

Diseño de un amplificador de bajo ruido para lectura de qubits

Gabriel López-Pinar, Uxua Esteban-Eraso, Santiago Celma, Carlos Sánchez-Azqueta

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: glopez@unizar.es

Resumen

Este trabajo presenta un LNA optimizado para leer qubits a 3–4 K, con 4 GHz de ancho de banda, 38 dB de ganancia y <33 mW de consumo. Usa arquitectura cascode multietapa e inductancias integradas. Aunque eficaz, podría mejorar el S_{11} y NF mediante un modelo de transformador más preciso.

Introducción

La computación cuántica (QC) busca utilizar principios de la mecánica cuántica con el objetivo de resolver problemas computacionales de forma mucho más eficiente que los ordenadores clásicos. En la actualidad, la alternativa preferida para implementar los bits cuánticos (qubits) se basa en circuitos superconductores (transmons), que requieren temperaturas criogénicas profundas para minimizar el ruido térmico [1]. En este contexto, la investigación actual se centra en la integración de sistemas electrónicos de tecnología CMOS dentro de un sistema en chip (SoC) cercano al entorno criogénico de los qubits [2]. Este enfoque reduce el tamaño del sistema, la disipación de energía y el ruido, al mismo tiempo que permite la escalabilidad.

Este trabajo se centra en el diseño de un amplificador de bajo ruido (LNA) que, como primera etapa de lectura de qubits, es crucial por su impacto en toda la cadena de señal. Se propone una arquitectura de múltiples etapas con inductancias integradas, orientada a operar en 5 GHz, con más de 30 dB de ganancia y 3.6 GHz de ancho de banda (BW), figura de ruido (NF) inferior a 2.5 dB y consumo máximo inferior a 35 mW, cumpliendo los requisitos de integración en sistemas cuánticos eficientes.

Diseño del LNA

Combinación de dos etapas cascode CG-CS

Para ampliar el ancho de banda del LNA, se han combinado dos etapas con resonancias en 4.5 GHz y 6.5 GHz, buscando factores de calidad bajos para obtener una respuesta más plana, Figura 1. Se han añadido condensadores para suavizar los picos de

resonancia y se han ajustado los resonadores LC y el ancho de los transistores [3]. La adaptación de impedancia se ha realizado modificando el valor de C_{p2} . Las etapas 2 y 3 representadas en la Figura 1, ofrecen ganancias de 21.5 dB y 24.3 dB con anchos de banda de 1.9 GHz y 1.5 GHz, respectivamente; al combinarlas, se logra una ganancia total de 39.8 dB con una variación máxima de 2.6 dB.

Minimización del ruido y aumento del BW

Para reducir aún más la figura de ruido, se ha añadido la etapa 1, que mantiene una arquitectura cascode con degeneración inductiva en puerta (L_G , L_P) y fuente (L_S), así como un resonador $L_D C_D$ en el drenador para mejorar la adaptación de impedancia de entrada. Se ha incorporado un transformador como red de adaptación en la salida, el cual aumenta el ancho de banda y suprime los armónicos gracias a sus características de filtro pasabanda [3]. Ajustando los valores del transformador, se han logrado frecuencias de resonancia en 3.5 GHz y 6.5 GHz, con modificaciones en los anchos de transistores para mejorar el acoplamiento con las otras etapas. Al combinar las tres etapas con elementos ideales, se ha observado reducción de ruido. Luego, se han reemplazado estos elementos por sus equivalentes tecnológicos y se ha añadido un buffer para mejorar el acoplamiento de salida, así como puertos de 50 Ω en entrada y salida [4]. Como se muestra en la Figura 2, el diseño final alcanza una ganancia de 48 dB con variación máxima de 9 dB, ancho de banda de 4 GHz centrado en 5 GHz, NF entre 1.9 y 2.2 dB e IIP3 de -34 dBm. Los parámetros S_{11} y S_{22} (Figura 3) son menores a -5 dB y -16 dB respectivamente. Finalmente, se ha reducido V_{DD} a 1 V, disminuyendo la ganancia a 38 dB, pero reduciendo el consumo a 33 mW, y manteniendo el resto del rendimiento. Este compromiso favorece la integración en sistemas cuánticos [3].

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado y optimizado un amplificador de bajo ruido (LNA) para la lectura de qubits transmon en entornos criogénicos, logrando

cumplir con la mayoría de los objetivos de diseño, incluyendo un ancho de banda amplio (4 GHz), alta ganancia (38 dB) y linealidad (IIP3 = -34 dBm) en condiciones de consumo máximo de energía igual a 33 mW, lo que lo hace adecuado para sistemas de computación cuántica. Aunque los resultados muestran buen desempeño, aún hay margen de mejora en el parámetro S_{11} y la figura de ruido, que podrían beneficiarse de un modelo de transformador más refinado para alcanzar una figura de ruido y un parámetro S_{11} menores que 1.5 dB y -10 dB respectivamente. La investigación en curso se centrará en desarrollar nuevas estrategias de adaptación de impedancia, así como la validación experimental a temperaturas criogénicas.

REFERENCIAS

- [1]. TACCHINO, F., CHIESA, A., CARRETTA, S. y GERACE, D. Quantum computers as universal quantum simulators: state-of-art and perspectives. *Advances in Quantum Technologies*, 2020, vol. 3, no. 3.
- [2]. PÉREZ-BAILÓN, J., TARANCÓN, M., CELMA, S. y SÁNCHEZ-AZQUETA, C. Cryogenic measurement of CMOS devices for quantum technologies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, p. 1–7.
- [3]. 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, p. 2040–2053.
- [4]. MARTINEZ-PEREZ, A. D., AZNAR, F., FLANDRE, D. y CELMA, S. Design-window methodology for inductorless noise-cancelling CMOS LNAs. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, p. 29482–29492.

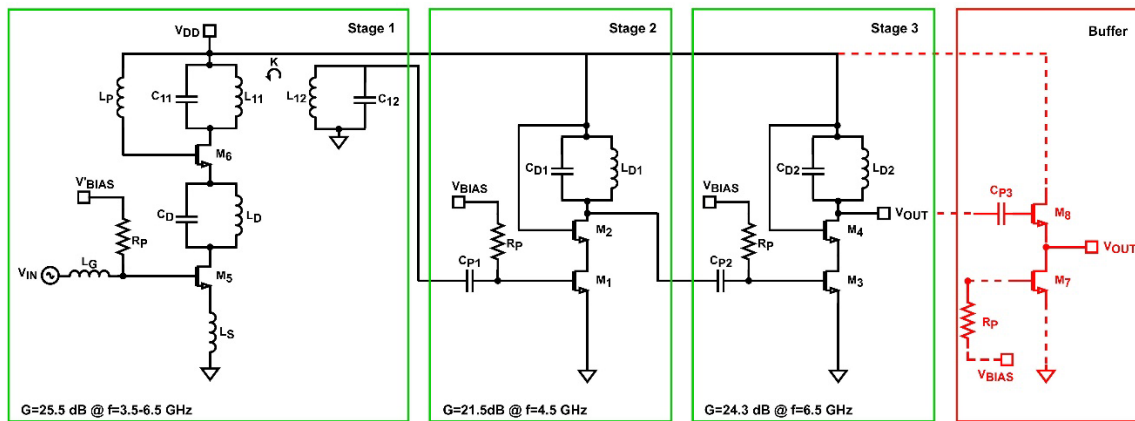


Figura 1. Esquema del LNA completo: una primera etapa de bajo ruido seguida por dos etapas cascode CG-CS, con un búfer de adaptación de salida resaltado en rojo.

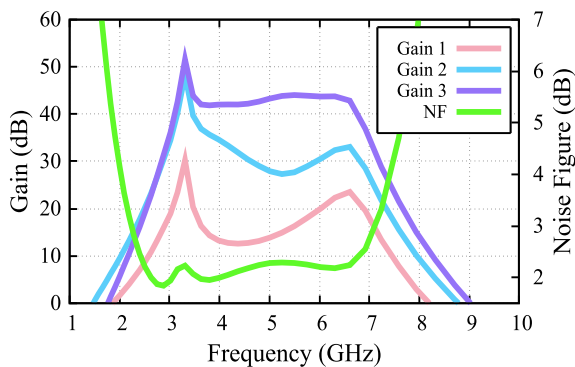


Figura 2. Ganancia del LNA final después de cada etapa: Ganancia 1 (Etapa 1), Ganancia 2 (Etapas 1+2), Ganancia 3 (Etapas 1+2+3); y figura de ruido (Etapas 1+2+3).

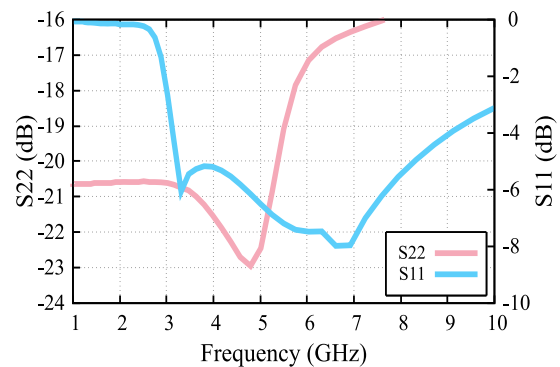


Figura 3. Parámetros S_{11} y S_{22} de la etapa final. Se observa que $S_{11} < -5$ dB y $S_{22} < -16$ dB en el ancho de banda.