

Efecto túnel en semiconductores sometidos a campos eléctricos intensos

Julio Mass Varela*

Resumen

El efecto túnel o filtración cuántica en diversos materiales se mide utilizando cantidades probabilísticas asignadas a un coeficiente de transmisión y a un coeficiente de reflexión de la partícula cargada para atravesar o reflejarse en una barrera de potencial de energía mayor.

El método de aproximación W.K.B. (Wentzel, Kramers y Brillouin) es útil para calcular estos coeficientes y nos permite determinar expresiones para diferentes perfiles de potencial, tales como las barreras rectangulares, triangulares y trapezoidales.

El efecto túnel es un fenómeno muy importante en los dispositivos semiconductores porque ayuda a entender y determinar propiedades eléctricas en estos materiales.

La respuesta del comportamiento de un semiconductor P-N a campos eléctricos intensos produce el fenómeno de ruptura Zener, que es una filtración cuántica de banda a banda. Se analiza el comportamiento para diferentes campos a tres materiales semiconductores: InAs, GaAs y AlAs.

Palabras claves: Efecto túnel, barrera de potencial, semiconductores, filtración Zener, Método WKB.

Abstract

The tunnel effect or quantum filtration in different materials is measured using quantities probabilistic assigned to coefficient of transmission and to coefficient of reflection to the particle charged for across or reflect in a barrier of potential of bigger energy.

The method of approximation WKB (Wentzel, Kramers, and Brillouin), is useful for calculate these coefficients and allow to determinate the expression for different profiles of potential, such as the barrier rectangular, triangular, and trapezoidal.

The tunnel effect is a phenomenon very important in the semiconductor devices, because, they helped to understand and to determine electric properties in these materials.

The answer of a semiconductor PN to intensive electrical fields produces the phenomenon of rupture Zener. It is a filtration quantum of band to band. For the analysis we obtain the behavior for different fields to three materials semiconductor In-As, Ga-As and Al-As.

Key words: Tunnel effect, barrier of potencial, semiconductor, filtration Zener, Method WKB.

Fecha de recepción: Marzo 15 de 1999

* Licenciado en Física, Universidad del Atlántico. Especialista en Física, Universidad Nacional. Profesor medio tiempo, Universidad del Norte, Departamento de Matemáticas y Física.
(E-mail: jmass@guayacan.uninorte.edu.co)

Introducción

El efecto túnel es la filtración de una partícula con energía E a través de una barrera de potencial con altura V mayor que E .

Hay muchos ejemplos en la naturaleza a escala atómica y nuclear para los cuales el efecto túnel es muy importante, por ejemplo: El diodo túnel en semiconductores; la unión Josephson en superconductores; el decaimiento Alfa en física nuclear, y el microscopio de barrido de efecto túnel, entre otros.

La probabilidad de que ocurra el efecto túnel se puede describir con un coeficiente de transmisión T y un coeficiente de reflexión R . El coeficiente T mide la probabilidad de que la partícula penetre hasta el otro lado de la barrera.

En los dispositivos semiconductores, el efecto túnel es un fenómeno muy

importante. Como el funcionamiento del contacto óhmico depende de este efecto, la ruptura Zener en los diodos P-N se determina a partir de la obtención de coeficientes de transmisión.

1. EFECTO TÚNEL EN SEMICONDUCTORES

1.1. Transmisión a través de una barrera

El método WKB (Wentzel, Kramers y Brillouin) es aplicado al cálculo del coeficiente de transmisión para una barrera, en la cual partículas incidentes de la izquierda con energía insuficiente clásicamente pueden pasar al otro lado de la barrera.

Si la aproximación WKB se mantiene en las tres regiones de acuerdo a la figura mostrada en la gráfica 1, la solución de la ecuación de Schrödinger debe ser escrita como:

$$1) \quad \varphi(x) = \begin{cases} \frac{A}{\sqrt{K(x)}} e^{i \int_a^x K dx} + \frac{B}{\sqrt{K(x)}} e^{-i \int_a^x K dx}, & X < a \\ \frac{C}{\sqrt{X(x)}} e^{i \int_a^x K dx} + \frac{D}{\sqrt{X(x)}} e^{-i \int_a^x K dx}, & a < x < b \\ \frac{F}{\sqrt{K(x)}} e^{i \int_b^x K dx} + \frac{G}{\sqrt{K(x)}} e^{-i \int_b^x K dx}, & b < x \end{cases}$$

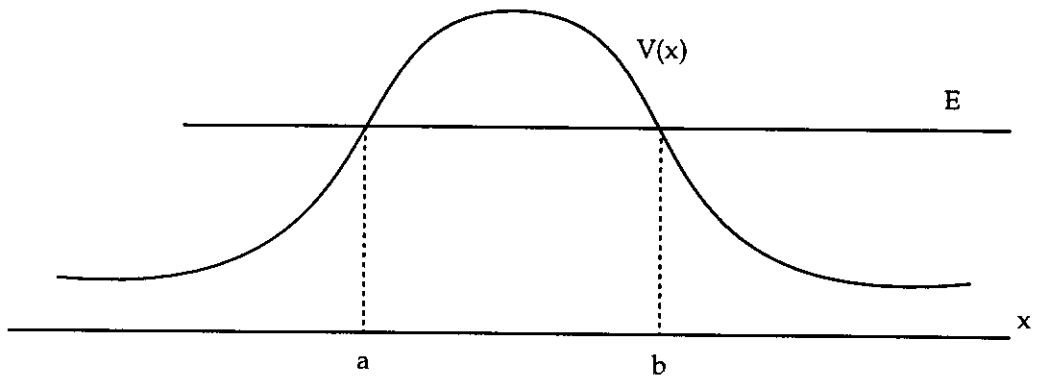


Gráfico 1

Mediante un enlace de fórmulas podemos establecer una relación lineal entre los coeficientes. El resultado es muy simple y se puede expresar en notación matricial así:

$$2) \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2\theta + \frac{1}{2\theta} & -i * \left(2\theta - \frac{1}{2\theta}\right) \\ -i * \left(2\theta - \frac{1}{2\theta}\right) & 2\theta + \frac{1}{2\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ G \end{pmatrix}$$

Donde el parámetro

$$3) \theta = e^{\int_a^x X(x) dx}$$

Y mide la altura y el grosor de la barrera como una función de la energía. El coeficiente de transmisión se define como

$$4) T = \frac{|\Psi_{trans}|^2 V_{trans}}{|\Psi_{inc}|^2 V_{inc}} = \frac{|\Psi_{trans} \sqrt{K_{trans}}|^2 F^2}{|\Psi_{inc} \sqrt{K_{inc}}|^2 |A|^2}$$

Asumiendo que no hay ondas incidiendo por la derecha, entonces $G = 0$, de (2) obtenemos:

$$5) T = \frac{4}{\left(2\theta + \frac{1}{2\theta}\right)^2}, \text{ para una barrera}$$

Alta y ancha $\theta \gg 1$, entonces

$$T \approx \frac{1}{\theta^2} = \exp\left(-2 \int_a^b X dx\right)$$

Por lo tanto, θ es una medida de capacidad de la barrera.

La función $X(x)$ varía de acuerdo a

$$X(x) = \begin{cases} \frac{2\mu}{h^2} [E - V(x)] & \text{si } E > V(x) \\ \frac{2\mu}{h^2} [V(x) - E] & \text{si } E < V(x) \end{cases}$$

$$\text{y } \chi(x) = -i \left\{ \frac{2\mu}{\hbar^2} [V(x) - E] \right\}^{1/2} = -i\chi(x) \text{ si } E < V(x)$$

1.2. Coeficiente de transmisión a través de una barrera triangular bajo la acción de un campo eléctrico

Las barreras de potencial con perfil triangular, como en la figura 2, se dan a menudo en la superficie de metales, en los contactos óhmicos y en efecto túnel Zener en semiconductores.

$$\begin{aligned} \text{los puntos } X = 0, & \quad |E| \\ X = X_0 = & \quad \frac{|E|}{D} \end{aligned}$$

marca el límite de la región en la cual la partícula, de acuerdo con la mecánica clásica no puede alcanzar. Evaluando la integral del exponente encontramos que

$$6) \quad T = \exp \left(- \frac{4}{3D} \frac{(2\mu)^{1/2}}{\hbar} |E|^{3/2} \right)$$

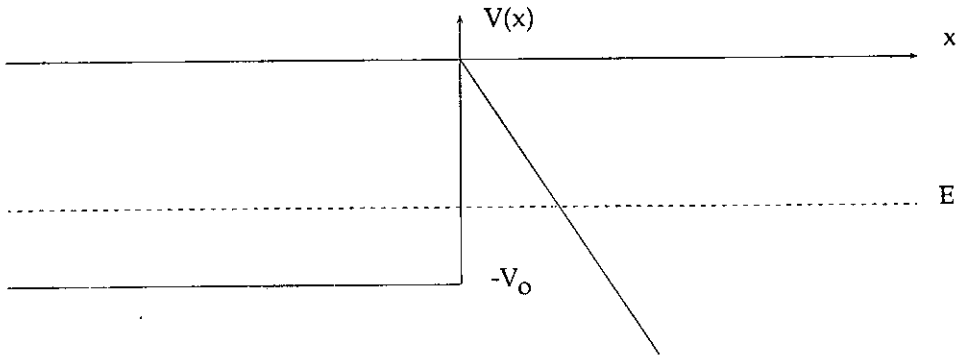


Gráfico 2

El coeficiente T de transmisión es:

$$T \approx \exp \left(- \frac{2}{\hbar} \int_0^{X_0} \left(2\mu (|E| - V(x)) \right)^{1/2} dx \right) \text{ donde}$$

$V(x) = D \cdot x$ y D: Es el campo eléctrico aplicado

$$T \approx \exp \left(- \frac{2}{\hbar} \int_0^{X_0} \left(2\mu (|E| - Dx) \right)^{1/2} dx \right) \text{ donde}$$

Estimando los límites de aplicabilidad de este resultado, observamos que la aproximación cuasi clásica no es válida en la vecindad de los puntos de cruce clásicos X_0 dentro de la región

$$X - X_0 \leq \left(\frac{\hbar^2}{2\mu D} \right)^{1/3}$$

La ecuación (6) puede ser usada si esta región es más pequeña que la an-

chura de la barrera.

$$X_0 = \frac{|E|}{D} \left(\frac{h^2}{2\mu D} \right)^{1/3} \ll \frac{|E|}{D} \text{ o } \frac{(2\mu)^{1/2}}{hD} |E| \gg 1$$

Este requisito es, por lo tanto, equivalente al requisito de que el coeficiente de transmisión sea pequeño $T \ll 1$.

Si el coeficiente de transmisión es igual a la unidad, entonces, de acuerdo con la mecánica clásica, el electrón puede escapar del metal, en un semiconductor los electrones pueden pasar a través de la barrera sin sentir su presencia.

1.3. Efecto túnel de banda a banda en semiconductores

Para campos eléctricos fuertes, los electrones en la banda de valencia en semiconductor pueden filtrarse en un estado no ocupado de la banda de conducción.

A medida que el electrón se filtra ve un perfil de potencial como en el gráfico 2. La anchura de la barrera de potencial disminuye a medida que el campo se incrementa.

El valor aproximado para la probabilidad T de filtración cuántica de banda a banda, de acuerdo con la ecuación 6) es:

$$T = \exp \left(-\frac{4}{3} \frac{(2\mu)^{1/2}}{eDh} \left(\frac{E_g}{2} - eDx \right)^{3/2} \right) \quad 7)$$

Donde E_g es la banda de separación GAP, μ es la masa reducida de acuerdo al perfil referenciado en el gráfico 3.

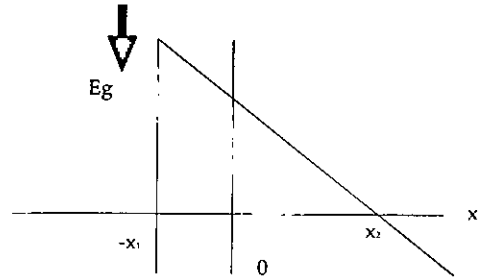


Gráfico 3

Para $X = X_2$ $\frac{E_g}{2} - eDx = 0$, y para $X = X_1$

$$\frac{E_g}{2} - eDx = E_g. \text{ Entonces la ecuación } 7)$$

queda $T = \exp \left(-\frac{4}{3} \frac{(2\mu)^{1/2}}{eDh} |E_g|^{3/2} \right) \quad 8)$

En materiales con banda de separación estrecha, este efecto túnel de banda a banda o filtración Zener puede ser muy importante, siendo la base del diodo Zener, donde la corriente es esencialmente cero hasta que da principio la filtración cuántica de banda a banda y la corriente se incrementa de forma aguda.

1.4. Cálculo del coeficiente de transmisión en algunos semiconductores

Calculamos el coeficiente de transmisión para algunos semiconductores como el InAs, GaAs y el AlAs, sometidos a diferentes campos eléctricos a una temperatura de 300K, los cuales arrojaron los siguientes resultados (ver tabla 1).

3. La filtración cuántica o efecto túnel Zener depende de la anchura de agotamiento.

A medida que el campo eléctrico se incrementa, la barrera efectiva que un electrón en la banda de valencia tiene que superar para pasar a la banda de conducción comienza a decrecer y la

Tabla 1

Semi-conductor	D(V/cms) Eg(e.v)	5×10^6	1×10^7	3×10^7	5×10^7	1×10^8	1×10^{17}	$\mu(Kg)$
In As	0.360	0.615	0.784	0.922	0.952	0.976	1.000	$0.027 m_0$
Ga As	1.424	2.688×10^{-3}	0.051	0.372	0.591	0.743	0.999	$0.065 m_0$
Al As	2.163	1.074×10^{-6}	1.036×10^{-3}	0.101	0.253	0.687	0.999	$0.1 m_0$
Coeficiente de transmisión T								

M_0 = Masa del electrón en reposo

probabilidad de filtración llega a ser más significativa y habrá tantos portadores libres que se produce una ruptura.

Conclusiones

De acuerdo con el análisis de los resultados, concluimos:

4. La ruptura Zener se da primero en los semiconductores de separación de banda más estrecha.

1. El coeficiente de transmisión (T) decrece rápidamente con un incremento del GAP (E_g).
2. El coeficiente de transmisión aumenta con un incremento del campo eléctrico externo.

Bibliografía

- BENG., Streetman. *Solid State Electronic Devices*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1995.
- JASPRIT, Singh. *Dispositivos Semiconductores*. Mc Graw-Hill, 1977.
- LINUS, Pauling y E. BRIGHT, Wilson. *Introducción To Quantum Mechanics*. Mc Graw-Hill, Book Company.
- EUGEN, Mer Zbacher. *Quant Mechanics*. Wiley Toppan, 1977.