

Análisis técnico y modelado matemático de diodos lambda para la emulación de resistencia diferencial negativa mediante transistores JFET 2N5457 y J176

La emulación de comportamientos cuánticos mediante topologías de estado sólido representa uno de los campos más fructíferos de la ingeniería electrónica contemporánea. El diodo lambda, una configuración de dos terminales que emplea transistores de efecto de campo de unión (JFET) complementarios, constituye el paradigma de esta aproximación técnica al replicar la característica de resistencia diferencial negativa (NDR) propia de los diodos túnel convencionales, pero operando en rangos de tensión y potencia significativamente superiores.¹ Este informe técnico presenta un análisis exhaustivo del modelado matemático y la infraestructura de simulación necesaria para caracterizar este dispositivo, tomando como referencia la arquitectura de scripts y el motor de análisis de circuitos del entorno 'reaction_chamber.py', el cual se fundamenta en la resolución iterativa de sistemas no lineales mediante la formulación de la topología algebraica y el cálculo jacobiano.

Caracterización física y operativa de los dispositivos semiconductores base

El diseño de un diodo lambda de alto rendimiento requiere una comprensión profunda de las asimetrías intrínsecas entre los dispositivos de canal N y canal P. El transistor 2N5457, un JFET de canal N de propósito general, ha sido históricamente el estándar para aplicaciones de audio debido a su bajo ruido y alta impedancia de entrada.² Por otro lado, el J176 es un JFET de canal P optimizado para la conmutación analógica y aplicaciones de chopper, caracterizado por una resistencia en conducción (RDSon) relativamente baja.⁴ La combinación de estos dos dispositivos en una topología de realimentación cruzada genera la curva en forma de "N" característica de la resistencia diferencial negativa.

Especificaciones técnicas y variabilidad de parámetros en el 2N5457

El 2N5457 opera como un dispositivo de modo de deplexión, lo que implica que el canal de

conducción está plenamente abierto a una tensión puerta-fuente (V_{GS}) de cero voltios.² Para aplicaciones de modelado preciso dentro de la arquitectura 'reaction_chamber.py', es crítico considerar la dispersión de parámetros documentada en las hojas de datos y en estudios de caracterización empírica. La tensión de corte ($V_{GS(off)}$) del 2N5457 presenta un rango extenso, típicamente de -0.5 V a -6.0 V, lo que impone desafíos considerables en el emparejamiento de dispositivos.⁶ En versiones de montaje superficial contemporáneas, como el MMBF5457 de ON Semiconductor, se observa una mayor consistencia, con valores promedio de $V_{GS(off)}$ cercanos a -1.21 V.⁸

Parámetro Crítico	Símbolo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Unidad	Contexto de Simulación
Tensión de Ruptura Puerta-Fuente	$V_{(BR)GSS}$	-25	—	V	Límite de seguridad operativa ⁶
Tensión de Corte Puerta-Fuente	$V_{GS(off)}$	-0.5	-6.0	V	Define el inicio de la región NDR ⁶
Corriente de Saturación de Drenaje	I_{DSS}	1.0	5.0	mA	Determina el pico de corriente (I_p) ⁹
Transconductancia Directa	g_{fs}	1000	5000	μS	Controla la pendiente de la NDR ⁷
Capacitancia de Entrada	C_{iss}	—	7.0	pF	Influye en la estabilidad dinámica ¹⁰
Capacitancia de Transferencia	C_{rss}	—	3.0	pF	Parámetro crítico para osciladores ⁶

El J176 como contraparte complementaria en canal P

El J176 introduce una inversión en la portadora de carga, utilizando huecos en lugar de electrones, lo que conlleva una movilidad intrínsecamente menor y, por ende, una transconductancia reducida en comparación con el 2N5457 para geometrías similares.¹¹ Esta disparidad es fundamental para el modelado en 'reaction_chamber.py', ya que la asimetría de las curvas de transferencia de ambos JFETs determina la linealidad y la profundidad del valle en la característica $I-V$ del diodo lambda resultante.¹² El J176 soporta tensiones de drenaje-puerta de hasta -30 V y corrientes de drenaje continuas de hasta 50 mA, superando

en capacidad de corriente al 2N5457, lo que permite que el pico de la curva lambda sea limitado primordialmente por el dispositivo de canal N.⁵

Parámetro Crítico	Símbolo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Unidad	Relevancia en el Diodo Lambda
Tensión de Ruptura Puerta-Fuente	$V_{(BR)GSS}$	30	—	V	Robustez ante picos de tensión ⁴
Tensión de Corte Puerta-Fuente	$V_{(GS(off))}$	1.0	4.0	V	Complemento de la tensión de pico ⁵
Corriente de Saturación de Drenaje	I_{DSS}	-2.0	-25.0	mA	Capacidad de carga del ánodo ¹⁴
Resistencia en Conducción	$r_{DS(on)}$	—	250	Ω	Pérdidas en la región óhmica inicial ¹⁵

Modelado matemático de la interacción complementaria

El diodo lambda se constituye conectando el drenaje del JFET de canal N (Q_N) a la puerta del JFET de canal P (Q_P), y el drenaje del Q_P a la puerta del Q_N . Los terminales del dispositivo emulado son la fuente de Q_N (cátodo) y la fuente de Q_P (ánodo). La corriente total I_λ que fluye a través de la estructura está gobernada por la restricción de que, en una configuración serie-paralela de este tipo, la corriente de drenaje de un transistor debe equilibrarse con la dinámica de puerta del otro, asumiendo corrientes de puerta despreciables en operación normal.¹⁶

Ecuación constitutiva de Shockley y efectos de modulación de canal

Para el modelado en scripts de análisis, se emplea la ecuación cuadrática de Shockley modificada para incluir el parámetro de modulación de longitud de canal λ , el cual es análogo al efecto Early en transistores bipolares.¹⁷ La corriente de drenaje I_D para ambos dispositivos en la región de saturación se define como:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Donde V_P es la tensión de pinch-off. En el caso del diodo lambda, las tensiones V_{GS} de cada transistor están vinculadas a las tensiones de drenaje del opuesto. Específicamente, para el transistor de canal N, $V_{GS} = V_{DS} - \lambda V_{DS}$, y para el de canal P, $V_{GSP} =$

$V_{DSN} - V_{\lambda}$. Esta interdependencia crea un bucle de realimentación positiva interna que, al aumentar la tensión total V_{λ} , empuja a ambos transistores hacia sus respectivas regiones de corte.¹

Dinámica de la formación de la región NDR

La característica $I-V$ del diodo lambda se divide en tres fases operativas distintas que deben ser capturadas fielmente por el motor de simulación. En la primera fase, para tensiones bajas, ambos transistores se encuentran en la región óhmica o lineal. La resistencia total es la suma de las resistencias de canal, y la corriente aumenta de forma casi lineal con la tensión aplicada.¹¹ A medida que la tensión se aproxima a la suma de las magnitudes de las tensiones de pinch-off, el canal de conducción comienza a estrecharse de forma asimétrica, siendo más pronunciado en el extremo del drenaje debido al gradiente de potencial a lo largo del canal.²⁰

El pico de corriente (I_p) ocurre cuando uno de los dispositivos entra en saturación mientras el otro aún conserva una conductancia significativa. Inmediatamente después, el aumento de tensión reduce la polarización de puerta del dispositivo complementario, iniciando una reducción drástica de la corriente total. Esta es la región de resistencia diferencial negativa, donde $\frac{dI}{dV} < 0$.²¹ Finalmente, el dispositivo alcanza el valle cuando ambos JFETs están efectivamente cortados. La corriente se mantiene en niveles mínimos de nanoamperios hasta que se alcanza la tensión de ruptura de las uniones, punto en el cual la corriente vuelve a subir de forma abrupta debido al efecto avalancha o ruptura Zener en las puertas.¹

Arquitectura de simulación basada en 'reaction_chamber.py'

El archivo 'reaction_chamber.py' proporciona el marco estructural para la implementación de modelos de dispositivos y algoritmos de resolución. Esta arquitectura se caracteriza por un enfoque modular donde los componentes físicos se abstraen como objetos que aportan términos a una matriz de conductancia global y a un vector de corrientes de error.

Estructura de clases para modelos JFET

En el paradigma de 'reaction_chamber.py', el modelo del 2N5457 y del J176 no se define como una función estática, sino como un elemento dinámico capaz de calcular sus propias derivadas parciales. Esto es esencial para la formación de la matriz jacobiana necesaria en el proceso iterativo de Newton-Raphson.²³ La clase base para estos dispositivos debe implementar los siguientes métodos:

1. **Evaluación de Estado:** Cálculo de I_D basado en el vector de tensiones nodales actual \mathbf{V} .

2. **Cálculo de Estampas (Stamping):** Generación de los términos de conductancia incremental $\frac{\partial g_m}{\partial V_{GS}}$ y $\frac{\partial g_{ds}}{\partial V_{DS}}$.¹⁷
3. **Gestión de Límites:** Implementación de funciones de suavizado para evitar discontinuidades en la transición entre las regiones óhmica, de saturación y de corte, lo cual es un factor crítico para la convergencia del solver.²⁶

Formulación de la Topología Algebraica en el Análisis de Circuitos

La arquitectura de simulación propuesta utiliza los principios de la topología algebraica para automatizar la generación de las ecuaciones de Kirchhoff. El circuito se representa como un complejo de cadenas donde los nodos son 0-celdas y las ramas (JFETs, resistencias, fuentes) son 1-celdas.²⁸ Se define el operador de incidencia o de borde \mathbf{A} , que describe cómo las ramas se conectan a los nodos.

A través del coborde, las tensiones de rama \mathbf{v}_b se relacionan con los potenciales nodales \mathbf{e} mediante la relación $\mathbf{v}_b = \mathbf{A}^T \mathbf{e}$.²⁸ La Ley de Corrientes de Kirchhoff (KCL) se expresa entonces de forma compacta como $\mathbf{A} \mathbf{i}_b = 0$. Al integrar las relaciones constitutivas no lineales de los JFETs, el sistema de ecuaciones resultante para el diodo lambda toma la forma:

$$\$ \$ \mathbf{A} \mathbf{G} (\mathbf{A}^T \mathbf{e}) \mathbf{A}^T \mathbf{e} + \mathbf{A} \mathbf{i}_{fixed} = 0 \$ \$$$

Donde \mathbf{G} es una matriz de conductancia no lineal que depende del estado del sistema. En 'reaction_chamber.py', este sistema se resuelve encontrando el cero de la función de error residual mediante iteraciones sucesivas, donde la topología del circuito permanece constante mientras que los valores de los elementos de la matriz se actualizan en cada paso de tiempo o de iteración DC.²⁴

Desafíos numéricos y convergencia en regiones de resistencia negativa

La presencia de NDR introduce inestabilidades numéricas que pueden causar que el algoritmo de Newton-Raphson falle al oscilar entre dos estados o al divergir hacia soluciones no físicas.²⁶ La arquitectura de scripts debe contemplar estrategias de robustez para manejar estos escenarios.

El problema del Jacobiano singular y la convergencia de Newton

En el pico y el valle de la curva del diodo lambda, la conductancia diferencial se aproxima a cero, lo que puede resultar en una matriz jacobiana mal condicionada o singular.²³ Para mitigar esto, 'reaction_chamber.py' integra técnicas de amortiguación de Newton y esquemas de continuación de parámetros (Homotopy methods).²⁶

La técnica de continuación consiste en introducir un parámetro γ que varía lentamente de 0 a 1. Cuando $\gamma=0$, el sistema representa una solución trivial (por ejemplo, todas las fuentes a cero); cuando $\gamma=1$, el sistema representa el circuito real. El solver rastrea la solución a lo largo de este camino, asegurando que el punto inicial para cada iteración de Newton esté siempre dentro del radio de convergencia de la solución local.²³

Análisis de Estabilidad y Autovalores de la Matriz de Conductancia

Una contribución fundamental del modelado matemático en este contexto es la capacidad de predecir la estabilidad del punto de operación (Q-point). Un punto de operación en la región NDR es intrínsecamente inestable si se conecta a una carga con una conductancia menor que la magnitud de la conductancia negativa del diodo.²¹

El motor de análisis de 'reaction_chamber.py' evalúa la estabilidad mediante el cálculo de los autovalores de la matriz de conductancia nodal linealizada \mathbf{J}_e . Si todos los autovalores tienen partes reales positivas, el sistema es estable ante pequeñas perturbaciones.³¹ En la región NDR, el sistema presentará al menos un autovalor con parte real negativa, lo que indica que cualquier fluctuación de ruido será amplificada, pudiendo llevar al sistema a una oscilación sostenida o a un salto hacia una de las regiones de resistencia positiva (comportamiento biestable).²¹

Estado del Sistema	Signo de los Autovalores (Parte Real)	Comportamiento Físico
Región Óhmica	Todos Positivos	Estable, comportamiento resistivo ³¹
Pico de Corriente	Uno aproximándose a Cero	Umbral de inestabilidad
Región NDR	Al menos uno Negativo	Inestable, amplificación o conmutación ³³
Región de Corte (Valle)	Todos Positivos	Estable, alta impedancia

Análisis Dinámico y Estabilidad de Lyapunov

Más allá del análisis estacionario DC, el modelado del diodo lambda con el 2N5457 y el J176

requiere una perspectiva dinámica para aplicaciones en osciladores de alta frecuencia y circuitos de memoria. La estabilidad de Lyapunov ofrece un marco riguroso para certificar la convergencia de las trayectorias del sistema sin necesidad de resolver explícitamente las ecuaciones diferenciales.³⁴

Construcción de Funciones de Energía y Disipación

Para un circuito que contiene diodos lambda, se puede definir una función de Lyapunov basada en el potencial de disipación de Rayleigh o en la energía total almacenada en las capacitancias parásitas de los JFETs.³¹ Para el 2N5457, las capacitancias C_{iss} y C_{rss} son pequeñas pero no despreciables (aprox. 4.5 pF y 1.5 pF), y su interacción con la resistencia negativa es lo que permite la oscilación.⁶

La función de Lyapunov $V(\mathbf{x})$ debe ser definida positiva, y su derivada temporal $\dot{V}(\mathbf{x})$ a lo largo de las trayectorias del sistema debe ser no positiva para garantizar la estabilidad. En el caso de un oscilador basado en diodo lambda, la resistencia negativa actúa "inyectando" energía al sistema para contrarrestar las pérdidas, lo que se traduce matemáticamente en una región donde la función de disipación es negativa, permitiendo la existencia de ciclos límite estables.³⁶

Topología de los Ciclos Límite y Atractores

El análisis topológico en 'reaction_chamber.py' puede extenderse para identificar atractores en el espacio de fases. Un diodo lambda correctamente modelado presentará un ciclo límite si se integra en un tanque resonante LC. La forma y estabilidad de este ciclo dependen críticamente del balance de transconductancias entre el 2N5457 y el J176. Si el emparejamiento es deficiente, el sistema puede caer en un estado de "bloqueo" (latch-up) en lugar de oscilar, o presentar una distorsión armónica elevada debido a la asimetría de la curva NDR.¹²

Metodología de Emparejamiento y Caracterización Empírica

Dada la amplia tolerancia de fabricación de los JFETs discretos, el éxito de la emulación del diodo túnel depende de un proceso de selección y emparejamiento (matching) riguroso. Estudios realizados con lotes grandes de 2N5457 muestran que incluso dispositivos de la misma cinta de fabricación pueden variar significativamente en su tensión de pinch-off.³⁸

Protocolo de Medición para Matching

Para integrar dispositivos reales en el modelo de 'reaction_chamber.py', se deben extraer tres puntos de datos fundamentales por cada componente³⁸:

1. **\$I_{DSS}\$ a Tensión Constante:** Medición de la corriente de drenaje saturada con $V_{GS}=0$. Se recomienda una tensión de referencia de 7.5 V para el 2N5457, ya que se sitúa con seguridad por encima del V_P máximo de 6 V.³⁸
2. **\$V_{GS(off)}\$ de Corte:** Determinación de la tensión necesaria para reducir la corriente a 10 μA .
3. **Punto Medio de Transconductancia:** Una medición de corriente a una polarización de puerta intermedia para validar la curvatura del modelo de Shockley.³⁸

Dispositivo	Referencia VDS	Punto de Prueba ID	Parámetro Derivado
2N5457 (N)	7.5 V	$V_{GS} = 0$	I_{DSS} ³⁸
2N5457 (N)	7.5 V	10 μA	$V_{GS(off)}$ ³⁸
J176 (P)	-15.0 V	$V_{GS} = 0$	I_{DSS} ⁵
J176 (P)	-15.0 V	-10 nA	$V_{GS(off)}$ ⁴

El impacto de la asimetría complementaria

Una observación recurrente en la caracterización de diodos lambda es que el 2N5457 suele tener una transconductancia mayor que el J176. En un estudio de parámetros de transistores complementarios, se encontró que los JFET de canal N presentaban transconductancias en el rango de 3.4-4.2 mA/V, mientras que los de canal P se situaban en 1.8-2.3 mA/V.¹² Esta diferencia de casi el doble significa que el JFET de canal N domina la pendiente de la región NDR. Para compensar esto en el modelado de 'reaction_chamber.py', se pueden ajustar los parámetros de área o de transconductancia relativa en las ecuaciones constitutivas para lograr una curva más simétrica y un valle de corriente más profundo.¹²

Estructura de Scripts y Análisis de Circuitos en 'reaction_chamber.py'

La arquitectura de los scripts debe diseñarse para ser extensible y permitir el análisis de barrido de parámetros, lo cual es vital para encontrar el punto de operación óptimo del diodo lambda.

Módulo de Ensamblaje de Matrices

El corazón del script es el motor de ensamblaje que traduce la netlist del circuito a la matriz de conductancia nodal. Para el par 2N5457/J176, el script debe implementar una "macro" que trate al diodo lambda como un subcircuito de dos terminales. Internamente, el motor calcula la contribución de cada JFET:

- **Nodo Ánodo (\$n_A\$)**: Fuente de \$Q_P\$.
- **Nodo Cátodo (\$n_K\$)**: Fuente de \$Q_N\$.
- **Nodo Interno 1 (\$n_{i1}\$)**: Drenaje de \$Q_N\$ unido a la Puerta de \$Q_P\$.
- **Nodo Interno 2 (\$n_{i2}\$)**: Drenaje de \$Q_P\$ unido a la Puerta de \$Q_N\$.

El Jacobiano global incluirá términos cruzados debido a que la corriente en el drenaje de \$Q_N\$ depende de la tensión en el nodo \$n_{i2}\$ (su puerta). Esta estructura de matriz no diagonal es la que captura físicamente la realimentación positiva necesaria para la NDR.²⁴

Implementación del Barrido de Tensión (I-V Curve Trace)

Para generar la curva característica, el script de 'reaction_chamber.py' realiza un barrido de tensión DC. Debido a la naturaleza multivaluada de la tensión en función de la corriente en dispositivos NDR, el barrido debe realizarse utilizando una fuente de tensión ideal (baja impedancia) para garantizar la estabilidad en todos los puntos de la curva.²²

Si se intentara realizar el barrido con una fuente de corriente, el sistema experimentaría saltos bruscos (discontinuidades) al cruzar el pico y el valle, ya que el sistema buscaría el siguiente punto de equilibrio estable, saltándose toda la región de resistencia negativa. Este fenómeno de histéresis es útil para memorias biestables pero indeseable para la caracterización completa del dispositivo.²¹

Consideraciones Térmicas y de Ruido en el Modelado

Aunque los JFETs son menos sensibles a la temperatura que los transistores bipolares (BJT), sus parámetros críticos como \$I_{DSS}\$ y \$V_P\$ todavía presentan una deriva térmica que puede afectar la estabilidad de un oscilador lambda.³⁸

Coeficientes de Temperatura en 2N5457 y J176

En el 2N5457, la movilidad de los portadores disminuye con la temperatura, lo que tiende a reducir \$I_{DSS}\$, pero simultáneamente la tensión de contacto de la unión puerta-canal disminuye, lo que tiende a aumentar la corriente para una \$V_{GS}\$ dada. Existe un "punto de operación de coeficiente de temperatura cero" donde estos dos efectos se cancelan, el cual es típicamente una corriente de drenaje baja.¹⁶

El modelo en 'reaction_chamber.py' debe incorporar estas dependencias térmicas en las ecuaciones de Shockley para permitir simulaciones de estabilidad térmica a largo plazo. Las hojas de datos especifican un rango de temperatura operativa de -55°C a +150°C, con una disipación total del dispositivo de 310 mW para el 2N5457.⁶ Exceder estos límites en la simulación debería disparar advertencias de integridad del diseño dentro del script.

Modelado de Ruido y Pureza Espectral

Para aplicaciones de osciladores, el bajo ruido del 2N5457 es una de sus mayores ventajas.³ El modelo matemático incluye fuentes de ruido térmico asociadas a la resistencia del canal y ruido de parpadeo (1/f) que domina a bajas frecuencias. El análisis de ruido en el dominio de la frecuencia dentro de 'reaction_chamber.py' utiliza la matriz jacobiana linealizada para propagar las densidades espectrales de ruido de cada JFET hacia los terminales del diodo lambda, permitiendo calcular el ruido de fase de los osciladores resultantes.²

Aplicaciones de Próxima Generación: Lógica Ternaria y Sensores

La característica NDR del diodo lambda abre la puerta a arquitecturas de computación no convencionales. A diferencia de la lógica binaria basada en estados "encendido/apagado", la resistencia negativa permite la creación de celdas de memoria con tres estados estables (lógica ternaria) aprovechando los múltiples puntos de intersección entre la curva del diodo y la línea de carga.³⁹

Sensores de Gas y Radiación con NDR

Investigaciones recientes sugieren que los dispositivos NDR pueden ser diseñados para ser extremadamente sensibles a estímulos ambientales.³⁹ En el caso de una implementación con JFETs, la exposición de la unión de puerta (específicamente en versiones sin encapsulado o con encapsulados modificados) a gases o radiación puede alterar la tensión de pinch-off, provocando un desplazamiento notable en el pico de corriente de la curva lambda. Esta sensibilidad amplificada por la región de ganancia negativa permite la creación de sensores con límites de detección muy bajos.³⁹

Integración en Sistemas Neuromórficos

El diodo lambda basado en 2N5457 y J176 puede actuar como el elemento de conmutación central en una neurona artificial. Al modelar la dinámica de carga y descarga de un condensador a través de la curva NDR, se obtienen oscilaciones de relajación que imitan los trenes de pulsos neuronales.³⁹ La arquitectura de 'reaction_chamber.py' es particularmente apta para simular grandes redes de estos elementos debido a su eficiencia en el manejo de matrices esparsas y su fundamentación en la topología de redes.²⁹

Síntesis de Conclusiones Técnicas

El estudio exhaustivo del diodo lambda emulado con transistores 2N5457 y J176 demuestra que este dispositivo es mucho más que una simple alternativa al diodo túnel; es un sistema

dinámico complejo con propiedades únicas de sintonización y estabilidad. El modelado matemático riguroso basado en las ecuaciones de Shockley, integrando efectos de modulación de canal y dependencias térmicas, es el único camino para una emulación fiel de la resistencia diferencial negativa.

La utilización de la arquitectura 'reaction_chamber.py' permite un análisis profundo mediante la aplicación de la topología algebraica y métodos numéricos de Newton-Raphson con continuación, superando los desafíos de convergencia inherentes a las regiones inestables. El análisis de estabilidad de Lyapunov y el estudio de autovalores de la matriz de conductancia proporcionan las garantías necesarias para el diseño de osciladores y circuitos de conmutación robustos.

Finalmente, la variabilidad de los parámetros en los JFETs discretos subraya la importancia de metodologías de matching precisas y el uso de componentes con mayor consistencia, como las versiones SMD. El potencial del diodo lambda en campos emergentes como la computación neuromórfica y la lógica ternaria posiciona a esta investigación como una base crítica para el desarrollo de nuevas tecnologías analógicas que exploten los fenómenos de ganancia negativa y biestabilidad.

Obras citadas

1. Lambda diode - Wikipedia, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
https://en.wikipedia.org/wiki/Lambda_diode
2. Exploring 2N5457 N-Channel JFET: Pinout, Features, Alternative and Uses | Lisleapex, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.lisleapex.com/blog-exploring-2n5457-n-channel-jfet-pinout-features-alternative-and-uses>
3. 2N5457 JFET Transistor: Pinout Details, Alternatives, and Technical Datasheet, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.ic-components.com/blog/2n5457-jfet-transistor-pinout-details-alternatives-and-technical-datasheet.jsp>
4. jfet-j176-j177-interfet.pdf, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.mouser.com/datasheet/3/1206/1/jfet-j176-j177-interfet.pdf>
5. j175-d.pdf - onsemi, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/j175-d.pdf>
6. 2N5457, 2N5458 JFETs - General Purpose - Mouser Electronics, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
https://www.mouser.com/datasheet/2/308/1/2n5457_d-1190035.pdf
7. 2N5457-5459 Part Specification Datasheet, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://static.chipdip.ru/lib/078/DOC001078497.pdf>
8. 2N5457 JFET with TO-92 Adapter - Aion FX, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://aionfx.com/component/2n5457-jfet/>
9. 2N5457 2N5458 2N5459 MMBF5457 MMBF5458 MMBF5459 - MIT, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.mit.edu/~6.301/2N5459.pdf>
10. 2N5457 - onsemi, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/jfets/2n5457>

11. Junction Field Effect Transistor or JFET Tutorial, fecha de acceso: febrero 21, 2026, https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_5.html
12. Adventures in Spice: real-life transistor parameter variation | preamp ..., fecha de acceso: febrero 21, 2026, <http://lasse.nerdcamp.net/static/adventures-in-spice-real-life-transistor-parameter-variation/index.html>
13. J176 JFET P-Channel Transistor - Futurlec - Electronic Components & Semiconductor Superstore, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.futurlec.com/Transistors/J176prs.html>
14. J176 JFET P-CHANNEL TRANSISTOR J176 TO-92 - Tayda Electronics, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.taydaelectronics.com/j176-d74z-jfet-p-channel-transistor-j176-to-92.html>
15. J176 onsemi | Discrete Semiconductor Products - DigiKey, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.digikey.com/en/products/detail/onsemi/J176/1050173>
16. JFET Circuits I - Instrumentation LAB, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <http://instrumentationlab.berkeley.edu/printpdf/13>
17. The JFET - Marshall Leach, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://leachlegacy.ece.gatech.edu/ece3050/notes/jfet/thejfet.pdf>
18. 4.12 The Junction Field-Effect Transistor (JFET) - Creating Web Pages in your Account, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://web.cecs.pdx.edu/~jmorris/ece321/ECE321%20Winter%202008/J%20&%20B%20Added%20Textbook%20Material/Section%204.12%20Insert%20p194.pdf>
19. How a JFET Works - Learnabout Electronics, fecha de acceso: febrero 21, 2026, https://learnabout-electronics.org/Semiconductors/fet_02a.php
20. Junction Field Effect Transistors (JFET), fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.ee.columbia.edu/~bbathula/courses/SSDT/lect11.pdf>
21. Negative resistance - Wikipedia, fecha de acceso: febrero 21, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Negative_resistance
22. Circuit Idea/Negative Differential Resistance - Wikibooks, open books for an open world, fecha de acceso: febrero 21, 2026, https://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Negative_Differential_Resistance
23. Solving the Circuit Equations in Nexxim DC Analysis, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/Subsystems/Circuit/Content/Circuit/SolvingtheCircuitEquationsinNexximDCAnalysis.htm>
24. Equations for Circuit Simulation - Stanford TCAD, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <http://www-tcad.stanford.edu/tcad/iedm/device/mixedmode/equations.html>
25. Paul Horowitz - Winfield Hill - The Art of Electronics - The X Chapters-Cambridge University Press (2020) | PDF | Amplifier | Mosfet - Scribd, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.scribd.com/document/821405429/Paul-Horowitz-Winfield-Hill-The-Art-of-Electronics-the-x-Chapters-Cambridge-University-Press-2020>

26. Nonlinear circuits and systems projects - Simon Fraser University, fecha de acceso: febrero 21, 2026, http://www.sfu.ca/~ljilja/projects_ncas.html
27. Achieving Accurate Results With a Circuit Simulator - Ken Kundert, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://kenkundert.com/docs/eda+t93-preso.pdf>
28. Circuit Theory Via Algebraic Topology - RI UFPE, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/31348/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Leonardo%20Lopes%20Abath.PDF>
29. Nodal analysis - Wikipedia, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
https://en.wikipedia.org/wiki/Nodal_analysis
30. What is "negative differential resistance"? How is it implemented? How does it operate? What is its relationship with the true negative resistance? | ResearchGate, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.researchgate.net/post/What-is-negative-differential-resistance-How-is-it-implemented-How-does-it-operate-What-is-its-relationship-with-the-true-negative-resistance>
31. (PDF) Dc Stability In Circuits With Algebraic Confinements - ResearchGate, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
https://www.researchgate.net/publication/2314776_Dc_Stability_In_Circuits_With_Algebraic_Confinements
32. Stability and Eigenvalues [Control Bootcamp] - YouTube, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=h7nJ6ZL4Lf0>
33. 10.4: Using Eigenvalues and Eigenvectors to Find Stability and Solve ODEs - Engineering LibreTexts, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/10%3A_Dynamical_Systems_Analysis/10.04%3A_Using_eigenvalues_and_eigenvectors_to_find_stability_and_solve_ODEs](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/10%3A_Dynamical_Systems_Analysis/10.04%3A_Using_eigenvalues_and_eigenvectors_to_find_stability_and_solve_ODEs)
34. Lyapunov stability - Wikipedia, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
https://en.wikipedia.org/wiki/Lyapunov_stability
35. Lyapunov-Based Stability Analysis - Emergent Mind, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://www.emergentmind.com/topics/lyapunov-based-stability-analysis>
36. Stability and Synchronization of Oscillators: New Lyapunov Functions - ResearchGate, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
https://www.researchgate.net/profile/Boris-Polyak-2/publication/318497542_Stability_and_synchronization_of_oscillators_New_Lyapunov_functions/links/59cd05b6a6fdcc1be7228bd3/Stability-and-synchronization-of-oscillators-New-Lyapunov-functions.pdf
37. Algebraic interpretation of Lyapunov functions - Mathematics Stack Exchange, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://math.stackexchange.com/questions/321044/algebraic-interpretation-of-lyapunov-functions>
38. Characterizing and Matching 2n5457 jFET Transistors - viva Analog | Handcrafted Guitar Pedals & DIY Projects, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://viva-analog.com/characterizing-and-matching-2n5457-jfet-transistors/>

39. How does negative differential resistance relate to neuromorphic computing and sensors? - Power Electronic Tips, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.powerelectronicstips.com/how-does-negative-differential-resistance-relate-to-neuromorphic-computing-and-sensors/>
40. 2N5457 N-Channel JFET : Pinout, Alternative and Datasheet - Utmel, fecha de acceso: febrero 21, 2026,
<https://www.utmel.com/components/2n5457-n-channel-jfet-pinout-alternative-and-datasheet?id=204>
41. Negative Differential Resistance with Ultralow Peak-to-Valley Voltage Difference in Td-WTe2/2H-MoS2 Heterostructure | Nano Letters - ACS Publications, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.4c03263>
42. Negative differential resistance and characteristic nonlinear electromagnetic response of a Topological Insulator - PMC, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4676013/>
43. Unconditional stability of a recurrent neural circuit implementing divisive normalization, fecha de acceso: febrero 21, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12588095/>
44. A non-destructive testing application solved with A-x geometric eddy-current formulation, fecha de acceso: febrero 21, 2026, https://www.comphys.com/pdf/compel_perturbation_a-chi.pdf