

Microondas Osciladores Gunn

1. [Introducción.](#)
2. [Acerca de la configuración atómica de los semiconductores](#)
3. [Diodo Gunn](#)
4. [Efecto Gunn](#)
5. [Osciladores de Resistencia Negativa - diodo Gunn](#)
6. [Configuraciones diodo Gunn - cavidades resonantes.](#)
7. [Conclusiones](#)
8. [Bibliografía](#)

INTRODUCCIÓN.

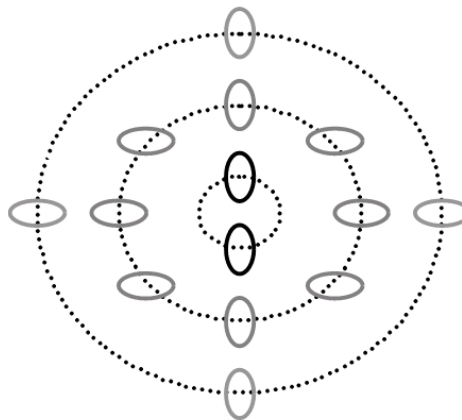
La generación de frecuencias para el rango de microondas se puede realizar de varias maneras, siendo las mas comunes el uso del Klystron, Magnetrón, sobre todo en aplicaciones de grandes potencias, para otros fines lo mas común es el uso de dispositivos de estado sólido como los transistores de efecto de campo de AsGa y diodos Gunn, sobretodo por su tamaño pequeño y bajo consumo.

En el presente trabajo, explicare acerca de los principios y el funcionamiento del oscilador Gunn, el mismo que se basa en el diodo Gunn, y por ende en el efecto que lleva el mismo nombre. En la primera sección, explicaré un poco de las propiedades de la configuración atómica de algunos materiales dieléctricos como el Galio(Ga) y el Arsénico(As), los mismos que se utilizan para aplicaciones de semiconductores como transistores. Posteriormente pasaremos a revisar conceptos básicos referentes al diodo Gunn, así como a algunas de sus características, para desarrollar el tema relacionado al efecto Gunn, que es la base del oscilador Gunn. Finalmente se verá algunas de las configuraciones típicas para la obtención de un oscilador Gunn dentro de cavidades resonantes.

MARCO TEORICO

Configuración Atómica de algunos semiconductores

Al iniciar esta sección es importante mencionar que los tres semiconductores mas utilizados dentro de la electrónica son; Silicio, Germanio y Galio, debido a ciertas peculiaridades de su estructura. Para ejemplificar esto vamos a tomar como base el Silicio, el mismo que posee una estructura cristalina tridimensional repetitiva en forma de tetraedro, como lo indica la figura 1.

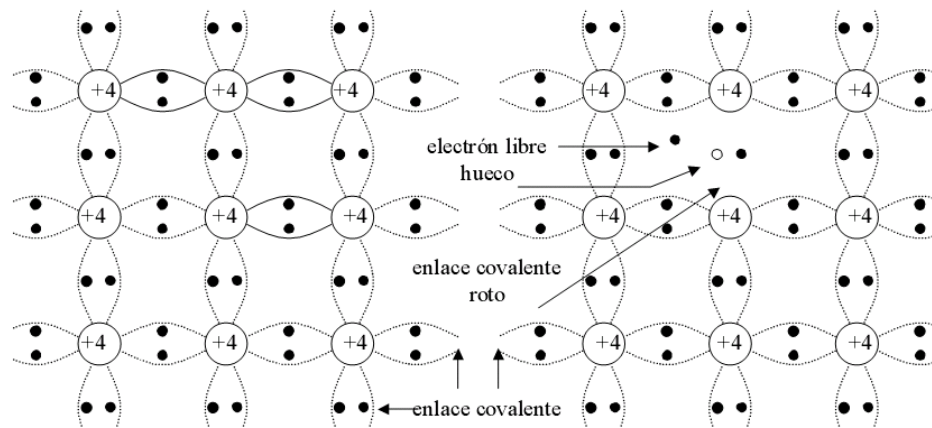


Si:14 (4)***

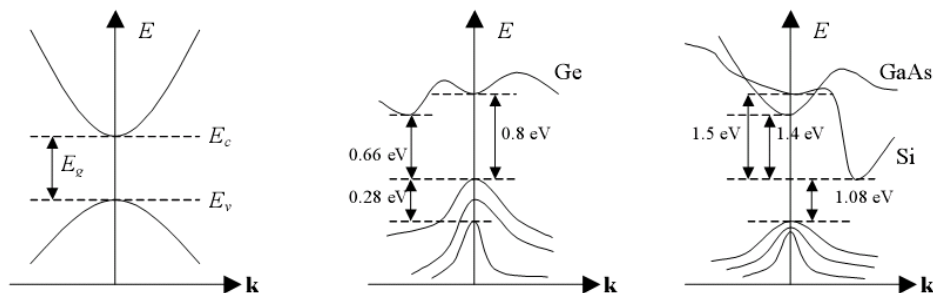
*** el número 14 señala que el átomo posee 14 electrones, de los cuales 4 son de valencia, es decir ocupan la última banda de energía.

Un buen dieléctrico tiene la propiedad de que los átomos se asocian compartiendo, cediendo o aceptando electrones, de otros átomos para completar los 8 electrones de su nivel más externo (en el caso del silicio le hace falta 4 electrones).

Se da un enlace covalente cuando dos átomos comparten varios electrones, para completar los 8 en su última capa, con esto no se producen iones, aquí es donde entran en acción los electrones de valencia ya que sirven como vínculo entre un átomo y el siguiente, dando como resultado que se encuentran ligados fuertemente al núcleo. En un material conductor hay disponibilidad de electrones de valencia, y a pesar de que en el silicio también la hay (4 electrones), es poco probable de que ellos queden libres para producir la conducción por lo ya señalado. Generalmente a temperaturas bajas este tipo de cristales se vuelven buenos semiconductores, ya que al no haber energía térmica, los electrones no pueden romper el enlace, pero a temperaturas ambiente la energía térmica es considerable, brindándoles así la energía necesaria para que algunos de los enlaces se rompan, y se produzca una pequeña corriente, por esta razón este tipo de materiales se denominan semiconductores. Cada electrón que ha roto un enlace y que está libre para moverse dentro del cristal, al liberarse genera un hueco.



Cuando el cristal posee una cierta temperatura, confiere a los electrones una cierta cantidad de movimiento, para la cual solo existe una cierta cantidad de energía accesible como lo muestra la figura, a esta cantidad de energía se la representa con las denominadas bandas de energía.



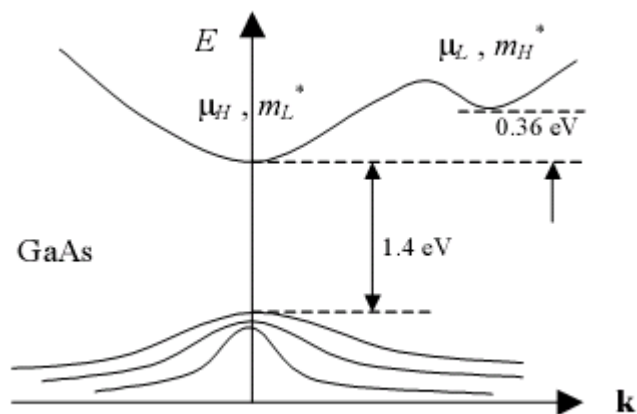
Entonces si se aplica un voltaje al cristal, esto generará energía térmica lo que le da a los electrones la capacidad de moverse, de romper y completar enlaces, y también de conducir la energía eléctrica, además de moverse entre las bandas de energía. Basados en esto es que se introduce impurezas dentro del semiconductor para aumentar el número de portadores de corriente como el Arsénico (As)

Diodo Gunn

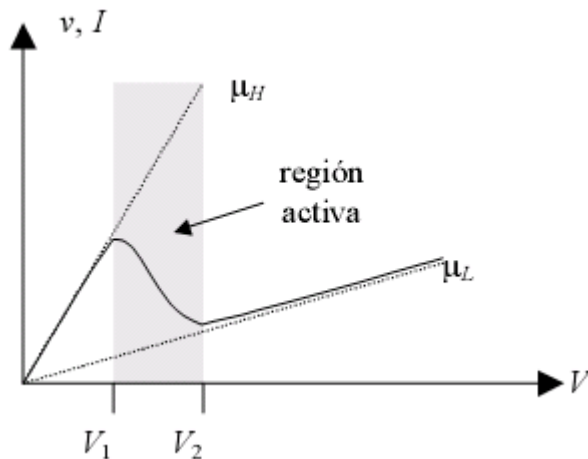
El diodo Gunn está basado en el descubrimiento de que materiales semiconductores como el Arseniuro de Galio al ser excitados con una tensión

continua, genera frecuencias en el espectro de las microondas, todo esto con la particularidad de no usar contacto óhmicos.

Como ya mencioné, un diodo Gunn se obtiene a partir de mezclas de algunos elementos para obtener otros compuestos como el Arseniuro de Galio (GaAs), lo particular de este tipo de aleaciones es que en sus bandas de energías presentan varios valles en la banda de conducción. Cuando la tensión es fuerte en el compuesto, se produce la transferencia de electrones hacia la banda de conducción, al mínimo más fuerte de la banda (el valle de mayor energía). Existe una serie de detalles en cada uno de estos valles, como por ejemplo al aumentar la energía también aumenta la movilidad de los electrones, lo que a su vez provoca que la masa efectiva de los electrones sea mayor en los niveles energéticos superiores.



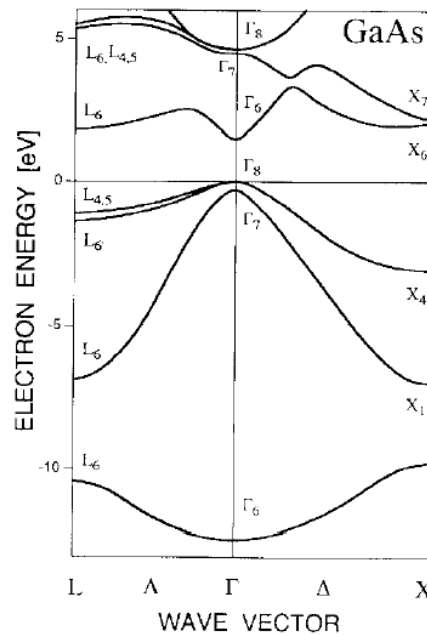
En el gráfico podemos observar claramente que la banda superior posee 2 valles y que la separación entre los dos valles corresponde a 0.36eV. Cuando la tensión aumenta, los electrones pasan del valle inferior al superior, representando esto en términos de tensión versus corriente tenemos:



Por ahora solo señalaré que este es el conocido efecto Gunn, y a los dispositivos que lo provocan se lo conoce como dispositivos de transferencia de electrones (TED). Es importante mencionar que los TED o más conocidos como diodos Gunn no se componen de una o varias uniones p-n o n-p, sino que se constituyen de un solo bloque semiconductor.

El Efecto Gunn
Bandas de Energía

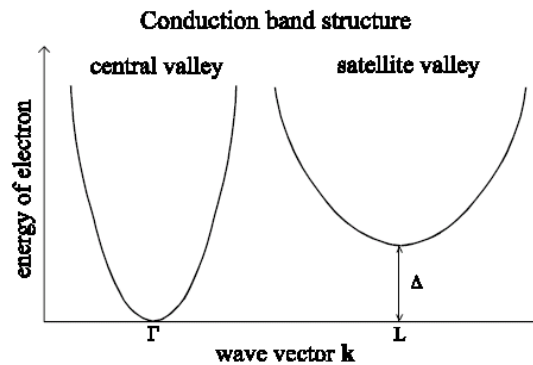
La estructura de las bandas de energía del diodo Gunn se muestra en la siguiente figura:



Como podemos apreciar se incluyen tanto las bandas de valencia (energía de electrón negativa) y de conducción (energía de electrón positiva); nos concentraremos en las bandas de conducción (sobre el eje horizontal). Al observar detenidamente la primera banda sobre el eje horizontal encontramos que la misma presenta 3 valles, que en la escala horizontal se han denotado como:

L Γ X

Los electrones tienden a ocupar siempre el centro de los valles, para mejor explicación se aproxima los 2 valles Γ y L en la siguiente figura:



La energía de cada electrón en el valle en que se encuentre, puede aproximarse a través de la siguiente expresión:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

donde:

k es la magnitud del vector de onda

m^* la masa efectiva del electrón asociada al valle
 h es la constante de Planck reducida

La masa efectiva de un electrón libre en un semiconductor es distinta a la masa de un electrón en el vacío, debido a las interacciones con los átomos del cristal. Por esta razón es importante notar que la masa de un electrón en el valle Γ m_{Γ}^* es mucho menor que la masa del electrón en el valle m_L^* y se la puede cuantificar para el GaAs mediante la siguiente expresión.

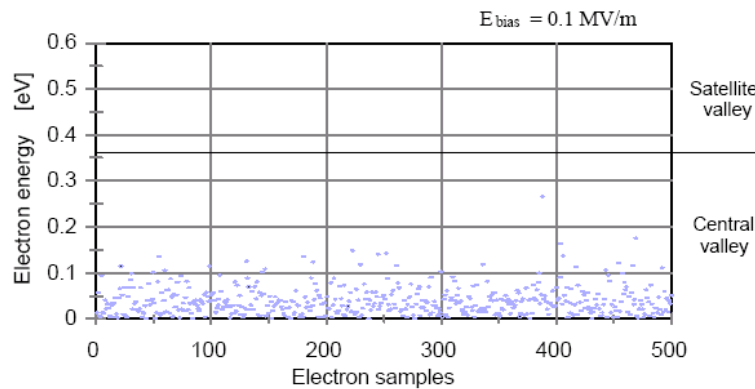
$$m_L^* = 5 m_{\Gamma}^*$$

En la figura además se muestra que existe una diferencia de energía entre los fondos de los valles denotada como Δ , y representa la energía que un electrón que se encuentra en el valle Γ debe adquirir para pasar al valle L. En el GaAs tenemos:

$$\Delta = 36\text{eV}$$

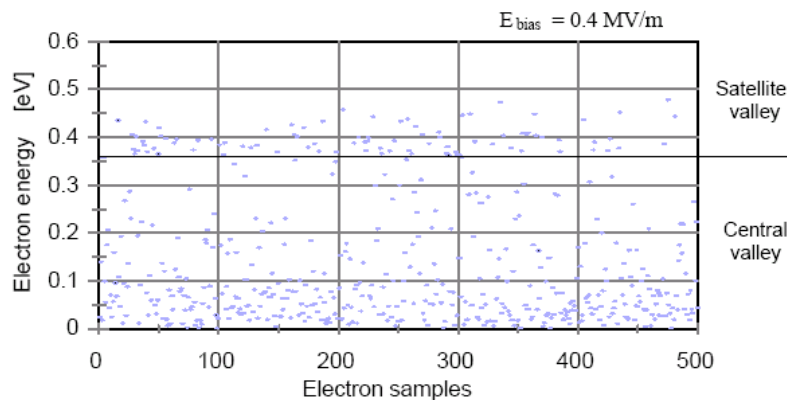
Proceso de Transferencia de electrones

Cuando no hay un voltaje aplicado al semiconductor, la mayoría de los electrones ocupan una posición en el valle Γ , ya que la energía térmica de los electrones es menor que la de 0.36 eV. Esto lo podemos ver en la siguiente gráfica:



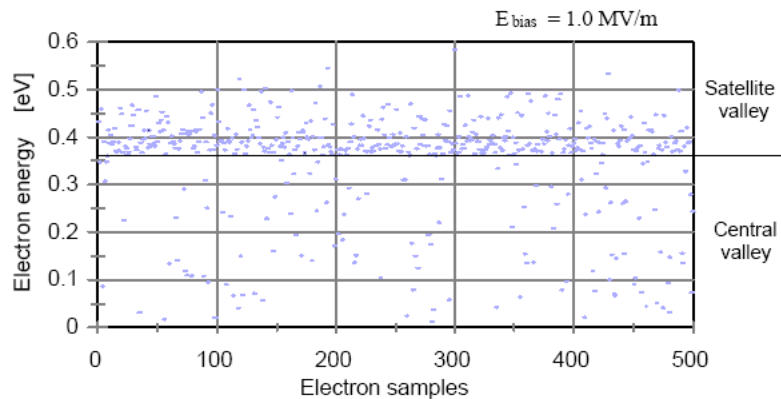
La gráfica muestra a los electrones que se encuentran en el valle central o Γ , mientras que en el valle L o satélite no existen, esto se explica debido a que la tensión es de 1MV/m lo que hace que la temperatura del cristal no brinde suficiente movilidad a los electrones para que se muevan al siguiente valle.

Pero si un voltaje mayor es aplicado entonces la energía de cada electrón crece y le permitirá a algunos electrones moverse de valle, observemos la siguiente figura con un voltaje de 0.4MV/m



Es fácil darse cuenta que el número de electrones en el valle L ha aumentado considerablemente, la explicación es que al aplicarse un mayor voltaje, la energía térmica de cada electrón aumentó, y a algunos les permitió moverse al valle L, dicho en otras palabras algunos electrones ganaron 0.36 eV o más de energía.

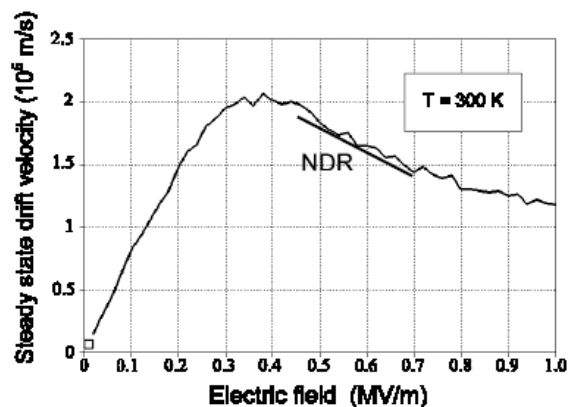
Consideremos el siguiente gráfico en el cual se ha aplicado una tensión de 1MV/m en el cristal, como es lógico pensar ahora casi todos los electrones han adquirido suficiente energía para moverse de valle.



Ahora bien, haciendo un resumen tenemos que:

- 1.- El cristal a temperatura ambiente mantiene los electrones en el valle Γ .
 - 2.- Los electrones deben adquirir 0.36eV para acceder al valle L
 - 3.- Los electrones adquieren la energía faltante al aplicar una tensión en el cristal.
 - 4.- Este cambio se inicia aproximadamente con 0.4MV/m y se aprecia con mayor intensidad al aplicar 1MV/m de tensión en el cristal.
 - 5.- Ahora la mayoría de los electrones se encuentran en el valle L.
- Pero que sucede luego con estos electrones?

Los electrones que han sido transferidos desde el valle Γ al L, son inmediatamente retornados al valle L debido a la masa efectiva que poseen en el valle (aproximadamente 5 veces que en el valle Γ), entonces la velocidad de los electrones, y por tanto la corriente puede decrecer con un incremento de la tensión, esto manifiesta una región de resistencia diferencial negativa (NDR), para voltajes aplicados mayores a 0.4MV/m, como se muestra en la siguiente figura.



En la figura se muestra la velocidad de los electrones (y la corriente), la misma que aumenta conforme aumenta la tensión, pero alcanza un máximo cuando se aplica un voltaje de 0.4 MV/m

Los osciladores Gunn se inventaron justamente aprovechando este efecto de la zona diferencial negativa

Formación de dominios Gunn

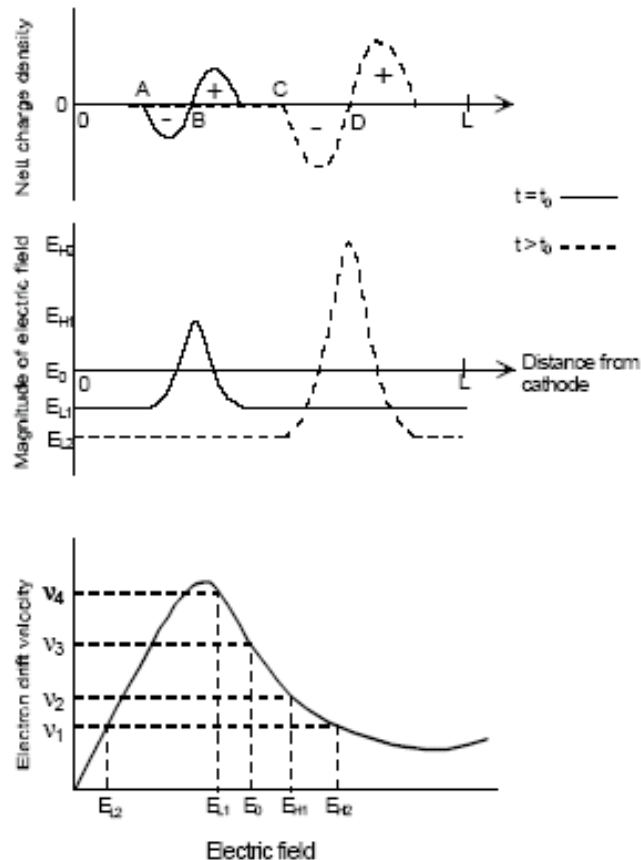
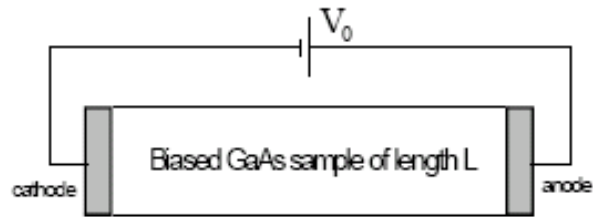
Supongamos que se aplica un voltaje V_0 a una muestra de GaAs de longitud L . El voltaje es constante y por consiguiente aplica un campo eléctrico que lo podemos obtener con la siguiente expresión:

$$E_0 = V_0/L$$

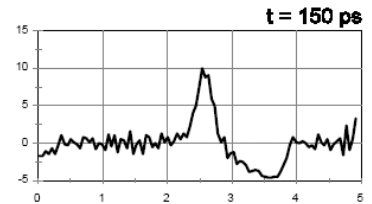
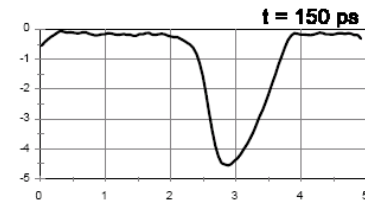
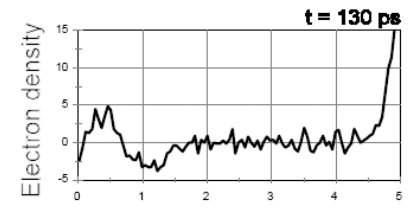
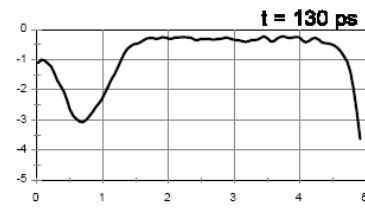
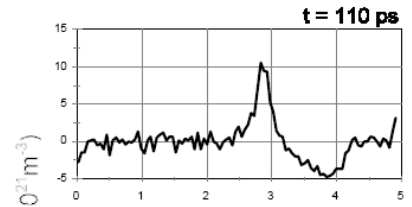
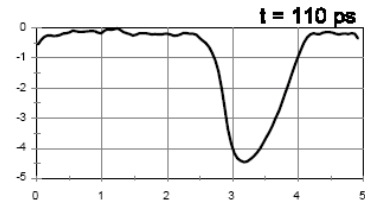
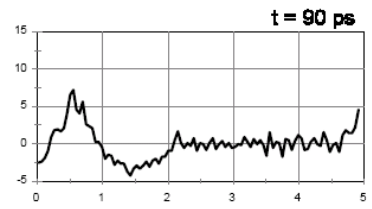
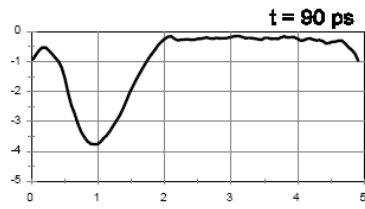
Al aplicar un campo E_0 , podemos decir que los electrones se mueven de cátodo a ánodo con una velocidad V_3 . Asumamos que una pequeña oscilación se produce en el instante $t=0$ la misma que puede ser ocasionada por la energía térmica de los electrones. Al observar la figura podemos decir que los electrones que se encuentran en el punto A, al experimentar el campo eléctrico E_{L1} viajarán al ánodo con una velocidad V_4 . Los electrones en el punto B están sujetos a un campo eléctrico E_{H1} y tenderán hacia el ánodo con una velocidad V_2 , la misma que es menor que V_4 . Por consiguiente cada vez aparecerán más electrones en esta zona lo que contribuirá a aumentar la resistencia diferencial negativa, lo que se traduce en un aumento en la oscilación hasta un límite máximo.

La oscilación inicial crecerá, en un dominio del dipolo, o dominio Gunn, este dominio crecerá hasta que se forme un dominio Gunn estable. Lo particular de este dominio es que ha crecido lo suficiente para que tanto los electrones que viajan en uno como en otro sentido lo hagan a la misma velocidad V_1 .

Por esta razón es importante que el voltaje aplicado al cristal debe ser el apropiado para permanecer en la región NDR (Resistencia Diferencial Negativa) y poder formar un dominio Gunn estable.



Una vez que se ha formado e; dominio estable el campo eléctrico en el resto de la muestra de GaAs cae bajo la región NDR, lo que impide la formación de un nuevo dominio Gunn, posteriormente mientras el dominio es absorbido por el contacto con el anodo, el campo eléctrico en la muestra hace que se alcance la formación de un nuevo dominio Gunn. Esto es lo fundamental, la repetición sucesiva de la formación de dominios Gunn hace que se vea una corriente osciladora en los contactos. Este es el modo de operación conocido como modo Gunn. Es importante notar por tanto que la frecuencia de operación dependerá de la distancia que los dominios tienen que recorrer antes que el anodo los absorba, en otras palabras dependerá de la longitud de la muestra del cristal que estemos usando. Y en segunda instancia dependerá de la cantidad de voltaje aplicado al cristal, que será la que afecte la velocidad del dominio. En las figuras podemos observar que la concentración de electrones aumenta y disminuye conforme se alcanza el valor pico en cada dominio Gunn que luego cae bajo la región NDR.

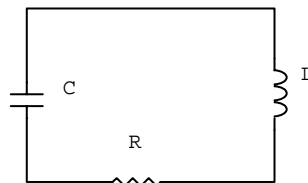


Distance from cathode (μm)

Distance from cathode (μm)

Osciladores de Resistencia Negativa – diodo Gunn

Como ya se mencionó en las secciones anteriores el diodo Gunn, tiene la característica principal de que posee una región de resistencia dinámica negativa, la misma que es usada para fabricar osciladores. Para hacer un análisis más comprensible de cómo se van a generar estas oscilaciones consideremos el siguiente circuito RLC.



Haciendo el análisis en AC tendremos que la ecuación de voltajes es:

$$0 = \frac{di(t)}{dt}L + i(t)R + \int \frac{i(t)}{C} dt$$

Al resolver esta ecuación tendremos que $i(t)$ tiene la siguiente forma:

$$i(t) = e^{At}$$

Donde

$$A = \frac{-R \pm \sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L}$$

Si R^2 es menor que $4L/C$ tendremos que el resultado de la expresión dentro del radical será negativa y por tanto A es compleja. Por tanto podemos decir que

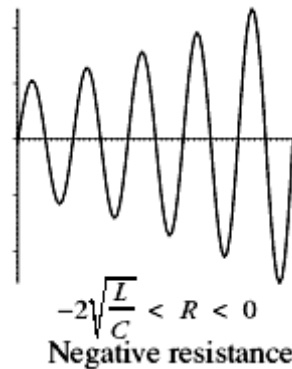
$$i(t) = e^{\alpha t} e^{j\omega t}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{-R}{2L}$$

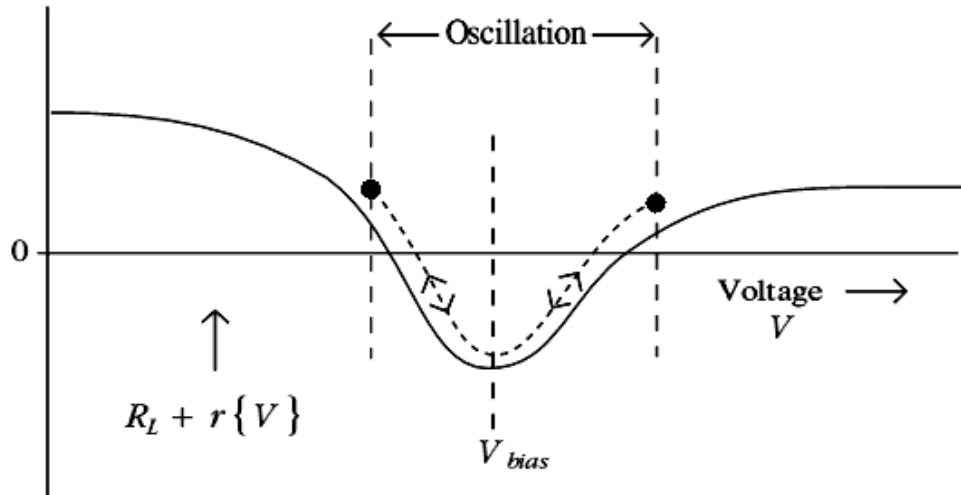
$$\omega = \left| \frac{\sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L} \right|$$

Por lo que ahora podemos afirmar que el circuito posee una resistencia negativa, y que se encuentra oscilando sinusoidalmente con una frecuencia ω , además que la amplitud de la oscilación crece exponencialmente con el tiempo.



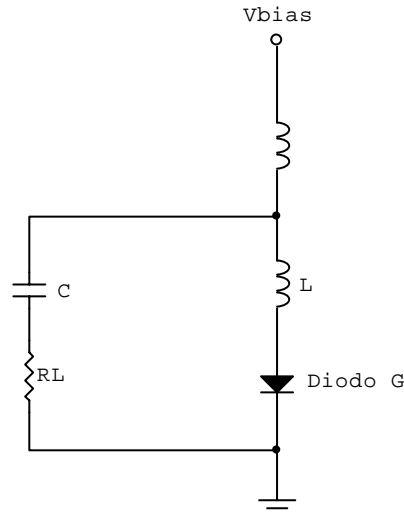
Esta es la base fundamental de los osciladores Gunn, ya que el circuito resonante se consigue a través de cavidades coaxiales, de guía de onda u otro tipo de dispositivo. En cualquier caso la resistencia negativa la da la característica del diodo Gunn, y el circuito resonante la da la geometría de los elementos.

Si alteramos el circuito anteriormente analizado, cambiando la resistencia por una resistencia de carga R_L , y un diodo Gunn el mismo que ofrece una resistencia negativa $r(V)$ bajo ciertas condiciones, entonces la curva de resistencia dinámica total del circuito sería:



Como podemos observar la parte comprendida entre las líneas verticales corresponde a la zona de resistencia influenciada por el diodo Gunn.

Un voltaje DC debe ser aplicado al diodo Gunn a través de una inductancia, este voltaje debe conducir al diodo a operar en la zona de resistencia negativa.



Cualquier pequeña fluctuación en la frecuencia de oscilación en el circuito tenderá a crecer debido a que para voltajes cercanos a V_{bias} la resistencia total del circuito será menor a cero:

$$r = R_L + r(V) < 0$$

La oscilación hará que el voltaje empiece a fluctuar alrededor de V_{bias} , y eventualmente podrá llegar a la zona de resistencia positiva, en cuyo caso la energía de cualquier oscilación tiende a ser disminuida por la disipación de la resistencia. Por otro lado mientras permanezca dentro de la región NDR, la oscilación tenderá a ser amplificada, como resultado de todo este proceso la oscilación tiende a estabilizarse en un nivel en el cual como ya se mencionó anteriormente la energía tanto fuera de la región NDR como dentro sea la misma.

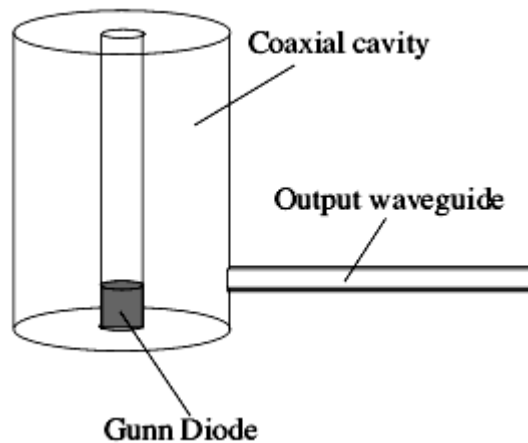
Es importante mencionar que la secuencia de oscilación está determinada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

La potencia de oscilación P_o generada por la resistencia negativa proviene del voltaje dc aplicado. Ahora bien $P_{in} = IV_{bias}$, la cual es la potencia que debemos proveer para asegurar que el diodo se mantenga operando en el modo Gunn, lo que quiere decir que para que exista oscilación se debe aplicar un voltaje determinado que nunca puede ser igual a cero, y por ende la potencia siempre debe ser mayor a 0. De hecho en la practica la potencia que se pueda obtener del oscilador dependerá de que tan grande es el rango de voltajes y corrientes que cubre la zona DNR, siempre podemos esperar que:

$$P_o < (V_{valle} - V_{pico}) \cdot (I_{pico} - I_{valle})$$

Algo importante ya mencionado es que el circuito modelado anteriormente se logra tambien a traves de el uso de cavidad e coaxiales u otro tipo de dispositivos, en general la cavidad resonante será la que reemplace al circuito LC, esta cavidad es la que en primera instancia va a determinar la frecuencia de resonancia del oscilador. Podemos observar un esquema de oscilador Gunn en la siguiente figura:

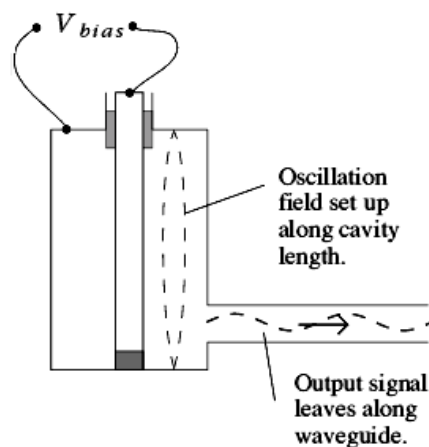


El diodo encerrado en la cavidad induce fluctuaciones que deben viajar en la cavidad y ser reflejadas, regresando hacia el diodo después de un tiempo t .

$$t = \frac{2l}{c}$$

Donde:

l es la longitud de la cavidad
 c es la velocidad de la luz en la cavidad



Además el oscilador puede oscilar a cualquier frecuencia que cumpla con:

$$f_n = \frac{cn}{2l}$$

Donde

n es el # de medias ondas que entran en la cavidad dada una frecuencia dada.

En la práctica el diodo tomará un tiempo " t_d " para reaccionar a cualquier cambio de voltaje en el diodo, ya que debe reaccionar tanto a incrementos como a decrementos tendremos que:

$$f_{\max} = \frac{1}{2t_d}$$

Esto significa además que el oscilador puede operar a frecuencias que cumplan con:

$$1 \leq n \leq \frac{1}{ct_d}$$

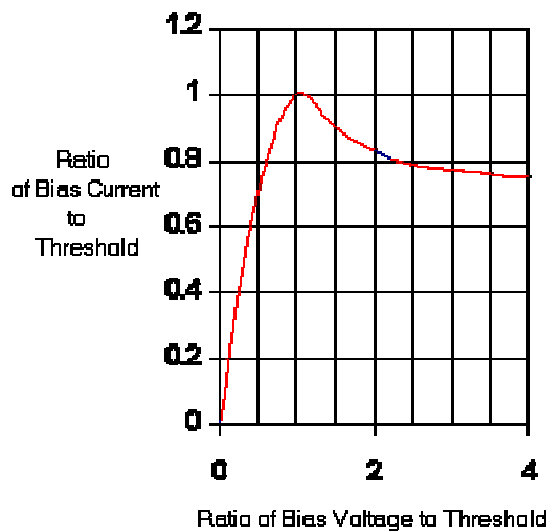
Si hacemos la cavidad lo mas pequeña posible de forma que:

$$\frac{1}{ct_d} \approx 1$$

Entonces estaríamos asegurando que el único modo de oscilación sea el que $n = 1$, dicho de otra forma el sistema no podrá oscilar a frecuencias menores porque la cavidad es muy pequeña, y no podrá hacerlo a frecuencias superiores por que el diodo es muy lento, de esta forma se asegura que oscile a una sola frecuencia.

Configuraciones diodo Gunn - cavidades resonantes.

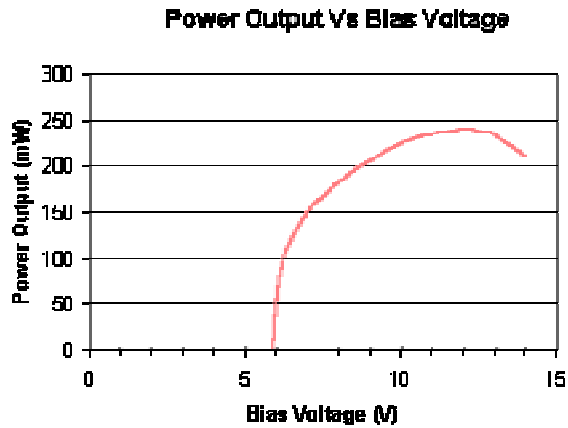
En general existen 3 tipos de diseños de osciladores Gunn, a los que comúnmente se les aplica un campo (para producir el movimiento entre valles) del orden de los 3.2 kV/cm:



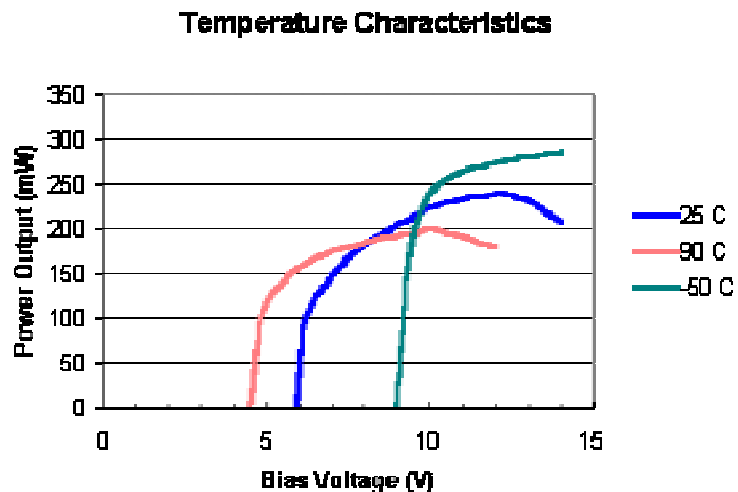
Como ya se conoce mientras el voltaje aumente, la corriente también lo hará, hasta alcanzar un determinado valor de voltaje a partir del cual la corriente empezara a

decrecer. En la figura anterior se muestra la figura que determinada el comportamiento típico entre la corriente y el voltaje en un diodo gunn.

En la siguiente figura podemos apreciar que para valores de voltaje aplicados al oscilador se tiene una diferente respuesta en cuanto a potencia de salida, el punto en el que empieza a existir una potencia de salida, es el que corresponde a un campo eléctrico de 3.2 kV/cm, mientras se continué aumentado el voltaje llegará un punto en el cual la potencia de salida será máxima, la que se conoce como potencia de salida pico Ppp, y por ende el voltaje de potencia pico es el valor de voltaje aplicado al oscilador para el cual la oscilación deseada ofrece una máxima potencia de salida, en el grafico 250mW a 12 V.



La siguiente figura muestra como la activación del diodo Gunn puede variar conforme varía la temperatura, en general el voltaje de activación y el voltaje de potencia pico decrecen con el incremento de la temperatura, mientras que el voltaje de activación del modo Gunn se incrementa con el mismo. Para temperaturas bajas el voltaje de encendido u el de potencia pico son mayores que para un cuarto de temperatura ambiente, y a la inversa para temperaturas altas los mismo parámetros tienen un valor menor.



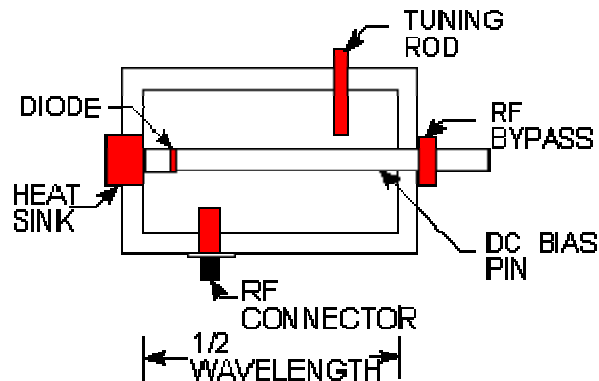
Por lo general existen 3 diseños diferentes de osciladores:

- Coaxial
- Guía de Onda
- Planares

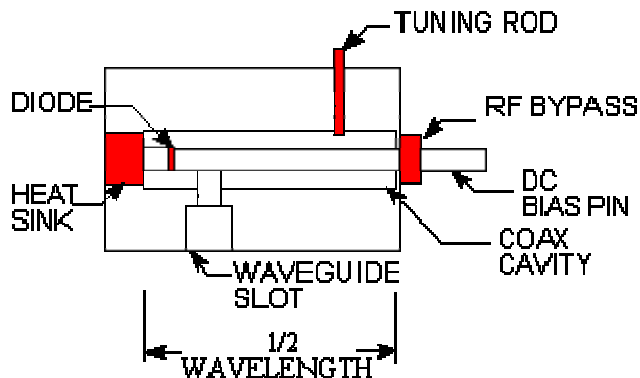
La elección de cualquiera de estos tipos de osciladores dependerá de potencia, frecuencia, estabilidad de frecuencia, estabilidad de potencia, material de la cavidad, etc.

Cavidades Coaxiales

Este tipo de diseños cubren un rango de frecuencias entre 5 a 65 GHz. Este tipo de osciladores tienen un bajo Q lo que produce baja estabilidad y altos desvíos de frecuencia, por ejemplo un valor típico de un oscilador de este tipo son los que funcionan a 15 GHz y ofrecen un desvío de $1\text{MHz}/^\circ\text{C}$.

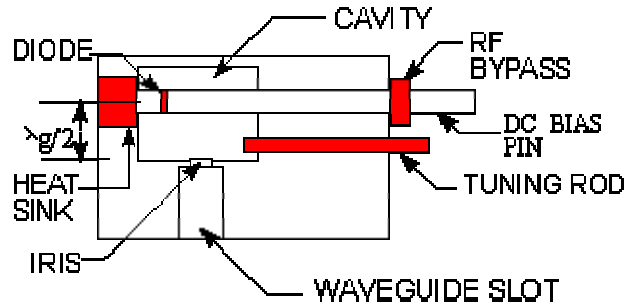


Existen variaciones de este diseño en el cual se utiliza un spot de guía de onda, por lo general son muy usados en frecuencias entre 15GHz hasta los 60 GHz, en contraparte ofrecen menor estabilidad y mayor desvío en frecuencias. Por ejemplo la estabilidad típica operando en los 35 GHz puede ser de $1.8\text{MHz}/^\circ\text{C}$.



Cavidades De Guía de Onda

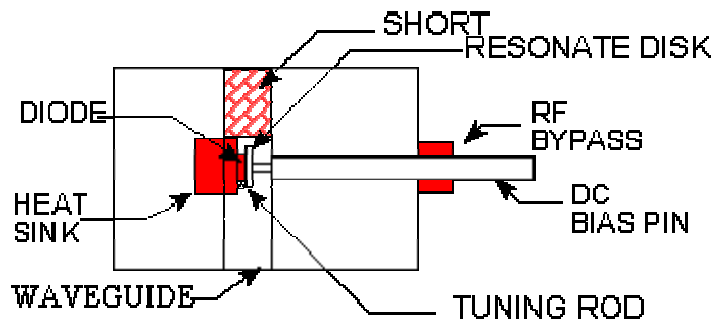
Este tipo de osciladores tienen la particularidad de que se encuentran acopladas con un iris, este tipo de cavidades son las más comunes para generar microondas, debido a que ofrecen un elevado Q y una excelente estabilidad de frecuencia, además ofrecen la ventaja de que pueden ser estabilizadas.



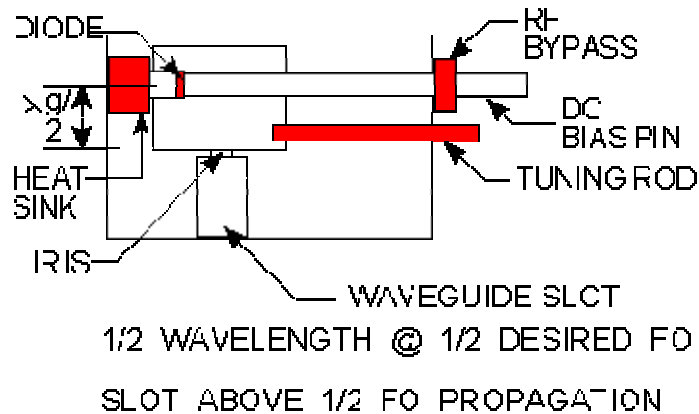
Valores típicos para este tipo de osciladores pueden ser por ejemplo aquellos que operan en 35 GHz y poseen una estabilidad de 1 MHz/°C en una cavidad no estabilizada, cuando se lo hace en una cavidad estabilizada pueden obtener como por ejemplo operar a 35 GHz con una estabilidad de 200kHz/°C.

Cavidades de Segundas Armónicas.

Cavidades de guía de onda acopladas con iris se usan por lo general a 50 GHz, para frecuencia mayores se suele utilizar cavidades de segundas armónicas, por ejemplo un valor de operación para este tipo de osciladores es de 95GHz con una estabilidad de 6MHz/°C. Observemos el siguiente esquema:



Otro tipo distinto de cavidades de segundas armónicas se muestra en la siguiente figura para incrementar la estabilidad en frecuencia, en general se genera la mitad de la frecuencia deseada, y luego se filtra para obtener solo el segundo armónico, un valor de operación típico de este tipo de osciladores es a 77GHz, con una estabilidad de 3.0MHz/°C.



Osciladores Planares.

Constituyen una nueva generación de osciladores, en los cuales los costos y el tamaño se ven reducidos por que ya no utilizan cavidades, en lugar de ello utilizan un DRO (oscilador resonador dieléctrico) y un oscilador Gunn penar. Observemos el siguiente esquema

Conclusiones

- El descubrimiento del efecto Gunn, en materiales como el GaAs, permite la generación de microondas, mediante el concepto de resistencia diferencial negativa para un rango de frecuencias comprendidos entre 5 y 140GHz.
- La energía que los electrones deben ganar para pasar de un valle a otro es aproximadamente de 0.36eV, esto les permite moverse de un valle a otro y generar así dominios Gunn, y por tanto corrientes de oscilación de las microondas.
- La corriente de oscilación generada por los electrones es amplificada, hasta llegar a un estado e la energía dentro de la NDR sea igual a la disipada por la resistencia, esto se puede entender mediante el concepto de resistencia negativa.
- No existe el concepto de resistencia negativa, debido a que la resistencia estática es siempre positiva, lo que existe es la resistencia diferencial negativa.
- El fundamento básico para un oscilador Gunn es un circuito RLC, el mismo que es modelado mediante el uso de una cavidad resonante.
- Los parámetros fundamentales que determinan la oscilación, son; el voltaje aplicado al cristal, la longitud del semiconductor GaAs, y la frecuencia de oscilación de la cavidad resonante.
- Se impide la oscilación superior a la frecuencia deseada debido a que la cavidad es muy pequeña para conducirlos, y de frecuencias inferiores debido a que el diodo es muy lento para generarlas.
- Existen varios tipos de cavidades dependiendo de la aplicación, y las podemos clasificar de la siguiente manera:
 - Coaxiales
 - Guía de Onda
 - De segunda armónica
 - Planares

La elección de cualquiera de ellas, debe hacerse cuidadosamente, basándose en la estabilidad deseada, potencia de salida, y frecuencia de oscilación requerida.

Bibliografía

- The Gunn Diode : Fundamentals and Fabrication, Robert van Zyl, Willem Perold, Reinhardt Botha
- Capitulo III Dispositivos de estado solido en microondas
- <http://www.qsl.net/ea4eoz/gunn.html>
- [www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/ Scots_Guide/RadCom/part5/page2.html](http://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/RadCom/part5/page2.html)
- www.iop.org/EJ/abstract/0022-3735/14/2/003
- www.insight-product.com/products/solid2.htm

Diego Alvarado

dfalvarado@utpl.edu.ec

2005-02-14

UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

-