

Efecto de Ciclos de Stress Térmico hasta el Régimen Criogénico Profundo en Resistencias CMOS Integradas

Yago Esquíroz-Olloqui¹, Jorge Pérez-Bailón², Santiago Celma¹, Carlos Sánchez-Azqueta¹

¹ Grupo de Diseño Electrónico (GDE), Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

² Quantum Devices and Materials Group (Q-MAD), Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA-CSIC)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

Tel. +34-976762707, e-mail: {yesquiroz, jorgepb, scelma, csanaz}@unizar.es

Resumen

La integración de la electrónica de control en entornos criogénicos con tecnología CMOS es actualmente la solución más prometedora para escalar la cantidad de qubits en procesadores cuánticos. Este estudio evalúa el comportamiento de resistencias de polisilicio frente a ciclos térmicos de temperatura, confirmando su estabilidad hasta 4 K sin degradación apreciable. Los resultados respaldan su uso en sistemas para computación cuántica operando a temperatura criogénica.

I. Introducción

La computación cuántica es un campo de aplicación de las tecnologías cuánticas que tiene como objetivo utilizar las propiedades cuánticas de la materia a escala microscópica, principalmente superposición y entrelazamiento, para resolver problemas computacionales complejos con una eficiencia mayor con respecto a la computación clásica (Shafique *et al.* 2024). Su funcionamiento se basa en la manipulación de los estados cuánticos de unos sistemas concretos, llamados qubits, los cuales existen en cualquier estado intermedio entre los niveles que corresponden al cero y uno lógicos, lo que permite a los ordenadores cuánticos llevar a cabo múltiples cálculos simultáneamente. Las arquitecturas más populares para realizar qubits son actualmente las basadas en circuitos superconductores porque se pueden implementar de forma monolítica a nivel de circuito utilizando condensadores, autoinducciones y uniones Josephson (Bardin 2022) en forma de transmones para formar una inductancia no lineal idealmente sin pérdidas (Roth *et al.* 2023).

Para evitar el efecto del ruido térmico, los qubits de tipo transmon deben operar en el régimen criogénico de temperatura (en torno a mK), el cual se consigue solo con refrigeradores de dilución $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Anders

et al. 2023). En cambio, las operaciones de control y lectura se realizan a temperatura ambiente con componentes comerciales, por lo que se debe operar en dos regímenes de temperatura. Así, una de las ramas de investigación se enfoca en el desarrollo de circuitos integrados que van a operar con los qubits en temperatura criogénica (Charbon *et al.* 2017). En el caso particular de este trabajo, se ha realizado un estudio de cómo afecta la temperatura a componentes de resistencia CMOS hasta 4 K, en concreto si estos se ven afectados al someterse a varios ciclos de enfriamiento-calentamiento.

II. Setup experimental

El dispositivo bajo test (DUT, del inglés *Device Under Test*) es un circuito integrado compuesto de resistencias CMOS, de las cuales se van a medir dos. Estas están implementadas con polisilicio altamente dopado, siendo una de tipo N+ y otra de tipo P+. Para realizar las medidas en la cámara criogénica, el circuito integrado está unido mediante *bonding* a una PCB de uso específico utilizando hilo de aluminio que añade $1\ \Omega$ a cada resistencia. Las propiedades de ambos componentes se recogen en la Tabla I.

III. Resultados

A. Medida de resistencia en el rango de temperatura

En la toma de datos se guarda el valor de tensión, corriente y temperatura a medida que el DUT se enfría o calienta en la cámara criogénica. Estos datos se procesan para obtener el valor de resistencia, para posteriormente relacionar este valor con el de temperatura, particularizando el caso de $V_{DD} = 0.6\text{ V}$. Los resultados en los extremos de temperatura se observan en la Tabla 1.

B. Comportamiento en ciclos de stress enfriamiento-calentamiento

Otro objetivo ha sido comprobar si los ciclos de enfriamiento-calentamiento deterioran el componente, de manera que las curvas de resistencia se vean afectadas por la sucesión de ciclos. Por lo tanto, se han sometido los componentes a 3 ciclos de enfriamiento-calentamiento, lo que corresponde a 6 medidas de la misma curva. El resultado, el cual se observa en la Fig. 1, muestra cómo las 6 curvas de la resistencia de tipo N+ (Fig. 1.a) están prácticamente superpuestas, es decir, su comportamiento eléctrico no se ve afectado. En cambio, este sí se ve afectado en el caso de la de tipo P+ (Fig. 1.b), donde se aprecia que las curvas se asemejan más dependiendo de si se está enfriando o calentando el componente.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que las resistencias de polisilicio integradas en tecnología CMOS cambian su comportamiento eléctrico en el rango de temperaturas, desde ambiente hasta 4 K. Además, tras someter los dispositivos a 3 ciclos de enfriamiento-calentamiento para comprobar si el integrado se ve afectado por el stress térmico en condiciones parecidas a las de operación real, no se han detectado degradaciones apreciables en sus características eléctricas en el caso de la resistencia de tipo N+, mientras que sí se observan

variaciones en la de tipo P+, de manera que su valor varía en torno a un 5 % dependiendo de si el componente se está enfriando o calentando.

REFERENCIAS

- ANDERS, J., BABAIE, M., BARDIN, J. C., BASHIR, I., BILLOIT, G., BLOKHINA, E., BONEN, S., CHARBON, E., CHIAVERINI, J., CHUANG, I. L., 2023. Quantum Engineering IEEE Transactions on CMOS Integrated Circuits for the Quantum Information Sciences. , vol. 4, no. September,
- BARDIN, J., 2022. Beyond-Classical Computing Using Superconducting Quantum Processors. *Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference*, vol. 2022, pp. 422-424.
- CHARBON, E., SEBASTIANO, F., BABAIE, M., VLADIMIRESCU, A., SHAHMOHAMMADI, M., STASZEWSKI, R.B., HOMULLE, H.A.R., PATRA, B., VAN DIJK, J.P.G., INCANDELA, R.M., SONG, L. y VALIZADEHPASHA, B., 2017. Cryo-CMOS circuits and systems for scalable quantum computing. *Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference*, vol. 60, pp. 264-265.
- ROTH, T.E., MA, R. y CHEW, W.C., 2023. The Transmon Qubit for Electromagnetics Engineers: An introduction. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 65, no. 2, pp. 8-20.
- SHAFIQUE, M.A., MUNIR, A. y LATIF, I., 2024. Quantum Computing: Circuits, Algorithms, and Applications. *IEEE Access*, vol. 12, no. February, pp. 22296-22314.

Tabla 1. Resistencias medidas

Nombre	Tipo	Valor a 300 K	Valor a 4 K	W/L
R2 N+	N+ poly	$824 \pm 1\Omega$	$790 \pm 6\Omega$	$2\mu\text{m}/10\mu\text{m}$
R4 P+	P+ poly	$3470 \pm 30\Omega$	$3750 \pm 50\Omega$	$5\mu\text{m}/25\mu\text{m}$

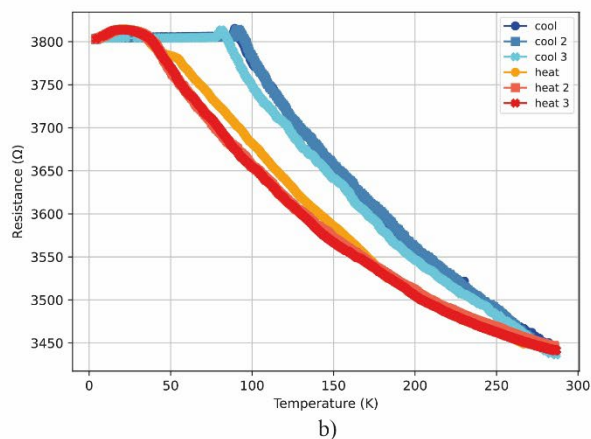
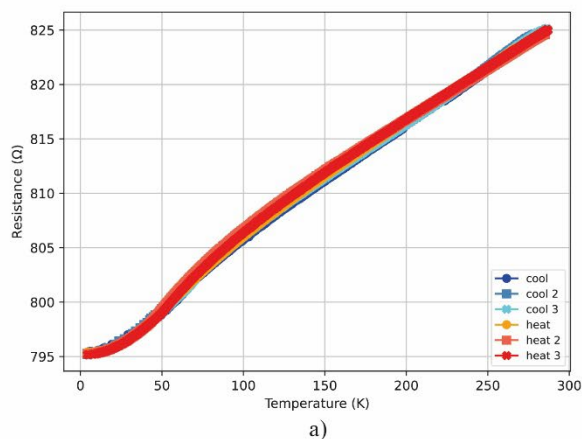


Fig. 1. Tres ciclos de enfriamiento-calentamiento con $V_{DD} = 0.6$ V para: a) R2 N+ b) R4 P+.