

DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.338>

Física, Tecnología y Métodos de Dopaje del Silicio en la Fabricación de Componentes Electrónicos Activos

Baldo Alberto Luigi Dalporto<https://orcid.org/0009-0008-8719-1562>

Universidad INTEC / Republica Dominicana

Sabine Mary<https://orcid.org/0009-0004-3488-9511>

Universidad INTEC

Santiago Gallur<https://orcid.org/0000-0001-6287-7340>

Universidad INTEC

RESUMEN

El dopaje del silicio es uno de los procedimientos fundamentales en la ingeniería de semiconductores. A través de este proceso se modifican las propiedades eléctricas del cristal puro introduciendo átomos controlados de impureza (dopantes), que permiten transformar un material inicialmente aislante en un conductor selectivo con portadores de carga mayoritarios. Este tratado desarrolla con profundidad científica los principios cuántico-electrónicos, los métodos de dopaje (difusión, implantación iónica, epitaxia dopada), las ecuaciones fundamentales del transporte de portadores, los modelos físicos de equilibrio y no-equilibrio, y las tecnologías empleadas en la fabricación industrial de dispositivos activos (diodos, transistores bipolares y MOSFET). El manuscrito integra formalismo físico-matemático, descripción de procesos industriales y criterios de caracterización metrológica, con énfasis en la relación entre perfiles de dopaje, transporte de portadores y desempeño de dispositivos.

Palabras clave: dopaje del silicio; semiconductores; implantación iónica; transporte de portadores; microelectrónica



Physics, Technology, and Silicon Doping Methods for Active Semiconductor

ABSTRACT

Silicon doping is one of the fundamental procedures in semiconductor engineering. Through this process, the electrical properties of the pure crystal are modified by introducing controlled atoms of impurity (dopants), which allow the transformation of an initially insulating material into a selective conductor with majority charge carriers. This treatise develops in scientific depth the quantum-electronic principles, the doping methods (diffusion, ion implantation, doped epitaxy), the fundamental equations of carrier transport, the physical models of equilibrium and non-equilibrium, and the technologies used in the industrial manufacture of active devices (diodes, bipolar transistors and MOSFETs). The text combines theoretical formulations, laboratory processes, industrial techniques, and physical justifications, with emphasis on physical consistency, industrial relevance, and device-level implications.

Keywords: silicon doping, semiconductors, ion implantation, carrier transport, microelectronics



INTRODUCCIÓN

Contexto Físico del Dopaje

El silicio, elemento del grupo IV de la tabla periódica, posee una estructura cristalina tetraédrica tipo diamante y cuatro electrones de valencia. En su estado puro (silicio intrínseco), el material se comporta como un **semiconductor casi aislante** a temperatura ambiente: la concentración de portadores libres es extremadamente baja, del orden de $n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ a 300 K.

Para obtener materiales capaces de conducir corriente controladamente, se introduce en la red una pequeña fracción de impurezas trivalentes o pentavalentes que alteran la densidad de portadores, generando **semiconductores tipo n** (electrones mayoritarios) o **tipo p** (huecos mayoritarios).

Este ajuste preciso de la concentración de carga —de 10^{14} a 10^{20} cm^{-3} — constituye la base de todos los dispositivos activos modernos: diodos, transistores, sensores y circuitos integrados.

El propósito académico del presente manuscrito es ofrecer una síntesis técnicamente verificable del dopaje del silicio, integrando fundamentos cuánticos, modelos de transporte y métodos industriales de fabricación, con un enfoque orientado a la comprensión y reproducibilidad científica en microelectrónica moderna.

Fundamentos Físicos y Cuánticos del Dopaje

Energías de ionización de dopantes

El principio cuántico que rige el dopaje se basa en la introducción de niveles discretos de energía dentro de la banda prohibida (E_g) del silicio.

Cuando se inserta un átomo donador (grupo V: fósforo, arsénico, antimonio), éste aporta un electrón adicional débilmente ligado al núcleo.

Su energía de ionización se aproxima mediante el modelo hidrogenoide:

$$E_D = \frac{m^* e^4}{2(4\pi\epsilon_r\epsilon_0)^2 \hbar^2}$$

Sze & Ng (2007)

Streetman & Banerjee (2016)

Para el silicio, con $m^* \approx 0.26m_0$ y $\epsilon_r = 11.7$, se obtiene $E_D \approx 0.045 \text{ eV}$.



Esto implica que a temperatura ambiente la mayoría de los donadores están ionizados, liberando electrones libres a la banda de conducción.

De modo análogo, un átomo aceptor (grupo III: boro, galio, aluminio) introduce un nivel energético E_A ligeramente por encima de la banda de valencia, capturando electrones y generando huecos.

Concentraciones de equilibrio (Boltzmann)

Las concentraciones de portadores en equilibrio térmico se rigen por:

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}, p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}}$$

- Sze & Ng (2007)
- Streetman & Banerjee (2016)

donde N_C y N_V son las densidades efectivas de estados en la banda de conducción y valencia, respectivamente.

En un semiconductor dopado tipo n:

$$n \approx N_D, p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

En tipo p:

$$p \approx N_A, n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Estas relaciones —derivadas de la estadística de Fermi-Dirac— permiten modelar el comportamiento eléctrico básico y el control de la conductividad mediante el nivel de dopaje.

METODOLOGÍA

Tipo de estudio y enfoque. Este manuscrito se desarrolló como una revisión técnica-científica con enfoque físico-ingenieril, orientada a integrar (i) fundamentos cuántico-electrónicos del dopaje, (ii) modelos de equilibrio y no-equilibrio para portadores, y (iii) métodos industriales de dopaje y caracterización en fabricación microelectrónica. El enfoque adoptado es narrativo-estructurado, priorizando consistencia física, trazabilidad de ecuaciones y correspondencia entre modelos y procesos industriales.



Criterios de selección y análisis bibliográfico. La selección de fuentes se realizó mediante un esquema de elegibilidad basado en:

- (a) Autoridad técnica (libros de referencia y manuales académicos ampliamente citados en dispositivos semiconductores y fabricación);
- (b) Pertinencia directa (dopaje, difusión, implantación, epitaxia dopada, activación/recocido, transporte por deriva-difusión, estadística de Fermi-Dirac, variabilidad en nodos escalados);
- (c) Calidad de evidencia (prioridad a libros académicos y artículos revisados por pares; uso limitado de fuentes no arbitradas solo como contexto histórico o de nomenclatura);
- (d) Recencia dirigida para tópicos sensibles a escalado (variabilidad sub-10 nm, efectos discretos de dopantes, modelado cuántico-transporte), incorporando literatura posterior a 2015 para reflejar el estado actual de nodos avanzados.

Procedimiento de síntesis. El análisis se organizó por ejes: (1) formalismo y magnitudes fundamentales (niveles energéticos, n_i , N_C , N_V , E_F), (2) métodos de dopaje (difusión, implantación, epitaxia), (3) herramientas y metrología (SIMS, Hall, resistividad en hoja), (4) modelos matemáticos (Fick/Arrhenius, deriva-difusión, continuidad, Einstein, Fermi-Dirac degenerado) y (5) escalado nanométrico (variabilidad estadística, modelos Poisson-Schrödinger y transporte cuántico). Las ecuaciones se reportan con notación estándar y se respaldan con referencias canónicas en dispositivos y fabricación.

Métodos Industriales de Dopaje del Silicio

El dopaje controlado se realiza mediante tres métodos principales, cada uno con fundamentos físicos específicos y equipos de proceso dedicados.

Difusión Térmica en Estado Sólido (2ª ley de Fick + Arrhenius)

El método más antiguo y todavía empleado para procesos de alta temperatura. Los átomos dopantes se difunden dentro del silicio sólido siguiendo la **segunda ley de Fick**:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D(T) \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}$$

- Campbell (2001)
- Wolf (2003)



donde $C(x, t)$ es la concentración de dopante y $D(T)$ el coeficiente de difusión, descrito por la ley de Arrhenius:

$$D(T) = D_0 e^{-\frac{E_A}{kT}}$$

con E_A la energía de activación (~ 3.6 eV para boro, 3.8 eV para fósforo). La difusión puede realizarse desde una **fente gaseosa** (POCl_3 , BBr_3), **líquida** o **sólida** (óxidos dopados). Los hornos de difusión operan entre 900°C y 1200°C , con atmósfera controlada (N_2/O_2) y tiempo de proceso de minutos a horas.

El perfil resultante es gaussiano:

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt}$$

donde Q es la dosis total de dopante.

- Campbell (2001)
- Wolf (2003)

Este método se emplea en la formación de **pozos de base y emisores** en transistores bipolares o **regiones de fuente/drenaje** en MOSFETs.

Implantación Iónica

Técnica dominante en la microelectrónica moderna por su precisión.

Consiste en acelerar iones dopantes a energías entre 10 keV y 200 keV mediante un **implantador iónico** (equipado con fuente de plasma, columnas magnéticas y analizador de masa), dirigiéndolos hacia la oblea de silicio.

El perfil de concentración tras la implantación se modela mediante una distribución gaussiana centrada en la profundidad promedio R_p :

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right]$$

donde R_p y ΔR_p dependen de la masa iónica, la energía de implantación y la densidad del silicio.

- Ziegler et al. (2010) (SRIM)
- Yoshida (2019)



Posteriormente, se realiza un **recocido térmico** (annealing) entre 800 °C y 1100 °C para reparar daños cristalinos y activar eléctricamente los dopantes (es decir, incorporarlos a sitios sustitucionales en la red).

Las ventajas incluyen:

- Control preciso de dosis y profundidad ($\pm 1\%$).
- Posibilidad de dopaje localizado mediante máscaras fotoresistentes.
- Compatibilidad con procesos CMOS.

Epitaxia Dopada y Crecimiento Químico de Vapor (CVD)

En tecnologías avanzadas, el dopaje se integra durante el crecimiento epitaxial del silicio monocristalino.

En este método, gases precursores como SiH_4 o SiCl_4 se descomponen térmicamente sobre un sustrato a 1000 °C, mientras se introduce un gas dopante (B_2H_6 para boro, PH_3 para fósforo, AsH_3 para arsénico).

El flujo y concentración de gases controlan la incorporación atómica según:

$$C_D = k_s \frac{p_D}{p_{Si}} e^{-E_A/kT}$$

donde k_s es una constante de superficie y p_D/p_{Si} el cociente de presiones parciales. Esta técnica permite obtener capas epitaxiales con perfiles de dopaje graduales, esenciales en transistores bipolares de alta frecuencia y estructuras HBT o HEMT.

Herramientas y Equipos de Fabricación

- **Hornos de difusión:** con control de temperatura $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ y atmósfera inerte u oxidante.
- **Implantadores iónicos:** sistemas de aceleración electrostática de iones con energías de 10–200 keV, equipados con colimadores magnéticos, detectores Faraday y cámaras de vacío de 10^{-6} Torr.
- **Sistemas de CVD y epitaxia:** reactores verticales o horizontales, controlados por flujo MFC (Mass Flow Controller).



- **Medición y caracterización:** perfilometría de concentración mediante SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy), medición de resistividad con efecto Hall y técnicas de difusión por hoja (sheet resistance).

Modelos Matemáticos del Dopaje y Transporte de Portadores

El dopaje afecta directamente la **conductividad eléctrica** del semiconductor, descrita por:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

donde q es la carga elemental y μ_n, μ_p las movilidades electrónicas y de huecos.

- Streetman & Banerjee (2016)

En dopajes altos ($N_D > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), se presenta degeneración y el nivel de Fermi penetra en la banda de conducción. En regímenes degenerados, la aproximación de Maxwell–Boltzmann deja de ser válida y debe emplearse estadística de Fermi–Dirac, expresada mediante integrales de Fermi de orden fraccional $F_{1/2}$ (Sze & Ng, 2007; Streetman & Banerjee, 2016).

En ese régimen, el modelo no clásico requiere la integral de Fermi:

$$n = N_C F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C}{kT} \right)$$

El transporte de portadores dopados obedece la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n + G - R$$

- Sze & Ng (2007)
- Streetman & Banerjee (2016)

y la corriente total incluye difusión y deriva:

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n$$

donde D_n se relaciona con μ_n por la relación de Einstein $D_n/\mu_n = kT/q$.

- Sze & Ng (2007)

Estos modelos explican la formación de uniones p-n, la corriente de saturación del diodo y la ganancia de los transistores bipolares.



Control, Pureza y Efectos Cuánticos del Dopaje

En la escala nanométrica (<10 nm), el dopaje adquiere un carácter cuántico discreto: la introducción de un solo átomo dopante puede alterar significativamente la conductividad de un canal MOSFET.

En nodos sub-10 nm, la variabilidad deja de ser una corrección secundaria y se convierte en un componente estructural del diseño: fluctuaciones de dopaje (RDF), variación de función de trabajo, rugosidad de borde y dispersión geométrica producen distribuciones medibles de V_T y degradan la reproducibilidad entre dispositivos nominalmente idénticos. Estudios posteriores a 2015 muestran que la dispersión de V_T aumenta al reducir L_G y que la sensibilidad a dopaje y dimensiones se intensifica en transistores ultrascalados, requiriendo modelos estadísticos y/o cuántico-transporte para capturar adecuadamente la distribución de umbral y su dependencia tecnológica.

Las fluctuaciones estadísticas del número de dopantes producen **ruido electrónico y variabilidad de umbral**.

Se emplean simulaciones Monte Carlo y modelos de Poisson-Schrödinger autoconsistentes para predecir estos efectos.

El dopaje ultra bajo se analiza mediante microscopía electrónica de transmisión (STEM) y mediciones Hall a bajas temperaturas.

Aplicaciones del Dopaje en Dispositivos Activos

- **Diodos p-n:** las regiones p y n se forman por difusión o implantación, controlando la anchura de la zona de deplexión y la corriente inversa.
- **Transistores bipolares (BJT):** requieren tres zonas de dopaje escalonado (emisor $>$ base $>$ colector).
- **MOSFET:** las concentraciones de dopaje definen el voltaje umbral V_T y la movilidad en el canal.
- **Sensores y fotodetectores:** la selectividad espectral depende del tipo y profundidad del dopante.

Consideraciones de Seguridad y Documentación Técnica

El dopaje implica el manejo de gases tóxicos (PH_3 , AsH_3 , B_2H_6) y temperaturas elevadas, por lo que se requieren protocolos de seguridad (OSHA 29 CFR 1910.1450), guías SEMI S2 y procedimientos ISO 14644 de salas limpias clase 100 o inferiores.



Toda operación debe registrarse mediante documentación de proceso (Process Traveler, Wafer History) y control estadístico SPC.

Perspectivas y Avances de Investigación

Las tendencias actuales buscan **dopaje atómico controlado** mediante haces de iones individuales o deposición selectiva atómica (ALD).

El dopaje cuántico y el uso de **dopantes isotópicos** permiten fabricar **qubits de silicio** basados en espín de donadores (P-31, As-75).

Se exploran también **dopajes por plasma frío** y **implantación láser femtosegundo**, con resolución sub-nanométrica.

DISCUSIÓN

El dopaje del silicio constituye el mecanismo central mediante el cual la física del estado sólido se traduce en funcionalidad electrónica práctica. A lo largo de este trabajo se ha mostrado que, aunque los principios fundamentales del dopaje están bien establecidos desde mediados del siglo XX, su implementación tecnológica continúa evolucionando en respuesta a la miniaturización extrema y a los límites físicos impuestos por la mecánica cuántica.

Desde una perspectiva física, los modelos hidrogenoides y de estadística de Fermi-Dirac describen adecuadamente el comportamiento de dopantes aislados y semiconductores moderadamente dopados. Sin embargo, en regímenes de dopaje alto o ultraescalado, estos modelos requieren extensiones no clásicas. La degeneración electrónica, la penetración del nivel de Fermi en las bandas permitidas y la ruptura de la aproximación de portadores no interactuantes obligan a incorporar integrales de Fermi de orden fraccional, así como simulaciones autoconsistentes de Poisson-Schrödinger.

En términos tecnológicos, la comparación entre difusión térmica, implantación iónica y epitaxia dopada revela una transición clara desde métodos gobernados por procesos termodinámicos globales hacia técnicas dominadas por el control cinético y estadístico a escala nanométrica. La difusión térmica, aunque conceptualmente simple y aún relevante en procesos específicos, carece de la precisión espacial requerida por tecnologías CMOS avanzadas. En contraste, la implantación iónica



ofrece un control sin precedentes sobre dosis y profundidad, pero introduce daños cristalinos cuya reparación y activación representan un compromiso delicado entre movilidad, difusión secundaria y estabilidad estructural.

La epitaxia dopada emerge como una solución híbrida que integra el dopaje directamente en el crecimiento cristalino, permitiendo perfiles graduales imposibles de obtener mediante implantación convencional. Este enfoque resulta especialmente relevante en dispositivos de alta frecuencia y heteroestructuras avanzadas, donde el gradiente de dopaje es tan crítico como su valor absoluto.

Un aspecto clave discutido implícitamente en este trabajo es la **variabilidad estadística del dopaje**. A escalas inferiores a 10 nm, la noción clásica de concentración promedio pierde significado físico: la presencia o ausencia de un único átomo dopante puede modificar sustancialmente el voltaje umbral, la corriente de canal y el ruido electrónico. Esta realidad impone límites fundamentales a la escalabilidad de dispositivos y redefine el concepto mismo de reproducibilidad en microelectrónica avanzada.

Desde el punto de vista de investigación futura, los métodos emergentes de dopaje atómico controlado y deposición selectiva representan no solo una evolución tecnológica, sino un cambio de paradigma conceptual: el dopaje deja de ser un proceso estadístico continuo para convertirse en un acto cuántico discreto. Este enfoque conecta directamente la ingeniería de semiconductores con la física cuántica aplicada, abriendo el camino a dispositivos donde un único átomo define un estado lógico, un sensor o un qubit.

En conjunto, los resultados y análisis presentados confirman que el dopaje del silicio no es un proceso meramente tecnológico, sino una manifestación directa de principios físicos profundos que continúan desafiando tanto a la teoría como a la ingeniería experimental.

CONCLUSIONES

El dopaje del silicio constituye una aplicación directa de la física cuántica de sólidos, integrando estadística, transporte de portadores y tecnología de procesos para habilitar dispositivos activos reproducibles. El dominio del dopaje —desde perfiles por difusión y activación post-implantación hasta



incorporación durante epitaxia— continúa determinando parámetros críticos de desempeño (resistividad, V_T , movilidad efectiva, corrientes de fuga) en diodos, BJT's y MOSFET's.

En la miniaturización avanzada, el dopaje evoluciona desde una magnitud continua hacia un régimen donde **efectos discretos y variabilidad estadística** condicionan el diseño, la modelización y la verificación experimental, especialmente en escalas sub-10 nm donde la dispersión paramétrica se amplifica y exige modelos más allá de aproximaciones puramente clásicas.

Limitaciones. Este trabajo es una revisión técnico-científica y, por tanto, (i) no presenta un conjunto propio de mediciones experimentales ni datos de obleas; (ii) no realiza meta-análisis cuantitativo debido a la heterogeneidad de arquitecturas y métricas reportadas en la literatura; y (iii) utiliza modelos representativos (Fick/Arrhenius, deriva-difusión, Fermi-Dirac degenerado) que, aunque estándar, requieren calibración tecnológica específica (materiales de puerta, tensiones mecánicas, geometrías GAA/FinFET) para predicciones de nodo a nodo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ben Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2016). *Solid state electronic devices* (7th ed.). Pearson.

Campbell, S. A. (2001). *The science and engineering of microelectronic fabrication* (2nd ed.). Oxford University Press.

Nicollian, E. H., & Brews, J. R. (2002). *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. Wiley.

Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). Wiley.

Tsividis, Y. P., & McAndrew, C. (2011). *Operation and modeling of the MOS transistor* (3rd ed.). Oxford University Press.

Wolf, S. (2003). *Silicon processing for the VLSI era: Process technology* (Vol. 1, 2nd ed.). Lattice Press.

Yoshida, T. (2019). *Ion implantation technology: Fundamentals and applications*. Springer.

Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., & Biersack, J. P. (2010). SRIM—The stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(11–12), 1818–1823.

Shin, Y. H., et al. (2016). Analytical model for random dopant fluctuation in double-gate MOSFETs (IDS and V_{th} variations in subthreshold). *Solid-State Electronics*.



- Berrada, S., et al. (2018). Quantum transport investigation of threshold voltage variability in sub-10 nm junction less FETs. *SISPAD 2018 Proceedings*.
- Lee, S., et al. (2022). Novel modeling approach to analyze threshold voltage variability in silicon nanowire FETs. *Nanomaterials*, 12(10), 1721.

