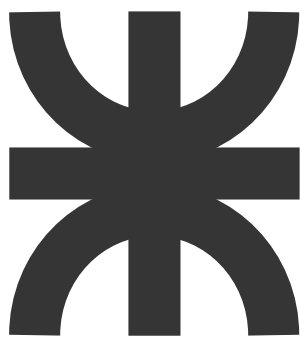


U.T.N. - Facultad Regional Paraná



Trabajo Práctico - BAW Filter

Lautaro Ezequiel Ubiedo

Nanotecnología

2024

Trabajo Práctico - BAW Filter

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 4 |
| 2. Materiales y Métodos | 5 |
| 2.1. Proceso de Fabricación | 6 |
| 2.2. Resolución por Análisis de Elementos Finitos | 7 |
| 2.2.1. Frecuencia de Resonancia | 8 |
| 2.2.2. Admitancia | 9 |
| 2.2.3. Factor Q | 10 |
| 2.3. Resolución Analítica | 11 |
| 2.3.1. Frecuencia de Resonancia | 13 |
| 2.3.2. Admitancia | 15 |
| 2.3.3. Factor Q | 16 |
| 3. Resultados del Análisis de Elementos Finitos | 17 |
| 3.1. Pasos Para Usar el Script de COMSOL Multiphysics en Linux | 17 |
| 3.2. Eigenvalores Obtenidos | 18 |
| 3.3. Respuesta en Frecuencia | 19 |
| 3.4. Factor de Calidad(Q) | 20 |
| 4. Resultados de la Resolución Analítica | 21 |
| 4.1. Frecuencia de Resonancia | 21 |
| 4.2. Respuesta en Frecuencia | 21 |
| 4.3. Factor de Calidad (Q) | 22 |

| | |
|--|-----------|
| <i>U.T.N. Facultad Regional Paraná</i> | 2 |
| 5. Discusión y Conclusión | 23 |
| 6. Referencias | 25 |

Abstract

The report describes the design, analysis, and fabrication of a bulk acoustic wave (BAW) resonator for filtering applications in the 220-225 MHz band, with the aim of comparing it to current ceramic resonators. Finite element analysis (FEA) methods and analytical analysis were used to determine the characteristics of the resonator, such as resonance frequency and quality factor (Q). The FEA results showed high selectivity and signal filtering efficiency, comparable to the values obtained by COMSOL Multiphysics. The advantages of the BAW resonator include high selectivity, reduced size, and better integration into integrated circuits, although it presents challenges in complexity and manufacturing costs compared to ceramic resonators.

Key Words: *BAW Resonator, Resonance Frequency, Quality Factor, Finite Elements Analysis, Signal Filtering*

Resumen

El informe describe el diseño, análisis y fabricación de un resonador de ondas acústicas en volumen (BAW) para aplicaciones de filtrado en la banda de 220-225 MHz, con el objetivo de compararlo con los resonadores cerámicos actuales. Se utilizaron métodos de análisis de elementos finitos (AEF) y análisis analíticos para determinar las características del resonador, tales como la frecuencia de resonancia y el factor de calidad (Q). Los resultados del AEF mostraron una alta selectividad y eficiencia en el filtrado de señales, comparables a los valores obtenidos por COMSOL Multiphysics. Las ventajas del resonador BAW incluyen alta selectividad, tamaño reducido y mejor integración en circuitos integrados, aunque presenta desafíos en la complejidad y costo de fabricación en comparación con los resonadores cerámicos.

Palabras Claves: *Resonador BAW, Frecuencia de Resonancia, Factor de Calidad, Análisis de Elementos Finitos, Filtrado de Señales.*

1. Introducción

Para los radioaficionados de toda América, está habilitado el uso del espectro en el rango de 220-225 MHz (la banda de 1.25 m) [7] es por esto que muchos de los desarrollos realizados en el marco de las comunicaciones de radiofrecuencia(RF) se realizan dentro de este espectro. Durante el diseño y fabricación de los circuitos, siempre resulta que los transmisores de RF son mucho más sencillos de fabricar que los receptores, siendo una parte crucial de los receptores los filtros entrada, ya que si se logra eliminar la mayor parte del ruido desde el principio el resto de los procesos de amplificación, filtrado y decodificación serán circuitos sencillos y robustos, es por eso que se busca siempre mejorar el factor de calidad (Q) de los mismos.

Hoy en día son ampliamente utilizados en los receptores los resonadores cerámicos, su popularidad se debe a su uso en los radioreceptores portátiles de AM y FM[9]. La principal ventaja de estos filtros es su muy bajo costo y fácil uso, sin embargo su rango de frecuencias es muy acotado y además solo sirven como un primer filtrado preliminar debido a su bajo Q. Es debido a esto que se buscó la forma de obtener un componente de fácil uso como el resonador cerámico pero de mucho mejor Q y con capacidad de trabajar en la banda de 1.25m. Teniendo en cuenta lo mencionado previamente es que se buscó diseñar un filtro del tipo BAW (Bulk Acoustic Wave), el cual es sencillo de fabricar y permite obtener un filtro pasa banda de un alto Q.

Los resonadores de ondas acústicas en volumen (BAW, por sus siglas en inglés) son dispositivos que utilizan la resonancia de ondas acústicas para filtrar señales eléctricas, permitiendo aplicaciones precisas en la tecnología de radiofrecuencia. En los receptores de la banda de 1.25 metros (VHF), los BAW se emplean como filtros pasa banda debido a su alta selectividad y estabilidad, lo que permite la sintonización precisa y el rechazo de frecuencias no deseadas, mejorando la calidad de la recepción de señales . Estos filtros son esenciales en aplicaciones donde la interferencia y la precisión son críticas, ofreciendo una solución compacta y eficiente frente a otras tecnologías de filtrado.

En esta informe se verá como se diseña un filtro pasa banda con frecuencia central ubicada en 221 MHz, comprobando el análisis realizado con simulaciones mediante el programa COMSOL 3.5 y analizando el factor Q obtenido en el rango de frecuencias de trabajo deseado.

2. Materiales y Métodos

La Fig. 1 muestra la geometría del resonador modelado en este análisis. La capa inferior del resonador es de silicio, sobre esta se encuentra una capa de aluminio, el cuál hace la función del terminal de ground. La siguiente capa es el piezoelectrico, en este caso hecho de oxido de zinc (ZnO), y sobre este se encuentra otro terminal de aluminio.

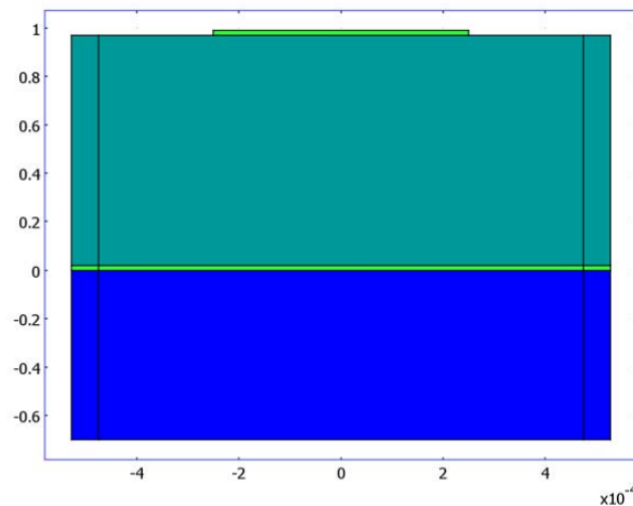


Figura 1: Vista 2D de la Geometría Usada.

Una parte del silicio ha sido removido del centro del resonador, ya que se busca que el espesor de la estructura activa del resonador sea muy pequeña.

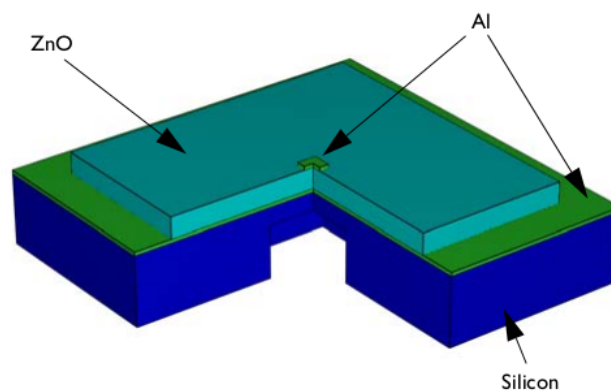


Figura 2: Vista 3D de la Geometría Usada.

La parte central de silicio (la que posee menos espesor) tiene un espesor de 7 μm , mientras que el piezoelectrico tiene un espesor de 9.5 μm . Ambas capas de aluminio tienen un espesor de 200 nm y el electrodo superior tiene una superficie cuadrada cuyo lado es de 500 μm . La parte central de silicio es también cuadrada, con un lado de 1.7 mm.

Se diseñó el resonador sobre silicio ya que tiene una alta rigidez, lo que reduce las pérdidas mecánicas, asegurando así que las ondas acústicas se confinen y se propaguen de manera eficiente dentro del resonador, para obtener así un alto Q . Por otro lado, se optó por usar óxido de zinc debido a que es un piezoléctrico muy compatible con los procesos de fabricación de semiconductores, lo que lo hace fácilmente integrable con otros componentes electrónicos en un solo chip para aplicaciones específicas.

2.1. Proceso de Fabricación

Antes de comenzar con la explicación detallada del proceso de fabricación se recuerda a continuación la estructura, materiales y medidas del resonador BAW a fabricar.

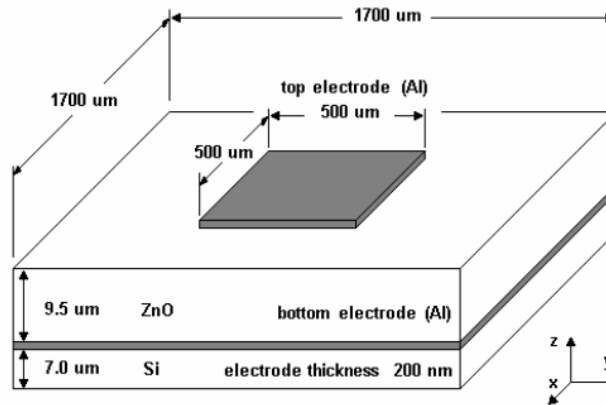


Figura 3: Estructura del Resonador.

De acuerdo con la Fig. 3, el proceso de fabricación se puede sintetizar en 10 pasos:

1. Partiendo de un sustrato de silicio 100, se deposita sobre la parte inferior una capa de dióxido de silicio (SiO_2) de 200 nm mediante el método de deposición química de vapor usando tetrahidruro de silicio (SiH_4) y dióxígeno (O_2).
2. Luego se aplica una máscara usando fotolitografía para así atacar el SiO_2 del cuadrado central para así atacar posteriormente el Si . Usando vapor phase etching con ácido fluorhídrico (HF), esta reacción química elimina el SiO_2 expuesto sin afectar el Si .
3. Una vez se remueve la máscara depositada sobre el SiO_2 se procede a atacar el Si mediante un ataque húmedo usando hidróxido de potasio (KOH), se usa este atacante para realizar un ataque anisotrópico de forma que el Si resultante quede de 7 µm de espesor. Es por esto que se depositaron 220 nm de SiO_2 para usarlo como máscara, ya que el KOH tiene una selectividad de 50:1 para el SiO con SiO_2 .
4. Se remueve el SiO_2 excedente con un ataque químico usando HF , es esta etapa se usa este método porque es más barato y no se necesita tanta precisión.

5. Ahora se debe depositar, en la capa superior, una capa de 200 nm de espesor de aluminio (Al), para lo cual se emplea el método de sputtering, empleando gas argón para crear el plasma.
6. Se aplica una máscara con fotolitografía para así limitar la capa a un área cuadrada de 1.7mm por lado. Ahora se ataca el Al excedente mediante un ataque húmedo usando cloruro férrico ($FeCl_3$) en una concentración del 20 % reducido en agua.
7. Ahora se debe depositar una capa de óxido de zin (ZnO) de 9.5 um de espesor. Para ello se emplea el método de deposición química de vapor metal-orgánico (MOCVD) debido al alto espesor, calidad y uniformidad necesaria. Se introducen en la cámara precursores organometálicos dietilzinc (DEZn) para zinc y fuentes de oxígeno como agua (H_2O) u oxígeno (O_2), así los precursores se descomponen y reacción en la superficie caliente del sustrato, depositando así una capa sólida de ZnO .
8. Una vez depositado el ZnO se debe aplicar una máscara por fotolitografía para luego atacar el piezoeléctrico para que quede con un área cuadrada de 1.7 mm de lado. Para ello se realiza un ataque húmedo mezclando partes iguales de ácido fosfórico (H_3PO_4) y ácido acético (CH_3COOH).
9. Ahora se deposita una nueva capa de Al de 200 nm que será el electrodo superior. La deposición se hace del mismo modo que como se depositó el electrodo inferior.
10. Finalmente, se aplica una máscara con fotolitografía para limitar la capa de Al a un área cuadrada de lado 500 um para luego realizar un atacado húmedo con $FeCl_3$ como se detalló previamente.

2.2. Resolución por Análisis de Elementos Finitos

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de un material piezoeléctrico son 2:

1. Mecánica del Sólido:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{T}} + \mathbf{f} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

donde:

- $\bar{\mathbf{T}}$ es el tensor de estrés mecánico.
- \mathbf{f} es la fuerza de cuerpo (insignificante en este caso).
- ρ es la densidad del material.
- $\ddot{\mathbf{u}}$ es el vector de desplazamiento mecánico.

2. Ley de Gauss:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \sigma \quad (2)$$

donde:

- \mathbf{D} es el campo de desplazamiento eléctrico.
- σ es la densidad de carga ($\sigma = 0$ en este caso al ser aislante).

2.2.1. Frecuencia de Resonancia

La piezoelectricidad relaciona las dos ecuaciones anteriores de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \mathbf{c}^E \mathbf{S} - e^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= e \mathbf{S} + \varepsilon^S \mathbf{E}\end{aligned}\tag{3}$$

donde:

- \mathbf{c}^E la matriz de rigidez elástica (evaluada en un campo eléctrico constante).
- e es la matriz de constantes piezoeléctricas.
- ε^S la matriz de permitividad dieléctrica (evaluada a tensión mecánica constante).
- \mathbf{E} es el campo eléctrico.
- \mathbf{D} es el desplazamiento eléctrico.
- \mathbf{S} es el vector columna de deformación mecánica.

Debido a que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es cinco ordenes de magnitud superior a la velocidad de las ondas acústicas se puede hacer la siguiente aproximación:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi\tag{4}$$

Además, el vector de deformación mecánica se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + ((\nabla \mathbf{u})^T))\tag{5}$$

Donde \mathbf{u} es el vector de desplazamiento mecánico.

Para encontrar los modos propios, se transforman estas ecuaciones en un problema de valores propios (eigenvalores). La formulación variacional se obtiene multiplicando las ecuaciones por funciones de prueba y aplicando integración por partes.

$$\begin{aligned}\int_{\Omega} \rho \ddot{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{c}^E \mathbf{S} + e^T \nabla \phi) : \nabla \mathbf{v} d\Omega &= 0 \\ \int_{\Omega} (e \mathbf{S} - \varepsilon^S \nabla \phi) \cdot \nabla \psi d\Omega &= 0\end{aligned}\tag{6}$$

donde \mathbf{v} y ψ son funciones de prueba.

Al asumir soluciones armónicas del tipo:

- $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{x})e^{i\omega t}$
- $\phi(\mathbf{x}, t) = \phi(\mathbf{x})e^{i\omega t}$

Obtenemos:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \rho \omega^2 \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{c}^E \mathbf{S} + e^T \nabla \phi) : \nabla \mathbf{v} d\Omega &= 0 \\ \int_{\Omega} (e \mathbf{S} - \varepsilon^S \nabla \phi) \cdot \nabla \psi d\Omega &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Esto se puede escribir como un sistema de ecuaciones matriciales:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & -\mathbf{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \phi \end{bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

donde:

- \mathbf{K} es la matriz de rigidez.
- \mathbf{C} es la matriz piezoeléctrica.
- \mathbf{P} es la matriz de permitividad dieléctrica.
- \mathbf{M} es la matriz de masa.

Este sistema de ecuaciones resultante es un problema de valores propios generalizado que se puede resolver utilizando métodos numéricos de elementos finitos. El software de simulación COMSOL Multiphysics discretiza estas ecuaciones y las resuelve para obtener los eigenvalores ω^2 y los eigenvectores \mathbf{u} y ϕ . Una alternativa libre es el uso del paquete de librerías FenicsX para Python.

2.2.2. Admitancia

Para calcular la admitancia $Y(\omega)$, usamos la relación:

$$Y(\omega) = \frac{J_{ns}}{V_0} \quad (9)$$

donde J_{ns} es la corriente a través del electrodo superior y V_0 es el potencial aplicado. La corriente se calcula como:

$$J_{ns} = \int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA \quad (10)$$

Sustituyendo \mathbf{D} :

$$J_{ns} = \int_A (e\mathbf{S} - \varepsilon^S \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dA \quad (11)$$

Finalmente, la admitancia se calcula como:

$$Y(\omega) = \frac{\int_A (e\mathbf{S} - \varepsilon^S \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dA}{V_0} \quad (12)$$

Para conocer como varía la admitancia con la frecuencia se debe obtener el valor del eigenvector ϕ para cada frecuencia, debido a que esto trae consigo un alto coste computacional se acota el rango de frecuencias para facilitar el análisis. En nuestro caso no interesa el rango de la banda de 1.25 metros que va desde 220 MHz hasta 225 MHz.

2.2.3. Factor Q

Para estudiar el factor de calidad $Q(\omega)$ de un resonador de onda acústica (BAW) con respecto a la frecuencia, se puede seguir un enfoque basado en la definición del factor de calidad Q como la relación entre la energía almacenada en el sistema y la energía disipada por ciclo de oscilación. La expresión para el factor de calidad es:

$$Q(\omega) = \frac{\omega W_{es,tot}}{P_{es,tot}} \quad (13)$$

donde ω es la frecuencia angular, $W_{es,tot}$ es el pico de la energía almacenada y $P_{es,tot}$ es la potencia promedio disipada.

La energía total almacenada se puede calcular como la suma de la energía eléctrica y la energía mecánica almacenada:

$$W_{es,tot} = W_{mech} + W_{elec} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{T} : \mathbf{S} d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\Omega \quad (14)$$

Por otro lado, la potencia total disipada se puede calcular como la suma de la potencia eléctrica disipada y la potencia mecánica disipada, ambas proporcionales a la energía almacenada mediante un factor de pérdida η .

$$P_{es,tot} = \eta_{mech} W_{mech} + \eta_{elec} W_{elec} \quad (15)$$

siendo en este caso $\eta_{mech} = 0,001$ y $\eta_{elec} = 0,01$.

Como los valores de energía almacenada, tanto mecánica como eléctrica, dependen de los eigenvectores obtenidos, este análisis también se verá acotado al rango de frecuencias de interés solamente debido al costo computacional que implicaría un mayor análisis.

2.3. Resolución Analítica

Para contrastar los resultados del análisis por elementos finitos se realizó también el análisis matemático de forma analítica modelando las ecuaciones de piezoelectricidad, determinando las condiciones de frontera y de operación del resonador para así hallar las soluciones analíticas.

Lo primero que se debe hacer es describir el comportamiento del piezoeléctrico mediante las ecuaciones de piezoelectricidad lineal. Estas ecuaciones relacionan el campo eléctrico y el campo mecánico a través de las constantes piezoeléctricas.

La ecuación constitutiva piezoeléctrica en forma tensional es:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde:

- σ_{ij} son los componentes del tensor de tensiones.
- ε_{ij} son los componentes del tensor de deformaciones.
- c_{ij} son las constantes elásticas del material.
- e_{ij} son las constantes piezoeléctricas.
- E_i son los componentes del campo eléctrico.

Para simplificar, consideraremos el eje de propagación a lo largo del eje z (longitudinal), por lo que las ecuaciones se pueden reducir.

Volviendo a recordar la geometría del resonador BAW, tenemos un electrodo de ground en la base, una capa de piezoeléctrico (ZnO) en el medio y un electrodo positivo en la parte superior, todo montado sobre un sustrato de silicio. Las dimensiones son:

- Capa de Silicio: 1700um x 1700um x 7 um
- Capa de Aluminio Inferior (Ground): 1700um x 1700um x 0.2um
- Capa de ZnO: 1700um x 1700um x 9.5um
- Capa de Aluminio Superior (Electrodo +): 500um x 500um x 0.2um

Se deberán tener en cuenta las siguientes dos condiciones de frontera:

1. Electrodo Inferior (Ground):

- Mecánicamente: La base está restringida, lo que implica que el desplazamiento u en $z = 0$ es cero.
- Eléctricamente: El potencial eléctrico ϕ en $z = 0$ es cero (electrodo de masa).

2. Electrodo Superior (Positivo):

- Mecánicamente: La superficie superior del piezoeléctrico en $z = d$ tiene una condición de carga libre, lo que implica que la tensión σ_{zz} es cero.
- Eléctricamente: Se aplica un potencial eléctrico $\phi = V_0$ en $z = d$.

El análisis del resonador BAW se realiza usando la ecuación de onda para un medio piezoeléctrico, la cual al simplificarla para una dimensión queda de la siguiente manera:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_{33} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + e_{33} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (17)$$

Donde:

- ρ es la densidad del material piezoeléctrico.
- u es el desplazamiento en la dirección z .
- c_{33} es la constante elástica en la dirección z .
- e_{33} es la constante piezoeléctrica en la dirección z .
- ϕ es el potencial eléctrico.

Para el potencial eléctrico tenemos que:

$$\varepsilon_{33} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -e_{33} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (18)$$

Donde ε_{33} es la permitividad dieléctrica.

2.3.1. Frecuencia de Resonancia

Para encontrar la frecuencia de resonancia, consideramos las soluciones armónicas para el desplazamiento y el potencial eléctrico:

$$\begin{aligned} u(z, t) &= U(z)e^{j\omega t} \\ \phi(z, t) &= \Phi(z)e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (19)$$

Sustituyendo en las ecuaciones de onda:

$$\begin{aligned} -\rho\omega^2 U &= c_{33} \frac{d^2 U}{dz^2} + e_{33} \frac{d^2 \Phi}{dz^2} \\ \varepsilon_{33} \frac{d^2 \Phi}{dz^2} &= -e_{33} \frac{d^2 U}{dz^2} \end{aligned} \quad (20)$$

Estas ecuaciones acopladas pueden combinarse en una única ecuación diferencial:

$$\left(c_{33} + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}}\right) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \quad (21)$$

La solución general para $U(z)$ es: $U(z) = A\cos(kz) + B\sin(kz)$. Donde:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega}{v} \\ v &= \sqrt{\frac{c_{33} + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}}}{\rho}} \end{aligned} \quad (22)$$

Aplicando las condiciones de frontera en $z = 0$:

$$U(0) = 0 \longrightarrow A = 0 \quad (23)$$

Por lo tanto, $U(z) = B\sin(kz)$.

Aplicando las condiciones de frontera en $z = d$:

$$\sigma_{zz} = 0 \longrightarrow c_{33} \frac{dU}{dz} + e_{33} \frac{d\Phi}{dz} = 0 \quad (24)$$

Usando la solución $U(z) = B\sin(kz)$:

$$\frac{dU}{dz} = Bk\cos(kd) \quad (25)$$

Al aplicar la condición de frontera eléctrica en $z = d$ se obtiene:

$$\phi(d) = V_0 \longrightarrow \Phi(d) = V_0 \quad (26)$$

La relación entre $U(z)$ y $\Phi(z)$ dada por las ecuaciones acopladas implica que:

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} = -\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} \frac{d^2U}{dz^2} \quad (27)$$

Solucionando esta ecuación para $\Phi(z)$:

$$\Phi(z) = \frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} U(z) + C_1 z + C_2 \quad (28)$$

Aplicando la condición en $z = d$:

$$\Phi(d) = V_0 = \frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} B \sin(kd) + C_1 d + C_2 \quad (29)$$

Para satisfacer la condición de carga libre en $z = d$:

$$c_{33} k \cos(kd) + e_{33} \left(\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} B k \cos(kd) + C_1 \right) = 0 \quad (30)$$

Simplificando:

$$\left(c_{33} + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}} \right) k \cos(kd) + e_{33} C_1 = 0 \quad (31)$$

Debido a que la solución no trivial debe ser válida: $kd = n\pi$ donde n es un entero. Por lo tanto la frecuencia de resonancia ω_r , se obtiene como:

$$\omega_e = \frac{n\pi v}{d} \quad (32)$$

Para el modo fundamental $n = 1$:

$$\omega_r = \frac{\pi v}{d} \quad (33)$$

Donde:

$$v = \sqrt{\frac{c_{33} + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}}}{\rho}} \quad (34)$$

Para una onda longitudinal en una capa de ZnO de espesor d , la frecuencia de resonancia fundamental es aproximadamente:

$$f_r = \frac{v}{2d} \quad (35)$$

2.3.2. Admitancia

Para calcular la admitancia del resonador BAW podemos pensarlo como un circuito equivalente que tiene un RLC serie en paralelo con un capacitor tal cual se ve en la siguiente figura:

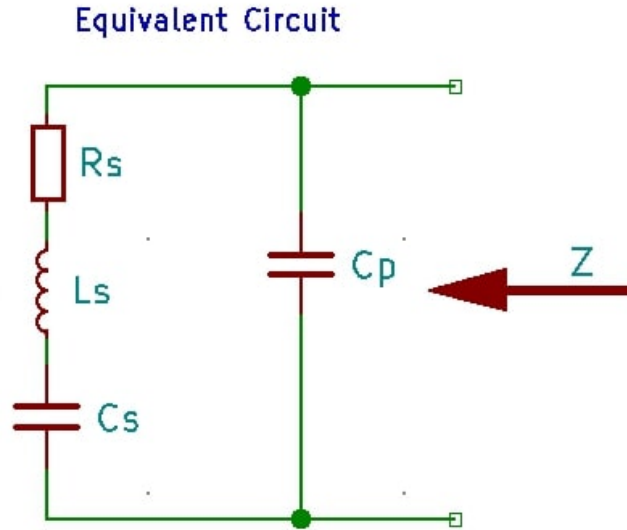


Figura 4: Circuito Equivalente

Así, la admitancia total del resonador se puede obtener de la siguiente manera:

$$Y(\omega) = j\omega C_p + \left(\frac{1}{R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}} \right) \quad (36)$$

Este análisis se basa en traducir los efectos mecánicos de inercia, fricción y rigidez del piezoeléctrico a un circuito eléctrico, esto se ve representado por el RLC serie. Por otro lado, el capacitor en paralelo representa un capacitor de placas paralelas que se forma al tener dos electrodos de aluminio separados por un material aislante como el ZnO (haciendo de dieléctrico).

Los parámetros del circuito serie son tres:

- R_s : La resistencia serie es un valor que normalmente se determina experimentalmente, pero para este caso se va a asumir que $R_s = 1\Omega$
- L_m : La inductancia serie se calcula de la siguiente manera.

$$L_s = \frac{\rho \cdot d}{A \cdot c_{33}} \quad (37)$$

Donde ρ es la densidad del ZnO, c_{33} es la constante elástica del ZnO, e_{33} es la constante piezoeléctrica del ZnO y ϵ_{33} es la permitividad dieléctrica del ZnO.

- C_m : La capacitancia serie en este caso se calcula a partir de la inductancia serie y la frecuencia de resonancia previamente calculada.

$$C_s = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot L_s} \quad (38)$$

Para terminar el análisis del circuito equivalente, la capacitancia paralela se puede calcular como un capacitor de placas paralelas:

$$C_p = \frac{\varepsilon_{33} \cdot A}{d} \quad (39)$$

Donde A es el área del electrodo superior y d es el espesor de la capa de ZnO.

2.3.3. Factor Q

El factor de calidad se calcula de forma similar al caso del análisis por elementos finitos, ya que se considerará que la energía disipada es proporcional a la energía almacenada por un factor de rendimiento η , tanto para la energía mecánica como para la energía eléctrica. De esta forma se define el factor de calidad Q como:

$$Q(\omega) = 2\pi \frac{E_S}{E_D} \quad (40)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} E_S &= W_{mec} + W_{elec} \\ E_D &= 2\pi(\eta_{mec}W_{mec} + \eta_{elec}W_{elec}) \end{aligned} \quad (41)$$

La energía mecánica almacenada se define como:

$$W_{mec} = \frac{1}{2} \cdot L_s \cdot \left(\frac{V_0}{\omega \cdot L_s}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_0^2}{\omega^2 \cdot L_s} \quad (42)$$

Mientras que la energía eléctrica se define como:

$$W_{elec} = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot V_0^2 \quad (43)$$

3. Resultados del Análisis de Elementos Finitos

Se realizó un script en Java para realizar el análisis anterior COMSOL Multiphysics 6.1.

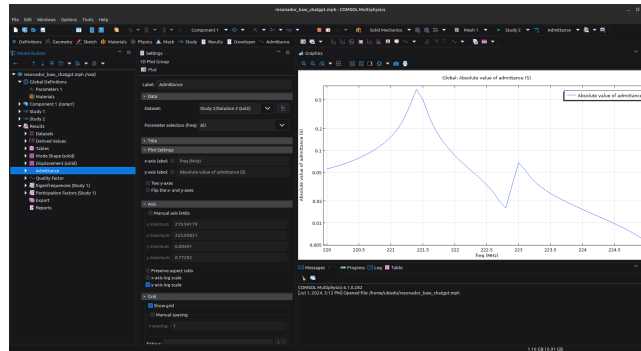


Figura 5: Evaluación del Script Creado.

Tanto el script en formato .java como sus archivos en formato .class y .mph listos para ejecutar en COMSOL Multiphysics pueden ser accedidos de forma libre y gratuita a través de su *repositorio en GitHub*

3.1. Pasos Para Usar el Script de COMSOL Multiphysics en Linux

1. **Abrir una Terminal de Comandos:** Ubíquese en la carpeta donde quiere almacenar el script y habrá allí una terminal de comandos.
2. **Clonar el repositorio:** En la terminal de comandos ingrese `git clone https://github.com/ezequiel1611/thin_film_baw_resonator` y presione Enter para crear una copia local del script en su computadora.
3. **Ingresar en la Carpeta:** En la terminal de comandos ingrese `cd thin_film_baw_resonator`
4. **Compilar el script:** En la terminal de comandos ingrese `COMSOL path/bin/comsol compile resonador_baw_chatgpt.java` reemplazando COMSOL path por la ubicación donde tiene usted instalado COMSOL Multiphysics.
5. **Ejecutar el Modelo:** Una vez compilado el script, se generará un nuevo archivo con el mismo nombre pero con extensión .class. Abra COMSOL Multiphysics, seleccione File->Open y seleccione el archivo nuevo creado para ejecutar el modelo.

3.2. Eigenvalores Obtenidos

Al realizar el análisis del sistemas de ecuaciones matriciales se logró hallar que la frecuencia de resonancia del dispositivo es:

| Eigenfrequency (MHz) | Quality factor for eigenvalue (1) |
|----------------------|-----------------------------------|
| 221.42+0.083604i | 1319.2 |

Figura 6: Frecuencia de Resonancia del Dispositivo.

3.3. Respuesta en Frecuencia

Para corroborar el resultado obtenido en el análisis anterior, se estudió como varía la admitancia del resonador BAW con respecto a la frecuencia, de ser la frecuencia de resonancia la correcta, se debería observar que el módulo de la admitancia es máxima para la frecuencia de resonancia.

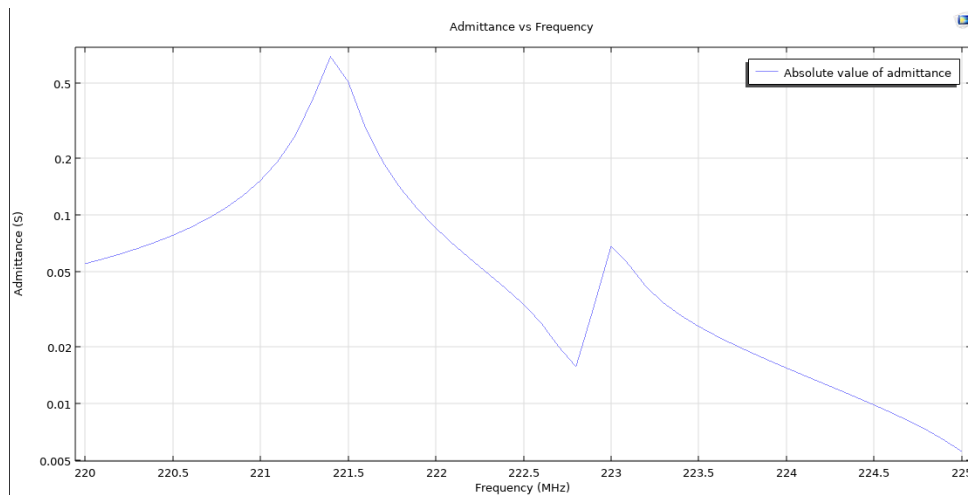


Figura 7: Módulo de la Admitancia en Función de la Frecuencia.

Como se puede observar en la Fig. 7 el módulo de la admitancia tiene un pico justo antes de alcanzar la frecuencia de 221.5 MHz, por lo que la frecuencia de resonancia coincide entonces con el pico de admitancia máxima, verificando así el resultado previo.

3.4. Factor de Calidad(Q)

Para que se justifique el uso de este tipo de filtros pasa banda en los dispositivos de radiofrecuencia para la banda libre de 220-225 MHz el factor de calidad debe ser muy superior al de los resonadores cerámicos comerciales que se usan hoy en día, de esta forma aunque el precio sea mayor se verá un beneficio notable. Tomando de referencia el fabricante TEMEX, es difícil hallar en el mercado resonadores cerámicos con un factor de calidad mayor a 500 [10]. Por otra parte, este resonador BAW a la frecuencia de resonancia presenta un $Q = 1319$, lo que lo hace muy superior a los resonadores cerámicos comerciales.

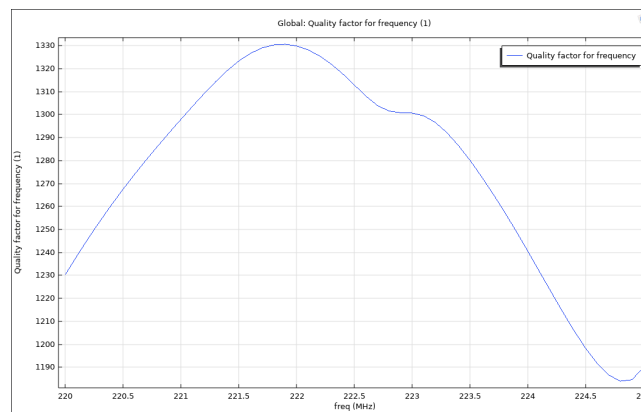


Figura 8: Factor de Calidad en Función de la Frecuencia.

4. Resultados de la Resolución Analítica

4.1. Frecuencia de Resonancia

Recordando el análisis realizado previamente, sabemos que la frecuencia de resonancia para una onda longitudinal en una capa de ZnO de espesor d es aproximadamente:

$$f_r = \frac{v}{2d} \quad (44)$$

Siendo:

$$v = \sqrt{\frac{c_{33} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}}}{\rho}} \quad (45)$$

En este caso tenemos que:

$$\begin{aligned} c_{33} &= 140 \times 10^9 Pa \\ e_{33} &= 0,428 C/m^2 \\ \epsilon_{33} &= 8,31 \cdot 8,854 \times 10^{-12} F/m \\ \rho &= 5606 kg/m^3 \end{aligned} \quad (46)$$

Reemplazando se obtiene que $v = 5041,56 m/s$, por lo tanto la frecuencia de resonancia es:

$$f_r = \frac{5041,56 m/s}{2 \cdot 9,5 \times 10^{-6} m} = 265,34 MHz \quad (47)$$

4.2. Respuesta en Frecuencia

Recordando el análisis del circuito equivalente del resonador BAW, sabemos que debemos hallar los valores de L_s , C_s y C_p . Para ello emplearemos los mismos datos anteriormente usados para hallar la frecuencia de resonancia.

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{\rho \cdot d}{A \cdot c_{33}} = 1,52 \mu H \\ C_s &= \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot L_s} = 240,37 fF \\ C_p &= \frac{\epsilon_{33} \cdot A}{d} = 2,21 pF \end{aligned} \quad (48)$$

Teniendo estos valores y considerando $R_s = 1\Omega$ se realizó un script en Python para poder graficar el módulo de la admitancia en función de la frecuencia, esto dio como resultado lo siguiente:

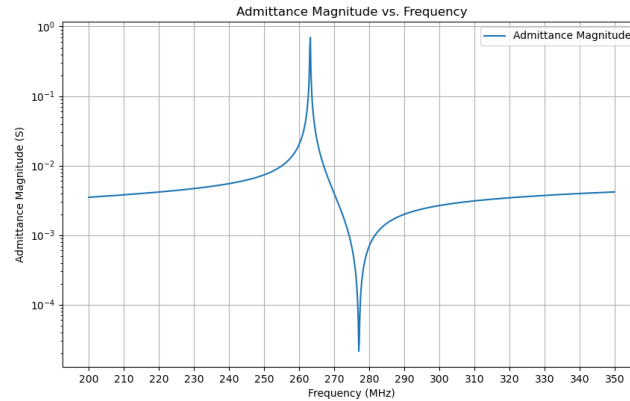


Figura 9: Módulo de la Admitancia Respecto a la Frecuencia.

Como se puede observar hay un pico en la frecuencia de resonancia, corroborando el análisis realizado previamente.

4.3. Factor de Calidad (Q)

Para el factor Q no se realizó un calculo numérico puntual sino que se cargaron las ecuaciones resultantes del análisis en un script de Python para así graficar el factor de calidad con respecto a la frecuencia, de esta forma se podrá corroborar si tenemos un Q máximo cuando $f = f_r$. El resultado de este análisis fue el siguiente:

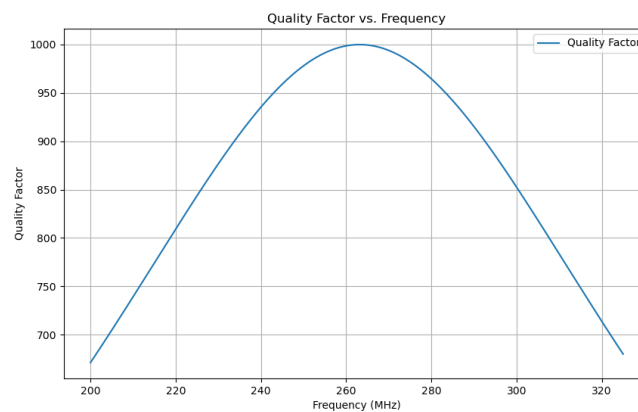


Figura 10: Factor de Calidad Respecto a la Frecuencia.

Cuando se da que $f = f_r$ se tiene un $Q = 1000$.

5. Discusión y Conclusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de elementos finitos (AEF) realizado en COMSOL, los resultados de la resolución analítica y los resultados obtenidos en el análisis provisto por COMSOL Multiphysics.

| Estudio | Frecuencia de Resonancia | Factor de Calidad | Módulo de la Admitancia |
|-----------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| AEF | 221.42 MHz | 1319 | 0.68 S |
| Analítica | 265.34 MHz | 1000 | 0.75 S |
| COMSOL | 221.40 MHz | 1330 | 0.72 S |

Cuadro 1: Comparación de los Resultados.

Si bien los resultados obtenidos mediante la resolución analítica están en el orden de magnitud de los demás, se ve una discrepancia importante, entendemos que esto se debe a las muchas simplificaciones tomadas para poder realizar una resolución de forma más sencilla. Por otro lado, la resolución realizada por AEF presentó resultados muy similares a los del paper provisto por COMSOL Multiphysics por lo que es una referencia mucho más fiel de la realidad, es por esto que tomaremos estos valores para comparar el resonador BAW con el resonador cerámico para así ver cuales son las diferencias entre ellos.

Los resultados obtenidos del AEF revelan que el resonador BAW diseñado presenta características de resonancia adecuadas para su uso como filtro pasabanda en la banda de 220-225 MHz. Los eigenvalores y eigenvectores calculados permitieron identificar las frecuencias de resonancia del dispositivo. Además, el estudio de la admitancia en función de la frecuencia mostró un comportamiento consistente con el esperado para filtros pasabanda, con un pico de admisión en la frecuencia de resonancia y una atenuación adecuada fuera de la banda. El análisis del factor de calidad (Q) indicó que el resonador BAW posee un Q considerablemente alto en la banda de frecuencia de interés. Esto es indicativo de bajas pérdidas de energía y, por ende, de una alta selectividad y eficiencia en el filtrado de señales[11][6].

Comparando el resonador BAW con los resonadores cerámicos, se observan varias ventajas y desventajas. Entre las ventajas destacadas del resonador BAW se encuentran:

- **Alta Selectividad:**El resonador BAW presenta un alto factor de calidad (Q), lo que resulta en una mejor selectividad y menor ancho de banda de paso en comparación con los resonadores cerámicos[1][3].
- **Tamaño y Peso:**Los resonadores BAW son típicamente más pequeños y ligeros que los cerámicos, lo que es beneficioso para aplicaciones donde el espacio y el peso son críticos[5][11].
- **Integración:**Los BAW pueden integrarse más fácilmente en circuitos integrados (IC), permitiendo diseños más compactos y robustos[11][4].

Sin embargo, también se presentan algunos desafíos y desventajas:

- **Complejidad de Fabricación:** La fabricación de resonadores BAW puede ser más compleja y costosa debido a la precisión requerida en la deposición de capas y el control de materiales[11][3].
- **Materiales:** Los resonadores cerámicos, como los basados en materiales piezoeléctricos cerámicos, han sido optimizados durante años y ofrecen una excelente estabilidad térmica y de frecuencia, características que los BAW aún están alcanzando[8][2].
- **Costo:** Aunque los BAW ofrecen ventajas significativas, el costo de producción puede ser más elevado en comparación con los resonadores cerámicos, especialmente en volúmenes bajos[11].

En conclusión, el análisis realizado demuestra que los resonadores BAW son una alternativa viable y efectiva a los resonadores cerámicos para aplicaciones en la banda de 1.25 metros. No obstante, la elección entre BAW y resonadores cerámicos dependerá de factores específicos de la aplicación, incluyendo el costo, la complejidad de integración y los requisitos de rendimiento.

6. Referencias

Referencias

- [1] Johan Bjurström e Ivaylo Katardjiev. “Silicon bulk acoustic resonator coupling and quality factor dependence on silicon device layer thickness”. En: *Journal of micromechanics and microengineering* 14.7 (2004), pág. 415.
- [2] Colin Campbell. “Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications”. En: *Academic Press* (1998).
- [3] Yung-Chang Chen, Albert P Pisano y Albert P Wong. “An overview of piezoelectric MEMS devices for acoustic sensing and actuation”. En: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.9 (2006), R1.
- [4] Per Delsing, Gang Yan y Alvin R Rosenbaum. “Micromachined bulk wave resonators for wireless communications”. En: *Sensors and Actuators A: Physical* 66.1-3 (1998), págs. 135-142.
- [5] Koichi-Yu Hashimoto. “RF bulk acoustic wave resonators for wireless communications”. En: *Artech House* (2009).
- [6] Kenneth M Lakin, Ji Fang Wang y G Kline. “High performance bulk acoustic wave resonators and filters”. En: *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on* 46.4 (2000), págs. 819-828.
- [7] Tom Mooring. “FCC Online Table of Frequency Allocations”. En: *Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology Policy and Rules Division* (2022).
- [8] Russell A Parker y Robert G Mock. “Ceramic resonators and filters”. En: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 49.10 (2002), págs. 1410-1423.
- [9] Ian Poole. *Ceramic Filter & Resonator: RF & IF Bandpass Filter*. https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/quartz-crystal-xtal/ceramic-if-rf-bandpass-filter.php. Accessed on 17-06-2024.
- [10] TEMEX. *Ceramic Coaxial Resonator*. https://www.rf-microwave.com/resources/products_attachments/5a4386ceb6f27.pdf. Accessed on 17-06-2024.
- [11] Dana D Weinstein. “Bulk acoustic wave resonators and their applications”. En: *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on* 57.1 (2010), págs. 179-196.