


El transistor: una revolución tecnológica

The transistor a technological revolution

 Franklin Israel Sánchez Gamboa: Instituto Superior Universitario Cotopaxi, Ingeniero en Electromecánica,
<https://orcid.org/0000-0001-8390-6200>
Autor de correspondencia: jambiuku@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.64424/rcu41202549>



Recibido: 19 junio 2024
Publicado: 12 marzo 2025

Resumen:

El artículo revisa la evolución del transistor desde su invención en 1950 por William Shockley hasta los avances más recientes. El problema abordado es la necesidad de comprender cómo los transistores han evolucionado y su impacto en la tecnología moderna. El objetivo es clasificar los transistores según su desarrollo histórico y sus aplicaciones actuales, incluyendo innovaciones recientes como los dispositivos neuromórficos. La metodología incluye una revisión exhaustiva de la literatura relevante, abarcando artículos académicos, libros y publicaciones técnicas. Los resultados más relevantes incluyen la clasificación de los transistores en tipos como BJT, MOSFET, IGBT y GTO, y sus aplicaciones en diversas industrias. Además, se destacan avances recientes como los transistores sin unión y los TFET, que prometen mayor eficiencia y escalabilidad. Los dispositivos neuromórficos basados en transistores se presentan como una innovación prometedora para la reparación del sistema nervioso dañado, imitando las características dinámicas de los sistemas neuronales biológicos. En conclusión, el transistor ha sido una innovación trascendental en la tecnología moderna y su desarrollo continuo sugiere que seguirá siendo fundamental, especialmente en campos emergentes como la computación neuromórfica y la medicina.

Palabras claves: transistor, semiconductor, tecnología, revolución industrial, revisión.

Abstract:

The article reviews the evolution of the transistor from its invention in 1950 by William Shockley to the most recent advances. The problem addressed is the need to understand how transistors have evolved and their impact on modern technology. The objective is to classify transistors according to their historical development and current applications, including recent innovations such as neuromorphic devices. The methodology includes a comprehensive review of relevant literature, encompassing academic articles, books, and technical publications. The most relevant results include the classification of transistors into types such as BJT, MOSFET, IGBT, and GTO, and their applications in various industries. Additionally, recent advances such as junctionless transistors and TFETs, which promise greater efficiency and scalability, are highlighted. Neuromorphic devices based on transistors are presented as a promising innovation for repairing damaged nervous systems by mimicking the dynamic characteristics of biological neural systems. In conclusion, the transistor has been a groundbreaking innovation in modern technology, and its continuous development suggests it will remain fundamental, especially in emerging fields such as neuromorphic computing and medicine.

Keywords: transistor, semiconductor, technology, industrial revolution, revision.



Introducción

Los transistores han sido fundamentales en la revolución digital, impulsando avances en una amplia gama de dispositivos electrónicos. Sin embargo, a pesar de su larga historia, la evolución del transistor y sus implicaciones para el futuro de la electrónica siguen siendo temas de gran interés. La mayoría de las revisiones existentes se centran en aspectos técnicos específicos o en aplicaciones particulares. Este estudio busca llenar un vacío en la literatura al proporcionar una revisión exhaustiva y actualizada de la evolución del transistor.

Un transistor, también conocido como semiconductor, de acuerdo a (Amos & James, 2000), un material semiconductor es uno con una conductividad que se encuentra entre la de un aislante y la de un conductor: es decir, uno para el que la resistividad se encuentra entre, digamos $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ (un valor típico del vidrio) y $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (aproximadamente el valor para cobre). Valores típicos para la resistividad de un material semiconductor miden entre 1 y $100 \Omega \cdot \text{cm}$.

Tal valor de resistividad podría, por supuesto, obtenerse mezclando un conductor y un aislante en proporciones adecuadas, pero el resultado material no sería un semiconductor. Otra característica esencial de un material semiconductor es que su resistencia eléctrica disminuye con aumento de la temperatura en un rango de temperatura particular que es característica del semiconductor. Este comportamiento contrasta con el de conductores metálicos.

El ritmo de la revolución se aceleró una década más tarde por el desarrollo del circuito integrado o c.i. (popularmente conocido como el chip de silicio) en el que los transistores y otros componentes se fabrican e interconectan para los cuales la resistencia aumenta con aumento de la temperatura (Amos & James, 2000)

La invención del transistor hace casi más de 70 años fue uno de los desarrollos técnicos más importantes de este siglo. De acuerdo a (Ross, 1998) tuvo un profundo impacto en la forma en que vivimos y en la forma en que trabajamos.

Hace unos 20 años, la situación era muy diferente. Durante ese tiempo, la electrónica de RF era algo misteriosa y sus aplicaciones habían sido principalmente militares (por ejemplo, comunicaciones seguras, sistemas de guerra electrónica, guía de misiles, electrónica de control para munición inteligente, radares) y la financiación para su desarrollo procedía principalmente de agencias gubernamentales. En la primera mitad de la década de 1980, la televisión por satélite que usaba transistores de bajo ruido que operaban a 12 GHz en los terminales del receptor surgió como la primera aplicación civil de los transistores de RF con un volumen de mercado digno de mención. (Liou & Schwierz, 2002).

Este artículo describe la evolución del transistor los materiales utilizados una descripción general en distintas aplicaciones en la actualidad y a lo largo de la historia.

Metodología

Se realiza una búsqueda de literatura relevante sobre la historia y evolución del transistor, incluyendo artículos académicos, libros de texto y publicaciones técnicas. Las fuentes seleccionadas abarcan desde los trabajos pioneros de William Shockley hasta los estudios más recientes en dispositivos neuromórficos basados en transistores. Se prioriza fuentes de alta calidad y reconocidas en el campo, como "Principles of transistor circuits" de (Amos & James, 2000), artículos en revistas de alto impacto como "Advanced Intelligent Systems" y "Nature", y conferencias relevantes como el "Proceedings of the IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting".

Se utilizaron los siguientes términos de búsqueda: "transistor" AND "evolución" AND "aplicaciones" AND ("neuromorphic" OR "neuromorphic computing"). Inicialmente, se identificaron aproximadamente 400 artículos, de los cuales se seleccionaron 20 para la revisión en profundidad, basándose en los criterios de inclusión como los trabajos más citados por artículos y por patente.

La información recopilada se clasifica en diferentes secciones temáticas, comenzando con los principios básicos del funcionamiento del transistor y su evolución histórica.

Se revisa los diferentes tipos de transistores, como los de unión bipolar (BJT), transistores de efecto de campo óxido metálico-semiconductor (MOSFET), tiristores desactivables por puerta (GTO), transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) y tiristores controlados MOS (MCT).

Se realiza un análisis detallado de las características y aplicaciones de cada tipo de transistor, apoyado en gráficos y figuras explicativas provenientes de las fuentes revisadas.

Se investiga los últimos avances tecnológicos en el campo de los transistores, enfocándose en innovaciones como los transistores sin unión y los transistores de efecto de campo de túnel (TFET), además, se incorporaron estudios de simulación y modelado de dispositivos avanzados, basados en trabajos recientes como los de Amin & Sarin (n.d.) y Ionescu y Riel (2011).

Las aplicaciones actuales evalúan a los transistores de diversas industrias, desde control de motores eléctricos hasta su uso en dispositivos neuromórficos.

Se discutieron las implicaciones futuras de estos desarrollos, especialmente en el ámbito de la computación neuromórfica y la medicina, destacando el potencial de los dispositivos neuromórficos basados en transistores para reparar sistemas nerviosos dañados.

Análisis de resultados

Clasificación a lo largo de la historia

Los transistores de potencia que se empezaron a tener un uso comercial alrededor de 1952 estos dispositivos que se utilizan como elementos de conmutación funcionan en la región de saturación lo que provoca una baja caída de voltaje en estado de conducción encendido. Con el avance de la tecnología de semiconductores de potencia las capacidades de los transistores de potencia se mejoran de forma continua. Los transistores de potencia se pueden clasificar en cinco categorías. (Rashid, 2020)

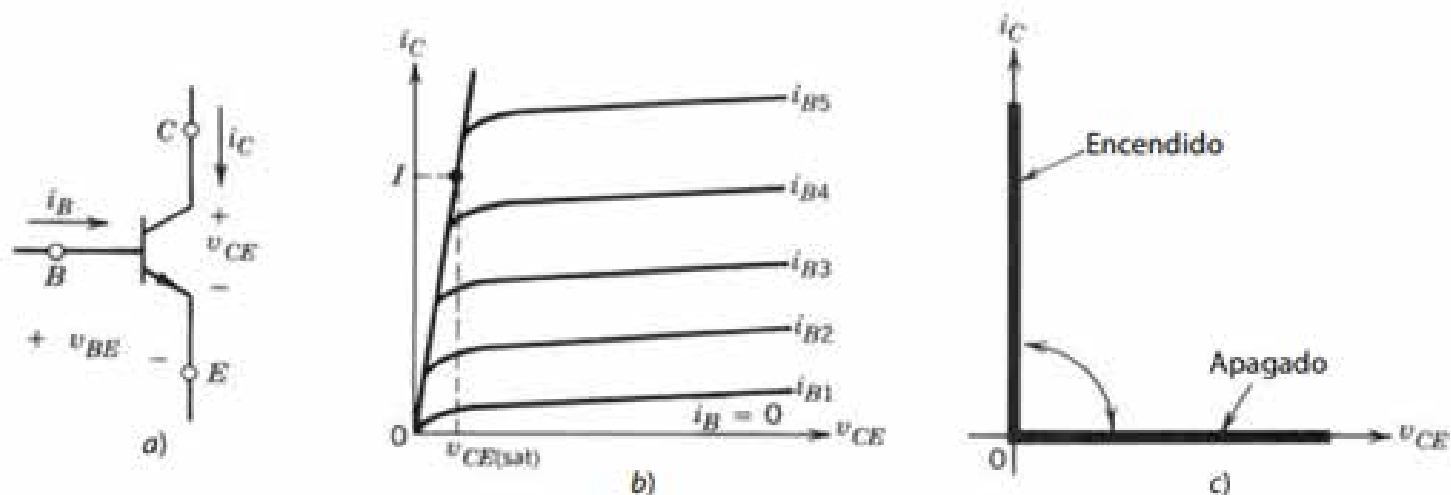
La categoría de interruptores controlables abarca varios tipos de dispositivos, como transistores de unión bipolar (bipolar junction transistors, BJT), transistores de efecto de campo óxido metálico semiconductor (metal-oxide-semiconductor field effect transistors, MOSFET), tiristores desactivables por puerta (GTO) y transistores bipolares de puerta aislada (insulated gate bipolar transistors, IGBT) (Mohan et al., n.d.)

Transistor de unión bipolar y darlington monolíticos.

Nuestro recorrido a lo largo de la historia revisando el avance de esta tecnología inicia con el transistor bipolar usado comercialmente desde el año 1952, el símbolo de circuito para un NPN BJT se muestra en la figura 1 a, y sus características de estado permanente, en la figura 1 b. Como se muestra en las características de i-v, resulta una corriente de base lo bastante grande (según la corriente del colector) cuando el dispositivo está completamente encendido. Esto requiere que el circuito de control proporcione una corriente de base lo bastante grande, de modo que donde h_{FE} es la ganancia de corriente de CC del dispositivo. El voltaje del estado activo $V_{CE(sat)}$ de los transistores de potencia suele encontrarse en el rango de 12 V, así que la pérdida de energía de conducción en el BJT es muy pequeña. Las características idealizadas i-v del BJT al operar como interruptor se muestran en la figura 1 c. Los transistores de unión bipolar son dispositivos controlados por corriente, y se les tiene que suministrar corriente de base de manera continua para mantenerlos en estado activo. (Mohan et al., 2012.)

Figura 1

Curvas características de BJT.

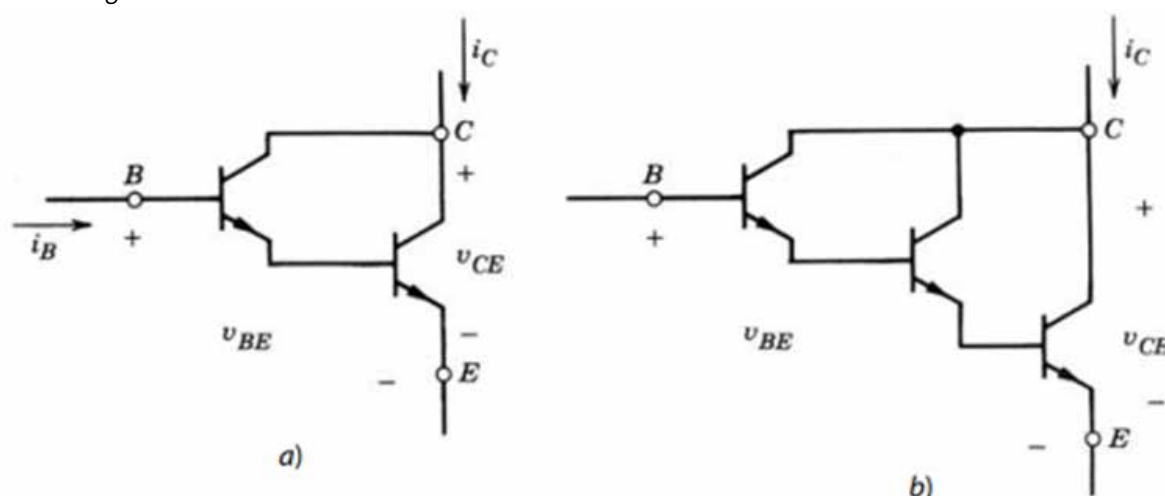


Nota. Mohan (2012)

La ganancia de corriente CC h_{FE} es normalmente en promedio de sólo 5-10 en transistores de alta potencia, así que estos dispositivos en ocasiones están conectados en una configuración Darlington o triple Darlington, como se muestra en la figura 2, a fin de lograr una mayor ganancia de corriente. En esta configuración se acumulan algunas desventajas, como valores generales V_{CE} (sat) un poco más altos, así como velocidades de conmutación más lentas. (Mohan et al., 2012.)

Figura 2

Configuración darlington.



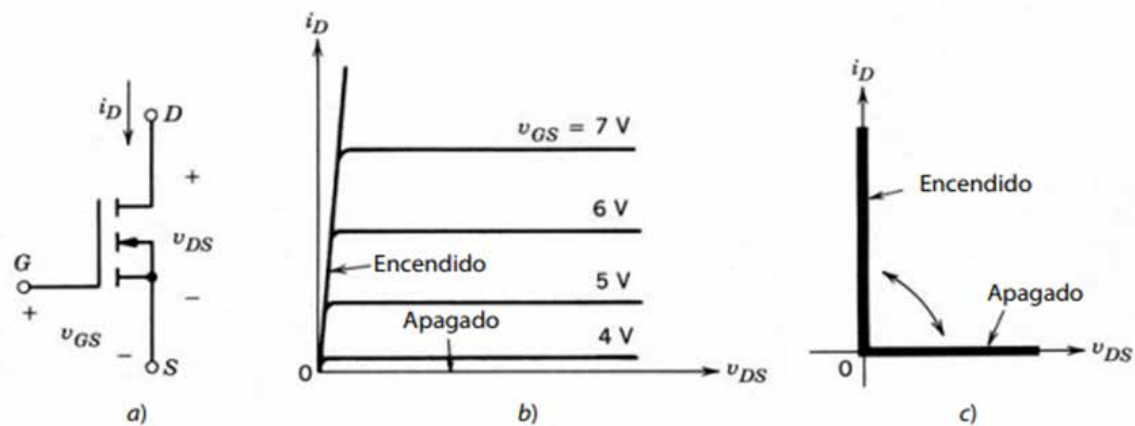
Nota. Mohan (2012)

Transistores de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor.

En 1960 se desarrolló y adaptó para aplicaciones de potencia, el símbolo de circuito de un MOSFET de canal n se muestra en la figura 3a. Se trata de un dispositivo controlado por tensión, como lo indican las características $i-v$ que se muestran en la figura 3b. El dispositivo está por completo encendido y se parece a un interruptor cerrado cuando la tensión de fuente de puerta está debajo del valor umbral V_{GS} (t_h). Las características idealizadas del dispositivo en operación como interruptor se muestran en la figura 3c. Los transistores de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor requieren la aplicación continua de tensión puerta-fuente de magnitud correspondiente a fin de estar en el estado activo. No hay flujo de corriente de puerta, excepto durante las transiciones de encendido a apagado, o viceversa, cuando la capacitancia de la puerta se está cargando o descargando. Los tiempos de conmutación son muy cortos y se encuentran en el rango de unas cuantas decenas de nanosegundos a unos cientos de nanosegundos, lo que depende del tipo de dispositivo. (Mohan et al., 2012)

Figura 3

Curvas características MOSFET.



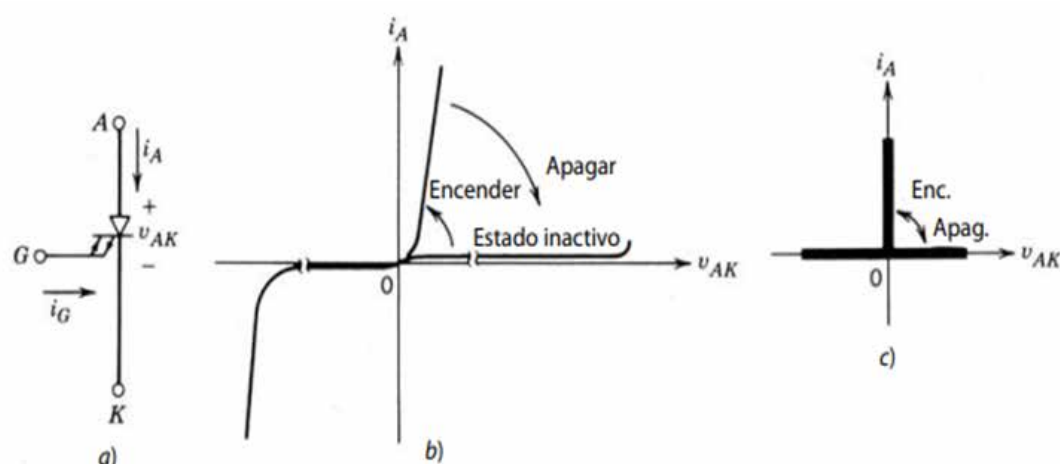
Nota. Mohan (2012)

Desactivación por puerta de tiristores.

En el año 1960 se desarrolló el GTO se muestra en la figura 4a, y su característica de estado permanente i-v, en la figura 4b. Igual que el tiristor (SCR), el GTO se enciende por medio de un impulso de corriente de puerta de corta duración, y una vez en el estado activo, el GTO se mantiene encendido sin más corriente de puerta. Sin embargo, a diferencia del tiristor (SCR), el GTO se apaga mediante la aplicación de una tensión de puerta a cátodo negativa para que fluya una corriente de puerta negativa lo bastante grande. Esta corriente de puerta negativa sólo necesita fluir durante unos cuantos microsegundos (durante el tiempo de apagado), pero debe tener una magnitud muy grande, normalmente hasta una tercera parte de la corriente de ánodo que se esté desconectando. Los GTO bloquean voltajes negativos cuya magnitud depende de los detalles del circuito amortiguador para reducir dv/dt en la desconexión circuito de control de puerta-diseño del GTO. Las características idealizadas del dispositivo al operar como interruptor se muestran en la figura 4c. (Mohan et al., 2012)

Figura 4

Curvas características GTO.



Nota. Mohan (2012)

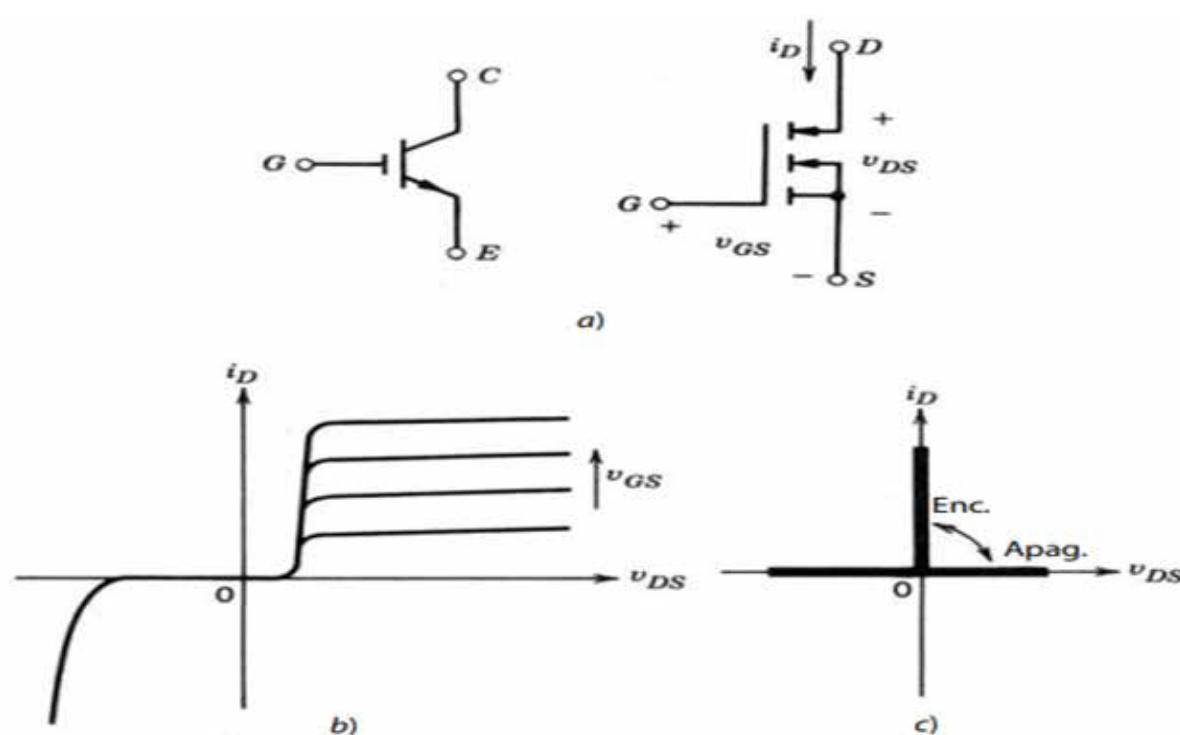
Transistores bipolares de puerta aislada (IGBT).

En el año 1963 se desarrolló del transistor de puerta aislada (IGBT), que combina las ventajas del BJT y el MOSFET, mejorando la capacidad de manejo de potencia el símbolo de

circuito para un IGBT se muestra en la figura 5a, y sus características de i - v , en la figura 5b. Los IGBT tienen algunas de las ventajas de los MOSFET, BJT y GTO combinados. Parecido al MOSFET, el IGBT tiene una puerta de alta impedancia que sólo requiere una pequeña cantidad de energía para conmutar el dispositivo. Igual que el BJT, el IGBT tiene un voltaje de estado activo pequeño, incluso en dispositivos con grandes voltajes nominales de bloqueo (por ejemplo, V_{ce} es de 2 a 3 V en un dispositivo de 1 000 V). Parecidos al GTO, los IGBT se pueden diseñar para bloquear tensiones negativas, como lo indican sus características de conmutación idealizadas que se muestran en la figura 5c. (Mohan et al., 2012).

Figura 5

Curvas características IGBT.



Nota. Mohan (2012)

Tiristores controlados MOS

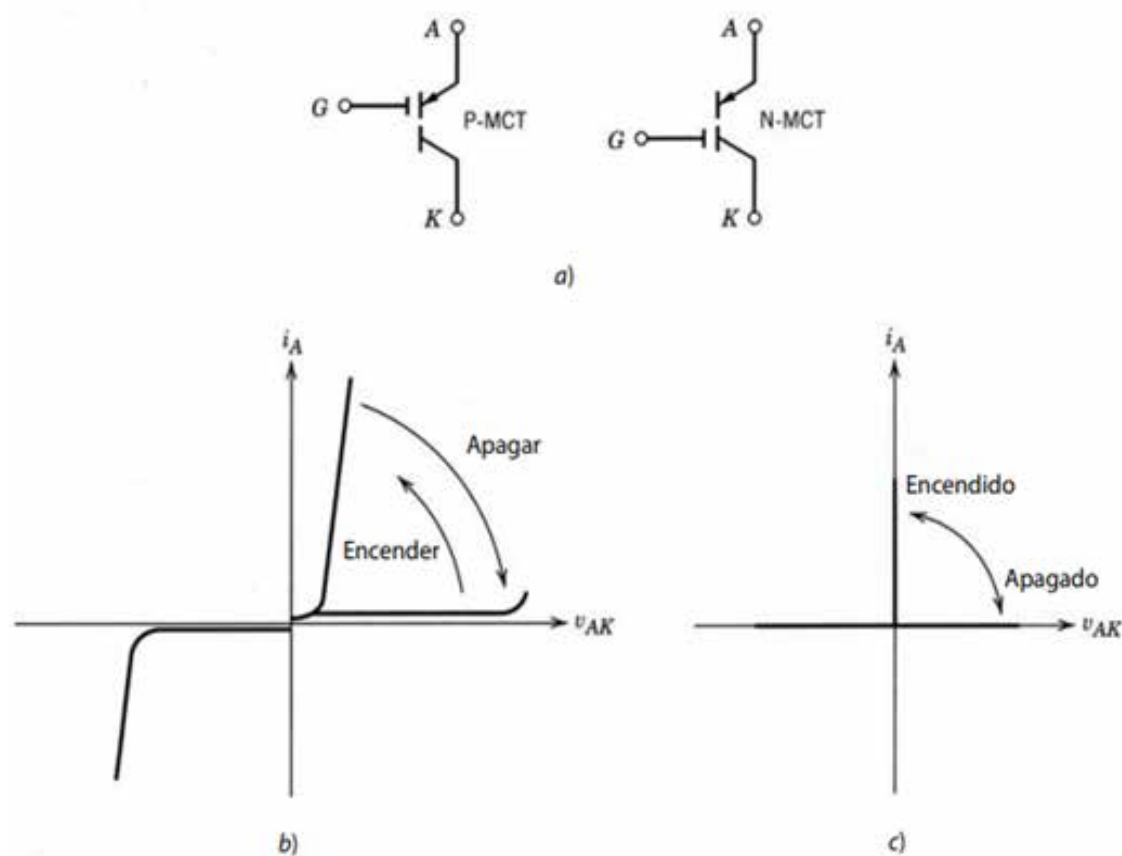
En el año 1980 se desarrolló el tiristor controlado MOS (MOS-controlled thyristor, MCT). Su símbolo de circuito se muestra en la figura 6a, y su característica de i - v , en la figura 6b. Los dos levemente distintos símbolos para el MCT denotan si el dispositivo es un P-MCT o un N-MCT. La diferencia surge por las diferentes ubicaciones de las terminales de control. Al ver las características de i - v , queda claro que el MCT tiene muchas de las propiedades de un GTO, como una caída de baja tensión en el estado activo con relativamente altas corrientes, así como una característica de activación (enclavado) (el MCT permanece encendido incluso cuando se quita la activación de la puerta). El MCT es un dispositivo controlado por tensión, igual que el IGBT y el MOSFET, y se requiere más o menos la misma energía para conmutar un MCT que para un MOSFET o un IGBT.

El MCT tiene dos ventajas principales ante el GTO, además de sus requisitos de control mucho más sencillos (no se necesita una corriente de puerta negativa grande para la desconexión, como en el GTO) y velocidades de conmutación más rápidas (tiempos de conexión y desconexión de unos cuantos microsegundos): los MCT tienen caídas de voltaje

de estado activo más pequeñas en comparación con IGBT de dimensionados comparables y están en la actualidad disponibles en tensiones nominales hasta 1 500 V con corrientes nominales de 50 A a unos cuantos cientos de amperios. Se han hecho pruebas con prototipos de voltajes nominales de 2 500 3 000 V, y pronto estarán disponibles. Las corrientes nominales de MCT individuales son considerablemente más pequeñas que las de GTO porque los MCT individuales no se pueden hacer tan grandes en el área transversal como un GTO, debido a su estructura más compleja. (Mohan et al., 2012)

Figura 6

Curvas características IGBT.



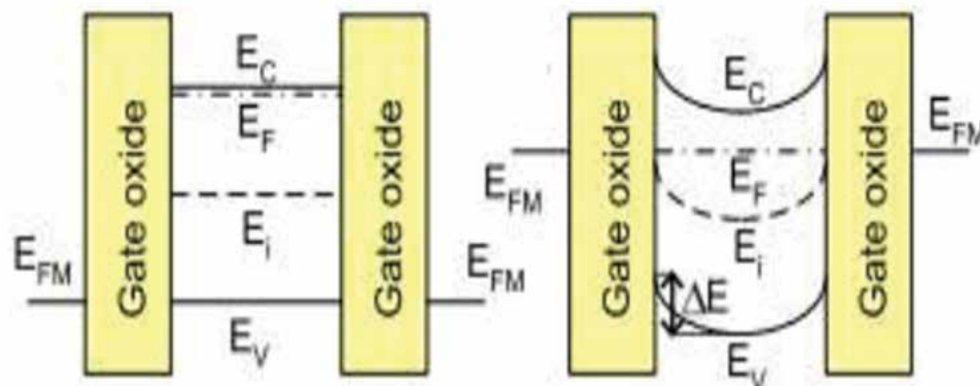
Nota. Amin y Sarin (2022)

Transistor sin unión.

A partir del año 2000 se investigó el Junctionless Transistor (JLT) Cuando se aplica un sesgo positivo a la puerta, entonces el canal se forma dentro de la mayor parte del dispositivo y la corriente pequeña comienza a fluir y debajo de la banda plana el canal de condición se vuelve neutral. La banda de energía El diagrama se muestra en la Figura 7(a) y (b). el campo eléctrico es máximo en condiciones de agotamiento total cuando el dispositivo está apagado y se convierte en cero cuando el dispositivo está encendido debido a la ausencia de la unión (El campo eléctrico existe solo cuando la unión está presente).El punto interesante aquí en JLT es que bajo el estado la longitud efectiva del canal se vuelve igual a la de la puerta longitud, por lo que el efecto de canal corto es menor en el caso de JLT en comparación con MOSFET convencional donde el efectivo la longitud del canal se reduce a medida que se enciende el dispositivo.(Amin y Sarin, 2022.)

Figura 7

Curvas características IGBT.



Nota. Amin y Sarin (2022)

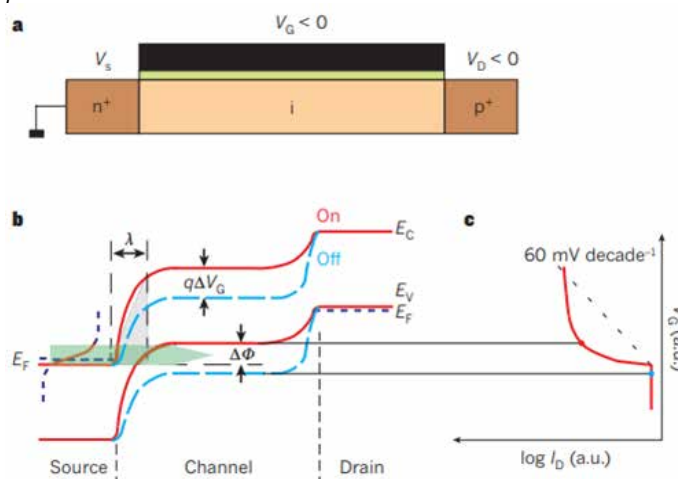
De acuerdo con (Amin & Sarin, 2022.) En el modelo de dispositivo presentado en su trabajo “Juntionless transistor: a review” en acumulación y región a granel. La simulación del dispositivo se lleva a cabo utilizando un espaciador de bajo k para diferentes longitudes de puerta que da como resultado un aumento en SS, pero aún muestra escalabilidad hasta L_{gate} de 10nm. Reduce la complejidad del proceso y mejora el rendimiento al reducir el efecto de canal corto y puede ser un candidato prometedor para la tecnología futura en la región del decananómetro.

Transistor de campo de túnel

En el año 2011 se encontraron resultados aplicativos del transistor Tunel Field Efect transistor (TFET) que su principio de funcionamiento es el túnel entre bandas, mediante el cual los portadores de carga se transfieren de una banda de energía a otra en una unión p+ -n+ fuertemente dopada. Este mecanismo de tunelización fue identificado por primera vez por Zener¹⁴ en 1934. En un TFET, la tunelización entre bandas se puede activar y desactivar abruptamente controlando la flexión de la banda en la región del canal por medio de la polarización de la puerta. Esta función se puede realizar en una estructura p-i-n con polarización inversa, figura 8 sección a. En principio, el TFET es un dispositivo ambipolar, que muestra un comportamiento de tipo p con un agujero dominante conducción y comportamiento de tipo n con conducción de electrones dominante. (Ionescu y Riel, 2011)

Figura 8

Transistores de efecto de campo de túnel.



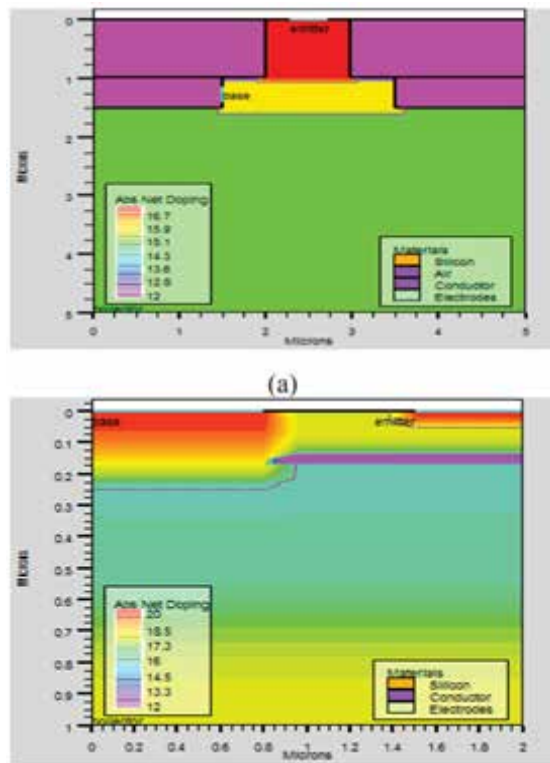
Nota. Ionescu y Riel (2011)

Transistor de difusión.

En el año 2016 se empezó a generar resultados en investigación en cuanto a los transistores de difusión, para esta investigación las estructuras simuladas en ATLAS para los transistores de difusión y deriva se muestran en la Fig. 9 (a) y la Fig. 9 (b) respectivamente de cuyos perfiles netos de dopaje se muestran en Fig. 10(a) y Fig. 10(b) respectivamente. Se hacen contactos óhmicos para los electrodos. Una malla muy fina en toda la base. se considera la región.

Figura 9

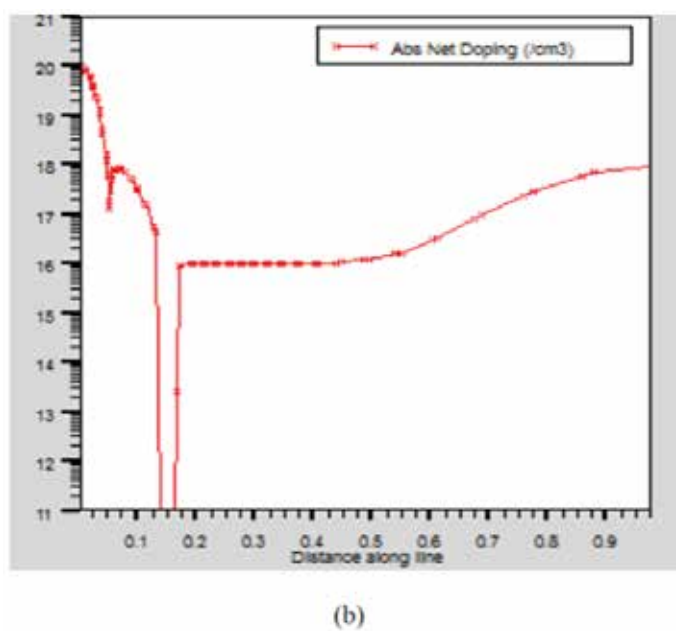
Transistor deriva y difusión bipolar.



Nota. Amin y Sarin (2022)

Figura 9

Transistor deriva doping.



Nota. Amin y Sarin (2022)

De acuerdo con (Mohapatra et al., 2016) en su trabajo titulado “Drift and diffusion bipolar transistors: a review” concluye que Es importante señalar que estas propiedades son muy simples e importantes al llevar a cabo investigación adicional en las áreas de transistores de unión bipolar como en los transistores bipolares de heterounión, por lo que son ideales para su inclusión en un libro de texto introductorio.

A continuación, se presenta una descripción a lo largo de los años del desarrollo de los transistores desde la invención 1947, hasta llegar a 2010 con los tipos neuromórfico.

Tabla 1

Avance de los transistores a lo largo de los años.

Año	Hito
1947	Invención del transistor
Década de 1950	Comercialización de los primeros transistores de unión bipolar.
Década de 1960	Desarrollo del MOSFET y su impacto en la miniaturización
Década de 1980	Introducción de IGBT y GTO para aplicaciones de alta potencia
Década de 2000	Investigación en JLT y TFET.
Década de 2010	Desarrollo de SiC MOSFET y transistores neuromórficos

Nota. Recopilación de información sobre el linetime de evolución del transistor. Autor (2024)

Las aplicaciones que presentan los transistores dependen de la incorporación de avances tecnológicos en su estructura, llevando a que estas características sean empleados en sistemas de mayor eficiencia y tecnología, como se observa en la tabla 2

Tabla 2

Últimos avances de los transistores y su aplicación.

Tipo de transistor	Características Principales	Avances	Razón para considerarlos modernos y donde se están utilizando
SIC MOSFET	El SiC MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) funciona controlando el flujo de corriente entre el drenaje y la fuente mediante un campo eléctrico aplicado a la puerta. Utiliza carburo de silicio como material base(Wang et al., 2022)	Mayor eficiencia energética, alta velocidad de conmutación y capacidad de operar a altas temperaturas. La alta movilidad de los portadores de carga en SiC reduce la resistencia y las pérdidas de energía, mejorando el rendimiento global del dispositivo.(Neyer et al., 2021)	Alta eficiencia energética, capacidad de manejar altas corrientes y voltajes, ampliamente utilizado en aplicaciones de movilidad eléctrica, sistemas de transmisión, aplicaciones aeroespaciales.(Wirths et al., 2022)
Transistor Neuromórfico de Puerta de Iones	Utiliza una capa de puerta de electrolito con cationes, como H ⁺ y Li ⁺ ; presenta mecanismos de acoplamiento electrostático y dopaje/des dopaje electroquímico (He et al., 2021)	Capacidad para imitar el funcionamiento de sinapsis y neuronas; uso de materiales con altas constantes dieléctricas (alta k)(Li et al., 2022)	Permite el desarrollo de computación neuromórfica, imitando el cerebro humano; eficiencia energética superior; potencial para inteligencia artificial avanzada(Lone et al., 2024)

Nota. Autor (2024)

La evolución del transistor continúa siendo un área de investigación activa y emocionante. La capacidad de estos dispositivos para adaptarse a nuevas necesidades y tecnologías sugiere que seguirán siendo fundamentales en el futuro de la electrónica. Las investigaciones futuras deberían enfocarse en mejorar aún más la eficiencia energética y la capacidad de miniaturización, así como en explorar nuevas aplicaciones en campos como la inteligencia artificial y la biotecnología.

En conclusión, el transistor ha demostrado ser una innovación trascendental, y su desarrollo continuo asegura que seguirá siendo un componente esencial en la tecnología moderna. La combinación de avances en diseños convencionales y nuevas tecnologías, como los dispositivos neuromórficos, destaca un futuro lleno de posibilidades y oportunidades para la mejora de la calidad de vida y el progreso tecnológico.

Discusión

Desde la invención del transistor en 1947 por John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, la investigación y desarrollo en esta tecnología ha pasado por múltiples etapas, cada una marcada por importantes avances que han transformado tanto su eficiencia como su aplicabilidad. En sus primeras décadas, los transistores de unión bipolar (BJT) dominaron el campo. Estos dispositivos, comercializados desde 1952, se convirtieron en los elementos básicos para aplicaciones en electrónica y comunicación.

Con el desarrollo del transistor de efecto de campo óxido metálico-semiconductor (MOSFET) en la década de 1960, se abrió una nueva era caracterizada por la miniaturización y la eficiencia energética. La capacidad de los MOSFET para operar a altas velocidades con baja potencia los hizo ideales para la revolución de los circuitos integrados.

En los años 80 y 90, la introducción de transistores como los IGBT (Transistores Bipolares de Puerta Aislada) y los GTO (Tiristores Desactivables por Puerta) permitió manejar altas potencias y mejorar la eficiencia en aplicaciones industriales y de potencia. Estos dispositivos combinaron las ventajas de los BJT y MOSFET, ofreciendo baja resistencia en conducción y capacidad de conmutación rápida.

En el siglo XXI, la investigación ha avanzado hacia la creación de dispositivos más específicos y eficientes como los transistores sin unión (Junctionless Transistors) y los transistores de efecto de campo de túnel (TFET). Los JLT eliminan las uniones PN tradicionales, lo que reduce el impacto de los efectos de canal corto y simplifica la fabricación. Los TFET, por su parte, utilizan el efecto túnel para lograr una conmutación muy eficiente, ideal para aplicaciones de baja potencia y alta eficiencia.

La evolución del transistor ha sido un proceso continuo de mejora en términos de eficiencia, costo y diversidad de aplicaciones. Inicialmente, los BJT proporcionaron una solución eficiente para la amplificación y conmutación, aunque con limitaciones en la velocidad y consumo de energía. Los MOSFET superaron estas barreras, proporcionando una mejor eficiencia energética y permitiendo la miniaturización que impulsó la electrónica de consumo y la informática.(Schuman et al., 2022).

El desarrollo de IGBT y GTO permitió aplicaciones en sistemas de alta potencia, como control de motores y sistemas de energía renovable, donde la capacidad de manejar grandes corrientes y voltajes es crucial. Estos transistores ofrecieron una mayor eficiencia y confiabilidad, aunque a un costo más alto debido a su complejidad y materiales.(Lone et al., 2022).

Los transistores más recientes, como los SiC MOSFET, han elevado aún más la eficiencia al utilizar materiales como el carburo de silicio, que soportan mayores temperaturas y proporcionan menores pérdidas de energía. Esto los hace ideales para aplicaciones en automoción eléctrica y sistemas de energía.(Karout et al., 2023).

La aparición de transistores neuromórficos y dispositivos como los TFET está revolucionando campos emergentes como la computación neuromórfica y la medicina. Estos transistores, diseñados para imitar las funciones neuronales, ofrecen una eficiencia energética incomparable y tienen el potencial de revolucionar la inteligencia artificial y las aplicaciones médicas avanzadas, incluyendo la reparación de sistemas nerviosos dañados.(Meng et al., 2023).

Conclusiones

Los transistores son dispositivos que partieron de un investigación que revolucionó al mundo hace más de 70 años dando un gran avance en aplicaciones industriales con su clasificación probada dentro de la ingeniería para mejorar nuestra tecnología pero su alcance no se detiene en aplicaciones que se nos puede venir a la mente como controlar motores controlar tarjetas circuito electrónicos ahora estamos hablando que el transistor de acuerdo a los últimos estudios serviría para simular las características dinámicas de los sistemas neuronales biológicos, esto nos entrega un abanico de posibilidades hablando solo de aplicaciones médicas citando a (He et al., 2021) es posible que podamos reparar el sistema nervioso dañado a nivel neuronal y sináptico utilizando dispositivo neuromórfico artificial.

Tomando en consideración el desarrollo a lo largo de los años de puede concluir que existieron hitos que dieron el cambio a la siguiente etapa en el desarrollo de esta tecnología en primer lugar la miniaturización donde la transición de los tubos de vacío a los transistores y luego a los circuitos integrados marcó un punto de inflexión en la reducción del tamaño y el aumento de la complejidad de los dispositivos electrónicos.

Después la eficiencia energética donde el desarrollo de MOSFET y dispositivos más recientes como los TFET ha permitido una mejora significativa en la eficiencia energética, lo que ha impulsado la miniaturización de dispositivos móviles y la creación de sistemas más sostenibles. A continuación, se considera las aplicaciones de alta potencia donde la introducción de IGBT y GTO amplió el rango de aplicaciones de los transistores a sistemas de alta potencia, como la electrónica de potencia y los sistemas de tracción eléctrica. Y finalmente la computación neuromórfica donde los transistores neuromórficos representan un nuevo paradigma en la computación, con el potencial de revolucionar la inteligencia artificial y la neurociencia.

Referencias

- Amin, S. I., & Sarin, R. K. (2022). JUNCTIONLESS TRANSISTOR: A REVIEW.
- Amos, S. W. (Stanley W., & James, M. (2000). Principles of transistor circuits : introduction to the design of amplifiers, receivers, and digital circuits. Newnes.
- Edición, C. (n.d.). ELECTRÓNICA DE POTENCIA.
- He, Y., Zhu, L., Zhu, Y., Chen, C., Jiang, S., Liu, R., Shi, Y., & Wan, Q. (2021). Recent Progress on Emerging Transistor-Based Neuromorphic Devices. *Advanced Intelligent Systems*, 3(7), 2000210. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000210>
- Ionescu, A. M., & Riel, H. (2011). Tunnel field-effect transistors as energy-efficient electronic switches. In *Nature* (Vol. 479, Issue 7373, pp. 329–337). <https://doi.org/10.1038/nature10679>
- Liou, J. J., & Schwierz, F. (2002). RF/microwave transistors: Evolution, current status, and future trend. *Proceedings of the IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting, 2002-January*, 5–10. <https://doi.org/10.1109/HKEDM.2002.1029145>
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2012.). *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*. www.FreeLibros.me
- Mohapatra, S., Jena, M. R., & Panda, A. K. (2016). Drift and diffusion bipolar transistors: A review. *Proceedings of the 3rd International Conference on Devices, Circuits and Systems, ICDCS 2016*, 14–17. <https://doi.org/10.1109/ICDCSyst.2016.7570614>
- Ross, I. M. (1998). The invention of the transistor. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 7–28. <https://doi.org/10.1109/5.658752>
- Karout, M. A., Taha, M., Fisher, C. A., Deb, A., Mawby, P., & Alatise, O. (2023). Impact of Diode Characteristics on 1.2 kV SiC MOSFET and Cascode JFET Efficiency: Body Diodes Vs SiC Schottky Barrier Diodes. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2023-March*, 202–208. <https://doi.org/10.1109/APEC43580.2023.10131399>
- Li, J., Zhao, C., & Man, K. (2022). Neuromorphic Hardware Based on Artificial Synaptic Devices. *Proceedings - International SoC Design Conference 2022, ISOC 2022*, 187–188. <https://doi.org/10.1109/ISOC56007.2022.10031458>
- Lone, A. H., Rahimi, D. N., Fariborzi, H., & Setti, G. (2024). Magnetic Soliton MTJ Devices for Neuromorphic Computing Applications. *IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference: Strengthening the Globalization in Semiconductors, EDTM 2024*. <https://doi.org/10.1109/EDTM58488.2024.10511578>
- Lone, A. H., Zou, X., Garcia, G. I. M. I., Li, X., & Fariborzi, H. (2022). Spin Orbit Torque Tunable Skyrmion Neuromorphic Devices. *2022 IEEE International Conference on Emerging Electronics, ICEE 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICEE56203.2022.10117876>
- Meng, J., Liu, Y., Fang, Y., Li, Z., Song, J., Wang, T., Zhu, H., Chen, P., Sun, Q., Zhang, D. W., & Chen, L. (2023). Fiber-Shaped Cu-Ion Diffusive Memristor for Neuromorphic Computing. *IEEE Electron Device Letters*, 44(7), 1220–1223. <https://doi.org/10.1109/LED.2023.3274828>
- Neyer, T., Domeij, M., Das, H., & Sunkari, S. (2021). Is there a perfect SiC MosFETs Device on an imperfect crystal? *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, 2021-March*. <https://doi.org/10.1109/IRPS46558.2021.9405098>
- Schuman, C. D., Plank, J. S., & Rose, G. S. (2022). Application-Hardware Co-Design: System-Level Optimization of Neuromorphic Computers with Neuromorphic Devices. *Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM, 2022-December*,

241–244. <https://doi.org/10.1109/IEDM45625.2022.10019362>

Wang, Y., Li, W., Ding, Y., Sun, H., & Yin, Y. (2022). Multi-Physics Coupling Analysis and Optimization Design of SiC MOSFET Power Module Package Insulation. 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022. <https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9947443>

Wirths, S., Alfieri, G., Romano, G., Ceccarelli, E., Arango, Y., Mihaila, A., & Knoll, L. (2022). Gate Stress Study on SiN-Based SiC Power MOSFETs. Proceedings of the International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2022-May, 245–248. <https://doi.org/10.1109/ISPSD49238.2022.9813671>