

Diseño de fuentes de corrientes para amplificadores diferenciales con Nanotubos de Carbono - CNT

*Recopilación bibliográfica de amplificadores diferenciales

1st Edison Abado Ancoco

Escuela profesional de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
145012@unsaac.edu.pe

3rd Kevin Cuba Arenaza

Escuela profesional de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
182963@unsaac.edu.pe

5th Roly S. Gutierrez Benito

Escuela profesional de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
182967@unsaac.edu.pe

2nd Wilmer Condori Olivera

Escuela profesional de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
182962@unsaac.edu.pe

4th Joseph Garfias Quispe

Escuela profesional de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
182966@unsaac.edu.pe

Resumen—El trabajo bibliográfico presente, recompila información de nuevos componentes para la mejora de los diseños de los dispositivos analógicos y digitales, empleando transistores de efecto de campo de nanotubos de carbono de tipo n (CNTFET - CNFET), donde se observó que existe mejora sustancial en la ganancia de voltaje, reducción de potencia consumida en el diseño de los amplificadores diferenciales y otras mediciones en comparación con otros amplificadores diferenciales - DA convencionales, estas mejoras están atribuidas a las propiedades de los nanotubos de carbono.

Términos Clave— Nanotubos de carbono - CNT, transistores CNTFET, amplificadores diferenciales - DA, ganancia, ancho de banda.

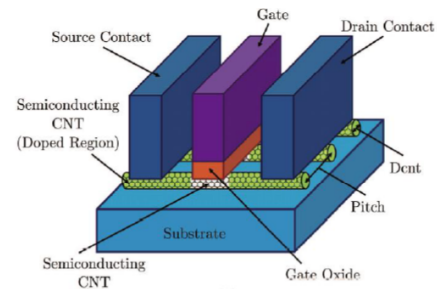


Figura 1. Diseño de un CNFET como un MOSFET [3]

I. INTRODUCCIÓN

Cada año se busca mejorar el rendimiento y velocidad en los aparatos electrónicos, ya sea innovando con nuevas tecnologías o rediseñando la tecnología existente; siguiendo la ley de Gordon Moore, este establecía que el número de transistores (elementos electrónicos semiconductores) en un microprocesador se duplicaría cada dos años y que los ordenadores, los componentes que funcionan en ordenadores y la potencia informática se volverían más pequeños y rápidos, a medida que los transistores de los circuitos integrados se vuelven más eficientes. Una confirmación de que esta ley se sigue cumpliendo es el estudio y diseño de los nanotubos de carbono aplicados en los transistores, siendo el principal punto de estudio en el presente artículo, que a diferencia de los transistores CMOS convencionales estos operan a una mayor velocidad y eficiencia, además se libra de la influencia de los parámetros térmicos haciendo su diseño e implementación más sencilla. Sin embargo, este material presenta algunas complicaciones de las cuales se hablará más adelante en este artículo.

II. FET DE NANOTUBOS DE CARBONO

Las necesidades de eficiencia nos llevan a buscar nuevas maneras de realizar tareas con el fin de aumentar la eficiencia, partiendo de ello se tiene a un dispositivo electrónico cuya composición se gestó en 1991 por Sumio Iijima (un nanotubo multicapa) y en 1993 con Donal Bethude que produjo nanotubos de Carbono de una sola capa.

Desde entonces, se fueron desarrollando nanotubos de carbono para diferentes aplicaciones, entre ellas, la que más nos interesa, los nanotubos de carbono para aplicaciones de semiconductores, para ser más específicos, el CNFET o CNTFET (Carbon Nanotube FET) cuyo diámetro de circunferencia va desde $< 1nm$ hasta $50nm$ [1] para aplicaciones de nuestro interés.

El esquema de un CNFET (figura 1) es parecido al del FETs a base silicio, requiere de tres pines, y también la compuerta (Gate) controla el flujo de corriente a través del canal. El switching de la compuerta habilita la corriente del canal [2]. La construcción se muestra en la figura 6.

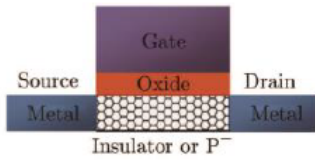


Figura 2. CNFET de barrera de Shottky [3].

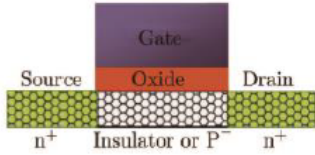


Figura 3. CNFET de tunelamiento banda-a-banda [3].

II-A. Clasificación de nanotubos de carbono

Existen 3 tipos: el CNFET de barrera de Shottky, CNFET de tunelamiento banda-a-banda y el CNFET como-MOSFET [3]. Otra clasificación se da por el tipo de distribución de las celdas hexagonales que presentan estos modelos.

1. Nanotubo de una sola capa (SWNT), el valor de su diámetro varía de 1nm a pocos micrómetros basado en la quiralidad que presenta
2. Nanotubo Multicapa (MWNT), son más costosos y se encuentran en los cables coaxiales, su diámetro varía de 5nm
3. Nanotubo Mixto, este modelo varía de diámetro entre los 2nm a 5nm

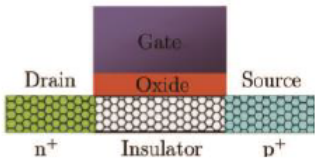


Figura 4. CNFET como-MOSFET. [3].

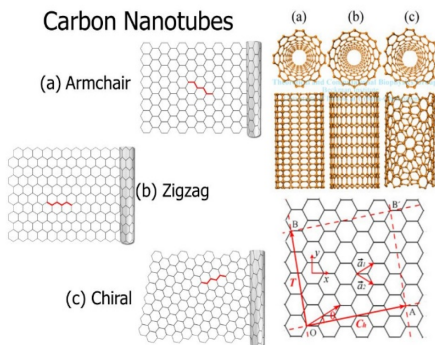


Figura 5. Los principios de construcción del CNT de planchas de grafeno [2].

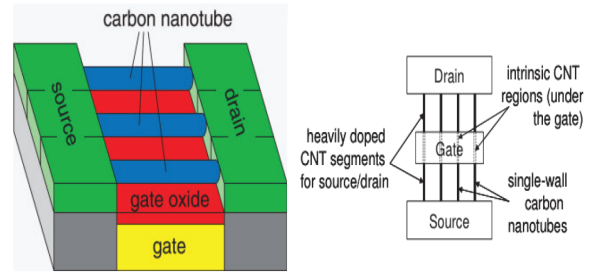


Figura 6. Estructura del CNFET [4].

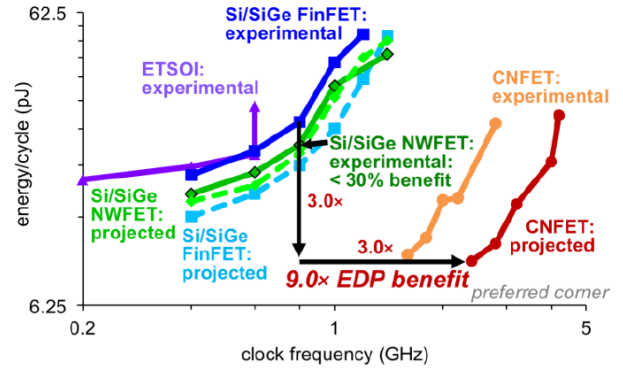


Figura 7. Comparación de otros dispositivos con CNFET de 5nm [5].

III. COMPARACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

III-A. Tecnología de 7nm por nodo

Mediciones para un chip multi núcleo de OpenSPARC T2 muestra que este CNFET 9 veces más beneficio que los de Si/SiGe, pueden operar 3 veces más rápido en frecuencia de reloj y consumen 3 veces menos energía por ciclo de reloj.

III-B. Tecnología de 5nm por nodo

Mediciones para un núcleo de procesador comercial de 32 bits muestra que este CNFET 9.3 veces más beneficio que los de Si/SiGe, pueden operar 3.1 veces más rápido en frecuencia de reloj y consumen 3 veces menos energía por ciclo de reloj.

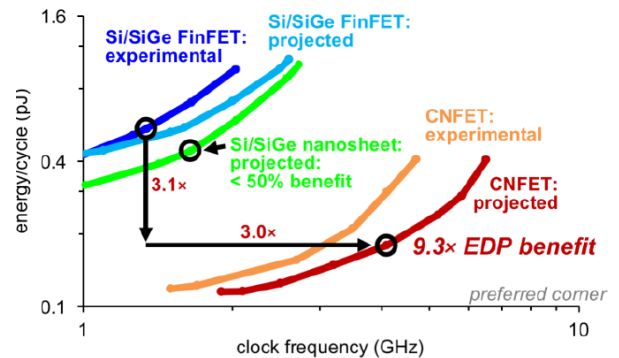


Figura 8. Comparación de otros dispositivos con CNFET de 7nm [5].

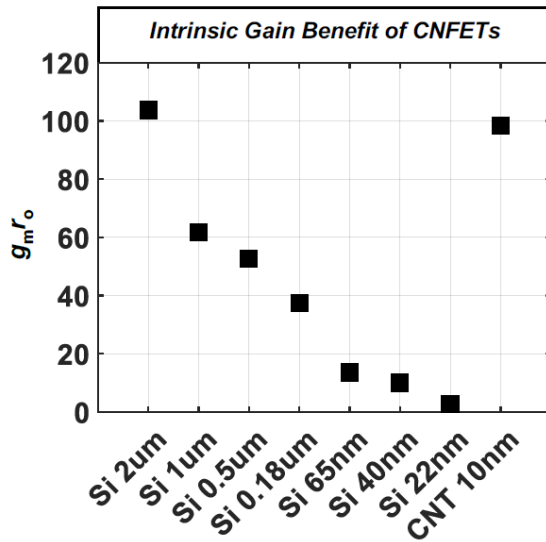


Figura 9. Comparación de otros dispositivos con CNFET de 7nm [5] .

Estas mediciones muestran que mientras más pequeño el nodo de CNFET, se mejora la eficiencia. Además, la ganancia intrínseca aumenta mientras más se reduce el tamaño [6] en comparación a los de Silicio que al aumentar tamaño disminuye su ganancia intrínseca (figura 9).

IV. CRITERIOS DE DISEÑO DE FUENTES DE CORRIENTE

La parte primordial de los amplificadores operacionales son los DA (Differential amplifier), ya que este amplifica la diferencia de dos entradas de voltaje. Estos están elaborados con tecnologías CMOS y los BJT, que con el tiempo se observó las deficiencias que presenta.

- Elevado consumo de energía
- Velocidad de tecnología en los bipolares es menor
- Los MOSFET en escalas de nano presenta limitaciones

En ese sentido se hace uso de los CNTFET (transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono) que son las nuevas herramientas del futuro para los dispositivos electrónicos. Como menciona [7], CNTFET es un dispositivo prometedor y se puede utilizar para extender la validez de la ley más conocida de Gordon Moore. Se ha encontrado que el CNTFET intrínseco tiene Características $CV/I \sim 13$ veces más altas que las de un convencional $n - MOSFET$, el transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono (CNFET) es una excelente alternativa a un transistor a granel tradicional para bajo consumo de energía y alto rendimiento, según [8]

- Reducción de potencia consumida
- Alta velocidad de procesamiento
- Eficiencia en los circuitos integrados
- Gran capacidad de conducción eléctrica
- Alta resistencia a la tracción
- Conductividad térmica

Son laminas de grafeno enrollados en tubos, que presentan características:

- Eléctricas
- Mecánicas
- Semiconductoras
- Prop. optoelectrónicas

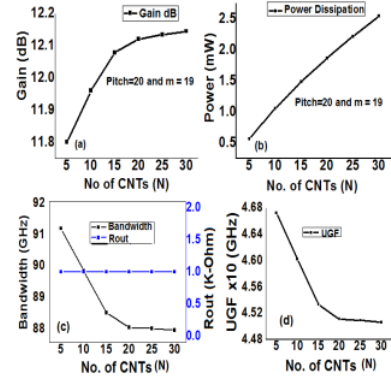


Figura 10. Variación de (a) Ganancia de corriente (b) Disipación de potencia (c) Ancho de banda (d) Frecuencia de ganancia unitaria con N en la propuesta basada en CNT-DA [7]

De acuerdo a la figura 5, podemos observar la estructura interna de los nanotubos, lo cual nos proporciona las propiedades mencionadas, que dependerán del diámetro, la distancia entre los nanotubos y el voltaje umbral con el que trabaja.

Diámetro de los nanotubos:

$$D_{CNT} = \frac{\sqrt{3}a_0}{\pi} \sqrt{n^2 + m^2 + mn} \quad (1)$$

Donde:

- n, m son los valores de vectores de quiralidad del nanotubo
- a_0 distancia interatómica entre cada átomo de carbono

Voltaje umbral

$$V_{th} \approx \frac{E_g}{2e} = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{aV_{\pi}}{eD_{CNT}} \quad (2)$$

- $a = 2,49 \text{ \AA}$, distancia de carbono a átomo de carbono
- $V_{\pi} = 3,033 \text{ eV}$ energía de enlace del carbono
- e , es el valor de la carga del electrón

Ancho de banda

$$W = (N - 1)S + D_{CNT} \quad (3)$$

- N , números de CNTs
- S , es la distancia entre el centro de dos CNTs (factor importante para el diseño)

La influencia de varios parámetros de CNTFET, N , S y D_{CNT}

V. FUENTES DE CORRIENTES

Algunas fuentes de corrientes

- Fuente de corriente constante cascode
- Fuente de corriente constante con FET(Mosfet)

V-A. Fuente de corriente constante cascode

Una forma de eliminar la disparidad de V_{DS} es usar la configuración cascode:

V_{DD} tal que $V_X = V_Y$

$$\frac{\left(\frac{W}{L}\right)_3}{\left(\frac{W}{L}\right)_0} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1}$$

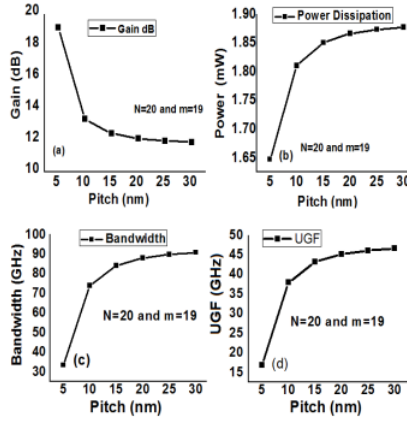


Figura 11. Variación de (a) ganancia de corriente (b) Disipación de potencia (c) Ancho de banda (d) Frecuencia de ganancia unitaria con respecto al tono de CNT-DA [7]

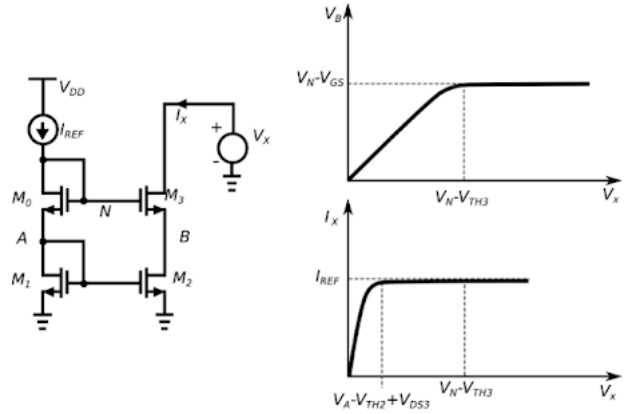


Figura 14. Gráfica de la ganancia de voltaje con fuente Widlar

donde

W: ancho de puerta
L: longitud de la puerta

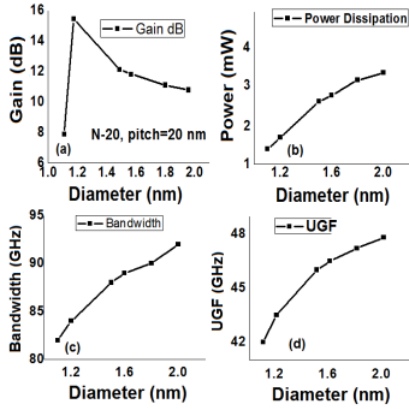


Figura 12. Variación de (a) Ganancia (b) Disipación de potencia (c) Ancho de banda (d) Frecuencia de ganancia unitaria con respecto al diámetro de CNT-DA [7]

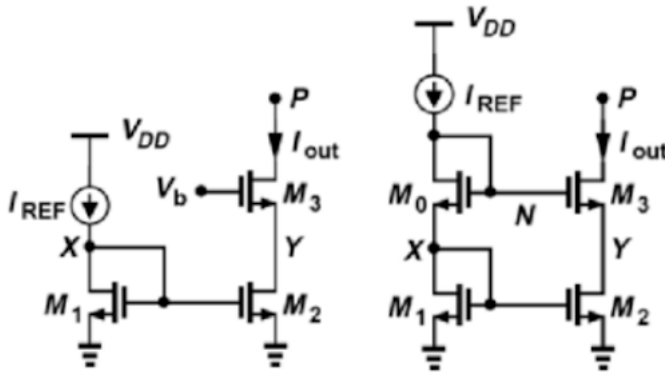


Figura 13. Fuente de corriente en cascode

$$V_{Pmin} = V_{DSsat2} + V_{DSsat3} \quad (4)$$

$$V_{Pmin} = (V_{GS0} - V_{TH0}) + (V_{GS1} - V_{TH1}) \quad (5)$$

$$V_{Pmin} = 2V_{DSsat} + V_{TH3} = 2V_{OD} + V_{TH} \quad (6)$$

Dimensionando correctamente los transistores logramos que M_3 absorba las variaciones de V_P y mantenga $V_X = V_Y$.

Por debajo de la tensión mínima de salida, M_3 ya no puede absorber las diferencias de V_{DS} y V_B y será distinto a V_A , volviendo a los problemas de espejo simple. Para tensiones muy bajas, la resistencia de salida se degrada.

V-B. Fuente con FET

- El par diferencial básico consta de dos MOSFET de enriquecimiento acoplados (Q_1 y Q_2), polarizados con una fuente de corriente constante; esta ultima suele ser una configuración de espejo de corriente similar a la utilizada con BJT's. desde luego se supone que el circuito de carga es tal que los dos MOSFET que conforman el par, se encuentran operando en la región de saturación.
- El MOSFET es frecuentemente usado como amplificador de potencia y ofrece como ventaja una resistencia de entrada alta, prácticamente infinita en la compuerta y una corriente de polarización de entrada cai cero.
- Existen dos razones fundamentales por las cuales se prefieren los amplificadores diferenciales sobre los de un solo extremo: son sensibles a la interferencia y no necesitan capacitores de paso y acoplamiento.

VI. CONCLUSIONES

- Las fuentes de corrientes basados en nanotubos de carbono y FETs tienen ventajas por encima que los BJTs: no dependen de hie, por ende no se verán afectados por la temperatura.
- Las fuentes de corrientes se usan en los amplificadores de corriente como un elemento de amplificador, ya que

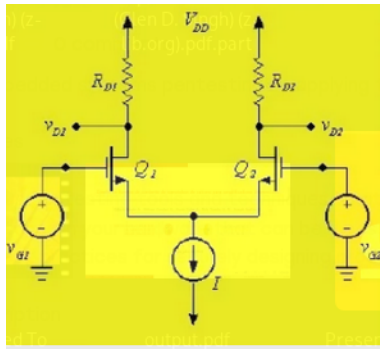


Figura 15. Amplificador diferencial con FETs

fijará un valor constante para el punto de operación del amplificador diferencial.

- Con una tensión de alimentación de 0,4 voltios, la corriente que fluye a través del transistor de nanotubos de carbono es mayor que la que obtendrían los mejores transistores CMOS.
- Los CNTFET presentan una precisión referencia de banda prohibida con una salida nominal de 500mV, 6,8 coeficiente de temperatura ppm/C , sensibilidad de línea de 2,25mV/V y se presenta una disipación de potencia de 26W.
-

REFERENCIAS

- [1] M. S. Akhoun, A. G. Alharbi, M. A. Bhat, S. A. Suandi, J. Ashraf, and S. A. Loan, "Design and simulation of carbon nanotube based current source load differential amplifier," in *2021 International Conference on Microelectronics (ICM)*, pp. 140–143, 2021.
- [2] S. Waykole and V. S. Bendre, "Performance analysis of classical two stage opamp using cmos and cnfet at 32nm technology," in *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCCUBEA)*, pp. 1–6, 2018.
- [3] Z. Liu, T. Pan, S. Jia, and U. Wang, "Design of a novel ternary sram sense amplifier using cnfet," in *2017 IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON)*, pp. 207–210, 2017.
- [4] S. M. Turkane and A. K. Kureshi, "Performance investigation of emerging nano devices for low power analog circuits," in *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, pp. 718–722, 2016.
- [5] G. Hills, M. G. Bardon, G. Doornbos, D. Yakimets, P. Schuddinck, R. Baert, D. Jang, L. Mattii, S. M. Y. Sherazi, D. Rodopoulos, R. Ritzenthaler, C.-S. Lee, A. V.-Y. Thean, I. Radu, A. Spessot, P. Debacker, F. Cathoor, P. Raghavan, M. M. Shulaker, H.-S. P. Wong, and S. Mitra, "Understanding energy efficiency benefits of carbon nanotube field-effect transistors for digital vlsi," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 17, no. 6, pp. 1259–1269, 2018.
- [6] R. Ho, C. Lau, G. Hills, and M. M. Shulaker, "Carbon nanotube cmos analog circuitry," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 18, pp. 845–848, 2019.
- [7] M. S. Akhoun, A. G. Alharbi, M. A. Bhat, S. A. Suandi, J. Ashraf, and S. A. Loan, "Design and simulation of carbon nanotube based current source load differential amplifier," in *2021 International Conference on Microelectronics (ICM)*, pp. 140–143, 2021.
- [8] Z. Liu, T. Pan, S. Jia, and U. Wang, "Design of a novel ternary sram sense amplifier using cnfet," in *2017 IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON)*, pp. 207–210, 2017.