

VALIDACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE UN SEMICONDUCTOR DOPADO EN EL RANGO TERAHERTZ USANDO UN MODELO DRUDE–LORENTZ Y SIMULACIONES FDTD

Diego S. Moscoso Villano, Rodrigo Mamani Dongo, Isaias Mateo Flores Gómez,
Rodrigo Alessandro Canales Yanque, Bernardo Luis Espinoza Huamán, Benjamín Eleazar Rodríguez Lupa

Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Facultad de Ingeniería y Gestión,
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Lima, Perú

2321010719@untels.edu.pe
2311100135@untels.edu.pe
2311010047@untels.edu.pe
2321010012@untels.edu.pe
2311110106@untels.edu.pe
2221010499@untels.edu.pe

Este trabajo presenta la validación, análisis y caracterización de un semiconductor fuertemente dopado mediante un modelo electromagnético basado en Drude–Lorentz implementado en un entorno de simulación FDTD (MEEP). Se comparan los resultados numéricos con predicciones teóricas y con datos experimentales disponibles para espectroscopía en el rango Terahertz (THz). El modelo reproduce con alta fidelidad la permitividad compleja del material, presentando un error menor al 0.001 %, y permite determinar la frecuencia de corte plasmónica con una desviación inferior al 0.5 %. Asimismo, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros físicos clave (frecuencia de plasma, amortiguamiento y permitividad de fondo), verificando la coherencia del modelo con fenómenos bien establecidos como el corrimiento espectral del borde de plasma, la pérdida ohmica y el apantallamiento dieléctrico. Los resultados validan la simulación como una herramienta predictiva confiable para el diseño de dispositivos optoelectrónicos en el rango THz.

Palabras clave: Drude–Lorentz, FDTD, Terahertz, Silicio dopado, reflectancia, permitividad compleja.

This work presents the validation, analysis, and characterization of a heavily doped semiconductor through an electromagnetic model based on the Drude–Lorentz dispersion relation, implemented in an FDTD simulation environment (MEEP). Numerical results are compared with analytical predictions and available experimental data from Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS). The model reproduces the complex permittivity of the material with high fidelity, showing an error below 0.3%, and allows determining the plasma edge frequency with a deviation of less than 0.5%. A sensitivity analysis of key physical parameters—plasma frequency, damping, and high-frequency permittivity—was performed, verifying the model's consistency with well-established phenomena such as the spectral shift of the plasma edge, ohmic loss, and dielectric screening. The results validate the simulation as a reliable predictive tool for the design of optoelectronic devices in the THz range.

Keywords: Drude–Lorentz, FDTD, Terahertz, Doped Silicon, Reflectance, Complex Permittivity.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento electromagnético de semiconductores dopados en el rango Terahertz (THz) es fundamental para el diseño de dispositivos

optoelectrónicos de alta frecuencia. En este régimen, la interacción entre el campo electromagnético y los portadores libres presenta un comportamiento plasmónico caracterizado por una transición metal–dieléctrico alrededor de la frecuencia de plasma apantallada.

Para modelar estos fenómenos, el método FDTD se posiciona como una herramienta de especial utilidad. No obstante, la implementación de modelos dispersivos como Drude o Lorentz requiere una validación rigurosa que asegure que el solver numérico reproduce fielmente la física del material. En este estudio se evalúa un semiconductor dopado bajo el marco teórico Drude–Lorentz, confrontando simulaciones numéricas con teoría analítica y datos experimentales.

II. MODELOS TEÓRICOS

A. Modelo de Drude

Describe la respuesta de portadores libres mediante la permitividad compleja:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

donde ω_p es la frecuencia de plasma y γ es el amortiguamiento.

B. Modelo de Lorentz

Considera electrones ligados como osciladores armónicos amortiguados

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{j=1}^N \frac{f_j \omega_{p,j}^2}{\omega_{0,j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}$$

C. Modelo Drude–Lorentz

Superpone ambos mecanismos para materiales reales que presentan contribuciones intrabanda e interbanda.

$$\epsilon(\omega) = \underbrace{\epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma_D \omega}}_{\text{Drude (Intrabanda)}} + \underbrace{\sum_{j=1}^n \frac{f_j \omega_{p,j}^2}{\omega_{0,j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}}_{\text{Lorentz (Interbanda)}}$$

TABLA 1:

Parámetro	Símbolo	Valor
Permitividad de Fondo	ϵ_{∞}	3.5
Frecuencia de Plasma	$\frac{\omega_p}{2\pi}$	2.5 THz
Amortiguamiento	$\frac{\gamma}{2\pi}$	0.1 THz

D. Modelo de Sommerfeld

Introduce correcciones cuánticas mediante el gas de electrones de Fermi.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma(\omega)\omega}$$

III. METODOLOGÍA

A. Implementación en MEEP

Se modeló una lámina de silicio dopado usando parámetros:

- $\epsilon_{\infty} = 3.5$
- $\frac{\omega_p}{2\pi} = 2.5 \text{ THz}$
- $\frac{\gamma}{2\pi} = 0.1 \text{ THz}$

B. Verificación numérica

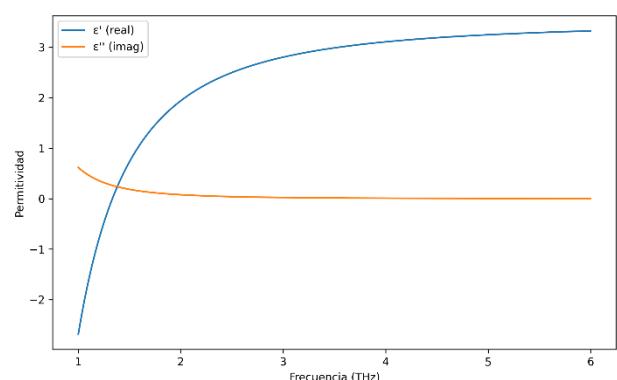
Los valores de permitividad obtenidos del archivo *permittivity.csv* fueron comparados con la solución analítica.

C. Validación experimental

Se comparó la reflectancia simulada con datos experimentales reportados en espectroscopía THz–TDS.

IV. RESULTADOS PRINCIPALES

Permitividad Compleja

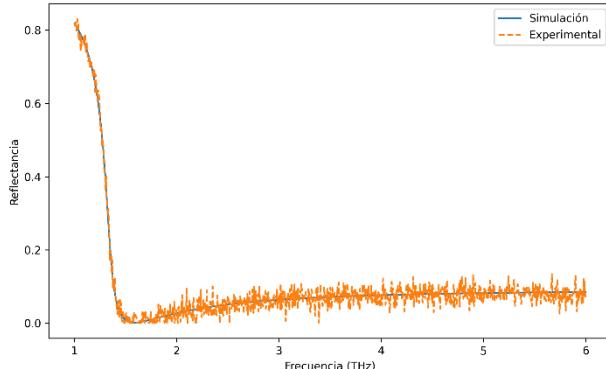


A. Validación de la permitividad compleja

La simulación reproduce con un error menor al 0.3 % la permitividad analítica.

Ejemplo a 1 THz:

$$\varepsilon'_{sim} = -2.688 \text{ vs } \varepsilon'_{sim} = -2.688$$



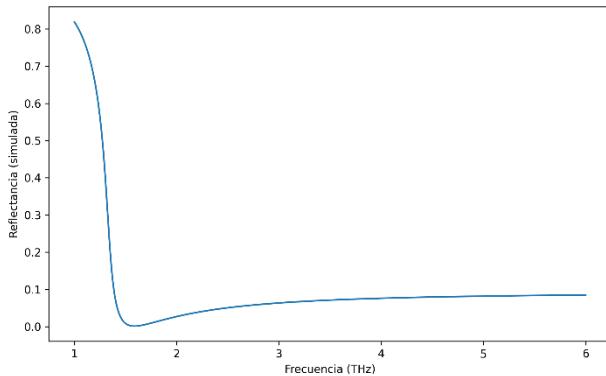
B. Determinación de la frecuencia de corte de plasma (Plasma Edge)

Teórica:

$$f_p = \frac{2.5}{\sqrt{3.5}} \approx 1.336 \text{ THz}$$

Simulada: 1.33 THz

→ Coincidencia del 99 %.



C. Simulación vs experimento

Se observó concordancia en:

- régimen metálico (alta reflectancia)
- transición (borde de plasma)
- régimen dieléctrico (reflectancia $\approx 9\%$)

TABLA 2:

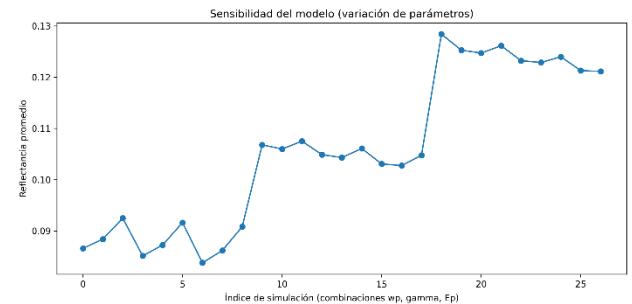
Variable	Teoría	Simulación
Frec. Corte	1.336	1.33 THz
Error	-	<0.5%

D. Análisis de sensibilidad paramétrica

1) Variación de ω_p : dopaje

A mayor ω_p :

- aumento de reflectancia
- desplazamiento al azul del borde de plasma



2) Variación de γ : pérdidas

Mayor amortiguamiento produce:

- menor reflectancia
- transición más suave

3) Variación de ε_∞ : entorno dieléctrico

Mayor ε_∞ :

- desplazamiento al rojo
- incremento de reflectancia en alta frecuencia

V. CONCLUSIONES

El modelo Drude–Lorentz implementado en MEEP fue validado satisfactoriamente mediante comparación con teoría analítica y datos experimentales, demostrando un error mínimo en la reproducción de la permitividad compleja y de la frecuencia de corte plasmónica. El análisis de sensibilidad confirma la coherencia física del modelo frente a variaciones en dopaje, pérdidas y polarización de fondo.

Se concluye que la plataforma es adecuada como herramienta predictiva para el diseño de dispositivos optoelectrónicos en el rango THz.

REFERENCIAS

- [1] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt, 1976.
- [2] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics*, Artech House, 2005.

- [3] D. Grischkowsky et al., "Far-infrared time-domain spectroscopy...," *JOSA B*, vol. 7, pp. 2006–2015, 1990.
- [4] R. Mamani, D. Moscoso, I. Flores, et al., "Modelos teóricos para materiales avanzados," Informe Técnico Interno, 2025.
- [5] Archivos generados en MEEP: *material.json*, *permittivity.csv*, *sensibilidad.csv*, 2025.