

# Caracterización experimental de resistencias integradas nano-CMOS a temperatura criogénica

Jorge Marqués-García<sup>1</sup>, Jorge Pérez-Bailón<sup>1</sup>, Carlos Sánchez Azqueta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Afiliación: Grupo de Diseño Electrónico (GDE)  
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)  
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.  
Tel. +34-976762707, e-mail: [jmarquesgarcia@unizar.es](mailto:jmarquesgarcia@unizar.es)

## Resumen

Este trabajo estudia el comportamiento de resistencias integradas en tecnología CMOS en un rango de temperaturas que abarca de temperatura ambiente hasta ultra-baja temperatura (4 K). Se demuestra que el coeficiente de temperatura  $\alpha$  no puede ser aproximado de forma lineal aun cumpliendo la condición de aproximación ( $\alpha\Delta T \ll 1$ ) para temperaturas criogénicas.

## Introducción

La computación cuántica se ha postulado en los últimos años como la herramienta dispuesta a resolver algunos problemas que hoy en día resultan irresolubles. [1]. La ya conocida como segunda revolución cuántica parece ser mucho más factible desde que en la pasada década naciera la idea de los bits cuánticos (qbits) en el spin de los electrones de silicio [2].

El problema que surge con los qbits es que, actualmente, su electrónica de control se encuentra separada, a temperatura ambiente, lo que se traduce en un aumento del ruido, no permite la escalabilidad y otros problemas derivados de la termalización desde la temperatura ambiente hasta los pocos K en los que trabajan los qbits. [3]

Por lo tanto, la solución evidente crear una electrónica criogénica, cryo-CMOS; sin embargo, los fabricantes de esta tecnología proporcionan modelos en un rango de temperatura limitado de -40 °C a 120 °C. Todas estas razones motivan que este trabajo presente un estudio del comportamiento de un conjunto de resistencias CMOS, diseñadas en tecnología TSMC de 65nm alcanzando temperaturas criogénicas.

## Montaje experimental

La instalación experimental utilizada se puede observar en la Fig. 1. Para medir las resistencias que se encuentran implementadas en la PCB se usa una

unidad de medida de fuente (SMU), modelo Keysight B2912B. Cabe destacar que todas las mediciones son a cuatro puntas, con la instrumentación necesaria del fabricante, lo que garantiza una alta precisión y fiabilidad en las medidas. Por otro lado, rango de temperatura desde la temperatura ambiente (300 K), hasta ultra-baja temperatura (4 K), se consigue mediante un crió-enfriador (Gifford McMahon), conectado a una unidad de compresión de helio Leybod (COOLPACK).

## Resultados

Con el fin de poder llevar a cabo un análisis del comportamiento del coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ) [4] *i.e.* cambios relativos en la resistencia asociados a cambios de temperatura. Se lleva a cabo un proceso de medición en el que se calculan las curvas I-V de cada una de las resistencias para distintos valores en el rango de temperatura, después se calcula el valor de la resistencia obtenido para cada temperatura; donde podremos estudiar el comportamiento de  $\alpha$ .

La Fig.2 muestra cómo varía la resistividad de cada una de las resistencias para los dos extremos del rango de temperaturas. En la figura se observa la limitación en corriente de 5.5 mA impuesta en la SMU con el fin de evitar electromigración, por lo que cada resistencia satura a una tensión diferente, aunque se consiguen suficientes datos en cada una como para que no afecte a los resultados finales.

Se observa también cómo todas las curvas sufren un efecto de disminución de la pendiente conforme disminuye la temperatura, lo que se traduce en un descenso del valor de la resistencia. La Tabla I muestra el valor de cada una de las resistencias para las dos temperaturas y su variación.

La evolución de la resistencia calculada mediante las curvas I-V en función de la temperatura se muestra en la Fig. 3. Destaca como una aproximación lineal de  $\alpha$  corresponde con el comportamiento de todas las resistencias hasta que se llega a la zona criogénica. A partir de los 70 K se realizan ajustes por mínimos

cuadrados de distintos órdenes para cada una de las resistencias, obteniendo distintos órdenes de aproximación dependiendo del valor de la resistencia y de su composición.

## Conclusiones

Este trabajo ha estudiado el comportamiento de la resistividad de 5 resistencias diferentes para un rango de temperatura que abarca de lo 300 K a los 4 K. Se ha encontrado que, en todas las resistencias, exceptuando una (R4 P+), disminuye la resistividad al verse reducida drásticamente la agitación térmica. En el caso R4 P+, esta reducción se traduce en una disminución de portadores, por lo que  $\alpha < 0$ .

En lo referido al ajuste de las curvas, queda demostrado que el ajuste lineal solo es válido fuera de la zona criogénica, tanto para  $\alpha$  positivos como

negativos. Mientras que a temperaturas criogénicas se necesitan modelos de órdenes superiores que se ajusten correctamente a los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

- [1]. BNational Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Quantum Computing: Progress and Prospects. The National Academies Press, 2019.
- [2]. PLA, J. y otros. A single-atom electron spin qubit in silicon. Nature. 2012, vol. 489, p. 541–545. ISSN 0028-0836.
- [3]. E. Charbon. Cryo-cmos electronics for quantum computing: Bringing classical electronics closer to qubits in space and temperature. IEEE Solid-State Circuits Magazine, 13(2):54–68, 2021.
- [4]. Kasap, S. O. Principles of Electronic Materials and Devices (Third ed.). Mc-Graw Hill. p. 126., 2006

Tabla 1. Valores obtenidos de cada resistencia para 4 K y 300 K y su porcentaje de variación

	300K	4K	$\Delta R$ (%)
R1 N+( $\Omega$ )	86.99	43.69	49.76
R2 N+( $\Omega$ )	782.35	808.52	2.88
R2 P+( $\Omega$ )	144.65	60.65	58.07
R3 P+( $\Omega$ )	82.4	37.75	54.19
R4 P+( $\Omega$ )	3421.33	3932.22	12.99



Fig. 1. Imagen de la instalación experimental.

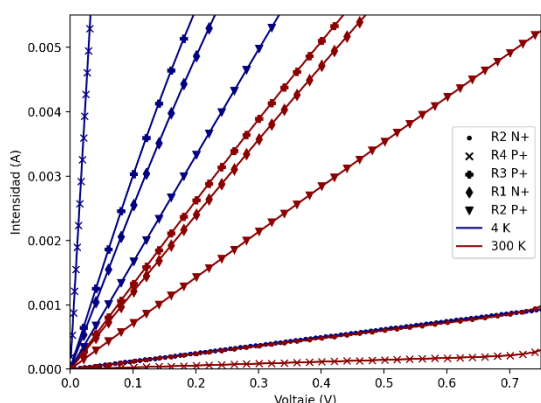


Fig. 2. Curvas I-V de cada resistencia para 4 K y para 300 K.

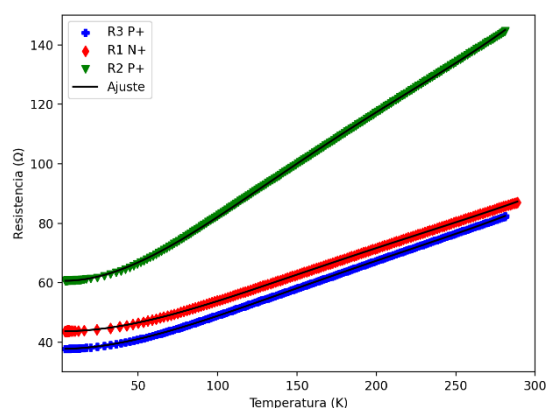


Fig. 3. Variación de las resistencias más representativas en el rango completo de temperaturas.