



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



Control Escolar de Licenciatura

VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó el C. **ZAVALA ALVRADO ADRIÁN** con número de matrícula **20154013920** cuyo título es:

“AMPLIFICACIÓN DE ONDA HÍBRIDA CAUSADA POR PIEZOEFFECTO”

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **Licenciado en Tecnología Área Terminal en Electrónica**.

Cuernavaca, Mor a 14 de enero del 2021

Atentamente
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

DR. J. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. OUTMANE OUBRAM
DRA. SVITLANA KOSHOVA VOLODYMYVNA
DR. VOLODYMYR GRIMANSKY
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
PRIMER SUPLENTE (NO PARTICIPA)
SEGUNDO SUPLENTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

SVITLANA KOSHOVA VOLODYMYIVNA | Fecha:2021-04-12 14:07:04 | Firmante

P1Cp/9FGVD4WpBzq+SiDI13eeBGoiu1C1zSeYKzxrVdkDdE4LmlVvaenXOMtqP+2XC8mcnW4Lmpil7O+caV99zhiE7SOM6NKtwbk0aX8cPS2XwFBvde0Kc6Q6BsiTyQnvzSAh
cP7CPrQyCc1mtV115alTo4IUk3QKmlkbszXuUikPW9+STCqsJx5tOLK/iWdOKIwrGw40nkPwJOO+ISNRAgcl5OgEvBzxlv9GI7n0e8IVRM04o9naPMkgCOspELM4RD3rMrUWJki4
CzwrTSqrsRHnQnObhzy4hO9yVd01MtvEtAmxDtKOFkdQqPODn1DLvY/YUxIIS/y1QZc0ND6HQ==

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-04-12 14:08:08 | Firmante

IGOJQhZFdMNCds7jrppwcXsol5InD0pSXG2YpNCFfJ6oleKELRS3ONyVnNnwu7azJLVGTfQv2b9JjnVzJZK4HRIKnlKI+ZVo4q3ERztzPEN07QWHdqQFIjLb19tEKfFFPAe+TmEJ
KK60ZOR312Xhh5o0jpUz6qZbjVwS8nowt+kmN5weoK8mTelhFo6/c6PkNey8CtPpm51H3sQqH7FzBBleFxfG7RT7Y13W59xMryAlh5qKJDNrjNVfvgMUMnznxuNIKrfA4MUTOCn+
Y9wFs6z4edtGFhQk7QNMyJ06O2ZfdHizafe+OlflZuz/3SbJbannTti03ynQ2EubnBlcVA==

OUTMANE OUBRAM | Fecha:2021-04-13 18:12:13 | Firmante

VhIVaVdguoFTzBvzj5kP7tnUuAPdZWGC3XmrJQzWuYn0c6GJ37gmiWRajVa5Qz2AD99BbHhUx8Wx3ToflN0vi9p8jISYceUfj/0p/P8xwYqwwNPiDbH/3rJS9T3TIF9fKzVsbAVZgW
RELsehDqLfuKPi8JRTyRt+0buKNXEAJ/KGEXZuvvYE9ftfg4A01BlIWzxO/vluvkAigqolzSPjXqQ6JcQ211/mrgebJOKwy8/i9+2sB/xSDqliKX67yxiJtB/esx92eFdePos7FZDCQv0b5q
Eae/IQ3xJz58g1HNt5MyOfRmltFv+MTTR6EkWMv8nHdHbc7IJZg0pqpHoLRoQ==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2021-04-15 23:16:32 | Firmante

Y4lsfzU7eiNppQmxVVKCzEn7o02VDqOfWxzFbi87mKhdIvR1cUVHqHWHWwe6KQIwSzPibMccEggMnYy6DqSymZSu8kRYsvvna95idzuOG15ITDhnoF00qW3guj/NNfyNvVNEf
9oGACREUt8llbRGwKaPOTSEWx8XzSrNx+bgls8QGwcpvdtZzEcdgtVML3GFVxXl8fLE03kefKLCy/g55x5dujby3abOmXkLQ6wZH42kqjrlaOHhJyIpO4mYBOiGgMsvYmAkSyA
nqgPLm++xJ5BJNhxBc/4/KkqzsmqxBYdf3xwGv9veSZOv25xcsXvDI4Q4Elw3Ak5q25ub/pQQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



JFv9TZ

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/mbRrVuNPazmWbzLohMwnJMtEk6KuUzs>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

“AMPLIFICACIÓN DE ONDA HÍBRIDA CAUSADA POR PIEZOELECTO”

TESIS PROFESIONAL

PRESENTA:

ADRIAN ZAVALA ALVARADO

ASESOR: DRA. SVITALANA KOSHOVA

COASESOR: DR. VOLODYMY GRIMANSKY

Contenido

Introducción	3
1. Clasificación de Cristales	4
1.1. Celda unitaria	5
1.2. Tipos de cristales	5
2. Piezoefecto	7
2.1. Cristales con piezoefecto	7
2.2. Cristal GaAs	10
3. Amplificación de onda híbrida en cristales de piezoelectro	11
3.1. Ecuación de piezoelectro	11
3.2. Ecuaciones para obtener efecto de dispersión para ondas	11
3.3. Ondas de carga espacial	13
3.4. Ecuación dispersión para amplificación	15
Conclusión	16
Bibliografía	17

Introducción

La generación de frecuencias para el rango de microondas se puede realizar de varias maneras, las más comunes son el Klyston y el Magnetrón, principalmente para aplicaciones de grandes potencias. Para otros fines, lo más común es el uso de dispositivos de estado sólido como los transistores de efecto de campo de GaAs y diodos Gunn, debido a su tamaño y bajo consumo. El problema de dichos dispositivos es que no pueden excitar ondas hipersónicas a frecuencias de microondas.

En la tesis presente se propone una solución al problema, el acoplamiento resonante de ondas acústicas con el campo eléctrico que poseen las ondas de carga espacial en materiales con conductividad diferencial negativa, se analizará el GaAs. Cuando en dicho material se propaga un campo eléctrico mayor a un campo crítico establecido se observa una conductividad diferencial negativa, entonces la onda de carga espacial está sujeta a una amplificación, provocando que el campo eléctrico alcance valores mayores. El método para que este campo eléctrico de microonda excite a la onda acústica hipersónica es el efecto piezoeléctrico.

1. Clasificación de Cristales

Los materiales sean semiconductores, polímeros, etc., cuentan con un arreglo en su estructura atómica, esta forma un patrón repetitivo, regular en forma de rejilla o red. La red difiere de un material a otro tanto en tamaño como en forma dependiendo del tamaño de los átomos y del tipo de enlace entre ellos. La estructura cristalina de un material se refiere al tamaño, la forma y la organización atómica dentro de la red.

Las propiedades electrónicas importantes de los sólidos se expresan mejor en cristales. Las propiedades de los semiconductores más importantes dependen de la estructura cristalina, debido al arreglo de los átomos en el sólido.

La estructura cristalina más ocupada en la industria electrónica es la del diamante. Cada átomo de la malla del diamante tiene una unión covalente con cuatro átomos adyacentes para formar un tetraedro.

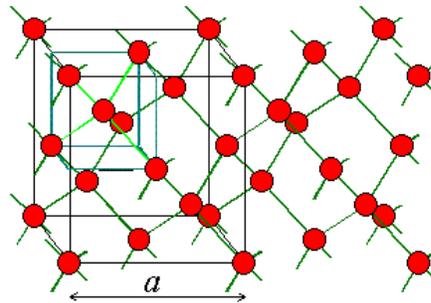


Fig 1.1. Estructura cristalina de diamante

Los semiconductores compuestos, como el GaAs y InP, tienen una estructura similar a la del diamante, pero contiene dos diferentes tipos de átomos. Cada átomo tiene cuatro uniones covalentes, esta estructura se llama zincblenda, tanto la malla de diamante como la malla zincblenda son mallas cúbicas.

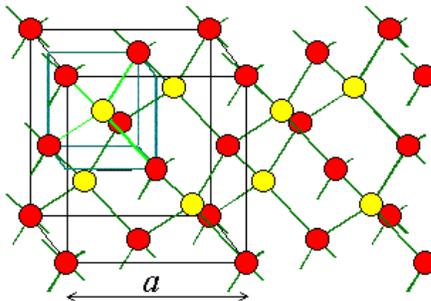


Fig 1.2. Estructura zincblenda

La estructura zincblenda tiene una malla unitaria cúbica y contiene 4 átomos de cada tipo, posicionado de la misma manera que en la estructura cristalina. En ambos casos la malla consiste en dos submallas cúbicas centradas en las caras independientes, alejadas por un cuarto de la distancia a lo largo de la diagonal del cuerpo. Cada átomo en la estructura puede considerarse como el centro de un tetraedo, con sus cuatro vecinos cercanos ocupando las cuatro esquinas del tetraedo.

1.1. Celda unitaria

La celda unitaria es la subdivisión de la red cristalina que sigue conservando las características generales de toda la red. En la siguiente figura se puede apreciar una celda unitaria.

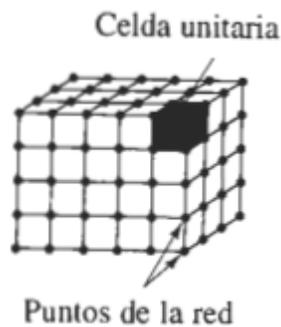


Fig. 1.3. Muestra de una celda unitaria y de los puntos de red. (Askeland 2011)

1.2. Tipos de cristales

Existen 14 formas de celdas unitarias o redes de Bravais agrupados en 7 sistemas cristalinos. Los puntos de la red están localizados en las esquinas de las celdas unitarias y, en algunos casos, en cualquiera de las caras o en el centro de la celda unitaria.

Los elementos de simetría que se han escogido para especificar estos siete son los siguientes [1]:

a) Eje de rotación n : n Puede tener los valores 1, 2, 3, 4 y 6. La simetría rotacional de 5 veces es imposible.

b) Plano de simetría: una mitad del cristal reflejada en un plano semejante que pasa por un punto de la red reproduce la otra mitad.

c) Centro de inversión: Un punto de la red, alrededor del cual la operación $\vec{r} = -\vec{r}$ (en donde \vec{r} es un vector hacia cualquier punto de la red) deja a la estructura reticular sin sufrir cambio alguno.

d) Eje de rotación-inversión: La rotación alrededor del eje $2\pi/n$ radianes ($n = 1, 2, 3, 4, 6$) seguida de una inversión alrededor de un punto de la red, por donde pasa el eje de rotación, no produce ningún cambio en la red.

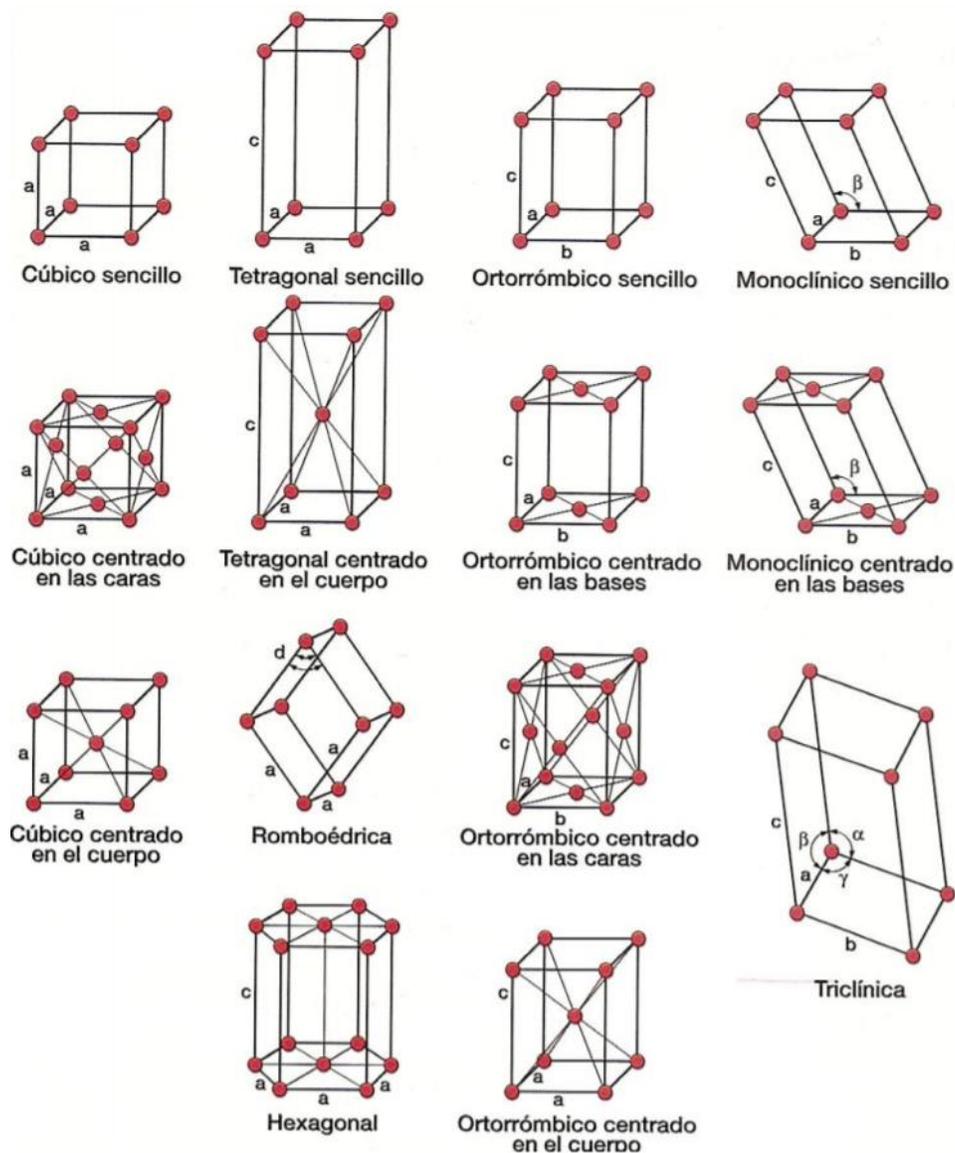


Fig. 1.4. Redes de Bravais.

Estructura	Ejes	Ángulo entre ejes
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos de 90°
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos de 90°
Ortorrómbica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos de 90°
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de 90° Un ángulo de 120°
Romboédrica	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno es de 90°
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90° Un ángulo (β) distinto a 90°
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ninguno es de 90°

Tabla 1. Clasificación de estructuras cristalinas.

2. Piezoeffecto

2.1. Cristales con piezoeffecto

La condición necesaria para que un cristal sea piezoactivo es que no debe tener centro de simetría en su estructura cristalina [2]. El piezoeffecto es una propiedad tensorial de rango tres. Un ejemplo de cristal piezoactivo es el GaAs; es un cristal cúbico porque el tamaño de sus ejes y sus ángulos son iguales y no tiene centro de simetría. Si la celda unitaria de un cristal contiene al menos dos átomos diferentes, el cristal puede producir piezoelectricidad (véase Fig.2.1).

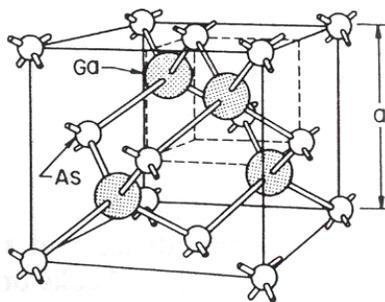


Fig. 2.1. Estructura Zincblenda (GaAs, GaP, etc.)

Para entender el fenómeno piezoeléctrico se estudiará el cristal GaAs, donde cada ion de Ga está cargado positivamente y está localizado en el centro de un tetraedro ABCD, en las esquinas de éste están los iones de As, que están cargados negativamente. Cuando

este sistema es sometido a una tensión en el plano xy, la cara AB se alarga y la cara CD se acorta. Como consecuencia, estas caras no tienen la misma magnitud y el ion de Ga se desplazará a lo largo del eje z, generando un dipolo eléctrico (fig. 2.2).

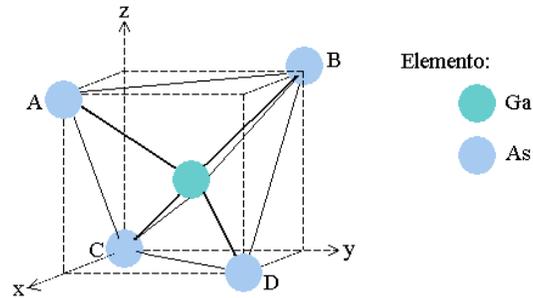


Fig. 2.2. Cristal GaAs

Si el cristal conductor tiene propiedades piezoeléctricas, la onda acústica propagada estará acompañada de un campo eléctrico pequeño, por ello una onda acústica propagada en el aire y en el agua no tiene campo eléctrico.

Cuando se aplica una tensión entre las caras de un cristal, éste producirá un campo eléctrico. Este fenómeno se conoce como efecto piezoeléctrico (Fig. 2.3 a).

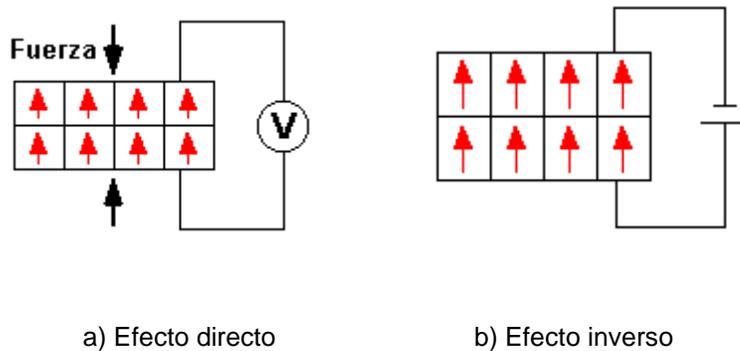


Fig.2.3. Piezoefecto

El efecto funciona también a la inversa (Fig. 2.3.b), cuando se aplica un campo eléctrico a ciertas caras de una formación cristalina, ésta experimenta distorsiones mecánicas.

El efecto piezoeléctrico se produce en varias sustancias cristalinas como el BaTiO₃, SrTiO₃ o la turmalina. El efecto se explica por el desplazamiento de iones en cristales que tienen una celda unitaria asimétrica. Cuando se comprime al cristal, los iones de las celdas se desplazan, provocando la polarización eléctrica de la misma. Debido a la regularidad de la estructura cristalina, estos efectos se acumulan, produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre determinadas caras del cristal. Cuando se aplica al cristal un campo eléctrico externo, los iones de cada celda son desplazados por las fuerzas electrostáticas, produciendo una deformación mecánica. Dada su capacidad de convertir la deformación mecánica en voltaje eléctrico y un voltaje eléctrico en movimiento mecánico, los cristales piezoeléctricos se utilizan en dispositivos como los transductores, que se emplean en la reproducción de discos y en los micrófonos. Los cristales piezoeléctricos también se usan como resonadores en osciladores electrónicos y amplificadores de alta frecuencia ya que, si se tallan estos cristales de una determinada manera, la frecuencia de resonancia es estable y bien definida. Los materiales piezoeléctricos se han usado en un sin fin de aplicaciones, en una amplia variedad de productos, en sectores como el industrial, médico, aeroespacial y militar. Cuando un material es sujeto a una presión mecánica, una carga eléctrica se genera a través del material. La habilidad de un material para generar carga o un campo eléctrico cuando se aplica una presión es medida por un coeficiente piezoeléctrico de voltaje.

La siguiente tabla muestra algunas aplicaciones de materiales que utilizan el efecto piezoeléctrico inverso.

Tabla 2.1. Aplicaciones del efecto piezoeléctrico

Proceso	Aplicaciones
Celdas de carga	Medida de fuerza y presión
Sensores de velocidad	Medida de la velocidad
Acelerómetro	Medida de la aceleración y monitoreo de vibraciones
Monitoreo estructural	Detección de emisiones acústicas
Hidrófonos	Monitoreo de la vida marina, del corazón y de los sistemas circulatorios
Igniters (inflamar)	Gas inflamable (gas ignition) en soldadores, parrillas y encendedores
Control remoto	Sensor en control remoto comercial

Micrófonos	Detección de frecuencias audibles
Soldar	Soldadores termoplásticos rígidos, película y tela de soldadura de costura, inserción de metal en plástico, microunión de metal, soldadura de solape de una conductividad eléctrica alta y hojas de soldadura de costura.

2.2. Cristal GaAs

Un tipo de cristal con piezoeffecto es el cristal arseniuro de galio (GaAs), es uno de los materiales más importantes para los semiconductores optoelectrónicos. Se usa para fabricar dispositivos como circuitos integrados a frecuencias de microondas, diodos de emisión infrarroja, diodos láser y celdas fotovoltaicas. Un cristal de GaAs consta de una red de átomos de galio y arsénico, en la que los átomos de galio portan una pequeña carga positiva y los átomos de arsénico una pequeña carga eléctrica negativa.

Un movimiento lento de electrones a través del cristal causa en sus alrededores una distorsión en la red cristalina. La carga eléctrica negativa de electrones repele a los átomos cargados negativamente y atrae a los átomos cargados positivamente.

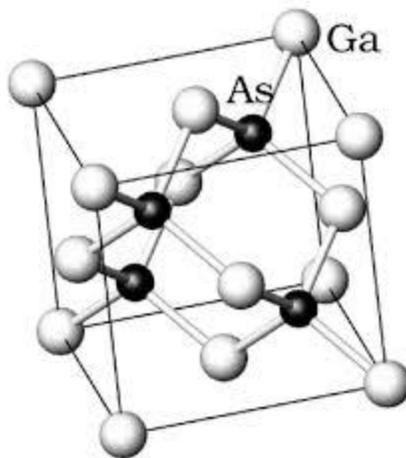


Fig.2.4 Arseniuro de Galio

El compuesto arseniuro de Galio (GaAs) se emplea como semiconductor (con los elementos de los grupos II, IV o VII de la Tabla Periódica) o como semiaislante. Los componentes hechos de arseniuro de galio se encienden diez veces más rápido que aquellos de silicio, no sufren tan a menudo daños transmitiendo señales analógicas y no necesitan mucha energía. Por estas cualidades, el arseniuro de galio tiene una amplia aplicación en la industria de las telecomunicaciones. Su principal aplicación es en la construcción de circuitos impresos y dispositivos optoelectrónicos en teléfonos celulares y

móviles para la transmisión de señales. Además, el arseniuro de galio se emplea para transmitir información por fibra óptica a través de láseres para tratamiento superficial (VCSEL) o para suministrar energía mediante los paneles solares con celdas fotovoltaicas de los satélites [3].

3. Amplificación de onda híbrida en cristales de piezoefecto

3.1. Ecuación de piezoefecto

Para el caso piezoeléctrico es necesario utilizar el cristal GaAs, debido a que posee un valor alto del módulo piezoeléctrico β . Se considera el caso donde el modo acusto electromagnético es transversal en dirección al eje z. Las ecuaciones de la teoría elástica con efecto piezoeléctrico son [3,4]:

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \beta \frac{\partial E}{\partial z} \quad (3.1.a)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E - \beta \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \quad (3.1.b)$$

donde el coeficiente para el módulo elástico es C y para el piezoefecto β , tomamos todos los módulos como tensores, ρ es la densidad del material, $\varepsilon_0, \varepsilon$ son las constantes dieléctricas del vacío y del material, respectivamente, U es el desplazamiento mecánico, E es el campo eléctrico y D es la densidad eléctrica.

3.2. Ecuaciones para obtener efecto de dispersión para ondas

Para simplificar el análisis utilizamos únicamente un coeficiente para el módulo elástico C y para el piezoefecto β [3].

Las ecuaciones para escribir el problema son:

$$\frac{\partial D}{\partial z} = en \quad (3.2.a)$$

$$e \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (j_z) = 0 \quad (3.2.b)$$

$$j_z = -|e|nv_z \quad (3.2.c)$$

$$v = v_z \approx \mu E + D \frac{\partial n}{\partial z} \quad (3.2.d)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E \quad (3.2.e)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \cdot \vec{v} \equiv \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{|e|\hbar}{m^*} \vec{E} - \frac{T}{nm^*} \nabla n - v \vec{v} \quad (3.2.f)$$

donde e es la carga del electrón, n la concentración de electrones, j_z es la densidad de corriente, v_z es la velocidad de deriva de los portadores, μ es la movilidad y D es el coeficiente de difusión.

La onda es de vista $e^{-i(\Omega t - kz)}$, la derivada con respecto al tiempo de la velocidad va a tender a la frecuencia con número complejo $\frac{dv_z}{dt} \sim i\omega_{1,2}$, y la frecuencia será menor que la velocidad $|\omega| \ll v$, por lo que la ecuación (3.2.f) se iguala a cero y escribirse como:

$$0 = -\frac{|e|\hbar}{m^*} E_z - \frac{T}{nm^*} \frac{\partial n}{\partial z} - v v_z \quad (3.3)$$

Podemos encontrar v_z a partir de la ecuación (3.3):

$$v_z = -\frac{|e|\hbar}{vm^*} E_z - \frac{T}{vnm^*} \frac{\partial n}{\partial z} \quad (3.4)$$

$$\frac{|e|\hbar}{m^*v} = f(z) = \mu(E) = \mu(E_0 + E_z) = \mu_0(E_0) + E_z \frac{\partial \mu}{\partial E} = \mu_1 \left(1 + \frac{\partial \mu}{\partial E} \Big|_{E_0} \frac{E_0}{\mu_1} \right) \quad (3.5a)$$

$$\frac{|e|\hbar}{m^*v} * E_z = \left(\mu + \frac{\partial \mu}{\partial E} \Big|_{E_0} E_z \right) (E_0 + E_z) = \mu_0 E_0 + \mu_0 E_z + \frac{\partial \mu}{\partial E} \Big|_{E_0} E_0 E_z = -v_0 + \mu_d E_z \quad (3.5b)$$

Se considera la siguiente expresión para simplificar la ecuación:

$$\mu_d = \mu_1 \left(1 + \frac{\partial \mu}{\partial E} \Big|_{E_0} \frac{E_0}{\mu_1} \right) \quad (3.5c)$$

Tenemos el resultado de v_z como:

$$v_z = v_0 - \mu_d \vec{E}_z - \frac{T}{vnm^*} \frac{\partial n}{\partial z} \quad (3.6)$$

Donde:

$$D = \frac{T}{vm^*} \quad (3.7)$$

Después es posible encontrar la corriente:

$$j_z = -|e|nv_z = -|e|(n_0 + \tilde{n}) \left[v_0 - \mu_d E_z - \frac{D}{n} \frac{\partial n}{\partial z} \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \tilde{D}}{\partial t} + 1 = 0, \quad \frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_m} \tilde{j} = 0 \quad (3.9)$$

$$\text{div} \tilde{D} = -\rho \rightarrow \frac{\partial E_z}{\partial z} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_m} \tilde{n} \quad (3.10)$$

Se considera:

$$\tilde{n} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_m}{e} \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (3.11)$$

Por lo tanto, tenemos que:

$$\frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_m} \left(|e|n_0 \mu_d E_z - |e|\tilde{n}v_0 + |e|D \frac{\partial \tilde{n}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.12)$$

Se considera la siguiente expresión para simplificar la ecuación:

$$\omega_c = \frac{|e|n_0 \mu_d}{\varepsilon_0 \varepsilon_m} \quad (3.13)$$

Conociendo las características $\mu < 0$ y $E < E_z$, reescribimos la ecuación (3.12) tenemos como resultado:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} + v_0 \frac{\partial E_z}{\partial z} - D \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \omega_c E_z = 0 \quad (3.14)$$

3.3. Ondas de carga espacial

Si existen cargas negativas y positivas, la carga espacial representa el exceso de cargas positivas difundidas a través de un volumen con relación al total de las cargas negativas. La carga espacial es una región localizada con un exceso de carga negativa que se produce cerca de un objeto de metal cuando se calienta hasta alcanzar la incandescencia en el vacío.

En este caso, una onda híbrida es el acoplamiento de una onda de carga espacial con una onda acústica. Las ondas acústicas están presentes en materiales piezoeléctricos, además tienen un campo eléctrico crítico y un desplazamiento alto de los electrones en el cristal. La polarización de la onda híbrida se desplaza en la misma dirección en la que se propaga el campo eléctrico.

Para el análisis de las ondas de carga espacial:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} + v_0 \frac{\partial E_z}{\partial z} - D \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \omega_c E_z = 0 \quad (3.14)$$

Considerando las siguientes expresiones:

$$E_z = E_0 e^{i(\Omega t - kz)} \quad (3.15a)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = i\Omega E_z \quad (3.15b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = -iE_z k \quad (3.15c)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} = -k^2 E_z \quad (3.15d)$$

Se puede reescribir la ecuación de ondas de carga espacial como se muestra a continuación:

$$i\Omega E_z + \omega_c E_z - iV_0 k E_z + D k^2 E_z = 0 \quad (3.16a)$$

$$i(\Omega - V_0 k) + D k^2 + \omega_c = 0 \quad (3.16b)$$

$$k^2 - \frac{iV_0 k}{D} + \frac{(i\Omega + \omega_c)}{D} = 0 \quad (3.16c)$$

Se puede resolver el sistema considerándolo como una ecuación cuadrática $ax^2 + bx + c = 0$, tomando $a = 1$, $b = -\frac{iV_0}{D}$, $c = \frac{(i\Omega + \omega_c)}{D}$, la solución está dada por:

$$k_{1,2} = \frac{\frac{iV_0}{D} \pm \sqrt{\left(-\frac{iV_0}{D}\right)^2 - 4\frac{(i\Omega + \omega_c)}{D}}}{2} \quad (3.17)$$

Se considera la siguiente expresión para simplificar la ecuación:

$$\omega_D = \frac{v_0^2}{D} \quad (3.18)$$

La cual representa una frecuencia, que nos simplifica las soluciones como se muestra a continuación:

$$k_1 = \frac{i\omega_D}{v_0} + \frac{i\omega_c}{v_0} - \frac{\Omega}{v_0} \quad (3.19a)$$

$$k_2 = \frac{\Omega}{v_0} - \frac{i\omega_c}{v_0} \quad (3.19b)$$

La primera solución k_1 tiene la parte $\frac{i\omega_D}{v_0}$ que se interpreta como mucha pérdida, se puede decir que esta onda no existe, por lo que solamente nos queda la solución:

$$k = \frac{\Omega}{v_0} - \frac{i\omega_c}{v_0} \quad (3.20)$$

3.4. Ecuación dispersión para amplificación

Usamos las ecuaciones (3.2a) – (3.2e), buscamos la onda con vista híbrida como $e^{i(\omega t - wz)}$, tenemos que:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{s^2} - K^2 k^2 \frac{\omega - kv_0 - ik^2 D}{\omega - kv_0 - i(k^2 D + \omega_M)} \quad (3.21)$$

donde k^2 es el número de onda longitudinal, s es la velocidad del sonido, $K^2 = \frac{\beta^2}{\epsilon_0 \epsilon C}$ es el coeficiente electromecánico para el efecto piezoeléctrico y no tiene unidades, $\omega_M = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0 \epsilon}$ es la relación de la frecuencia de Maxwell, en este caso es positiva por lo que únicamente se toman casos positivos de conductividad σ_0 y movilidad μ y v_0 es la velocidad de los electrones.

Tomamos en cuenta que $k = k_0 + \Delta k(K^2)$ y $\Delta k = \Delta k' + i\Delta k''$, entonces encontramos la solución para la amplificación $\Delta k''$ como la primera aproximación $K^2 < 1$:

$$\Delta k'' = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_M}{s} \cdot K^2 \cdot \frac{1 - \frac{v_0}{s}}{\left(1 - \frac{v_0}{s}\right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_D^2} + \omega_M\right)^2} \quad (3.22)$$

donde $\omega_D = \frac{v_0^2}{D}$ es la frecuencia de difusión.

Conclusión

Utilizando las ecuaciones de Maxwell y las ecuaciones de carga espacial podemos observar el efecto Cherenkov, que sucede cuando la velocidad de los electrones excede la velocidad del sonido, los electrones transmiten su energía a la onda acústica. Existe una onda viajera amplificada en el caso de que el valor sea pequeño $(s - v_0)s = \delta < 1$

Algunas de las aplicaciones que se le podría dar a esta amplificación sería en el campo de aplicación de filtros en los diversos sistemas de comunicación y televisión. Es posible usar una onda acústica-electromagnética para cerrar el sangrado mediante la producción de hipertemia localizada en tejido humano.

Bibliografía

1. Edvaard Sethaziz Jatirian Foltides. Tesis de doctorado: "*Amplificación de ondas electromanéticas en el rango de terahertz e infrarrojo en cristales de InN y GaN*". Universidad Autónoma del Estado de Morelos (2014).
2. G.T. Murray. "*Handbook of materials selection for engineering applications*". CRC Press 1997.
3. Forschungsverbund Berlin e.V. "*Newly Discovered Properties Of Certain Crystals Could Impact The Miniaturization Of Electronic Devices*." ScienceDaily 28 December 2007
4. Koshova, S., Grimalsky, V & Díaz, M. "*Excitación de hipersonido en películas de GaAs y GaN*". México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos 2012.
5. S. V. Koshevaya, V. Grimalsky, M. Tecpoyotl-Torres, J. Escobedo-Alatorre, M. F. Diaz-Ayala and A. Garcia-B. (2006). "*Hyper Sound Amplification*"; 25th International Conference on Microelectronics (MIEL 2006). Belgrade, Serbia and Montenegro. 14-17 May.