

Recepción: 15.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0008-7074-4837>

<https://orcid.org/0000-0001-6339-2679>

<https://orcid.org/0000-0001-6086-4650>

LA MAGIA EN LA FRONTERA: COMO LOS MATERIALES QUE NO ERAN NI AISLANTES NI CONDUCTORES, REVOLUCIONARON EL MUNDO

MAGIC AT THE BOUNDARY: HOW MATERIALS THAT
WERE NEITHER INSULATORS NOR CONDUCTORS
REVOLUTIONIZED THE WORLD

¹ Gonzalo Cavazos Juárez*

² María Josefina Robles Águila

³ Lidia Esmeralda García DÍaz

¹Doctorado en Ciencias Químicas, BUAP

²Centro de Investigación de Dispositivos Semiconductores, ICUAP

³Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP

Correos:

cj225570398@alm.buap.mx*

josefina.robles@correo.buap.mx

esmeralda.garcia@correo.buap.mx

Resumen

En cada teléfono inteligente, supercomputadora y panel solar se encuentra un material semiconductor. Estos materiales han permitido tomar un control sin precedentes sobre la electricidad. Este artículo aborda la historia de la revolución tecnológica a partir del primer transistor en 1947, la creación del circuito integrado en una pastilla de silicio y la profética Ley de Moore que impulsó a la industria durante medio siglo. La diversificación de la tecnología a partir de los materiales semiconductores ha permitido tener dispositivos de iluminación LED, paneles solares que cosechan energía y materiales fotocatalíticos que aportan una alternativa a la eliminación de contaminantes del medio ambiente. En cada teléfono inteligente, supercomputadora y panel solar se encuentra un material semiconductor. Estos materiales han permitido tomar un control sin precedentes sobre la electricidad. Este artículo aborda la historia de la revolución tecnológica a partir del primer transistor en 1947, la creación del circuito integrado en una pastilla de silicio y la profética Ley de Moore que impulsó a la industria durante medio siglo. La diversificación de la tecnología a partir de los materiales semiconductores ha permitido tener dispositivos de iluminación LED, paneles solares que cosechan energía y materiales fotocatalíticos que aportan una alternativa a la eliminación de contaminantes del medio ambiente.

Palabras clave: semiconductor; transistor; circuito integrado; Ley de Moore; fotovoltaica; LED.

Abstract

Every smartphone, supercomputer, and solar panel contains a semiconductor material. These materials have enabled unprecedented control of electricity. This article explores the history of the technological revolution, beginning with the first transistor in 1947, the creation of the integrated circuit on a silicon chip, and the prophetic Moore's Law, which propelled the industry for half a century. The diversification of technology stemming from semiconductor materials has led to LED lighting devices, solar panels that harvest energy, and photocatalytic materials that offer an alternative for removing environmental pollutants.

Keywords: semiconductor; transistor; integrated circuit; Moore's Law; photovoltaic; LED.

Introducción

Vivimos en un mundo construido sobre arena. El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y, en su forma pura, es el protagonista de la era de la información. El silicio es un semiconductor, un material de frontera cuyas propiedades eléctricas pueden manipularse de muchas formas.

Antes de los semiconductores, la electrónica dependía de los tubos de vacío. Estos componentes, similares a bombillas incandescentes, eran grandes, frágiles, caros y consumían enormes cantidades de energía. Las primeras computadoras o los sistemas electrónicos de los aviones bombarderos requerían miles de estos tubos, casi imposibles de construir y mantener.

La solución no vino de mejorar el tubo de vacío, sino de un campo completamente nuevo: la física del estado sólido. Investigadores de los Laboratorios Bell buscaban un interruptor sólido y se sumergieron en la teoría cuántica de cómo se mueven los electrones a través de los cristales, buscando un interruptor sólido, sin partes móviles ni filamentos incandescentes. En 1947

El primer hechizo: el genio de cristal (el transistor)

El 23 de diciembre de 1947 (aunque el artículo no se publicaría hasta junio de 1948), John Bardeen y Walter Brattain presentaron a sus colegas de Bell Labs su invención: el transistor de punto de contacto. Usando un cristal de germanio como semiconductor y dos filamentos de oro como contactos, demostraron que una pequeña señal eléctrica aplicada en uno de ellos podía controlar una señal mucho mayor en el otro. Habían creado el primer amplificador de estado sólido.

Este primer transistor era inestable y difícil de fabricar, pero demostró que el concepto era viable. Fue el físico William Shockley quien, en un arranque de genialidad competitiva, desarrolló la teoría fundamental que daría forma a la industria. Shockley teorizó el transistor de unión (Shockley,

se encontró el semiconductor. Se encontró que elementos como el silicio y el germanio, componentes básicos de la arena y el cristal, no eran conductores pero tampoco aislantes (Bardeen & Brattain, 1948) y durante mucho tiempo fueron vistos como curiosidades de laboratorio, malos conductores sin un propósito claro. El error fue pensar en ellos en términos de flujo.

Su verdadero poder no residía en su capacidad para conducir electricidad, sino en su asombrosa susceptibilidad a ser controlada. Se descubrió que su conductividad podía ser alterada, afinada y manipulada con una precisión sin precedentes, respondiendo a la luz, al calor o a pequeños campos eléctricos (Shockley, 1949). No eran un simple cable ni un muro; eran una compuerta.

Este descubrimiento desataría una revolución silenciosa. No fue una explosión, sino un encogimiento; un viaje hacia lo infinitesimal que redefiniría a la civilización humana. Fue como poner un genio en una botella de cristal, construir ciudades enteras en un grano de arena.

1949), un sándwich de materiales semiconductores tipo p y tipo n (con exceso de "huecos" o electrones, respectivamente). El diseño basado en las uniones p-n era robusto, fiable y mucho más fácil de producir en masa. (Figura 1)

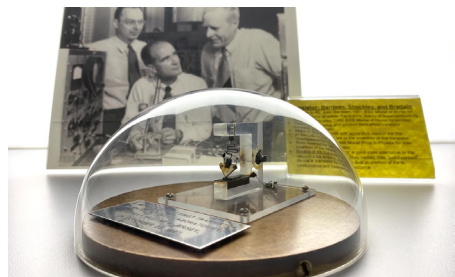


Figura 1. Réplica del transistor de punto de contacto original de los Laboratorios Bell.
<https://spectrum.ieee.org/point-contact-transistor>

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático fundamental que el Dr. Shockley publicó en su artículo para explicar la física de una unión p-n. El panel (a) muestra el dispositivo físico y su conexión. El material tipo-p (portador mayoritario de huecos), el material tipo-n (portador mayoritario de electrones) y la región de agotamiento que se forma en la interfaz. El dispositivo está conectado a una fuente de voltaje ($\delta\Phi$) que aplica una corriente total I de izquierda a derecha. Los contactos en los extremos (x_a y x_b) se asumen como no rectificantes; son solo conexiones eléctricas que no interfieren al paso de corriente. El panel (b) muestra las concentraciones de los átomos “donadores” y “aceptores” que definen las regiones p y n.

La línea punteada muestra los aceptores (N_a). Estos son los átomos que forman el material tipo p. Su concentración es alta a la izquierda y disminuye hacia la derecha. La línea sólida verde muestra los donadores (N_d). Estos son los átomos que forman el material tipo n. Su concentración es baja a la izquierda y alta a la

derecha. La línea roja representa la carga neta de impurezas. En la región p ($x < 0$) hay más aceptores (N_a) que donadores (N_d), por lo que la carga neta es negativa. En la región n ($x > 0$) hay más donadores (N_d) que aceptores (N_a); la carga neta es positiva. En el centro ($x=0$) las concentraciones son iguales y se forma la unión. El panel (c) es el más importante, pues muestra tres posibles comportamientos de la corriente de huecos (I_p) a medida que la corriente total (I) fluye a través del dispositivo. La corriente total I es la suma de la corriente de huecos (I_p) y la corriente de electrones (I_n). En la región p (en x_a) la corriente es transportada por huecos ($I_p=I$). En la región n (en x_b), la corriente es transportada por electrones (la corriente de huecos es cero, $I_p=0$). El dispositivo consiste en una corriente de huecos que se convierte en una corriente de electrones en la unión. En la curva “OHMIC”, los huecos se detienen bruscamente en la unión y no ingresan a la región n. Shockley explica que esto es característico de una unión no rectificante.

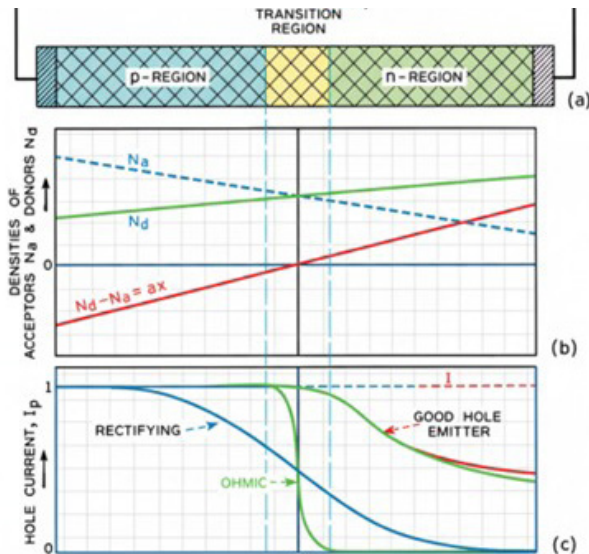


Figura 2. (a) Esquema de una unión p-n. (b) Distribución de impurezas. (c) Corriente de huecos.

Modificado del artículo de Bell System Technical Journal, 28(3), 435-489

En la curva "RECTIFYING" (rectificante), los huecos (I_p) penetran una distancia significativa en la región n antes de desaparecer (recombinarse). Shockley estableció que la penetración de huecos en la región n (y de electrones en la región p) es la característica fundamental de una unión rectificante. La curva GOOD HOLE EMITTER (buen emisor de huecos) es un caso especial de una unión rectificante. Muestra que la mayor parte de la corriente que cruza la unión es de huecos, lo cual es deseable

en un emisor de transistor, que inyecta huecos en el material tipo n (Shockley, 1949).

El impacto fue inmediato y profundo. El transistor era pequeño, consumía una fracción de la energía que un tubo de vacío y era increíblemente duradero. Por esta invención, Bardeen, Brattain y Shockley compartieron el Premio Nobel de Física en 1956, encendiendo la chispa que remodelaría el siglo XX.

La miniaturización: el circuito integrado

El transistor resolvió el problema del tubo de vacío, pero pronto creó otro. Los ingenieros ahora podían usar miles de transistores para construir computadoras, pero cada uno de estos diminutos componentes debía controlarse mediante cables. A esto se le llamó "tiranía de los números": demasiadas interconexiones que debían hacerse.

En el verano de 1958, Jack S. Kilby, un ingeniero de Texas Instruments, tuvo una idea revolucionaria. Si todos los componentes, como transistores, resistores y capacitores, pudieran fabricarse con el mismo material (un semiconductor), ¿por qué no fabricarlos todos juntos en una sola pieza? (Kilby, 1976).

Kilby construyó un prototipo tosco, un oscilador de desplazamiento de fase en una

lámina de germanio, con las interconexiones cableadas a mano y funcionó. La Figura 3 es una fotografía histórica de los componentes individuales (transistores, resistencias y capacitores) que conformaron el primer circuito integrado. A la derecha, se observa el circuito ensamblado, sostenido por una mano. Esta invención marcó el nacimiento de la microelectrónica y sentó las bases para la miniaturización masiva que daría inicio a la era digital y a la electrónica moderna. Poco después, Robert Noyce, de la empresa Fairchild Semiconductor, ideó la solución de interconexión crucial: depositar una capa de metal sobre el chip (protegido por una capa de óxido) y luego grabar el metal para crear los cables directamente sobre la superficie. Había nacido el circuito integrado (CI) monolítico. La revolución estaba lista para escalar.

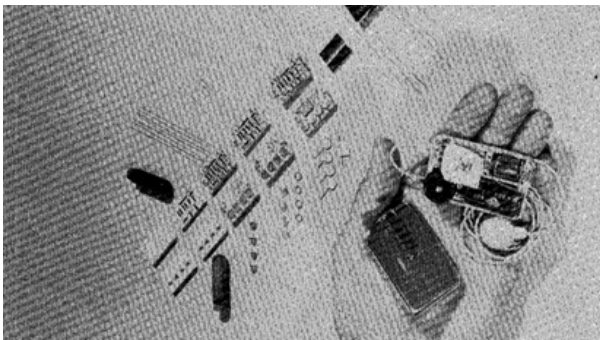


Figura 3. Componentes del primer circuito integrado (IC) de Jack Kilby.

IEEE Transactions on Electron Devices, 23(7), 648-654

La profecía de la Ley de Moore: la tecnología que se duplica cada dos años

Con el transistor y el circuito integrado ya establecidos, la industria comenzó una carrera frenética por la miniaturización. En 1965, Gordon E. Moore, uno de los fundadores de Fairchild y más tarde de Intel, escribió un artículo para la revista *Electronics* que se convertiría en la profecía autocumplida de la industria.

Observando la tendencia de los años anteriores, Moore postuló lo que ahora se conoce como la Ley de Moore: el número de componentes (transistores, resistores, etc.) que podían fabricarse en un circuito integrado se duplicaría cada dos años (Moore, 1965).

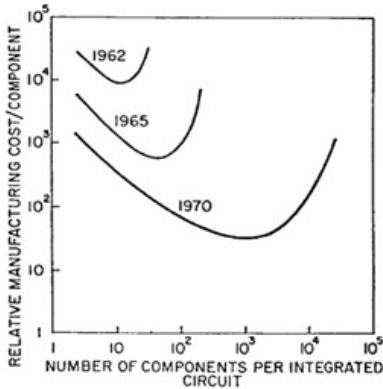


Figura 4. Gráfico logarítmico del número de transistores en microprocesadores a lo largo del tiempo.
Cramming More Components onto Integrated Circuits

Esta ley no era una ley de la física, sino una observación económica y tecnológica. Sin embargo, su poder residía en que la industria de los semiconductores la adoptó como un objetivo. Esta ley se convirtió en el motor implacable de la innovación, reduciendo los costos y aumentando la capacidad informática durante más de cincuenta años.

Por otra parte, se creó el MOSFET (Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor), un transistor más pequeño, que funcionaba controlando un canal de portadores de carga con un campo eléctrico, sin requerir un flujo de corriente de control constante.

Pero encoger un MOSFET no era tan simple como reducir una fotografía. A medida que las dimensiones se reducían, los ingenieros se enfrentaron a nuevos problemas físicos. En un artículo fundamental de 1974, R. H. Dennard y sus colegas de IBM establecieron las reglas de escalado. Para mantener el buen funcionamiento de los transistores más pequeños, había que reducir las dimensiones horizontales (como la longitud del canal) y las verticales (como el grosor del óxido de la compuerta), así como los voltajes de operación. Además, surgieron técnicas de dopaje de iones en materiales que permitieron a la industria seguir el ritmo de la Ley de Moore durante décadas (Dennard et al., 1974).

Capturando la luz del sol: del transistor al panel solar

Mientras la industria informática se obsesionaba con hacer los chips más rápidos y densos, los principios fundamentales de los semiconductores estaban abriendo otras oportunidades. La unión p-n que formaba el corazón del transistor de Shockley tenía otra propiedad asombrosa: podía convertir la luz solar directamente en electricidad. Era el efecto fotovoltaico.

En 1961, se publicó el postulado conocido como el principio de Shockley-Queisser (S-Q), que cal-

culó la eficiencia teórica máxima de una celda solar de unión p-n única.

Teniendo en cuenta la energía perdida por los fotones que no tienen suficiente energía para crear un par electrón-hueco, y la energía perdida por los fotones que tienen demasiada energía (que se disipa como calor), establecieron un límite máximo de eficiencia de aproximadamente el 44% para el silicio con una banda prohibida (band gap) óptima de 1.1 eV. En la Figura

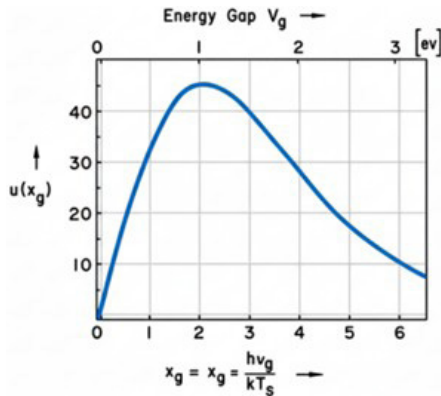


Figura 5. Diagrama fotovoltaico: dependencia de la eficiencia máxima teórica $u(x_g)$ sobre la brecha energética V_g del semiconductor Modificado del artículo de Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519

5 se muestra que si la energía del gap es muy baja (izquierda), la celda absorbe muchos fotones, pero la mayor parte de la energía se desperdicia como calor, porque el voltaje V_g que generan es muy bajo y su eficiencia es baja. Si la energía del gap es muy alta (derecha), cada fotón absorbido genera voltaje (V_g), pero muy pocos fotones del sol tienen la energía sufi-

ciente para ser absorbidos. La mayoría de la luz solar atraviesa el material sin hacer nada y la eficiencia también es baja. Este artículo se convirtió en la "Ley de Moore" de la industria solar: el objetivo teórico que todos los ingenieros fotovoltaicos han estado persiguiendo desde entonces (Shockley & Queisser, 1961).

El Nobel de Nakamura y la luz que lo cambió todo

Los semiconductores que generan electricidad a partir de la luz también pueden hacer lo contrario. Los diodos emisores de luz (LED) son uniones p-n que, al polarizarse, hacen que los electrones y los huecos se recombinen y liberan energía en forma de fotones.

Durante décadas, los LED rojos y verdes fueron comunes, pero el reto de la iluminación era el LED azul, pues sin él, era imposible crear luz blanca. El desafío residía en encontrar un material semiconductor con una banda prohibida lo suficientemente ancha como para emitir luz azul de alta energía (Nakamura et al., 1993).

La respuesta llegó con los nitruros de galio (GaN). A principios de la década de 1990, Shuji Nakamura, trabajando en la pequeña empresa japonesa Nichia Chemical, logró avances revo-

lucionarios en el crecimiento de cristales de InGaN/GaN de alta calidad. Su trabajo dio lugar a los primeros LED azules de alta potencia y de doble heteroestructura, como se describe en su artículo de 1993. Este logro, que le valió el Premio Nobel de Física en 2014, no solo dio lugar a la revolución de la iluminación LED de bajo consumo, sino que también sirvió de base para el láser azul que hizo posible el almacenamiento de datos de alta densidad (Blu-ray).

El GaN y otros semiconductores de banda prohibida ancha como el SiC (carburo de silicio) también estaban revolucionando la electrónica de potencia, permitiendo que los dispositivos pudieran trabajar con voltajes y temperaturas mucho más altas que el silicio, necesarios para vehículos eléctricos y redes de energía eficientes

El final de la Ley de Moore y la apertura un nuevo horizonte

A principios de la década de 2020 ya existían transistores de 2-3 nanómetros (apenas 10 átomos de ancho); sin embargo, eran poco fiables. El calor generado por tantos componentes empaquetados también se convirtió en un problema.

La industria se ha visto obligada a cambiar de estrategia. El objetivo ya no es simplemente encoger, sino diversificar. En lugar de hacer chips más rápidos y esperar a que lleguen las aplicaciones, la industria ahora identifica las aplicaciones primero (teléfonos móviles,

supercomputadoras, la “nube”) y luego diseña los chips necesarios para ellas (Waldrop, 2016). Esta nueva filosofía significó integrar funciones más allá del cómputo puro: sensores, gestión de energía y nuevos tipos de memoria, todo ello en un solo paquete enfocado en el sistema completo.

Ahora, el escalado de transistores de silicio, predicho por la Ley de Moore, está alcanzando sus límites físicos y económicos (Jaeger & Blalock), la frontera de la innovación se expande hacia la especialización.

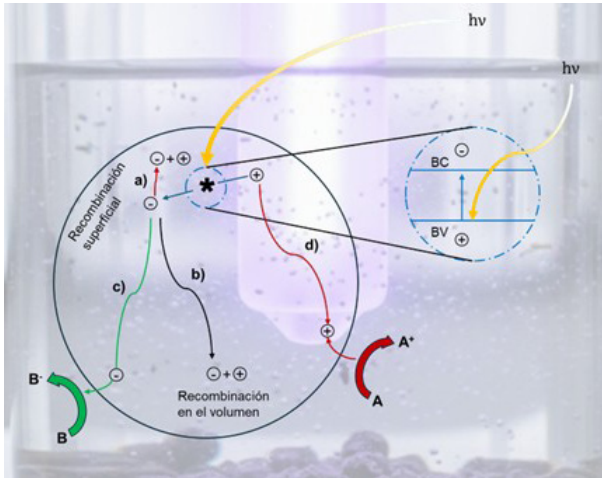


Figura 6. Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor-electrolito bajo iluminación.

Modificado del libro de Grela, María Alejandra et al. (2001), CYTED VIII. Eliminación de contaminantes mediante fotocatalisis heterogénea.

Mientras el silicio domina el procesamiento de la información, los semiconductores de banda ancha, como el nitruro de galio (GaN), son la opción para la gestión de la energía (Nakamura et al., 1993). El GaN puede soportar voltajes y temperaturas mucho más altos que el silicio, lo que permite la generación de cargadores rápidos más pequeños, inversores de alta eficiencia para vehículos y redes eléctricas inteligentes más robustas (Baliga, 2013).

Por otra parte, la energía fotovoltaica sigue perfeccionándose. El desafío de convertir eficientemente la luz solar en electricidad, cuya eficiencia máxima teórica fue calculada en 1961, sigue siendo un objetivo central (Shockley & Queisser, 1961). Hoy, las celdas solares de silicio han alcanzado eficiencias que se aproximan a ese límite fundamental, en estudios de laboratorio. Paralelamente, nuevos materiales como las perovskitas demuestran buena eficiencia en el almacenamiento de energía solar (Green et al., 2021).

Finalmente, la cadena de suministro de semiconductores, antes concentrada en Asia y Norteamérica, busca diversificarse. En 2025 se presentó el proyecto “Kutsari, casa de diseño de semiconductores” en Phoenix, Arizona, enfocado en impulsar a Puebla, México, como centro de diseño e innovación en semiconductores. Con el apoyo de la SECIHTI, busca integrar al estado en la cadena global de valor y atraer alianzas con empresas como TSMC, SMIC y NVIDIA (Vázquez, 2025).

Aplicación medioambiental de los semiconductores

Desde los años setenta se consolidó el estudio de la fotocatalisis para la oxidación fotoinducida de contaminantes medioambientales.

Se ha demostrado que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencionales no están diseñadas para eliminar moléculas complejas, lo que genera su acumulación en el medio ambiente.

La Figura 6 esquematiza los procesos químicos que ocurren en una partícula de semiconductor cuando es excitada con luz suficientemente energética. En estas condiciones se generan pares electrón-hueco que pueden formar especies reactivas de oxígeno y reaccionar con especies adsorbidas (Mills & Le Hunte, 1997). Los

pares electrón-hueco que no alcanzan a separarse ni a reaccionar con especies en la superficie se recombinan y la energía se disipa. El proceso neto es la catálisis de la reacción entre el oxidante y el reductor (por ejemplo, OH⁻ y materia orgánica) (Mills & Le Hunte, 1997).

Ciertos semiconductores, como el trióxido de tungsteno (WO₃) o el dióxido de titanio (TiO₂) pueden generar especies químicas altamente reactivas (como los radicales hidroxilos y superóxidos) a partir de la irradiación con luz a determinada longitud de onda. Estas especies pueden atacar y degradar contaminantes orgánicos complejos, convirtiéndolos en especies más biodegradables o llegar a la mineralización.

Conclusiones

La historia de los semiconductores es la historia del dominio humano sobre la frontera de la conductividad eléctrica, desde el tubo de vacío a la era de la información, con la Ley de Moore como su profecía autocumplida. Pero la era de los semiconductores no ha terminado; se está transformando. La innovación ahora reside en la diversificación de potentes circuitos y en la generación de celdas solares ultraeficientes. Sin embargo, el gran reto ya no es la velocidad de cómputo, sino la sostenibilidad.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (*ChatGPT*, *COPILOT*, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

GCJ agradece a la SECIHTI por la beca doctoral 4051803.

Referencias

- Baliga, B. J. (2013). Gallium nitride devices for power electronic applications. In *Semiconductor Science and Technology* (Vol. 28, Issue 7). <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/7/074011>
- Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). The Transistor, A Semi-Conductor Triode. *Physical Review*, 74(2), 230. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.74.230>
- Dennard, R. H., Gaensslen, F. H., Yu, H. N., Rideout, V. L., Bassous, E., & Leblanc, A. R. (1974). Design of Ion-Implanted MOSFET's With Very Small Physical Dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 9(5), 256–268. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (Version 58). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(7), 657–667. <https://doi.org/10.1002/ppa.3444>
- IRDSTM Community. (n.d.). IEEE IRDSTM - IEEE IRDSTM. Retrieved November 13, 2025, from <https://irds.ieee.org/component/content/article/8-home/4-what-is-the-irds>
- Jaeger, R. C., & Blalock, T. N. (n.d.). *Microelectronic circuit design, FIFTH EDITION*.
- Kilby, J. S. (1976). Invention of the Integrated Circuit. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23(7), 648–654. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1976.18467>
- Mills, A., & Le Hunte, S. (1997). An overview of semiconductor photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 108(1), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(97\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(97)00118-4)
- Moore, G. E. (1965). Cramping More Components onto Integrated Circuits.
- Nakamura, S., Senoh, M., & Mukai, T. (1993). High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 62(19), 2390–2392. <https://doi.org/10.1063/1.109374>
- Shockley, W. (1949). The Theory of p n Junctions in Semiconductors and p n Junction Transistors. *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435–489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.d>
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- Vázquez, K. (2025, October 17). Puebla presenta Kutsari y fortalece su papel en la industria de semiconductores. *Industria 4.0*. <https://mexicoindustry.com/noticia/puebla-presenta-kutsari-y-fortalece-su-papel-en-la-industria-de-semiconductores>
- Waldrop, M. M. (2016). More than Moore. *Nature*, 530(7589), 144–148. <https://go.gale.com/ps/i.o?p=HRCA&s=w&ssn=00280836&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA443132364&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext&?p=HRCA&sw=w&issn=00280836&v=2.1&it=r&id=GAL-443132364&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>