

Transformador integrado monolítico en un amplificador de bajo ruido para computación cuántica

Sabina Pache-Vilés, Gabriel López-Pinar, Concepción Aldea,
Santiago Celma, Carlos Sánchez-Azqueta

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: spache@unizar.es

Resumen

Se presenta un transformador integrado monolítico implementado en tecnología CMOS de 65 nm. El dispositivo proporciona un coeficiente de acoplamiento $k \approx 0.75$, en un amplificador de bajo ruido (LNA) para entornos criogénicos. El LNA presenta un rango frecuencial de 3.4 a 7.4 GHz, ganancia máxima de 35 dB y figura de ruido de 4 dB.

Introducción

La computación cuántica es un campo emergente basado en el uso de qubits, capaces de existir en superposición de estados, lo que permite mayores capacidades de procesamiento frente a los bits clásicos. Estos sistemas funcionan en entornos criogénicos con el objetivo de reducir el ruido térmico y preservar la coherencia cuántica.

En la cadena de lectura, la señal generada por el qubit se obtiene mediante un resonador acoplado y debe amplificarse añadiendo el mínimo ruido posible. Para ello se emplea una etapa de amplificación de bajo ruido (LNA). Los transformadores integrados resultan especialmente útiles en la implementación de esta etapa, ya que permiten adaptar impedancias y mejorar el acoplamiento entre etapas y, en algunos casos, la extensión o conformación del ancho de banda.

Arquitectura propuesta

El transformador se integra en un LNA basado en una arquitectura cascode fuente común-puerta común (CS-CG) para aumentar el ancho de banda en aplicaciones de lectura de qubits transmon, que operan entre 1 y 10 GHz.

La configuración cascode incrementa la resistencia de salida y reduce la realimentación capacitiva no deseada, permitiendo operar a frecuencias más altas.

La primera etapa del amplificador proporciona reducción de ruido y alta ganancia, mientras que dos etapas adicionales con diferentes frecuencias de resonancia ($f_2 = 4.5$ GHz y $f_3 = 6.5$ GHz) permiten ampliar y aplanar la respuesta en frecuencia alrededor del punto de operación de 5 GHz [1]. Para ello se emplean cargas inductivas y condensadores de ajuste, mejorando la ganancia y el ancho de banda del sistema. Además, la inductancia de entrada también aporta protección ESD sin degradar el comportamiento en términos de ruido.

Diseño del transformador

La red de adaptación de impedancias del LNA utiliza un transformador RF integrado en tecnología CMOS de 65 nm de TSMC. El transformador está formado por dos inductancias de 2.5 nH en una configuración monolítica con bobinas superpuestas colocadas en capas metálicas verticalmente adyacentes (Fig. 1a). Este diseño ofrece un mayor rendimiento electromagnético frente a configuraciones planares, ya que mejora el coeficiente de acoplamiento y reduce el área ocupada en silicio, aspectos fundamentales en circuitos integrados.

Las inductancias superpuestas del transformador introducen capacitancias parásitas significativas ($C_p = 0.8$ pF), que contribuyen naturalmente al comportamiento resonante de la estructura y proporcionan el componente capacitivo necesario para operar cerca de la frecuencia objetivo.

Resultados

La Figura 1b muestra los parámetros-S del transformador obtenidos mediante simulaciones electromagnéticas utilizando la herramienta EMX de Cadence. En la frecuencia de diseño, la transmisión es de aproximadamente $S_{21} \approx 2.4$ dB, lo que indica una transferencia de potencia superior al 50%.

A partir de la relación entre S_{21} y el acoplamiento, se estima un coeficiente de acoplamiento $k \approx 0.75$. Esto se traduce en que más de la mitad de la potencia se transfiere entre bobinas, mientras que el resto se pierde principalmente por reflexión y pérdidas resistivas y del sustrato. El dispositivo es recíproco, ya que $S_{12} \approx S_{21}$, como es de esperar en un transformador pasivo simétrico. Los parámetros de reflexión S_{11} y S_{22} mejoran con la frecuencia y a 5 GHz alcanzan aproximadamente -12 dB y -10 dB, indicando una mejoría en la adaptación de impedancias cerca de la frecuencia de diseño.

Conclusiones

La integración del transformador en el amplificador mejora de forma clave el rendimiento al permitir una buena adaptación entre la primera y la segunda etapa. La primera etapa por sí sola alcanza unos 12 dB de ganancia a 5 GHz, con resonancias marcadas, pero su comportamiento no es suficiente para un buen funcionamiento global.

El LNA completo mantiene una ganancia alrededor de 35 dB en un rango amplio de frecuencias de 4 GHz en torno a la frecuencia de operación de 5 GHz (Fig. 1c). Sin el transformador, la ganancia total cae a ~ 5 dB incluso empleando varias etapas, debido a una mala adaptación interestadio que provoca reflexiones y pérdida de señal. Esto demuestra que el transformador es crítico para lograr alta ganancia y buen ancho de banda. En cuanto al ruido, las simulaciones predicen una figura de ruido de ~ 4 dB a la frecuencia objetivo, con contribución dominante del ruido flicker ($v_{flicker}^2 \propto 1/f$) a bajas frecuencias y del ruido térmico ($v_{thermal}^2 \propto T$) a altas frecuencias. En conjunto con la alta ganancia, el

sistema presenta un rendimiento de ruido adecuado para la aplicación, con margen para optimización futura.

La Tabla 1 compara las prestaciones de este trabajo con el estado del arte. Esta arquitectura presenta un ancho de banda de 4 GHz, ganancia de 35 dB, figura de ruido de 4 dB y un consumo típico en amplificadores multietapa de 30.8 mW.

Tabla 1. Comparativa del estado del arte.

Referencia	BW (GHz)	Ganancia (dB)	NF (dB)	Pot. (mW)
[2] (40 nm)	3.8	35.5	1.3	51.1
[3] (65 nm)	0.95	24	3.3	19.8
Este trabajo	4.0	35	4.0	30.8

REFERENCIAS

- [1]. PACHE-VILÉS, S., LÓPEZ-PINAR, G., ALDEA, C., CELMA, S. y SÁNCHEZ-AZQUETA, C. On-chip stacked transformer in a low-noise amplifier for cryogenic environments. En: *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Dresden, Germany, 2026, Art. no 2752.
- [2]. PENG, Y., RUFFINO, A. y CHARBON, E. A cryogenic broadband sub-1-dB NF CMOS low-noise amplifier for quantum applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2021, vol. 56, no. 7, pp. 2040-2053.
- [3]. KIM, S. y KWON, K. A 50-MHz–1-GHz 2.3-dB NF Noise-Cancelling Balun-LNA Employing a Modified Current-Bleeding Technique and Balanced Loads. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2019, vol. 66, no. 2, pp. 546-554.

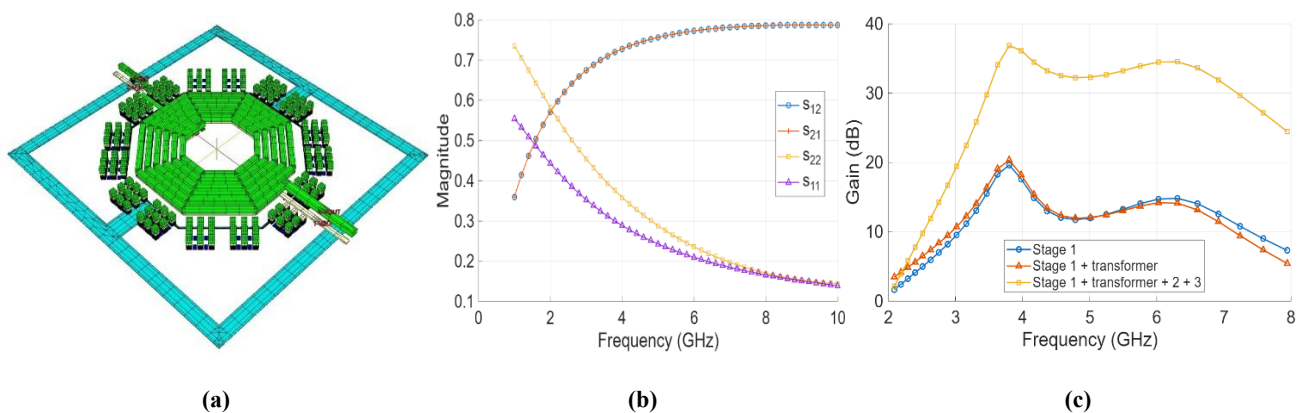


Figura 1: (a) Vista 3D del transformador integrado monolítico. (b) Parámetros S del transformador, extraídos mediante simulaciones electromagnéticas usando EMX tool. (c) Respuesta en frecuencia de las diferentes etapas del LNA, donde la etapa final alcanza una ganancia de 35 dB al incluir el transformador.