

Amplificadores de microondas con FET de As Ga en banda L.

4-1* Componentes en microondas

La miniaturización es una prioridad fundamental en la industria de los componentes utilizados en microondas, pues las ventajas que ofrecen los circuitos integrados de muy pequeño tamaño no se pueden materializar a menos que el tamaño de los componentes se reduzca también de forma análoga; además, el comportamiento en frecuencias de microondas mejora muchísimo al usar estos componentes. La realización de esta premisa es la aparición de los componentes cerámicos CHIP, multicapas o monolíticos. Trataremos de exponer a través de sus características y parámetros, un conocimiento que nos permita el correcto uso de estos elementos, imprescindibles en circuitos de alta frecuencia.

4-2* Capacitores

Los capacitores, elementos capaces de almacenar energía eléctrica, son usados en la industria electrónica en variadas aplicaciones: elementos de circuitos resonantes, en acoples, desacoples, bloqueo de corriente continua, filtros, líneas de retardo y supresión de transitorios.

La energía almacenada es proporcional a la tensión aplicada.

$$Q = C V$$

4-1

La capacidad C en un elemento, expresada en Faradios, depende de las propiedades del material usado como dieléctrico y de su geometría, es decir, el área de los electrodos y su separación.

Podemos expresarla:

$$C = Q / V = K A / e$$

4-2

donde:

K = cte dieléctrica relativa del material colocado entre los electrodos.

A = área que cubren los electrodos.

e = espesor del dieléctrico.

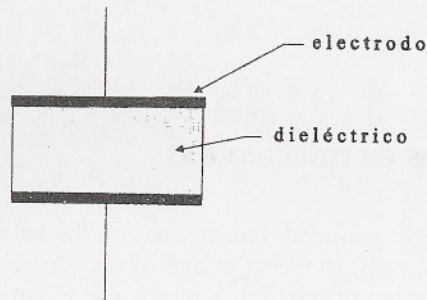


Figura 4-1* Representación de corte de un capacitor.

La eficiencia volumétrica del capacitor, Faradio/cm³, puede ser maximizada:

- 1-Incrementando K.
- 2-Incrementando A.
- 3-Reduciendo e.

La construcción de multicapas en forma monolítica maximiza el factor geométrico porque aumenta el área de los electrodos manteniendo un pequeño volumen, como se observa en la figura 4-2.

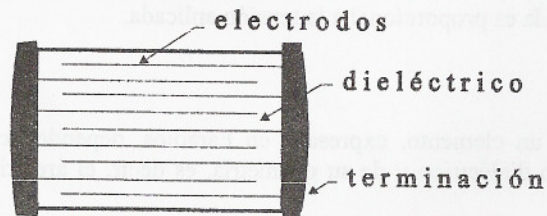


Figura 4-2 * Representación de corte de un capacitor chip.

Esta construcción, usada con cerámicos de alta constante dieléctrica y gran rigidez dieléctrica, permite tener una multitud de capas muy finas, logrando sobrepasar la eficiencia volumétrica de otros tipos de capacitores.

Los capacitores conformados de esta manera reciben el nombre de capacitores tipo CHIP (CHIP capacitors).

La capacidad se puede expresar como:

$$C = K A N / e$$

4-3

donde N es el número de capas dieléctricas.

Si deseamos calcular la capacidad podemos usar la siguiente expresión, que permite determinar dicho valor en Faraday.

$$C = K A N / (11,3 \cdot 10^6) e \quad [\mu F]$$

4-4

donde A está dado en cm², e en cm, y 11,3 · 10⁶ es un factor de conversión de unidades.

4-3* Propiedades eléctricas

Para entender los materiales dieléctricos cerámicos, veremos algunas propiedades eléctricas de los dieléctricos en general.

• Constante dieléctrica

La constante dieléctrica en cualquier material aislador, ocurre debido a la interacción entre un campo eléctrico aplicado y las cargas localizadas en el dieléctrico. Las cargas no son transferidas pero sí desplazadas por el campo, las cargas positivas hacia el electrodo negativo y las negativas hacia el positivo. En los dieléctricos cerámicos con gran constante dieléctrica, las cargas fácilmente polarizadas se corren creando un efecto de polarización con oposición al campo eléctrico aplicado, produciendo mayores cargas en los electrodos.

Este crecimiento del efecto de polarización se debe a cuatro mecanismos:

- 1.- Desplazamiento electrónico.
- 2.- Desplazamiento iónico.
- 3.- Orientación de dipolos permanentes.
- 4.- Polarización de carga espacial.

Todos estos mecanismos que contribuyen a formar la constante dieléctrica son dependientes de la temperatura, la tensión continua aplicada, frecuencia y tensión alterna.

• **Factor de disipación y factor de potencia.**

Cuando una tensión es aplicada a un capacitor, una corriente de cargas fluye a través de él, y esta corriente está retardada con respecto a la tensión de un capacitor **sin pérdidas**, en 90° . En un dieléctrico real ese ángulo de fase ideal es imposible por dos razones:

- Ningún dieléctrico es un perfecto aislador, entonces ocurre una pequeña corriente de pérdidas.
- Los mecanismos de polarización de una cerámica no son eficientes al 100%, es decir, el capacitor no descarga el total de la energía absorbida en el ciclo de carga. Estas pérdidas denominadas de relajación se manifiestan en calor y en una desviación de los 90° de fase entre la corriente y la tensión (figura 4-3).

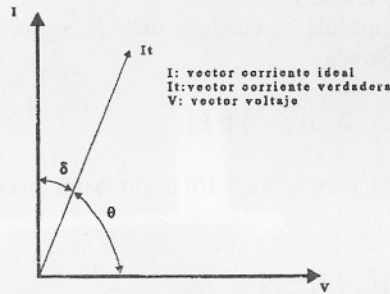


Figura 4-3 * Representación tensión-corrientes en un capacitor.

Si consideramos el diagrama vectorial tensión-corriente para un capacitor real, donde R_p es la resistencia de las pérdidas y X es la reactancia total del capacitor, tendremos:

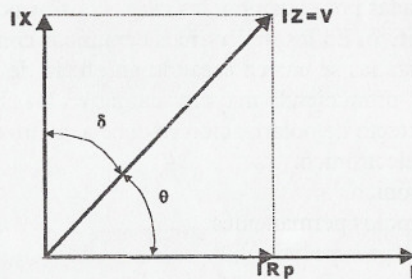


Figura 4-4 * Diagrama vectorial tensión - corriente para un capacitor real.

Se denomina Factor de Potencia a la relación de la potencia real con la aparente de un sistema, y se representa por el coseno del ángulo de fase que forman los vectores de tensión y corriente.

$$\cos \theta = \frac{P_{\text{real}}}{V \cdot I} = \frac{I^2 \cdot R}{I^2 \cdot Z} = R/Z \quad 4-5$$

El ángulo de pérdidas δ , que es el complemento del ángulo θ , está determinado por los vectores de tensión sobre la resistencia de pérdidas y de tensión sobre la componente reactiva. Este ángulo sirve para expresar el apartamiento entre las corrientes ideal y verdadera, o, puesto de otra forma, las pérdidas del capacitor con respecto a su reactancia, que podemos expresar como:

$$\text{tg } \delta = I \cdot R_p / I \cdot X = R_p / X \quad 4-6$$

Expresión que recibe la denominación de tangente del ángulo de pérdidas o Factor de Disipación. Cuanto menor es la $\text{tg } \delta$ más se aproxima al ideal.

• **Factor de mérito Q**

Es la recíproca del factor de disipación:

$$Q = 1 / \text{tg } \delta \quad 4-7$$

También podemos usar la expresión clásica del Q que relacione la potencia reactiva con la potencia activa.

$$Q = 1 / 2 \pi f C R_s \quad 4-8$$

donde R_s es la resistencia serie equivalente de pérdidas, y por lo tanto podemos decir que Q depende de la frecuencia. Por ser dificultosa su medida en altas frecuencias debido a sus bajos valores, es un parámetro no usado en ese rango de frecuencia.

• **Coefficiente de temperatura (CT).**

El coeficiente de temperatura de un dieléctrico cerámico define la desviación en la capacidad en un rango de temperatura determinado. Los dieléctricos cerámicos, especialmente los de BaTiO_3 , sufren variaciones en la corriente dieléctrica debido a efectos de energía térmica producidos por la movilidad en los átomos de Ti.

El CT se expresa en porcentos del cambio de temperatura, o en parte por millón por cada grado centígrado, desde 25° C tomado como referencia.

- **Coefficiente de tensiones continuas (CV).**

Muestra el efecto de la disminución de la constante dieléctrica con el aumento de la tensión continua, debido a que son afectados los mecanismos de polarización. Es expresado en porcentaje de variación de capacidad en función de la tensión de corriente continua (Vcc).

- **Coefficiente de temperatura-tensión.**

Como los capacitores deben operar con diferentes valores de tensión sobre ciertos rangos de temperaturas, es necesario combinar el efecto de la temperatura y la tensión. Es expresado en porcentaje de capacidad en función de Vcc y CT.

- **Resistencia de aislación.**

La resistencia de aislación es una medida de la habilidad del capacitor cargado para resistir una corriente continua de pérdidas. Las variaciones en la resistencia de aislación se deben a:

a) Cambios en la resistividad superficial.

b) Cambio en la resistividad de masa del dieléctrico, debido a causas internas o externas.

La aislación en capacitores de alto valor es expresada como el producto **R** por **C**, en ohm-faradios o megaohm-microfaradios. Las normas RETMA especifican 1000 para $C > 0,01$ microfaradios, y para $C < 0,01$ se expresa directamente en ohms y son del orden de 110.

- **Tensión de ruptura.**

La tensión de ruptura es definida como el gradiente de tensión que produce la ruptura eléctrica del capacitor. Se expresa en Volt/cm de dieléctrico.

- **Tiempo de vida.**

La variación de la constante dieléctrica exhibe una dependencia con el tiempo conocida como **AGEING** que depende de la composición y del proceso. Esta variación, que generalmente decae logarítmicamente con el tiempo, es expresada como porcentaje de variación de **C**, en términos de décadas de horas, como por ejemplo: $\Delta C = 2\%$ décadas de horas, entre 0,1 y 1 hora después de enfriar al Punto de Curie, que es donde el material usado como dieléctrico cambia su estructura cristalina.

- **Impedancia de un capacitor.**

Para comprender el valor de la impedancia de un capacitor es conveniente tener bien en claro sus características reales.

Un circuito equivalente para explicar la variación de la impedancia en función de la frecuencia es el mostrado en la figura 4-5.

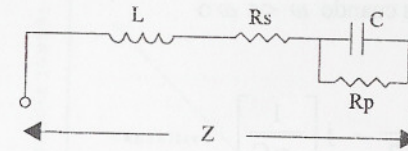


Figura 4-5 * Circuito equivalente de un capacitor.

Donde:

Rs: Resistencia serie equivalente (RSE) consiste en la resistencia ohmica de los electrodos y los terminales.

L: Inductancia serie equivalente (LSE) o inductancia intrínseca del capacitor, que depende exclusivamente de su tamaño.

C: Capacidad.

Rp: Resistencia de aislación (RA).

La impedancia del circuito de la figura será:

$$Z = R_s + j\omega L + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C} \quad 4-9$$

Luego:

$$Z = R_s + j\omega L + \frac{\frac{1}{R_p} + j\omega C}{\left(\frac{1}{R_p}\right)^2 + (j\omega C)^2} \quad 4-10$$

Simplificando ya que $1/R_p \ll \omega^2 C^2$, entonces:

$$Z = R_s + \frac{1}{\omega^2 C^2} - j \left[\frac{1}{\omega C} - \omega L \right] \quad 4-11$$

Si $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, entonces cuando $\omega \ll \omega_0$

$$Z = R_s + \frac{R_p}{\omega^2 C^2} - j \left[\frac{1}{\omega C} \right] \quad 4-12$$

y como $R_s + \frac{R_p}{\omega^2 C^2} \ll \frac{1}{\omega C}$

$$Z = 1 / \omega C \quad 4-13$$

si $\omega = \omega_0$ y como $\frac{R_p}{\omega^2 C^2} \ll R_s$ entonces:

$$Z = R_s \quad 4-14$$

Si $\omega \gg \omega_0$ y como $R_s \ll \omega L$, luego

$$Z = \omega L \quad 4-15$$

Por lo tanto, si representamos $Z=f(f)$ tendremos:

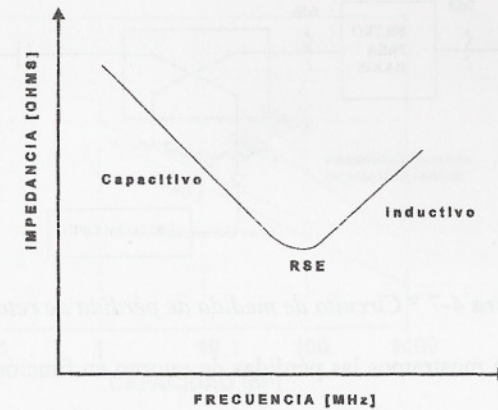


Figura 4-6 * Impedancia de un capacitor vs frecuencia.

Si trabajamos en baja frecuencia, por lo general el diseñador no tiene en cuenta o no conoce cuál es la frecuencia de resonancia serie cuando elige un capacitor para acople o desacople. Sólo le interesa que tenga un alto Q o bajas pérdidas.

En alta frecuencia la selección es más compleja y conviene remarcar el problema de la resonancia serie.

4-4* Resonancia serie

A la frecuencia en que se produce la resonancia serie, las resonancias capacitiva e inductiva se cancelan y el capacitor presenta su menor impedancia, en un estado que algunos denominan como **Transparente** a la energía.

Para conocer la frecuencia de resonancia serie de un capacitor CHIP se observan las pérdidas de retorno del capacitor montado en un probador sobre un rango amplio de frecuencias. A medida que la frecuencia aumenta, las pérdidas de retorno disminuyen hasta alcanzar un punto mínimo y volver a incrementarse. En ese mínimo leemos la frecuencia de resonancia serie. Recordamos que las pérdidas de retorno se aplican como la relación logarítmica entre la onda reflejada e incidente expresadas en dB: $20 \log E^- / E^+$.

El método para medir pérdidas de retorno incluye un acoplador direccional de alta directividad en un circuito como muestra la figura 4-7.

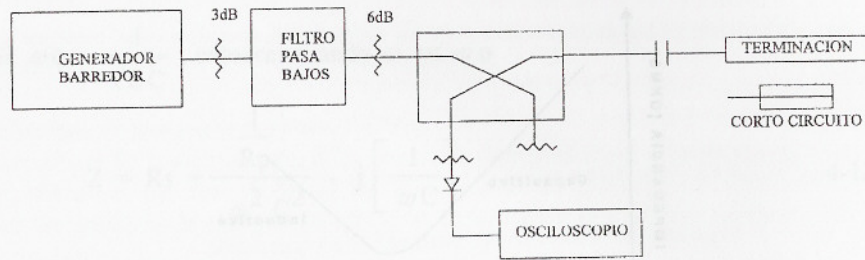


Figura 4-7 * Circuito de medida de pérdida de retorno.

Para un capacitor típico mostramos las pérdidas de retorno en función de la frecuencia en la figura 4-8.

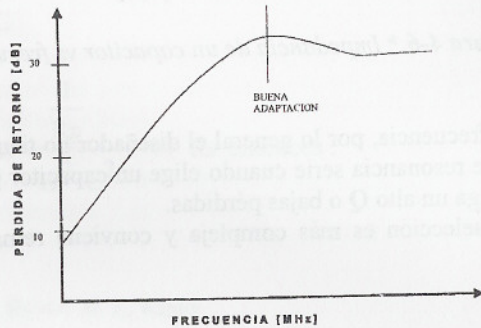


Figura 4-8 * Pérdida de retorno vs frecuencia.

En bajas frecuencias la reflexión es grande, causada por la excesiva reactancia en serie con la línea.

Los fabricantes de capacitores presentan un gráfico un poco diferente, ya que muestran el valor de capacidad en función de la frecuencia de resonancia serie, como vemos en la figura 4-9.

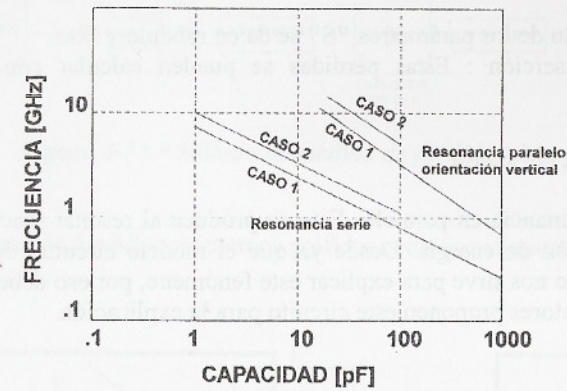


Figura 4-9 * Gráfico para diferentes tamaños de capacitores.

Mostramos dos curvas para diferentes tamaños de capacitores: el tamaño 2 es de menores dimensiones que el 1, por lo tanto tiene menos inductancia (ya que dijimos que depende exclusivamente del tamaño); luego, para igual capacidad, el tamaño 2 tiene mayor f de resonancia serie.

4-5* Pérdidas de inserción.

Un parámetro muy importante para un diseñador en microondas es conocer las pérdidas de un capacitor CHIP. Ya que el valor de **Q** o el factor de disipación (**FD**) son extremadamente dificultosos de medir en altas frecuencias, lo que se hace es medir las pérdidas del capacitor una vez que se instala en un circuito operativo. Este generalmente se construye con una línea de microtira de 50 ohms de impedancia característica. Entonces se pueden medir las pérdidas, que fundamentalmente se deben a tres factores:

1.- Pérdidas por reflexión : Generalmente, cuando un capacitor CHIP es insertado en una microtira crea alguna desadaptación. Es casi imposible construir un capacitor con la impedancia característica de la microtira; pequeñas reflexiones siempre son generadas.

Algunos fabricantes suministran esta información con los parámetros "S" del capacitor. Con S11 se pueden calcular las pérdidas por reflexión.

$$PR = 10 \log (1 - S11^2) \tag{4-16}$$

También podríamos calcular el R.O.E. (Relación de Onda Estacionaria) mediante:

$$R.O.E. = \frac{(1 + S11)}{(1 - S11)} \tag{4-17}$$

Aclaremos que el dato de los parámetros "S" se da en módulo y fase.

2.- Pérdidas por inserción : Estas pérdidas se pueden calcular con el coeficiente de transmisión S21.

$$P.I. = 10 \log (1 / S21^2)$$

4-18

3.- Pérdidas por resonancia en paralelo: Esto se produce al resonar reactancias en paralelo produciendo absorción de energía. Desde ya que el modelo circuital de un capacitor que vimos al comienzo no nos sirve para explicar este fenómeno, por eso debemos recurrir a otro esquema. Algunos autores proponen este circuito para la explicación.

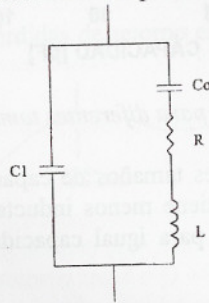


Figura 4-10 * Circuito equivalente de un capacitor.

Resonancia serie: $\omega = \frac{1}{\sqrt{L C_o}}$ 4-19

Resonancia paralelo: $\omega = \frac{1}{\sqrt{\frac{L C_o C_1}{C_o + C_1}}}$ 4-20

Esto explicará la resonancia paralelo, pero veamos qué sucede cuando procedemos a medir las pérdidas de inserción. El método propuesto no discrimina entre las diferentes causas que producen las pérdidas, pues mide el total de las pérdidas. Un esquema de medida es el siguiente.

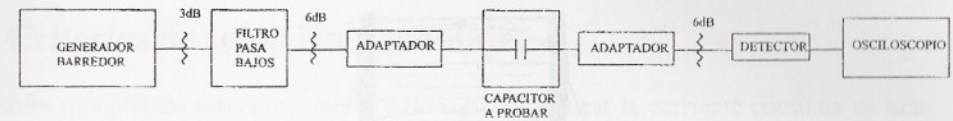


Figura 4-11 * Método de medida de pérdidas de un capacitor.

Con este sistema de medidas obtenemos gráficos como los siguientes.

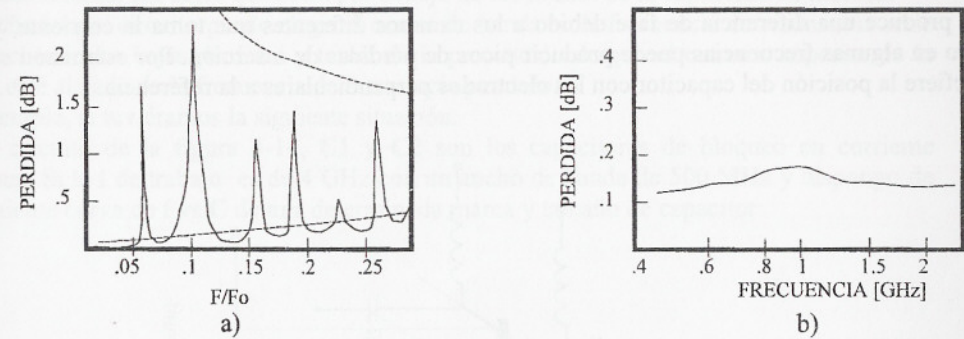


Figura 4-12 * Gráficas de pérdidas de capacitor vs frecuencia.

En la figura 4-12a se aprecia para un tipo de capacitor que en determinadas frecuencias aumentan bruscamente las pérdidas de inserción; eso se produce por resonancia paralelo, cuya explicación, que no daremos aquí, se puede encontrar en la referencia bibliográfica.

En la figura 4-12b mostramos en detalle los valores de las pérdidas hasta la frecuencia de resonancia serie, menor que 2 GHz para este capacitor, y que corresponde al tamaño inicial de la curva de la figura 4-12a.

Para realizar esta medición se colocó el capacitor con los electrodos paralelos a la línea de microtira; si los colocamos en forma perpendicular a la microtira, veríamos que las frecuencias de resonancia serie y paralelo se corren, tomando la frecuencia serie el valor de la paralelo y ésta un valor mayor, y así se corren todos los picos de resonancia. Tendremos de esa forma una mayor respuesta de frecuencia.

El fenómeno que se produce al colocar los electrodos paralelos a la tierra de referencia, se visualiza en la figura 4-13.

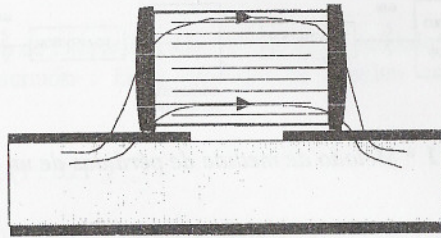


Figura 4-13 * Diferencia de recorrido en un capacitor con electrodos paralelos.

Se produce una diferencia de fase debido a los caminos diferentes que toma la corriente, y esto en algunas frecuencias puede producir picos de pérdidas de inserción. Por esta razón se prefiere la posición del capacitor con los electrodos perpendiculares a la referencia.

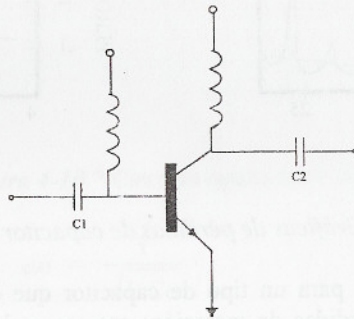


Figura 4-14 * Capacitores de paso en un circuito típico.

4-6* Criterios de selección y montaje.

Capacitores monolíticos son comúnmente usados para bloquear la corriente continua en una conexión serie, como capacitor de paso en RF en conexión paralelo y como un elemento de un filtro. Para las dos primeras aplicaciones, la impedancia medida es normalmente 50 ohm y los sistemas de transmisión son microtira o stripline.

Las aplicaciones en un filtro son más diversas para poder generalizar. En conexión serie o paralelo, la frecuencia de resonancia paralelo es un inconveniente, pues causa grandes pérdidas de inserción u oscilaciones parásitos en amplificadores.

Por el contrario, la frecuencia de resonancia serie produce las menores pérdidas de inserción, y a veces resultan tan bajas que están por debajo de los límites de la capacidad de medida.

El diseñador del circuito puede elegir el centro de banda en la frecuencia de resonancia serie aprovechando las bajas pérdidas y tomando la precaución de que el extremo superior de la banda esté alejado de la frecuencia de resonancia paralelo.

Por ejemplo, si tuviéramos la siguiente situación:

En el circuito de la figura 4-14, C1 y C2 son los capacitores de bloqueo en corriente continua. Si la f de trabajo es de 4 GHz con un ancho de banda de 500 MHz y dispongo de la siguiente curva de f vs C de una determinada marca y tamaño de capacitor:

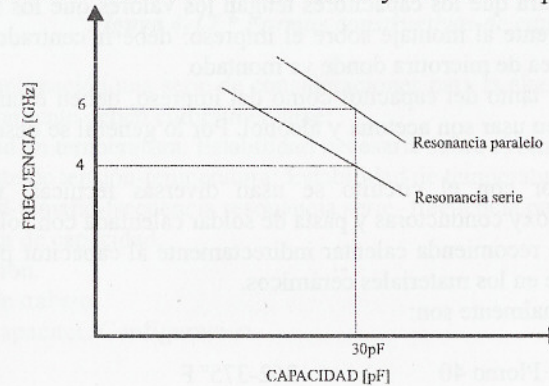


Figura 4-15 * Gráfica capacidad vs frecuencia.

Por lo tanto, el valor 30 pF será el correcto para usar en C1 y C2. El montaje del capacitor, recordemos que tiene que ver con los electrodos perpendiculares a la referencia; por lo general la curva viene para este tipo de montaje y en los capacitores normalmente es su dimensión menor la que debe ir sobre la microtira.

El cambio de fase cerca de la frecuencia de resonancia serie puede ser importante para un capacitor que forma parte de un filtro. También hay que pensar que el montaje del capacitor

sobre la microtira puede afectar la frecuencia de resonancia. Es común por otra parte dejar algún elemento de ajuste o tomar en este caso una posición más conservadora y elegir el capacitor por debajo de la frecuencia de resonancia serie.

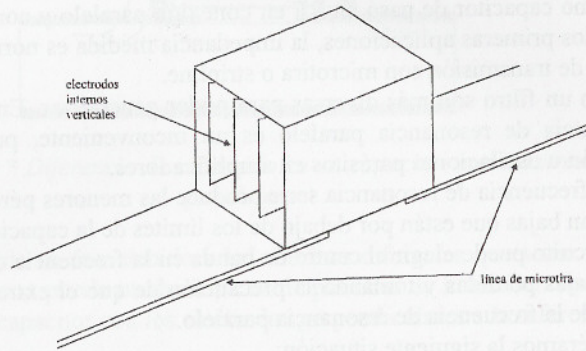


Figura 4-16 * Capacitor con electrodos verticales.

Otra recomendación para que los capacitores tengan los valores que los fabricantes ofrecen en sus grupos es referente al montaje sobre el impreso: debe ir centrado con respecto a la separación sobre la línea de microtira donde va montado.

Las superficies a unir, tanto del capacitor como del impreso, deben estar muy limpias. Los solventes que se pueden usar son acetona y alcohol. Por lo general se descarta cualquier tipo de pulido.

Para unir el capacitor con el circuito se usan diversas técnicas: ultrasonido, termo compresión, resinas epoxy conductoras y pasta de soldar calentada con soldador manual.

En este último caso se recomienda calentar indirectamente al capacitor para evitar el shock térmico que se produce en los materiales cerámicos.

Las pastas usadas normalmente son:

Estaño 60	Plomo 40		362-375° F
Estaño 62	Plomo 36	Plata 2	350-372° F
Estaño 60	Plomo 36	Indio 4	340-345° F

Las configuraciones que presentan los capacitores CHIP más comunes son las mostradas en la figura 4-17.

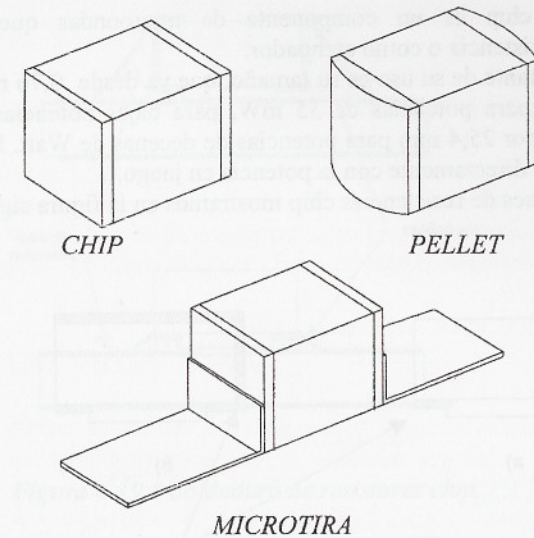


Figura 4-17 * Formas constructivas de capacitores.

Damos a continuación una serie de consideraciones para la elección de los capacitores CHIP que necesariamente deben cumplimentarse:

- Estabilidad en temperatura: Estabilidad necesaria sobre el rango de temperatura de trabajo.
- Coefficiente de tensión-temperatura: Estabilidad de temperatura para la tensión de trabajo.
- Capacidad-tamaño-frecuencia resonancia serie- frecuencia paralelo.
- Tolerancia de capacidad.
- Terminación.
- Tensión de trabajo.
- Tipo de capacitor. Configuración.

4-7* Resistores chip

La resistencia tipo chip es un componente de microondas que encuentra muchas aplicaciones, como resistencia o como atenuador.

Una razón muy importante de su uso es su tamaño, que va desde 0,76 mm por 0,51 mm con espesor de 0,38 mm para potencias de 35 mW, para bajas potencias, hasta los tamaños mayores de 25,4 mm por 25,4 mm para potencias de decenas de Watt. Entonces el tamaño a elegir está relacionado directamente con la potencia en juego.

Distintas configuraciones de resistencias chip mostramos en la figura siguiente.

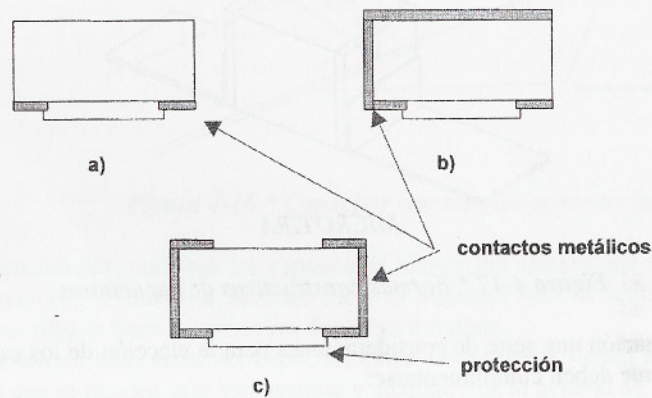


Figura 4-18 * Configuraciones de resistencias chip.

Las figuras 4-18 muestran los contactos metálicos en sombreado. La configuración a) tiene menor fijación que el c), que se recomienda por su mayor superficie de contacto. El tipo b) es recomendable para una conexión a tierra, como una terminación de 50 Ohm.

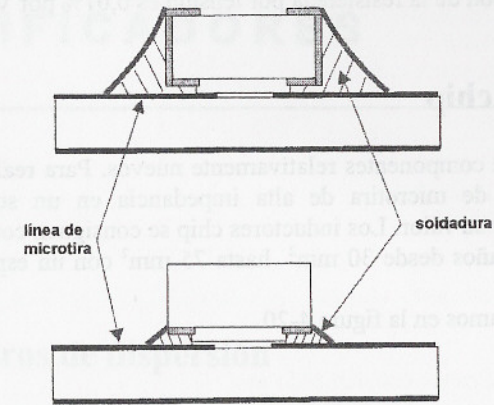


Figura 4-19 * Soldadura de resistores chip.

Los valores de resistencia se obtienen con películas de Nichrome o con técnicas de deposición de película delgada. Mediante estos procesos una capa resistiva con una determinada resistencia por unidad de superficie es depositada en una base cerámica, con terminaciones metálicas y cubierta con una protección para conservar sus propiedades eléctricas aislándolas del medio. Normalmente, como base cerámica se usa alúmina. Como contactos metálicos plata, níquel u oro con platino.

Para unir los chip con un circuito se usan dos métodos, con epoxi o soldando. En el primero, epoxi conductor, es una pasta que se aplica sobre el área a unir a 149° C de temperatura. Para el método de soldar, recomendamos primero estañar los terminales del chip por inmersión, durante 2 a 5 segundos con 220° C de temperatura, o con soldador de 35 Watt durante 3 a 8 segundos. Para soldar conviene aplicar un soldador de 35 Watt durante menos de 15 segundos.

4-8* Algunas características eléctricas

Los rangos de resistencia son de 1 Ohm a 10 Mohm con tolerancias de $\pm 20\%$, 10%, 5%, 2% y 1%.

Los coeficientes de temperatura son de 50, 100, 200 y 300 ppm/ C.

La temperatura máxima a plena potencia es 70° C.

La temperatura máxima para cero potencia es 125° C.

El rango de temperatura es de -55° C a +125° C.

El coeficiente de variación de la resistencia por tensión es 0,01% por Volt.

4-9* Inductores chip

Los inductores chip son componentes relativamente nuevos. Para realizar una inductancia imprimimos una línea de microtira de alta impedancia en un sustrato, con un largo determinado para ajustar su valor. Los inductores chip se consiguen con valores entre nHy a 550 nHy en tamaños desde 30 mm² hasta 75 mm² con un espesor máximo de 0,1 mm.

Una forma básica mostramos en la figura 4-20.

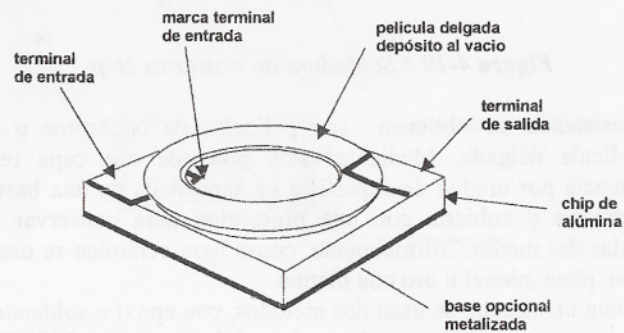


Figura 4-20 * Inductor chip.

Los inductores chip son construidos sobre un sustrato de alúmina, depositando el elemento conductor con técnicas de película delgada. El procedimiento consiste en depositar media vuelta de película conductora, luego cubrirla parcialmente con material cerámico, después agregarle otra media vuelta, aislarla y así hasta completar el número de vueltas necesarias, siendo terminada con una capa de material aislante para sellado hermético. Este proceso permite construir simultáneamente 100 inductores idénticos sobre un sustrato de alúmina de 50,8 mm por 50,8 mm.

La fijación se puede hacer por soldadura, con mezcla de indio, o por pegado con epox conductor, de la misma forma que comentamos para los resistores.

DISEÑO DE AMPLIFICADORES

Parámetros de dispersión

En la teoría de RF la forma de evaluar la salida y entrada de un cuadrupolo es mediante los coeficientes de reflexión que relacionan las ondas incidentes y reflejadas (coeficiente de reflexión) en cada puerto. En la práctica es la forma que más se usa para medir el comportamiento de un dispositivo que se quiere evaluar. Se puede usar un cuadrupolo con entradas y salidas desadaptadas. Según la vista en la figura 5-1 se produce una onda incidente y una onda reflejada en la salida como se la ve.

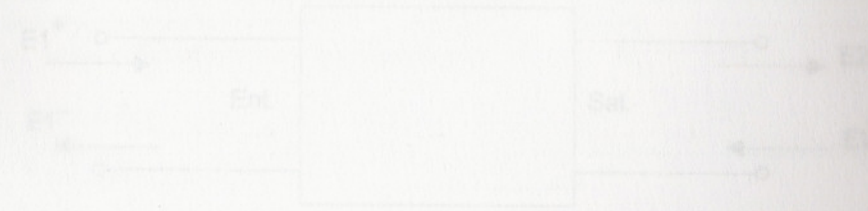


Figura 5-1 * Ondas incidentes y reflejadas en un cuadrupolo.