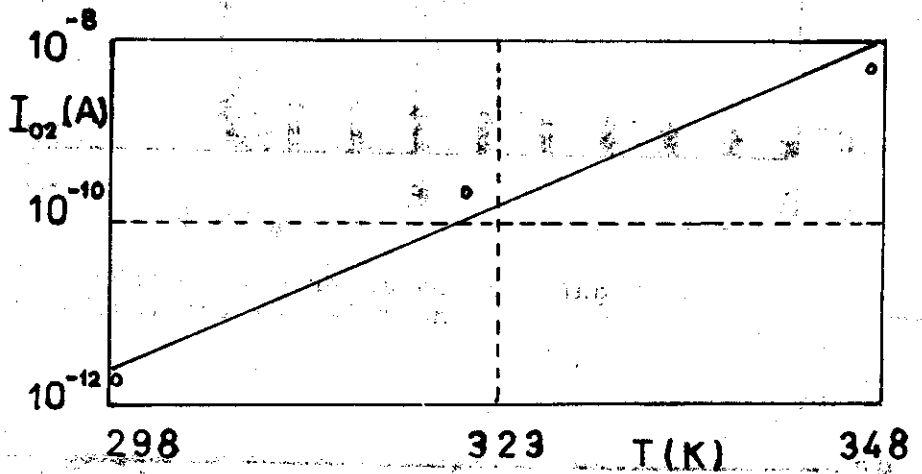


Figura 4b. Dependencia semi-logarítmica de la corriente oscura de saturación de la rama difusiva, I_{02} , con la temperatura.

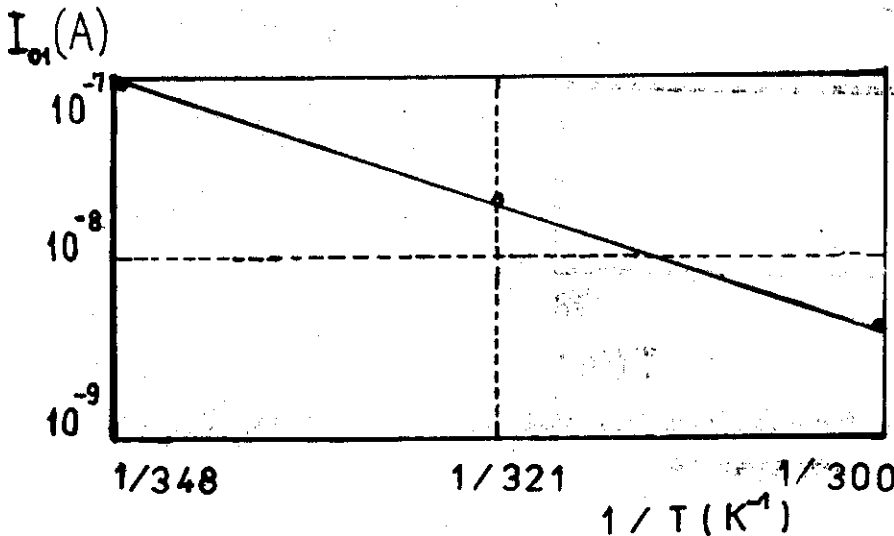


Figura 4c. Dependencia semi-logarítmica de la corriente oscura de saturación de la rama recombinativa, I_{01} , con el inverso de la temperatura.

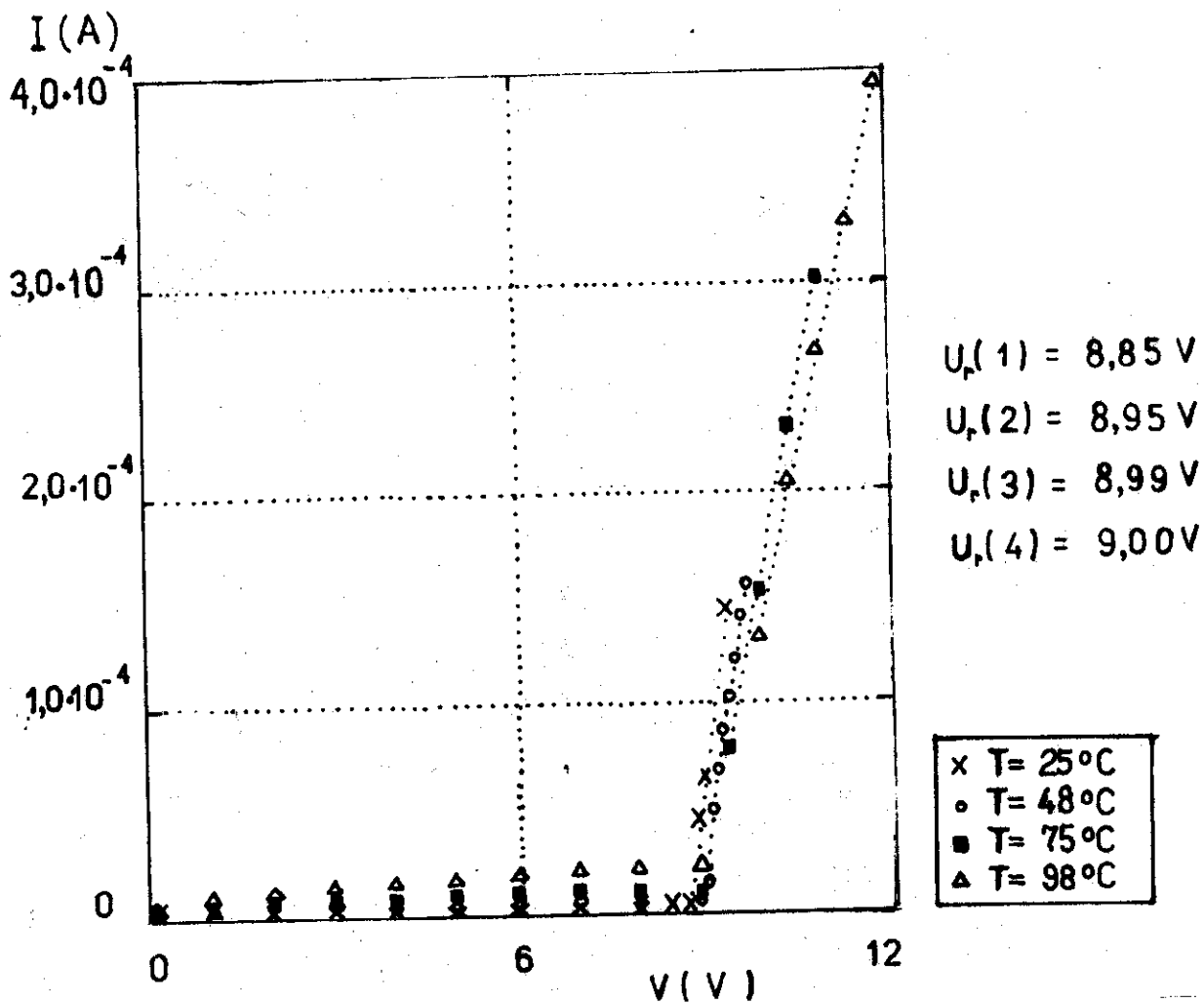


Figura 5a. Característica voltampérica oscura en régimen de polarización inversa a diferentes temperaturas.

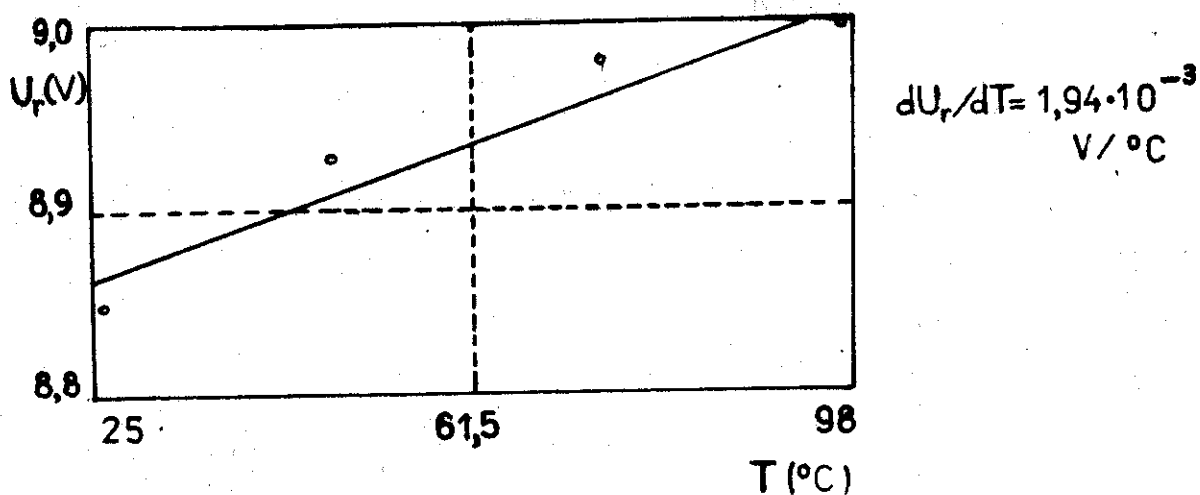
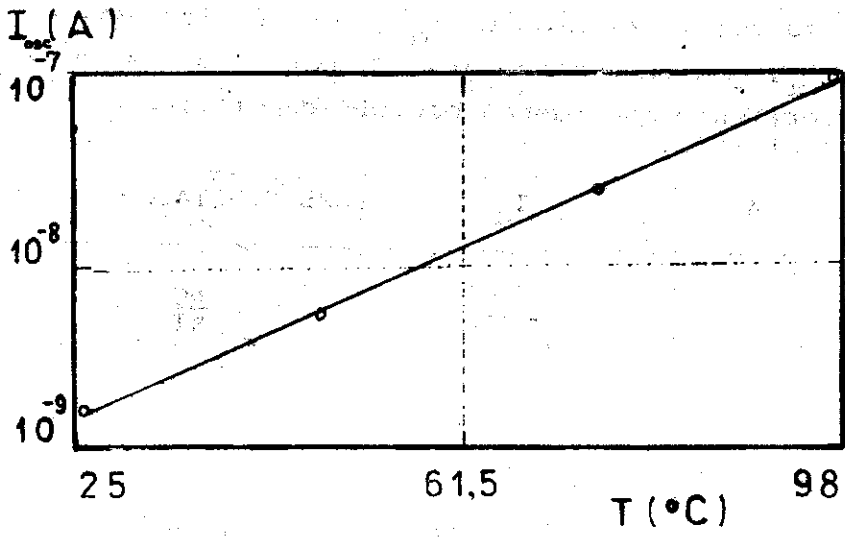
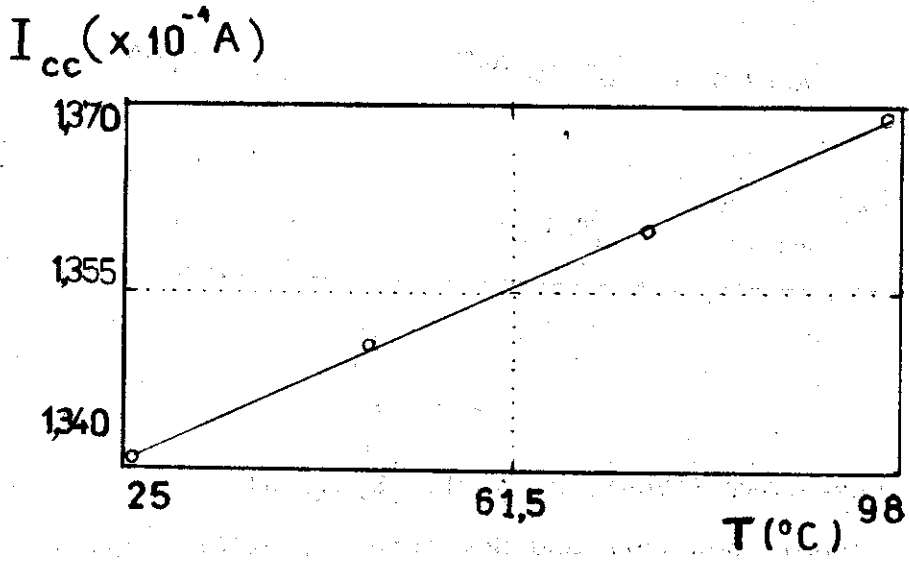


Figura 5b. Dependencia del voltaje de ruptura, V_r , con la temperatura.



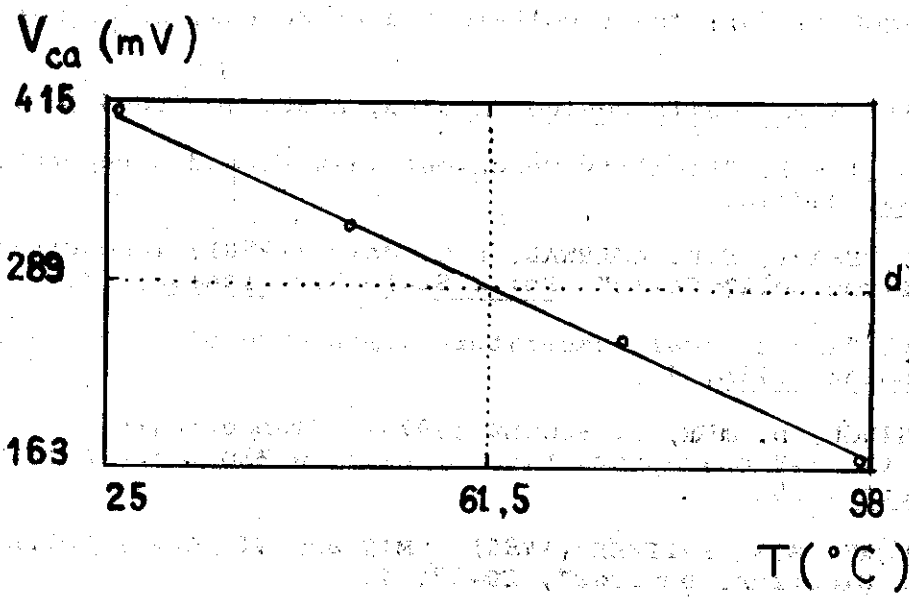
$$d[\ln(I_{osc})]/dT = 0,074 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Figura 6. Dependencia semilogarítmica de la corriente inversa oscura con la temperatura.



$$dI_{cc}/dT = 4,06 \cdot 10^{-8} \text{ A}/^\circ\text{C}$$

Figura 7. Dependencia de la corriente de cortocircuito, I_{cc'}, con la temperatura.



$$dV_{ca}/dT = -3,4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

Figura 8. Dependencia del voltaje a circuito abierto, V_{ca'}, con la temperatura.

Tabla 1. Dependencia de la corriente oscura, I_0 , y de los factores de corrección, A_1 , con la temperatura, T , para los distintos mecanismos de corriente que pueden ocurrir en diferentes dispositivos de silicio.

| MECANISMO | A | I_0 | DEPENDENCIA CON LA T |
|--|----------------|----------------------------------|------------------------|
| 1) Recombinación y difusión en el volumen del SC. | 1 | $c T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}$ | $e^{-\frac{E_g}{kT}}$ |
| 2) Recombinación generación en la zona de carga espacial. | $1 < A \leq 2$ | $c T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{AkT}}$ | $e^{-\frac{E_g}{kTA}}$ |
| 3) Emisión termoiónica. | $A \geq 1$ | $c T^2 e^{-\phi_b/kT}$ | $e^{-\phi_b/kT}$ |
| 4) Tunelaje termoiónico. | $A=A(T) > 1$ | $\sim e^{-\phi_b/AkT}$ | $e^{-\phi_b/AkT}$ |
| 5) Tunelaje directo interbanda o mediante niveles intermedios. | $AT=cte$ | e^{T/T_0} | e^{T/T_0} |

REFERENCIAS

- [1] WYSOCKY, J.J. y P. RAPPAPORT (1960): J. Appl. Phys., 31.
- [2] HOVEL, H.J. (1975): "Semiconductors and Semimetals", Solar Cell, 11, Academy Press.
- [3] GREEN, M.A. (1982): "Solar Cell", Prentice-Hall Inc.
- [4] ASHOK, S., K.P. PANDE (1985): "Photovoltaic Measurements", Solar Cell, 14.
- [5] FONASH, S.J. (1981): Solar Cells Device Physics, Academic Press Inc.
- [6] RUIZ, J.M., M. CID (1986): "Facility Check-out Task Extended Report", Doc.: IES/WP-A3, Madrid.
- [7] AGARWALA, A., V.K. TEWARY, S.K. AGARWAL, S.C. JAIN (1980): Temperature effects in Silicon Solar Cells", Solid State Electronics, 23.
- [8] FAN, J.C.C. (1986): "Theoretical temperature dependence of solar cell parameters", Solar Cells, 17.
- [9] SHEWCHUN, J., R. SINGH, D. BURK, F. SCHOLZ (1979): "Temperature dependence of the I-V characteristics of silicon MIS solar cells", Appl. Phys. Lett., 35.
- [10] SHEWCHUN, J., D. BURK, M.B. SPITZER (1980): "MIS and SIS Solar Cells", IEEE Trans. on Electron. Devices, ED-27, 4.

- [11] WOLF, H.F. (1971): Semiconductors, John Wiley & Sons Inc.
- [12] SZE, S.M. (1981): Physics of semiconductor devices, 2 ed., John Wiley & Sons Inc.
- [13] Catálogo Hamamatsu Corp. (1991), Japón.
- [14] NEUGROSCHER, A., F.A. LINDHOLM, C.T. SAH (1977): "A method for determining the emitter and base lifetimes in p-n junction diodes", IEEE Trans. on Electron. Devices, ED-24, 6.
- [15] MILLMAN, J., C.C. HALKIAS (1984): Dispositivos y circuitos electrónicos, t.1, Ed. Pueblo y Educación.