



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 315 361**

51 Int. Cl.:
H03H 11/30 (2006.01)
H01P 1/18 (2006.01)
H04B 1/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **02722534 .1**
96 Fecha de presentación : **02.04.2002**
97 Número de publicación de la solicitud: **1380106**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **14.01.2004**

54 Título: **Circuito de adaptación ajustable.**

30 Prioridad: **11.04.2001 US 283093 P**
13.07.2001 US 904631
24.07.2001 US 912753
08.08.2001 US 927732
10.08.2001 US 927136

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.04.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.04.2009

73 Titular/es: **Kyocera Wireless Corp.**
10300 Campus Point Drive
San Diego, California 92121, US

72 Inventor/es: **Toncich, Stanley, Slavko**

74 Agente: **Isern Jara, Jorge**

ES 2 315 361 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Circuito de adaptación ajustable.

5 **Solicitudes relacionadas**

La presente solicitud reivindica el beneficio de la solicitud provisional US-60/283.093, presentada el 11 de abril de 2001. Asimismo, la presente solicitud está relacionada con las solicitudes estadounidenses “Filtro ferroeléctrico ajustable”, presentada el 13 de julio de 2001, “Multiplexor ferroeléctrico ajustable”, presentada el 24 de julio de 2001 y “Dispositivo ferroeléctrico ajustable de baja pérdida y método de caracterización”, presentada el 8 de agosto de 2001.

Antecedentes15 **Descripción de la técnica relacionada**

Los circuitos de adaptación se utilizan con mucha frecuencia para transformar la impedancia de varios componentes de un mismo circuito en una impedancia objetivo. La entrada del circuito de adaptación puede tratarse de una señal de radiofrecuencia que transporte información. La salida de dicho circuito también puede ser una señal de RF que transporte información. El circuito de adaptación puede estar situado antes o después de un componente. Dicho componente posee una impedancia de entrada y una impedancia de salida. Si el componente está situado tras el circuito de adaptación en la ruta de la señal, la impedancia objetivo del componente será su impedancia de entrada. Si el componente está situado antes del circuito de adaptación en la ruta de la señal, la impedancia objetivo del componente será su impedancia de salida.

El circuito de adaptación funciona fijando la impedancia de la señal a una impedancia objetivo mediante compensación de la diferencia entre la impedancia en cuestión y la impedancia objetivo. La compensación de la impedancia se determina a partir de la capacitancia y la inductancia del circuito de adaptación y la configuración de dicho circuito. Puede realizarse una amplia gama de circuitos de adaptación de impedancia y de funciones de transferencia utilizando condensadores, inductores de elementos concentrados, o bien ambos. En frecuencias más altas (por encima de 1 GHz), a menudo resulta ventajoso sustituir bien los inductores de elementos concentrados o los condensadores, o ambos, por redes de línea de transmisión distribuida. La utilidad de esta sustitución también depende de la constante dieléctrica (DK) del sustrato, así como de las limitaciones de área.

En el estado de la técnica, se conocen distintas disposiciones de circuitos de adaptación. Algunos ejemplos de éstas son: condensador en serie, condensador derivado; condensador en serie, inductor derivado; inductor en serie, condensador derivado; etc. Una de las configuraciones habituales de los circuitos de adaptación es condensador derivado, inductor en serie, condensador derivado. También pueden utilizarse transformadores, e incluso redes resistivas, si puede tolerarse la pérdida de inserción.

En general, la pérdida que añadan los circuitos de adaptación debe ser mínima para evitar que la señal de información se degrade ulteriormente. El exceso de pérdida aumenta el nivel de exigencia para el resto de componentes del sistema eléctrico, en particular, los elementos activos, como los amplificadores. En algunos casos, como en la entrada de un amplificador de bajo ruido (LNA), un aumento de la pérdida de señal no puede compensarse simplemente incrementando la ganancia del LNA.

Las impedancias de los componentes y los circuitos de adaptación dependen de la frecuencia. La impedancia sólo se adapta a una única frecuencia de funcionamiento, o en una banda limitada de frecuencias. Si el diseñador desea que el dispositivo funcione a más de una banda de frecuencias, deben adoptarse concesiones.

Las redes de adaptación por antena de los dispositivos manuales inalámbricos servirán de ejemplo. Puesto que los equipos actuales de doble banda normalmente sólo emplean una antena, la presente solución consiste en adaptar impedancias a una frecuencia mediana dentro del rango de frecuencias de funcionamiento. La impedancia se desajusta en todas las frecuencias distintas de la frecuencia media. Este hecho aumenta la pérdida de energía en las dos bandas.

Una segunda opción consiste en utilizar componentes y circuitos de adaptación distintos para frecuencias de funcionamiento diferentes. El ajuste de la impedancia puede ser mejor de este modo, pero el coste excesivo de la fabricación y el tamaño total de la combinación de circuitos pueden ser prohibitivos. Se apreciará que si uno de los componentes pudiera adaptarse correctamente en todas las frecuencias de funcionamiento deseadas, se obtendría un gran ahorro en cuanto a tamaño del circuito y consumo de energía. Este problema quedaría resuelto mediante un circuito de adaptación ajustable.

En dispositivos manuales de acceso múltiple por división de códigos (CDMA), son necesarios circuitos de adaptación entre el diplexor y la antena (teléfono de banda única) o el diplexor o multiplexor y la antena en dispositivos de banda doble o múltiple, así como antes y después de amplificadores de potencia (PA) y amplificadores de bajo ruido (LNA).

Antes del presente invento no se había conseguido obtener circuitos de adaptación ajustables de baja pérdida para frecuencias superiores a unos 200 MHz, aunque sí que se había intentado. Dichos intentos incluyen los circuitos de adaptación con diodos de varactor, tal y como muestra la patente US-6.198.441-B1. Más concretamente, se viene utilizando un circuito compuesto de un inductor en serie y un diodo de varactor derivado para realizar circuitos de adaptación ajustables. Sin embargo, el problema de este circuito es que las pérdidas son intolerablemente altas, en particular en su uso en dispositivos de comunicación móvil. Además, los diodos de varactor son bastante sensibles a la temperatura y han demostrado que poseen rendimientos de RF oscilantes entre lote y lote. Se apreciará que un circuito de adaptación ajustable de baja pérdida sería útil en muchas aplicaciones, pero en particular, en dispositivos móviles de comunicación inalámbrica.

En la patente US-5.496.795 se describe un filtro de paso de banda ajustable. El filtro de paso de banda ajustable incorpora secciones de microbandas ferroeléctricas de adaptación ajustables, pero este filtro de paso de banda emplea materiales ferroeléctricos con temperaturas de Curie entre los 70 y los 98 Kelvin. Por tanto, el filtro ferroeléctrico ajustable que se da a conocer en dicho documento debe refrigerarse y no puede utilizarse a temperatura ambiente. Asimismo, el material ferroeléctrico dado a conocer es una película gruesa o es material bruto. Además, el material ferroeléctrico está situado fuera de la región en la que se necesita dicho material para ajustar el dispositivo. Por tanto, el filtro de paso de banda ferroeléctrico ajustable que se da a conocer no puede emplearse en dispositivos móviles del mercado ni teléfonos móviles.

En la patente US-5.472.935 se describe un dispositivo ajustable por microondas que incorpora películas ferroeléctricas y superconductoras de alta temperatura. La superconductividad de alta temperatura revelada corresponde a 30 Kelvin, 90 Kelvin, 120 Kelvin y 127 Kelvin. En consecuencia, los dispositivos ferroeléctricos dados a conocer sólo pueden utilizarse con refrigeración.

En la patente US-5.987.314 se describe un dispositivo de comunicación de radio provisto de un diodo de capacitancia variable a modo de componente ajustable integrado en un circuito de adaptación con filtro de frecuencia intermedia.

Resumen

El objetivo del presente invento consiste en proporcionar un circuito de adaptación ajustable de baja pérdida. Dicho circuito de adaptación ajustable de baja pérdida comprende las características enumeradas en la reivindicación principal. En las reivindicaciones subordinadas se presentan realizaciones preferentes del invento. El circuito de adaptación puede utilizarse para dispositivos portátiles de comunicación inalámbrica. Para realizar el circuito de adaptación pueden utilizarse componentes ferroeléctricos ajustables de baja pérdida. Para ello, puede emplearse un condensador o un inductor ferroeléctrico ajustable. Los circuitos de adaptación pueden aplicarse mediante elementos concentrados situados en serie o en derivación, mediante elementos de red distribuida o mediante una combinación de ambas variantes. En el caso de la adaptación mediante elementos distribuidos, pueden utilizarse películas ferroeléctricas en circuitos de adaptación pasivos y planos (microbandas, stripline, CPW, entre otros) para modificar la permitividad del sustrato subyacente y así provocar un cambio en la longitud eléctrica del circuito de adaptación o el resonador. La utilización de circuitos de adaptación planos resulta bien conocida para cualquier persona familiarizada con el diseño de circuitos o amplificadores. En este caso, las redes de adaptación pueden constar de híbridos y acopladores o también de estructuras capacitivas e inductivas distribuidas más convencionales.

Algunas ventajas del invento son la menor pérdida de inserción del circuito de adaptación y la mejor adaptación de la impedancia, lo cual se traduce en una menor pérdida de inserción del componente o los componentes que se adaptan. Además, una mejor adaptación también supone que se producirán menos interferencias a causa de la reflexión en el interior del circuito.

Asimismo, los dispositivos portátiles de comunicación inalámbrica disponen de una mayor duración de la batería y de los tiempos de conversación.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1a muestra una proyección horizontal de un condensador ferroeléctrico de entrehierro;

La figura 1b muestra una vista de la sección transversal del condensador ferroeléctrico de entrehierro de la figura 1a por la línea A;

La figura 2a muestra una proyección horizontal de un condensador ferroeléctrico de sobrecapa junto con un condensador de bloqueo de CC acompañante;

La figura 2b muestra una proyección horizontal de la primera capa metálica del condensador de sobrecapa de la figura 2a;

ES 2 315 361 T3

La figura 2c muestra una vista de la sección transversal del condensador de sobrecapa de la figura 2a por la línea B de la figura 2a;

La figura 3 muestra una vista ampliada de una parte de la figura 2a;

La figura 4a muestra una proyección horizontal de un condensador interdigital ferroeléctrico;

La figura 4b muestra una proyección horizontal de un inductor ferroeléctrico de microbanda;

La figura 4c muestra un diagrama esquemático de un circuito equivalente al inductor mostrado en la figura 4b;

La figura 5 muestra el esquema de un circuito de adaptación de ejemplo;

La figura 6 muestra el esquema de un circuito de adaptación de ejemplo;

La figura 7 muestra el esquema de un circuito de adaptación de ejemplo;

La figura 8 muestra el esquema de un circuito de adaptación de ejemplo;

La figura 9 muestra el esquema de un circuito de adaptación de ejemplo;

La figura 10 muestra el esquema de un circuito de adaptación de ejemplo;

La figura 11 muestra un diagrama de bloques de un circuito de adaptación ajustable ferroeléctrico de baja pérdida;

La figura 12 muestra un diagrama de bloques de un circuito de adaptación y los circuitos de alrededor de un amplificador;

La figura 13 muestra un diagrama de bloques de un circuito de adaptación entre una antena y un duplexor;

La figura 14 muestra un diagrama de bloques de un circuito de adaptación entre una antena y un diplexor;

La figura 15 muestra un diagrama de bloques de una fuente de control y un circuito de adaptación.

El uso de los mismos símbolos de referencia en distintas figuras indica elementos similares o idénticos.

Descripción detallada

El objetivo del presente invento consiste en proporcionar un circuito de adaptación ajustable de baja pérdida. Para realizar el circuito de adaptación pueden utilizarse componentes ferroeléctricos ajustables de baja pérdida. Para ello, puede emplearse un condensador o, hasta cierto punto, un inductor ferroeléctrico ajustable. Los circuitos de adaptación pueden aplicarse preferentemente mediante elementos concentrados situados en serie o en derivación, mediante elementos de red distribuida o mediante una combinación de ambas variantes. En el caso de la adaptación mediante elementos distribuidos, pueden utilizarse películas ferroeléctricas finas o gruesas en circuitos de adaptación pasivos y planos (microbandas, stripline, CPW, entre otros) para modificar la permitividad del sustrato subyacente y así provocar un cambio en la longitud eléctrica o la impedancia característica del circuito de adaptación o el resonador. La utilización de circuitos de adaptación planos resulta bien conocida para cualquier persona familiarizada con el diseño de circuitos o amplificadores. En este caso, las redes de adaptación pueden constar de híbridos y acopladores o también de estructuras capacitivas e inductivas distribuidas más convencionales.

Si se emplean componentes de adaptación de elementos concentrados, entonces es posible utilizar condensadores ajustables con base ferroeléctrica de modo similar para provocar un cambio en una red de adaptación de un amplificador. Las personas expertas en la materia conocen bien los circuitos de adaptación. La red de adaptación preferente con elementos concentrados sería igual a las que ya se conocen en la técnica, sólo que se utilizaría un material ferroeléctrico para modificar la capacitancia del condensador.

A continuación, se describirá el diseño de los condensadores ferroeléctricos ajustables que se usarán en los circuitos de adaptación. La pérdida total de un condensador, L_t , ya sea éste ajustable o no, viene dada por la razón entre la energía disipada y la energía almacenada, almacenándose la energía en el campo eléctrico y disipándose en la resistencia, es decir, $L_t = (\text{energía disipada})/(\text{energía almacenada})$. La inversa de esta pérdida es el factor de calidad, Q_c . En el caso de un condensador, L_t puede venir dada por la cantidad $(\omega \cdot R_s \cdot C)$, siendo ω la frecuencia en radianes, R_s la resistencia en serie del condensador y C la capacitancia. Por ejemplo, para que un condensador ajustable de 1,0 pF tenga $Q_u = 250$ a 2,0 GHz es necesario que R_s sea de 0,32 Ω (ohmios). Para minimizar la pérdida (obtener una R_s baja), es necesario tener en cuenta todos los mecanismos de pérdida presentes y el modo de eliminar todos esos mecanismos si es posible.

La determinación de la pérdida de un condensador ferroeléctrico no depende de su topología, es decir, de si se trata de un condensador de sobrecapa, de entrehierro o interdigital (IDC).

En el caso de los dispositivos ferroeléctricos, la pérdida total viene determinada por la suma de cada una de las fuentes del siguiente modo:

$$L_t = L_{geom} + L_{attach} + L_{metal} + L_{sub} + L_{rad} + L_{meas} + L_{f-e};$$

donde L_{geom} se deriva de la topología del condensador; siendo L_{attach} la pérdida debida a la conexión del dispositivo; L_{metal} , la pérdida metálica total; L_{sub} , la pérdida del sustrato base (si existe); L_{rad} , la pérdida por radiación, tanto la deseada como la no deseada; L_{meas} , la pérdida total derivada de los errores de medición, y L_{f-e} la tangente de la pérdida ferroeléctrica.

Esta distribución de pérdidas puede utilizarse en primer lugar para obtener un valor preciso de la pérdida L_{f-e} (o f e $\tan \delta$) a la frecuencia de funcionamiento deseada en el modo en que se utilizará el condensador ferroeléctrico. Para derivar correctamente la pérdida L_{f-e} , es necesario eliminar o restringir las demás fuentes de pérdida que se acaban de describir. Por ejemplo, la pérdida L_{geom} será distinta según la topología, siendo mejor en el caso de un condensador de sobrecapa, peor en un condensador de entrehierro, y mucho peor en un condensador interdigital. Aunque esta pérdida puede reducirse y controlarse, es inherente al dispositivo. Por lo tanto, la elección de la topología de un condensador ferroeléctrico determinado afectará a la Q_c máxima que pueda conseguirse con dicho condensador ferroeléctrico. Un software electromagnético (EM) puede establecer una pérdida de referencia para la geometría deseada, presuponiendo que la película ferroeléctrica no tiene pérdidas. Esta pérdida de referencia representa la pérdida mejor (más baja) para una geometría determinada.

En general, los condensadores de entrehierro son los más sencillos de fabricar. A continuación estarían los IDC y, por último, los condensadores de sobrecapa serían los más complicados de los tres. En comparación con un IDC, el condensador de entrehierro cuenta con una mejor Q , pero con una capacitancia inferior por sección transversal de unidad (W en la figura 1a). La capacitancia de los IDC es mayor debido al uso de una serie de “dedos” por sección transversal de unidad. Sin embargo, para muchas aplicaciones de filtrado de comunicaciones, no es necesario contar con una capacitancia elevada ($C \geq 4,0$ pF). Por tanto, un condensador de entrehierro suele proporcionar una capacitancia suficiente. El valor elevado de κ inherente a la mayoría de películas ferroeléctricas contribuye a aportar una capacitancia relativamente elevada por sección transversal de unidad, W , en comparación con un condensador de entrehierro convencional.

La pérdida L_{attach} se deriva de las técnicas específicas de conexión del dispositivo como, por ejemplo, soldadura, pintura de plata o unión por hilo. Estas pérdidas de conexión pueden ser elevadas e imposibles de predecir. Las pérdidas más bajas se consiguen fabricando directamente el condensador ferroeléctrico ya conectado al resonador u otros circuitos de RF para minimizar así, o incluso eliminar, este componente de pérdida.

La pérdida inherente de un condensador ferroeléctrico independiente tiene poca repercusión. Lo que sí influye mucho más es cualquier pérdida que se añada por la conexión del condensador ferroeléctrico al circuito. Aun cuando el condensador ferroeléctrico fuera sin pérdida, si se utilizase una conexión de alta pérdida, el efecto global sería el de un dispositivo ferroeléctrico con pérdida. Por ejemplo, si se desea una $Q \geq 250$ a 2,0 GHz para una capacitancia de 1,0 pF, la resistencia en serie total R_s debe ser $\leq 0,32$ ohmios. Cualquier pérdida adicional reduciría aún más la Q de este condensador. El hecho de que la pérdida adicional sea externa al propio condensador no tiene relevancia. Incluso los mecanismos de pérdida inevitables, como los generados por el montaje, por ejemplo, disminuyen la Q efectiva del condensador desde el punto de vista de su efecto en el sistema.

Para conseguir que la pérdida adicional sea mínima, la conexión entre el condensador ferroeléctrico y el resonador debería ofrecer la resistencia adicional más baja. Así, las corrientes y las cargas eléctricas relacionadas con el condensador ferroeléctrico sufrirían una pérdida adicional mínima. Las técnicas de unión o montaje convencionales, poniendo como ejemplos (no restrictivos) la soldadura, la unión por hilo, la pintura de plata o la adhesión no son aptas como uniones controlables de baja pérdida.

La pérdida adicional e impredecible derivada del uso de estos métodos de unión reduce la Q realizada con independencia de si el condensador ferroeléctrico se utiliza para ajustar un resonador o no, o de la caracterización de la película ferroeléctrica. Por tanto, para obtener un rendimiento máximo (pérdida mínima) la estructura del condensador ferroeléctrico debería fabricarse directamente sobre el resonador, junto al resonador que debe ajustar, o bien sobre otros circuitos esenciales de RF. Sólo mediante la fabricación directa puede conseguirse una transición con pérdida mínima en fuentes (corrientes) electromagnéticas (EM) desde los elementos de ajuste ferroeléctricos hasta el resonador. Los efectos deseables de la fabricación directa del condensador ferroeléctrico sobre un resonador o junto a éste pueden mejorarse mediante la ausencia de esquinas afiladas o transiciones.

Los factores que provocan la pérdida L_{metal} son, por ejemplo, la rugosidad de la superficie (SR) del metal, el grosor del metal en comparación con la profundidad pelicular, δ_s , y la conductividad. La SR puede eliminarse con efectividad si este factor tiene una media cuadrática inferior a unos $0,254 \mu m$ en frecuencias de funcionamiento situadas en la banda L y S (1-4 GHz). El grosor del metal puede reducirse como factor si éste es $1,5 \delta_s$ o más, o eliminarse con efectividad si el grosor es $\geq 5 \delta_s$. Para los contactos de los electrodos, el grosor del metal (t_m) puede ser de

aproximadamente 1,5 δ s. En el caso de resonadores electromagnéticos, en los que se debe tratar con ondas progresivas o estacionarias, es decir, en los que el metal en cuestión se extiende por una fracción apreciable de la longitud de onda (aproximadamente un 10% o más), el grosor del metal debería ser de unos 5 δ s o más.

La mejor conductividad la proporcionan la plata, el cobre y el oro (Ag, Cu y Au, respectivamente). Por tanto, la pérdida L_{metal} puede reducirse y controlarse, pero nunca eliminarse como factor. Sin embargo, su efecto puede calcularse mediante fórmulas que bien conocen aquellas personas expertas en la materia, o utilizando herramientas calculadoras de línea disponibles en los simuladores de circuitos más comunes, como Eagleware o Touchstone. Asimismo, un control preciso de la fabricación puede limitar las variaciones geométricas de la pérdida L_{metal} .

La contribución a la pérdida que representa L_{sub} puede minimizarse eligiendo un sustrato de baja pérdida con una tangente de pérdida inferior a 0,001, preferentemente inferior a 0,0005, a la frecuencia de funcionamiento que corresponda. Algunos de los materiales adecuados a tal efecto son la alúmina con >99% de pureza, una de las mejores opciones que existen en la actualidad por su relación pérdida/coste. El zafiro o el MgO son mejores que la alúmina en cuanto a sus tangentes de pérdida, pero son mucho más caros. Todos estos materiales aceptan películas ferroeléctricas finas sin necesidad de capas de transición y tienen una rugosidad de superficie aceptable con poco pulimentado, o sin pulimentado adicional. Los sustratos semiconductores son una opción descartable por su conductividad relativamente alta. Además de los factores de tangente de pérdida, rugosidad de superficie y precio, los sustratos adecuados no deben ser quebradizos, deben poder fabricarse a modo de obleas de área más grande y poder metalizarse fácilmente sin un preprocesado extensivo.

Puede aislarse la pérdida L_{sub} de la pérdida total de un sustrato compuesto (sustrato más película ferroeléctrica) utilizando un software de simulación de circuitos o campos EM, por ejemplo, Sonnet, Momentum o IE3D. Así pues, la pérdida L_{sub} puede reducirse considerablemente y calcularse con precisión.

La pérdida L_{rad} puede eliminarse con un diseño y un apantallamiento adecuados, por lo que en general no constituye un factor de pérdida. Cabe mencionar que una gran variedad de filtros, especialmente los filtros planos como el filtro *comblin* o *hairpin*, dependen del acoplamiento radiativo para lograr el rendimiento deseado. En estos casos, debe garantizarse que se reduzca, o que se elimine, el acoplamiento parásito no deseado.

La pérdida L_{meas} puede contribuir considerablemente al error de pérdida del circuito porque una pérdida pequeña adicional reduce acusadamente la Q medida del dispositivo a prueba (DUT) o el sistema y, por tanto, empaña la Q intrínseca del DUT. El método convencional de medir la constante dieléctrica y la tangente de pérdida de un material consiste en la técnica de perturbación en cavidades, que es bien conocida entre las personas expertas en la materia. Sin embargo, en la banda L, el tamaño de la cavidad se vuelve demasiado grande. Al caracterizar películas finas (en oposición a las brutas) con grosores $\leq 1,5 \mu\text{m}$, como las películas ferroeléctricas, el problema se agrava porque los errores de medición pueden ser graves. Además, es conveniente caracterizar un condensador (o filtro) ferroeléctrico de la manera más parecida a cómo se utilizará. Por tanto, el modo preferente de caracterizar compuestos o películas ferroeléctricas son las técnicas de resonador de microondas.

A efectos de determinar las características de la película ferroeléctrica y caracterizar los condensadores ferroeléctricos, se prefieren las técnicas de microbanda a, por ejemplo, las de *stripline* u otras técnicas volumétricas por los siguientes motivos:

1) Los circuitos microbanda son sistemas planos sin cubierta superior, por lo que no es necesario unir sustratos duros como en el caso de las cubiertas superiores. Por tanto, tampoco es necesario que haya continuidad de planos de tierra (descendente) como en el caso del *stripline*, por ejemplo.

2) Los condensadores de entrehierro, preferentemente, y los IDC, alternativamente, pueden fabricarse y medirse fácilmente.

3) Existe una gran cantidad de conocimiento en relación con la caracterización de resonadores de microbanda.

4) No es necesario ejecutar una fabricación o un ajuste complejos como sí ocurre en el caso de las cavidades dieléctricas, por ejemplo.

Sería conveniente medir los circuitos de Q elevada con técnicas de resonador porque las mediciones de banda ancha pueden no resolver con suficiente precisión las pérdidas resistivas inferiores al ohmio en frecuencias de RF/microondas. Por el mismo motivo, los medidores LCR no son una opción adecuada.

La medición a radiofrecuencia debe recoger correctamente la R_s y, por tanto, la Q, en caso de un condensador ferroeléctrico, puesto que la medición a baja frecuencia, en particular por debajo de entre 10 y 100 MHz aproximadamente, se ve dominada por una gran resistencia en paralelo, R_p , que desvía la capacitancia en cuestión. La dominancia de R_p , junto con los valores relativamente bajos de la capacitancia en cuestión ($\leq 4,0 - 5,0 \text{ pF}$) impide que se obtenga una medición de la Q (por tanto, de la R_s) fiable en frecuencias bajas.

Al realizar mediciones de pérdidas, las estaciones de probadores de obleas deben utilizarse con cuidado porque es difícil calibrar la pérdida resistiva e inductiva a frecuencias de RF/microondas. Las puntas del probador y sus

conexiones a tierra también son sensibles a la colocación sobre el DUT, al igual que la presión que se ejerce sobre ellas. En consecuencia, es mejor utilizar un circuito de resonancia de prueba que permita medir directamente los parámetros deseados de un modo que no exija mediciones de pérdidas de un dispositivo individual.

- 5 Por tanto, en el caso de mediciones en circuitos resonantes, se prefiere un analizador de redes. Para minimizar la pérdida de la medición y conseguir mediciones lo más precisas posible, es deseable eliminar la pérdida del DUT por calibración, ejecutar una calibración completa de dos puertos en el analizador de redes y emplear la promediación para la calibración y la medición. Por último, es necesario realizar un análisis adecuado de los datos obtenidos en la medición, como el que se describe en "Data Reduction Method for Q Measurements of Strip-Line Resonators",
10 Transacciones IEEE en MTT, S. Tonich y R. E. Collin, vol. 40, n.º 9, sept. 1992, págs. 1833-1836, con el fin de extraer con precisión la Q, o la pérdida, del condensador sometido a prueba.

Con los resultados de lo expuesto anteriormente para minimizar, eliminar o restringir cada una de las susodichas pérdidas, la pérdida total puede reformularse de la siguiente manera:

15

$$L_t = L_{geom} + L_{metal} + L_{f-e} + \Delta L_{misc}$$

- 20 Como se ha expuesto anteriormente, tanto la L_{geom} como la L_{metal} pueden cuantificarse y eliminarse analíticamente para obtener una medición precisa de L_{f-e} . La pérdida L_{geom} puede determinarse a partir de una simulación electromagnética precisa del circuito basándose en el supuesto de que el material ferroeléctrico no tiene pérdida. La pérdida L_{metal} puede calcularse utilizando las fórmulas para la pérdida metálica presuponiendo la conductividad, la SR (si procede) y la profundidad pelicular. El último sumando, ΔL_{misc} , representa una combinación de la eliminación incompleta de los
25 demás mecanismos de pérdida, o la pérdida que está más allá de los límites finitos, o bien de la eliminación incompleta de L_{metal} y L_{geom} , o de ambos. Siendo así, se trata de un término de error irreducible. Para obtener mediciones precisas de las propiedades del componente o película ferroeléctrica, debe minimizarse y limitarse, tal y como se describe en las secciones precedentes.

- 30 Por último, para reducir el efecto de la pérdida L_{f-e} a un mínimo debe utilizarse una colocación de película ferroeléctrica selectiva para situar la película sólo en las zonas en las que sea necesaria para el ajuste y en ningún sitio más.

- El proceso de tener en cuenta todos los mecanismos de pérdida y eliminar o limitar dichas pérdidas, no sólo deter-
35 mina la pérdida ferroeléctrica, sino que también establece unas directrices para el diseño correcto de filtros ajustables de baja pérdida. Conocer la pérdida L_{f-e} le aporta al diseñador una línea de referencia para la película ferroeléctrica que es necesaria para realizar cualquier tipo de diseño óptimo con películas ferroeléctricas. Este conocimiento es imprescindible si se desea compensar con efectividad la tangente de pérdida con capacidad de ajuste, por ejemplo. En pocas palabras, la precisión en la fabricación y la medición se traduce en una aplicación y caracterización coherente
40 de la pérdida de la película ferroeléctrica.

- Una vez consideradas las técnicas anteriores para la minimización de la técnica, a continuación se presentan reali-
zaciones preferentes para los tres tipos de condensadores ferroeléctricos. Se apreciará que, aunque estos diseños están
45 pensados para su uso en la banda L (1-2 GHz), las innovaciones del presente invento pueden utilizarse para diseñar condensadores ferroeléctricos para otras bandas de frecuencia.

- En las figuras 1a y 1b se muestra un condensador ferroeléctrico de entrehierro 10 ajustable preferente para su uso
50 en la banda celular (entre 800 y 1.000 MHz) y la banda L (1-2 GHz) en dispositivos inalámbricos. El condensador de entrehierro 10 está formado sobre un sustrato 12 de zafiro, MgO o alúmina con un grosor comprendido entre 0,5 y 1,0 mm y una pureza $\geq 99\%$, el cual posee una SR inferior a $0,127 \mu\text{m}$ de media cuadrática. De manera alternativa, el condensador de entrehierro puede modelarse en la cara delantera o trasera o en una pared lateral de cualquier número de estructuras de resonadores.

- Algunos ejemplos son resonadores coaxiales, monobloque y *stripline*. Dicho condensador debería fabricarse lo
55 más cerca posible de su punto de conexión eléctrica al resonador.

- El sustrato 12 puede estar provisto de un plano de tierra metálico 14 en función de los otros requisitos. Sin embargo, la realización preferente carece de plano de tierra para minimizar la capacitancia parásita. Preferentemente, se deposita
60 sobre el sustrato 12 una capa ferroeléctrica 16 de un grosor aproximado entre 0,1 y 2,0 micrones hecha de BSTO u otro material ferroeléctrico deseable y adecuado para obtener una capacitancia y un rango de ajuste máximos. Resulta aún más preferente que la capa 16 tenga un grosor de entre 0,5 y 1,0 micrones. La fracción Ba/Sr, dopada, aleada, mezclada con otros componentes y/o recocida, determina las características de ajuste y la pérdida ($\tan \delta$) deseadas y, por tanto, también la Q.

- 65 Generalmente, se prefiere que las características de ajuste se correspondan con el rango de ajuste mínimo requerido a un voltaje de ajuste mínimo. Preferentemente, $x = 0,5$ en el compuesto $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ para el funcionamiento a temperatura ambiente, con independencia del dopaje con otros elementos o el recocido de preproceso o postproceso.

Se apreciará que pueden utilizarse otros materiales ferroeléctricos aparte del BSTO. Una capa metálica 18 formada sobre la capa ferroeléctrica 16 define el entrehierro 20, que preferentemente tiene una anchura de entre 3,0 y 5,0 micrones. Preferentemente, la capa metálica 18 presenta un grosor entre 0,5 y 6,0 micrones. Aunque resulta más preferente que la capa metálica 18 tenga un grosor entre 1,5 y 2,5 micrones. Se apreciará que el entrehierro 20 puede ser más ancho o más estrecho que este intervalo en función de los requisitos y el equipo de procesamiento. Para obtener una pérdida adicional mínima en la banda PCS, la capacitancia resultante será aproximadamente entre 0,6 pF y 1,5 pF a 0 voltios CC, mientras que para la banda celular CDMA será de unos 1,0 pF - 3,0 pF. La anchura del condensador, W 17, determinará también la capacitancia ferroeléctrica, dependiendo de la película ferroeléctrica concreta utilizada y el entrehierro 20 deseado. La anchura se situará normalmente entre los 0,25 mm y los 2,0 mm. La capacitancia normalmente va de 0,6 a 3,0 pF. El condensador resultante debería proporcionar una Q de al menos 160 a 2,0 GHz.

Para minimizar la pérdida adicional de la película ferroeléctrica debe utilizarse una colocación selectiva, un grabado al aguafuerte, o bien ambos, es decir, la película ferroeléctrica debe situarse únicamente donde sea necesaria para el ajuste y en ningún otro lugar, como se ha comentado anteriormente. Por ejemplo, en el condensador de entrehierro 20 de la figura 1a, se podría colocar la película ferroeléctrica deseada 16 en una zona estrecha D_{f-e} situada alrededor del entrehierro 20, como se muestra en la figura 1a. D_{f-e} debería ser lo bastante grande para asegurar que el entrehierro 20 puede modelarse repetidamente sobre la película ferroeléctrica durante la fabricación (permitiendo una tolerancia de alineación de máscara) y para cubrir la zona necesaria situada bajo el entrehierro 20 con fines de ajuste. En el caso de los filtros PCS de la banda L, es suficiente con D_{f-e} = entre 0,2 y 0,5 mm, siendo 0,2 mm preferente. A medida que aumenta la frecuencia de funcionamiento, disminuye D_{f-e} . Y a medida que disminuye la frecuencia de funcionamiento, D_{f-e} puede aumentar.

Las propiedades y la fabricación de la película ferroeléctrica tendrán una repercusión considerable en la pérdida global del condensador. Existen muchas técnicas para mitigar y minimizar la pérdida de la película ferroeléctrica. Una de las características de las películas ferroeléctricas consiste en que la pérdida y la capacidad de ajuste son inversamente proporcionales. Es decir, normalmente deben compensarse la una con la otra. Cuanto mayor es el rango de ajuste κ ferroeléctrico, mayor es la pérdida ferroeléctrica en la mayoría de los casos.

Así pues, aun cuando los materiales ferroeléctricos pueden alcanzar un rango de ajuste κ de entre 3 y 1, puede aceptarse un ajuste menor según la aplicación del circuito de adaptación determinada. En ese caso, se elegiría menos ajuste, con la ventaja de una reducción de la pérdida.

El efecto de la capacidad de ajuste κ sobre la capacidad de ajuste de frecuencia viene determinado por la topología del circuito de adaptación. Este efecto también debe considerarse al elegir el material ferroeléctrico. Sin embargo, si no existe una caracterización precisa de la compensación de la pérdida ferroeléctrica con la capacidad de ajuste κ ferroeléctrica, será difícil que el diseñador escoja un material ferroeléctrico óptimo. La caracterización precisa de esta compensación permite que el diseñador elija un material ferroeléctrico óptimo (obteniendo así la mínima pérdida posible al tiempo que se cumplen los requisitos de ajuste).

Con respecto a la pérdida L_{geom} del condensador de entrehierro, las principales contribuciones de la pérdida la componen las cuatro esquinas del entrehierro. Estas pérdidas pueden reducirse redondeando las esquinas.

En comparación con los condensadores interdigitales y de entrehierro, los condensadores de sobrecapa poseen la pérdida L_{geom} más baja. Los condensadores de sobrecapa son un ejemplo de geometría de placas en paralelo en la que las dimensiones de las placas (largo y ancho) son muy superiores a la separación de las placas. Teniendo en cuenta esta geometría, la mayor parte del campo eléctrico entre las placas es uniforme, salvo en los bordes, donde se distorsiona. El efecto de distorsión en los bordes puede reducirse considerablemente utilizando una banda de protección, como se conoce ampliamente en la técnica. Así pues, la pérdida geométrica de un condensador de placas en paralelo es bastante baja. Además, las geometrías de placas en paralelo pueden proporcionar capacitancias elevadas y un ajuste elevado a partir de pequeñas oscilaciones de voltaje de control.

En las figuras 2a, 2b, 2c y 3 se muestra un condensador de sobrecapa 3 preferente que minimiza las contribuciones de pérdida L_{geom} . El condensador 30 se deposita directamente sobre un sustrato 31 de alúmina de 635 micrones. Una primera capa metálica 34 hace la unión con el sustrato 31. La forma de la capa metálica 34 también se muestra en la figura 2b. Una capa ferroeléctrica 36 se sobrepone sobre la capa metálica 34. Para formar el condensador de sobrecapa 30, una almohadilla metálica 40 formada sobre la capa ferroeléctrica 36 se sobrepone a una porción de la primera capa metálica 34. La figura 3 muestra una vista ampliada de las partes superpuestas. Tanto la almohadilla metálica 40 como la capa metálica 34 poseen una zona que se estrecha y forma un condensador de sobrecapa 30 con la capacitancia adecuada. Una almohadilla metálica adicional 41 se sobrepone a la capa metálica 34 para formar un condensador de bloqueo CC 42. La almohadilla metálica 41 se estrecha para obtener la capacitancia adecuada para el condensador de bloqueo CC 42.

Debido a la elevada constante dieléctrica (κ) de la mayoría de las películas ferroeléctricas que pueden utilizarse, el condensador de sobrecapa 30 puede tener un área bastante pequeña y aun así proporcionar una capacitancia (C_{f-e}) de 1,5 pF. Se prevé una almohadilla de desviación de unión 44 para conectar una resistencia de pastilla de alto valor (500-1000 k Ω). Tenga en cuenta que la película ferroeléctrica no sólo se deposita bajo el condensador de sobrecapa 30, sino también bajo el condensador de bloqueo 42. Sin embargo, el efecto sobre la capacitancia (C_{DC}) del condensador de bloqueo CC 42 es irrelevante si $C_{DC} \geq 180$ pF y $C_{f-e} \leq 1,5$ pF, incluso con una desviación V_{DC} máxima (preferentemente

10 V CC). Esto es así porque el condensador de bloqueo CC posee una capacitancia bastante alta que, aun cuando se reduce la capacitancia por el ajuste ferroeléctrico, sigue teniendo un efecto mínimo sobre C_{f-e} .

En dicha realización, $0,7 \leq C_{f-e} \leq 1,5$ pF, la κ ferroeléctrica es aproximadamente 1000, la zona superpuesta de la almohadilla metálica 40 que forma el condensador de sobrecapa 30 es aproximadamente de $7,0 \mu\text{m} \times 7,0 \mu\text{m}$, y el grosor de la película ferroeléctrica es aproximadamente de $1,0 \mu\text{m}$. La capa metálica 34 puede estar hecha de Pt y tener un grosor $\leq 0,5 \mu\text{m}$. Las almohadillas metálicas 40 y 41 pueden ser de Ag y tener un grosor aproximado de $1,5-2,5 \mu\text{m}$.

Aunque se ha hablado de los materiales ferroeléctricos de película fina (t_{f-e} inferior a aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$), también pueden utilizarse materiales ferroeléctricos de película gruesa. En el presente documento, se considera "película gruesa" aquella con t_{f-e} mayor a $1,5 \mu\text{m}$ y menor de $1,0 \text{ mm}$ aproximadamente. La película bruta es mayor a $1,0 \text{ mm}$ aproximadamente. La fabricación y la aplicación de material ferroeléctrico de película gruesa son bastante diferentes a las del material ferroeléctrico de película fina. Normalmente implica una técnica de pegado o sol-gel y que los materiales ferroeléctricos produzcan un grosor adicional considerable. El grosor adicional y, en particular, el coste más reducido van a expensas de una cierta degradación del rendimiento ferroeléctrico, especialmente, una reducción de la capacidad de ajuste.

Aunque la pérdida L_{geom} de un condensador de sobrecapa es inferior a la del condensador de entrehierro, la pérdida L_{f-e} de un condensador de sobrecapa puede ser superior, ya que todo el campo de RF se concentra en la película ferroeléctrica. En un condensador de entrehierro, el campo de RF se encuentra parcialmente en el aire, en la película ferroeléctrica y en el sustrato. Por los mismos motivos, los condensadores de sobrecapa tienen una capacidad de ajuste de capacitancia para un voltaje aplicado determinado superior a la de un condensador de entrehierro.

En una zona de sección transversal determinada, un condensador IDC puede proporcionar una capacitancia superior a la de un condensador de entrehierro. Sin embargo, presenta más pérdidas, proviniendo la principal contribución de la pérdida L_{geom} del espaciado del entrehierro; la pérdida aumenta a medida que disminuye el espaciado. De forma similar, la pérdida aumenta a medida que disminuye el ancho de los dedos. La longitud de los dedos también afecta a la pérdida, pues ésta aumenta a medida que se incrementa la longitud de los dedos; en particular, en una realización de microbanda (la más común) del IDC porque la pérdida de modo diferencial domina en esa estructura. Además, la pérdida aumenta a medida que se incrementa el número de dedos debido a la pérdida que se añade por cada esquina afilada adicional; nótese que ese incremento del número de dedos se emplea normalmente para aumentar la capacitancia de un IDC.

Muchos investigadores en el ámbito ferroeléctrico utilizan IDC con entrehierros y dedos de anchura estrecha ($\leq 5,0 \mu\text{m}$ cada uno) para caracterizar la película ferroeléctrica. Este enfoque es problemático, ya que dicha estructura de IDC provoca una pérdida L_{geom} elevada y, por tanto, una Q baja en sí misma. Normalmente, la Q es muy inferior a 100 a $2,0 \text{ GHz}$, con unos $1,0 \text{ pF}$, incluso sin L_{f-e} . Por todo ello, es bastante difícil medir la pérdida L_{f-e} . Además, el uso extendido de las técnicas de medición de banda ancha, como se ha descrito anteriormente, todavía enturbia más las mediciones de la pérdida L_{f-e} .

En la figura 4 se muestra un condensador IDC 60 preferente que minimiza la contribución a la pérdida L_{geom} . Se forma sobre un sustrato de zafiro, MgO o alúmina con un 99,5% de pureza u otro sustrato 62 adecuado con un grosor aproximado entre $0,2$ y $1,5 \text{ mm}$. Se forma una capa ferroeléctrica 64 sobre el sustrato 62. Un puerto de entrada 66 y un puerto de salida 68 se acoplan al condensador IDC 60. Una capa metálica 70 con un grosor entre $1,5$ y $3,0$ micrones y situada sobre la capa ferroeléctrica 64 forma un espaciado de entrehierro 72 de unos $5,0$ micrones y una anchura de dedo 70 de unos 150 micrones, o más si es posible.

A continuación, se describirá un inductor ajustable que pueda utilizarse para crear un circuito de adaptación ajustable. Los inductores de microbanda pueden fabricarse en forma de longitudes cortas, 1, de líneas estrechas como se muestra en la figura 4b. La figura 4b muestra un inductor de microbanda 700 conectado eléctricamente con dos partes 702 y 704 de una línea de microbanda y situado entre éstas. La anchura, W_L , y la longitud, L_L , se muestran en la figura 4b. También se muestran los planos de entrada y salida A y A', como referencia a un modelo de circuito mostrado en la figura 4c y que se describirá más adelante.

Obsérvese que:

$$L_L = \frac{\lambda_g}{4},$$

donde

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}};$$

ES 2 315 361 T3

ϵ_{eff} = la constante dieléctrica efectiva;

$$\lambda_0 = \frac{c}{f};$$

y c = la velocidad de la luz.

El inductor 700 tiene una inductancia, L , determinada por la siguiente ecuación:

$$L = \frac{Z_0}{\omega} \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_t}\right),$$

donde

Z_0 = la impedancia característica de la línea inductiva estrecha; y $\omega = 2\pi f$, es la frecuencia en radianes de la señal de RF.

La constante dieléctrica efectiva, ϵ_{eff} , de la línea de microbanda puede verse afectada al introducir una película ferroeléctrica fina 708 (grosor, t , $\leq 1,5 \mu\text{m}$ aproximadamente) en la parte superior del sustrato base 706 utilizado en la figura 4b y justo por debajo de la capa metálica 700. A la línea puede aplicársele una desviación. Los inductores de este tipo (líneas de microbanda rectas simples) normalmente están limitados a $L \leq 1,0 \text{ nH}$ aproximadamente. Los factores de limitación son una elevada resistencia relacionada con una w_L estrecha y los requisitos de transporte de corriente, los determinados por la aplicación específica. Pueden fabricarse líneas inductivas similares con curvas o espirales, que permitan una mayor inductancia, L , de hasta $4,0 \text{ nH}$ aproximadamente.

Los inductores de este tipo también pueden fabricarse con topología de guía de onda coplanar (CPW) o de *stripline*. En este enfoque, tanto el valor de inductancia, L , como el rango de ajuste están limitados. El uso de películas ferroeléctricas gruesas puede ser más ventajoso para los inductores de ajuste, ya que ofrece un mayor potencial de variación con respecto a ϵ_{eff} y Z_0 .

En la figura 4c se muestra un modelo de circuito equivalente al circuito de la figura 4b. El inductor 700 se muestra como equivalente al inductor 722 de la figura 4c. También se muestran los condensadores 724 y 726 que representan las capacitancias parásitas a tierra de las partes de microbanda 702 y 704 de la figura 4b. Asimismo, en la figura 4c se muestran planos de entrada y salida equivalentes A y A'. El plano de entrada y salida A está acoplado al inductor 722 y al condensador 724. El condensador 724 está acoplado a tierra. El inductor 722 también está acoplado al condensador 726. El condensador 726 está acoplado a tierra. El inductor 722 también está acoplado al plano de entrada y salida A'.

El valor de los condensadores derivados 724 y 726 puede aprovecharse en circuitos específicos. Por ejemplo, pueden absorberse mediante condensadores derivados situados junto al inductor a ambos lados.

El circuito de adaptación puede presentar cualquier topología conocida en la técnica. A continuación se describirán varios circuitos de adaptación ajustables. En lo que respecta a la figura 5, se muestra un circuito de adaptación ajustable 122 con un condensador ajustable en serie 125 y un inductor derivado 128 acoplado entre una entrada 131 y una salida 134. La figura 6 muestra un circuito de adaptación ajustable 137 con un inductor derivado 140 y un condensador en serie 143 acoplado entre una entrada 146 y una salida 149. La figura 7 muestra un circuito de adaptación ajustable 152 con un inductor en serie 155 y un condensador derivado 158 acoplado entre una entrada 161 y una salida 164. La figura 8 muestra un circuito de adaptación ajustable 167 con un condensador derivado 170 y un inductor en serie 173 acoplado entre una entrada 176 y una salida 179. De manera alternativa, en cualquiera de las figuras de la 5 a la 8, el inductor 128, 140, 155, 173 puede ser ajustable, o tanto el condensador 125, 143, 158, 170 como el inductor 128, 140, 155, 173 pueden ser ajustables. En muchos casos, los voltajes de control pueden aplicarse al condensador ferroeléctrico mediante los inductores mostrados en las figuras de la 5 a la 8. De forma alternativa, puede aplicarse al condensador ferroeléctrico por sí mismo con un diseño adecuado del condensador.

Las figuras 9 y 10 muestran circuitos de adaptación más complejos. La figura 9 es un diagrama de bloques de un circuito de adaptación en π 102. El circuito de adaptación en π 102 posee un primer elemento reactivo 106 acoplado entre la entrada 108 y la toma a tierra 114. Un segundo elemento reactivo 112 está acoplado entre la entrada 108 y la salida 116. Un tercer elemento reactivo 118 está acoplado entre la salida 116 y la toma a tierra 114. Cada elemento reactivo 106, 112, 114 puede comprender un inductor o bien un condensador. Todos los elementos reactivos, o cualquiera de ellos, pueden realizarse a modo de elemento concentrado o distribuido. Al menos uno de los elementos reactivos 106, 112, 114 es ajustable. Esto permite que el circuito de adaptación 102 sea ajustable.

La figura 10 es un diagrama de bloques de un circuito de adaptación en T 60. El circuito de adaptación en T 60 posee un primer elemento reactivo 66 acoplado entre la entrada 63 y un segundo elemento reactivo 69. El segundo elemento reactivo 69 está acoplado entre el primer elemento reactivo 66 y una toma a tierra 72. Un tercer elemento reactivo 75 está acoplado entre los elementos reactivos primero y segundo 66, 69 y una salida 78. Cada elemento reactivo 66, 69, 75 puede comprender un inductor o bien un condensador. Todos los elementos mostrados, o cualquiera de ellos,

ES 2 315 361 T3

pueden ser elementos concentrados o distribuidos. Al menos uno de los elementos reactivos 66, 69, 75 es ajustable. Esto permite que el circuito de adaptación 60 sea ajustable.

Las figuras de la 5 a la 10 muestran circuitos de adaptación ajustables. Se entenderá que es posible construir circuitos de adaptación más complejos combinando los circuitos de adaptación mostrados en las figuras de la 5 a la 10 y agregando componentes en serie y en paralelo a los componentes mostrados.

La capacitancia de un condensador ferroeléctrico siempre disminuirá al incrementar el voltaje CC (de control). Es necesario tener este hecho en cuenta para conseguir una red de adaptación óptima. Una herramienta útil para ello es el diagrama de Smith. Históricamente, el diagrama de Smith era el recurso gráfico con el que los diseñadores podían trazar la impedancia fuente o de carga y elegir la topología del circuito de adaptación para desplazar dicha impedancia fuente o de carga al lugar deseado, normalmente a 50Ω .

De manera alternativa, la sensibilidad del material ferroeléctrico a la temperatura puede controlarse modificando el voltaje CC de control en función de la temperatura. Un modo de hacer esto consiste en utilizar una tabla de consulta almacenada en la memoria junto con un sensor de temperatura, por ejemplo, un diodo o un termistor.

La sensibilidad ferroeléctrica a la temperatura también puede reducirse mediante un tipo de fabricación adecuada del material ferroeléctrico. En el estado paraeléctrico preferente, la temperatura de Curie del material está por debajo del intervalo de temperaturas de funcionamiento. Reduciendo la temperatura del punto de Curie, puede conseguirse una variación menor de la temperatura en el material ferroeléctrico. Sin embargo, ello va a expensas de la capacidad de ajuste.

El diagrama de Smith se ha incluido en muchos paquetes de programas informáticos de simulación de circuitos de uso común. Algunos ejemplos son Eagleware (que también tiene un programa individual de adaptación) y Momentum. Estas herramientas pueden utilizarse para seleccionar la topología óptima o deseada del circuito de adaptación y el número de elementos de adaptación necesarios para una aplicación determinada.

La figura 11 es un diagrama de bloques que muestra un circuito de adaptación dieléctrico ajustable 22 empleado para ajustar una impedancia de dispositivo 24 a una impedancia objetivo 26. El circuito 22 está compuesto de un condensador 28 y un inductor 30. En una primera realización, el condensador 28 puede disponer de un primer mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 34. Juntos, el condensador 28 y el mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 34 comprenden un condensador ajustable 32.

El mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 34 ajusta la constante dieléctrica de algunos o de todos los materiales dieléctricos próximos al condensador 28. Esto desvía la capacitancia del condensador 28. De este modo se desvía a su vez la impedancia del dispositivo 51 y del circuito de adaptación 22 combinadas. Así, la impedancia puede ajustarse selectivamente para que se adapte a la impedancia objetivo 26.

En una segunda realización, el inductor 30 puede disponer de un segundo mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 33. Juntos, el inductor 30 y el segundo mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 33 comprenden un inductor ajustable 31. El mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 33 ajusta el material dieléctrico próximo al inductor 30. Esto desvía la inductancia del inductor 30. De este modo, a su vez, se desvía la impedancia del dispositivo 51 y del circuito de adaptación 22 combinadas. Así, la impedancia puede ajustarse selectivamente para que se adapte a la impedancia objetivo 26.

En una tercera realización, el circuito de adaptación 22 puede estar provisto de los dos componentes ajustables, es decir, un condensador ajustable 32 y un inductor ajustable 31.

En cada una de las realizaciones primera, segunda y tercera, se incluye una primera fuente de control 96, una segunda fuente de control 98, o bien ambas, para enviar señales de control a los mecanismos de ajuste de la constante dieléctrica 34 y 33.

Se consiguen adaptar las impedancias, al tiempo que se mantiene una pérdida total muy baja en el circuito de adaptación 22. En la figura 11 se muestran cinco pérdidas específicas. Hay una pérdida 53 relacionada con el primer mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 34. Esta pérdida 53 puede ser la tangente de pérdida del material ferroeléctrico o L_{f-e} . Consta también una pérdida 55 asociada al condensador 28. Esta pérdida 55 puede ser una combinación de L_{metal} y L_{geom} . Hay también una pérdida 54 relacionada con el segundo mecanismo de ajuste de la constante dieléctrica 33. Esta pérdida 54 puede ser la tangente de pérdida del material ferroeléctrico o L_{f-e} . Consta también una pérdida 56 asociada al inductor 32. Esta pérdida 56 puede ser una combinación de L_{metal} y L_{geom} . Por último, está la pérdida 57 relacionada con todo el circuito de adaptación 22. Esta pérdida 57 puede ser una combinación de L_{attach} , L_{sub} y L_{rad} .

Cada una de estas pérdidas se elimina o limita mediante las técnicas expuestas anteriormente. Por tanto, el circuito de adaptación 22 aporta una pérdida lo suficientemente baja como para poder utilizarse en un dispositivo inalámbrico u otro sistema de comunicación que exija una pérdida baja.

ES 2 315 361 T3

Los circuitos ferroeléctricos de adaptación ajustables pueden emplearse en distintos lugares del dispositivo manual inalámbrico. En concreto, pueden emplearse, aunque no de forma limitada, en la adaptación de una antena a un duplexor, diplexor o multiplexor y para realizar la adaptación en la entrada y la salida de PA y LNA. También pueden usarse en la banda de frecuencia intermedia (IF) para proporcionar el ajuste en este lugar si fuera necesario.

La figura 12 muestra un diagrama de bloques de dos circuitos de adaptación 101 y 104 acoplados a un amplificador 107. El amplificador 107 puede ser un amplificador de potencia (PA), un amplificador de bajo ruido (LNA) o cualquier otro tipo de amplificador. El primer circuito de adaptación 101 fija la impedancia de un circuito de entrada 110 a una primera impedancia objetivo. La impedancia objetivo puede ser distinta de la impedancia de entrada del amplificador 107. El circuito de adaptación 101 compensa esta diferencia. Un segundo circuito de adaptación 104 fija la impedancia del amplificador 107 a una segunda impedancia objetivo. La segunda impedancia objetivo puede ser igual a la primera impedancia objetivo.

La adaptación puede conseguirse en una amplia gama de frecuencias al tiempo que se mantienen las características de banda estrecha del dispositivo. Poder controlar la impedancia de un amplificador en el momento en que se ajusta reduce la pérdida en la ruta de la señal.

Los circuitos de adaptación 101 y 104 pueden controlarse mediante un circuito de muestreo de potencia 108, un circuito de detección de potencia 103 y un circuito de control 105 tal y como se muestra en la figura 12. El circuito de muestreo de potencia 108 está acoplado a la salida del amplificador 107. Toma muestras de la salida de potencia del amplificador 107 y transfiere la señal al circuito detector de potencia 103. El circuito detector de potencia 103 detecta el nivel de potencia del amplificador 107 y transfiere la señal al circuito de control 105. El circuito de control recibe el nivel de potencia detectado por el circuito detector de potencia 103 como entrada y genera una señal de control como salida. La señal de control modifica el voltaje de CC aplicado al material ferroeléctrico de los circuitos de adaptación 101 y 104. De este modo, los circuitos de adaptación 101 y 104 reaccionan a la salida de potencia del amplificador 107.

Juntos, el circuito de muestreo de potencia 108, el circuito detector de potencia 103 y el circuito de control 105 forman una fuente de control. Obsérvese que el circuito detector de potencia 103 se muestra como un diodo, un condensador y un inductor sólo a efectos ilustrativos. Puede utilizarse cualquier detector de potencia adecuado.

En la figura 15 se muestra una fuente de control alternativa. Se recibe como entrada 237 una señal selectora de banda que permite controlar la fuente 221. La fuente de control 221 comprende una fuente de voltaje 223 y una tabla de consulta 229. Reaccionando a la señal selectora de banda, la fuente de control 221 consulta un valor en la tabla de consulta 229 correspondiente a la banda seleccionada. El valor representa el voltaje que aplicará la fuente de control 221 al circuito de adaptación 225. El voltaje incluye una señal de control que cambia la impedancia del circuito de adaptación 225.

En los PA, el ajuste ferroeléctrico no sólo puede ajustar eléctricamente la adaptación de impedancia de salida de un dispositivo determinado inicialmente y optimizarlo en función de la temperatura, sino que también puede modificar dinámicamente la línea de carga de un PA conociendo la salida de potencia necesaria. La capacidad de optimizar la línea de carga de un PA en una gama de potencias de salida es fundamental para obtener una eficiencia de potencia óptima y así minimizar el consumo de electricidad de la fuente de CC, es decir, una batería, en el caso de los dispositivos manuales inalámbricos. De este modo, se incrementa el tiempo de conversación y se reduce la disipación de calor.

La potencia de salida máxima que un amplificador ferroeléctrico ajustable puede gestionar está limitada por la no linealidad del material ferroeléctrico y por los requisitos generales del sistema. Para los dispositivos manuales inalámbricos existen estándares adecuados, como IS-95 o IS-98, que definen los límites de tolerancia de la no linealidad de transmisión (PA) en términos de interferencia de cocanal y/o canal adyacente. La mejora de la linealidad del PA tiene un efecto directo y positivo que se traduce en el hecho de que debe utilizarse un dispositivo más pequeño y/o menos corriente de polarización para cumplir con estos estándares. La linealidad del material ferroeléctrico debe tenerse en cuenta. Los materiales ferroeléctricos descritos en el presente documento tienen cierta no linealidad. La elección de una película ferroeléctrica en particular viene determinada por la tolerancia de un sistema dado a la no linealidad.

Asimismo, puede conseguirse un aumento de la potencia de salida mediante la colocación en paralelo convencional de los dispositivos, como resultará evidente a las personas dadas en la materia. La capacidad ferroeléctrica de ajuste también puede explotarse en estos casos.

Los materiales ferroeléctricos también pueden resultar beneficiosos para los LNA. Los LNA pueden ajustarse eléctricamente para adaptarse a la impedancia óptima de entrada de un dispositivo, junto con la salida, para proporcionar un número de ruido y un punto de interceptación óptimo. Como ocurre en el caso del PA, también puede controlarse con la temperatura. El rendimiento del amplificador cambia según la temperatura. Esto puede provocar desajuste de impedancia a diferentes temperaturas y/o una desviación del punto de funcionamiento del dispositivo activo. La capacidad ferroeléctrica de ajuste puede emplearse para compensar este desajuste de impedancias seleccionando oportunamente: 1) las características de temperatura del material ferroeléctrico, y/o; 2) la topología de adaptación elegida.

La capacidad de ajuste permite operar un LNA o un PA de forma óptima sobre más de una banda. Esto resulta especialmente útil en dispositivos manuales inalámbricos porque la cantidad de espacio de dichos dispositivos es limi-

tado y muchas bandas de funcionamiento tienen un espaciado muy próximo. El ahorro de espacio es proporcional al número de componentes independientes para las distintas bandas que se eliminan añadiendo componentes ajustables. La capacidad de ajuste permite que los fabricantes de dispositivos manuales dispongan de menos diseños distintos de PA y LNA para la fabricación de dispositivos en un mercado diversificado. También permite que los dispositivos
5 funcionen en amplias áreas geográficas sin la necesidad de contar con varios PA y LNA. Por ejemplo, un PA o un LNA puede cubrir varias bandas PCS, como las bandas PCS de Corea, India o Estados Unidos.

La mejora de la adaptación resultante se traduce en un aumento de la ganancia de antena, una ulterior mejora del rendimiento del dispositivo, tanto en lo que respecta a la transmisión (menor potencia de PA necesaria, más linealidad)
10 como a la recepción (incremento de la sensibilidad, menos corriente de polarización de LNA necesaria).

Otro ejemplo de circuito de adaptación ajustable es un circuito de adaptación para adaptar la impedancia de una antena a la impedancia de un duplexor o un diplexor. Estas configuraciones se muestran en las figuras 13 y 14. En la figura 13, una antena 42 está acoplada a un circuito de adaptación 44. El circuito de adaptación 44 está acoplado a un
15 duplexor 46. El circuito de adaptación 44 fija la impedancia de la antena 42 a una impedancia objetivo. La impedancia objetivo puede ser distinta de la impedancia de entrada del duplexor 46. El circuito de adaptación 44 compensa esta diferencia. La impedancia de adaptación también fija la impedancia del duplexor 46 a una impedancia objetivo. Esta impedancia objetivo puede ser distinta de la impedancia de entrada de la antena 42. El circuito de adaptación 44 compensa esta diferencia.

En la figura 14, una antena 48 está acoplada a un circuito de adaptación 50. El circuito de adaptación 50 está acoplado a un diplexor 52. El circuito de adaptación 50 fija la impedancia de la antena 48 a una impedancia objetivo. La impedancia objetivo puede ser distinta de la impedancia de entrada del diplexor 52. El circuito de adaptación 50
20 compensa esta diferencia. La impedancia de adaptación también fija la impedancia del diplexor 52 a una impedancia objetivo. Esta impedancia objetivo puede ser distinta de la impedancia de entrada de la antena 48. El circuito de adaptación 50 compensa esta diferencia. El diplexor se muestra de tal forma que funciona para las bandas PCS y celular. Esto sólo se incluye a modo de ejemplo. El diplexor podría funcionar para otras bandas y podría sustituirse por un multiplexor para más de dos bandas.

Obsérvese que se aplica una señal de control a los circuitos de adaptación 44 y 50 de las figuras 13 y 14, respectivamente. Esta señal de control puede generarse de forma similar a las de las figuras 12 o 15, o con otro método adecuado. También puede aplicarse un muestreador de potencia, por ejemplo, en los puertos Tx o Rx del duplexor 46
30 o en los puertos PCS o celular del diplexor.

La mejora de la adaptación resultante se traduce en un aumento de la ganancia de antena, una ulterior mejora del rendimiento del dispositivo, tanto en lo que respecta a la transmisión (menor potencia de PA necesaria, más linealidad), como a la recepción (incremento de la sensibilidad, menos corriente de polarización de LNA necesaria).
35

Aunque el invento se ha descrito haciendo referencia a realizaciones concretas, la descripción sólo es un ejemplo de aplicación del invento y no debería considerarse limitativa. En consecuencia, dentro del ámbito del invento, abarcado por las siguientes reivindicaciones, se incluyen varias adaptaciones y combinaciones de las características de las realizaciones divulgadas.
40

REIVINDICACIONES

1. Circuito de adaptación (22) que comprende: un condensador (28) y un inductor (30) dispuestos a modo de
 5 circuito de adaptación (22), contando el circuito de adaptación (22) con una impedancia; pudiéndose ajustar al menos
 el condensador (28) o el inductor (30) utilizando un material ferroeléctrico (33, 34) limitado a una zona de entrehierro
 del condensador (28) y limitado a una zona de microbanda del inductor (30); una línea de control controlable conectada
 al material ferroeléctrico (33, 34); una fuente de control (96, 98) conectada eléctricamente a la línea de control, estando
 la fuente de control (96, 98) configurada para transmitir una señal de control a través de la línea de control; ajustando
 10 el material ferroeléctrico (33, 34), en reacción a la señal de control, al menos la capacitancia del condensador (28) o
 bien la inductancia del inductor (30) para modificar la impedancia del circuito de adaptación (22).
2. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el condensador (28)
 está fabricado directamente sobre un sistema de circuitos de RF asociado.
- 15 3. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el condensador de
 entrehierro (10) tiene esquinas redondeadas.
4. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el condensador es
 20 un condensador de sobrecapa (30) y por el hecho de que las contribuciones de pérdida por geometría se reducen
 configurando el condensador de sobrecapa (30) para que posea un área de aproximadamente $7,0 \mu\text{m} \times 7,0 \mu\text{m}$ y una
 película ferroeléctrica con un grosor de $1,0 \mu\text{m}$ aproximadamente.
5. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el condensador es un
 25 condensador interdigital (60), y por el hecho de que las contribuciones de pérdida por geometría se reducen configu-
 rando el condensador interdigital (60) con un espaciado de entrehierro de aproximadamente $5,0 \mu\text{m}$ y un ancho de
 dedo de aproximadamente $150 \mu\text{m}$.
6. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroeléc-
 30 trico (33, 34) posee una constante dieléctrica ajustable a una temperatura ambiente en el rango de -100 grados Celsius
 a 50 grados Celsius.
7. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroeléc-
 trico (33, 34) posee una temperatura de Curie de entre -100 grados Celsius y 50 grados Celsius.
- 35 8. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroeléc-
 trico (33, 34) posee una temperatura de Curie cercana a la temperatura ambiente.
9. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroeléc-
 40 trico (33, 34) es una película limitada a una región de menos de 0,5 mm de ancho.
10. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroeléc-
 trico (33, 34) es una película limitada a una región de menos de 0,2 mm de ancho.
- 45 11. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el circuito de adapta-
 ción (22) está situado sobre un sustrato.
12. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 11, **caracterizado** por el hecho de que la zona de entrehierro
 se encuentra entre un inductor de entrada y un inductor de salida del condensador (28).
- 50 13. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 12, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroe-
 léctrico (33) está situado sobre el sustrato en una región estrecha que rodea y se superpone a la zona de entrehierro.
14. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 11, **caracterizado** por el hecho de que el inductor (30)
 55 comprende una línea de microbanda de inductor (700) conectada eléctricamente a una almohadilla de entrada (702) y
 a una almohadilla de salida (704).
15. Circuito de adaptación (22) según la reivindicación 14, **caracterizado** por el hecho de que el material ferroe-
 léctrico (34) está situado sobre una región estrecha que rodea y se superpone a la línea de microbanda (700).

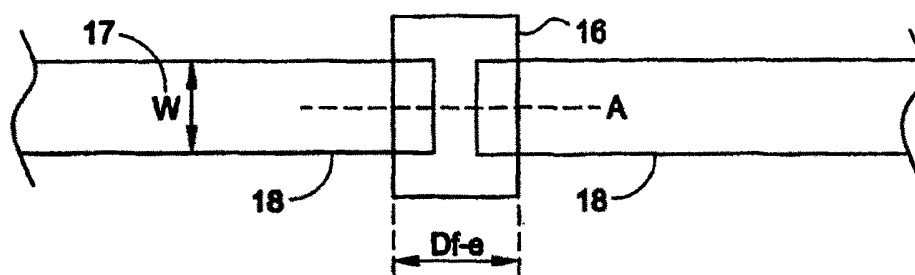


FIG. 1a

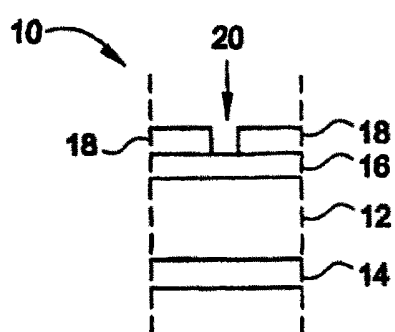


FIG. 1b

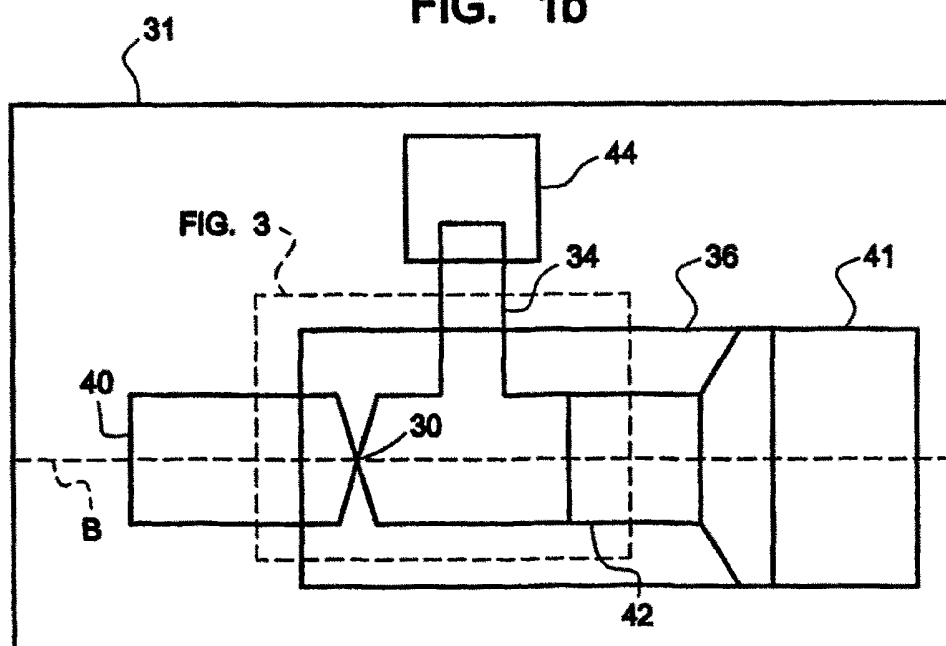


FIG. 2a

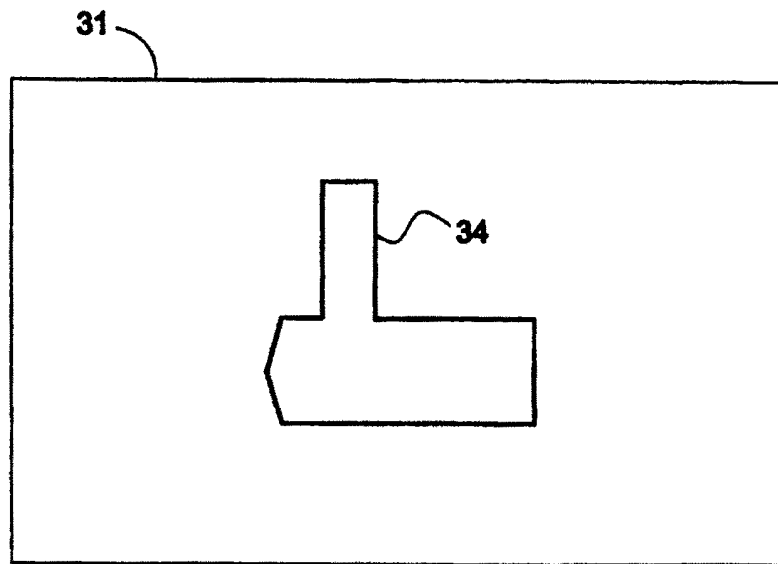


FIG. 2b

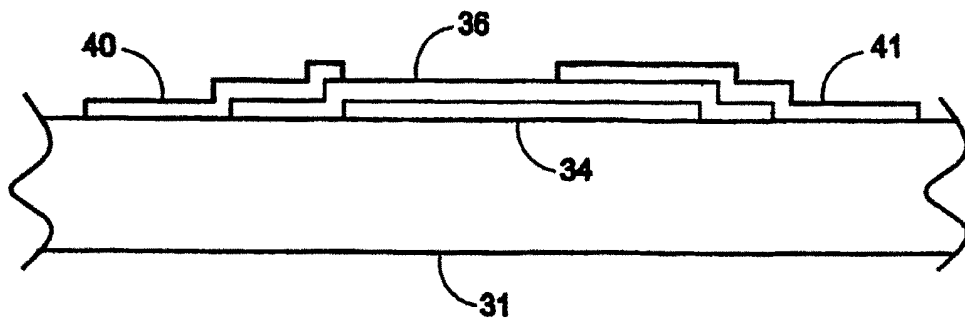


FIG. 2c

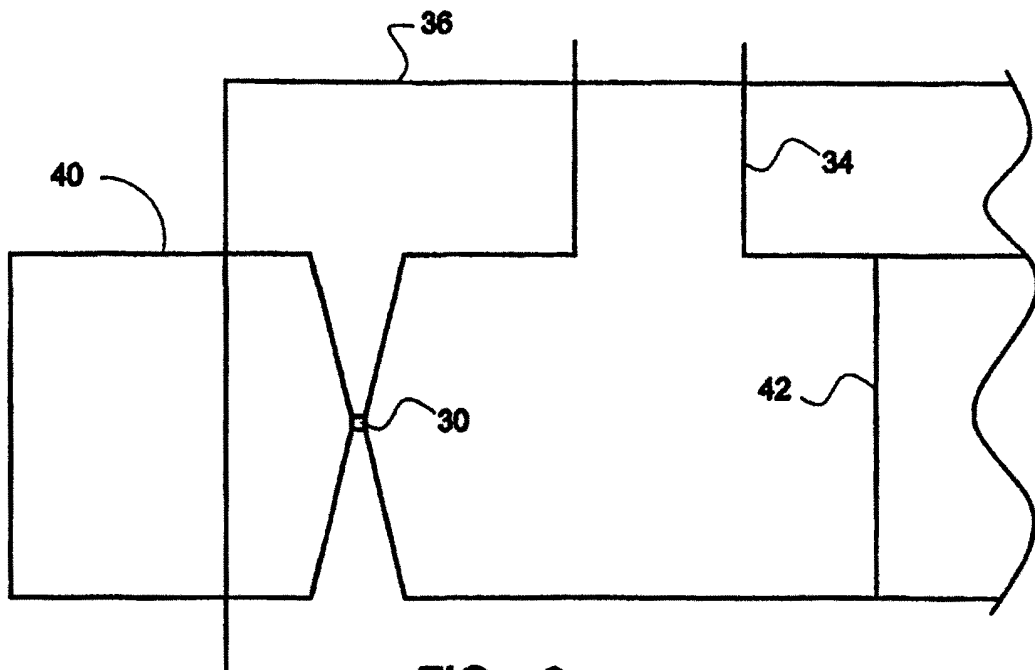


FIG. 3

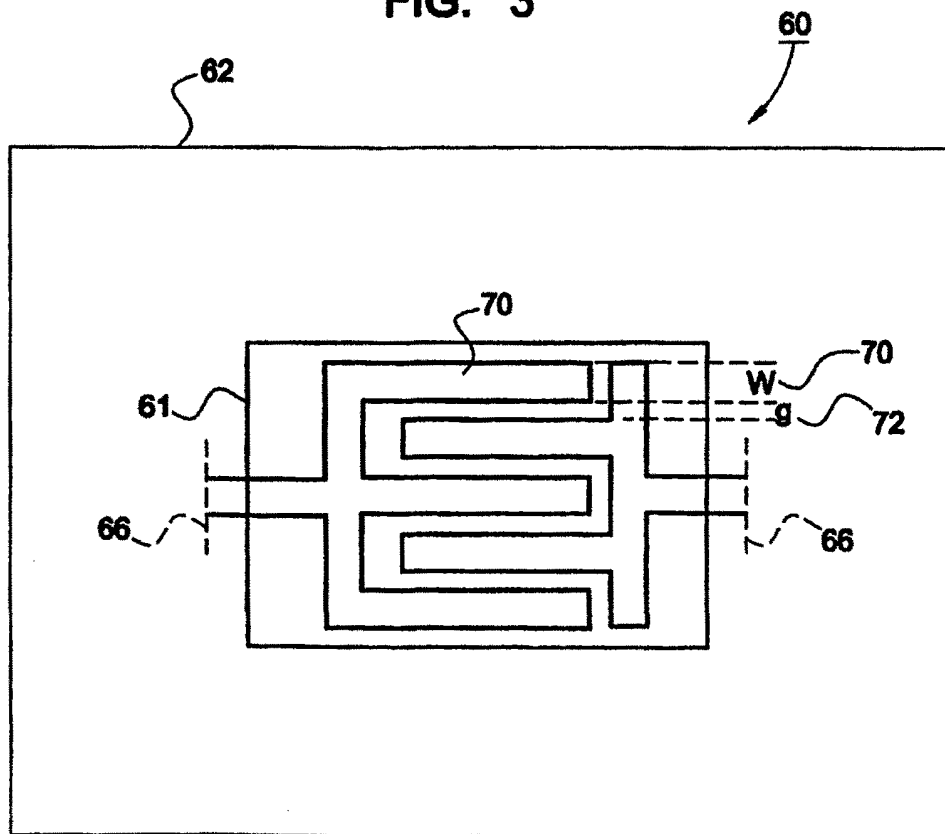


FIG. 4a

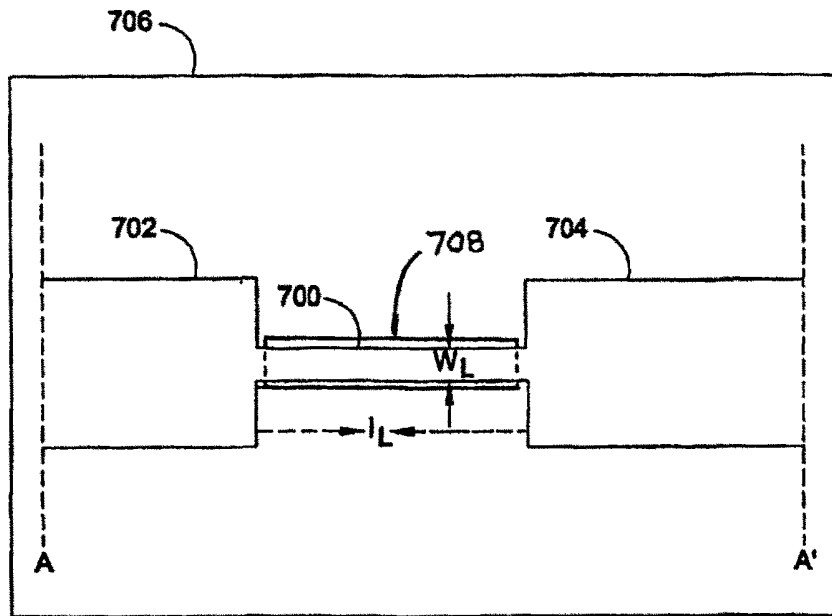


FIG. 4b

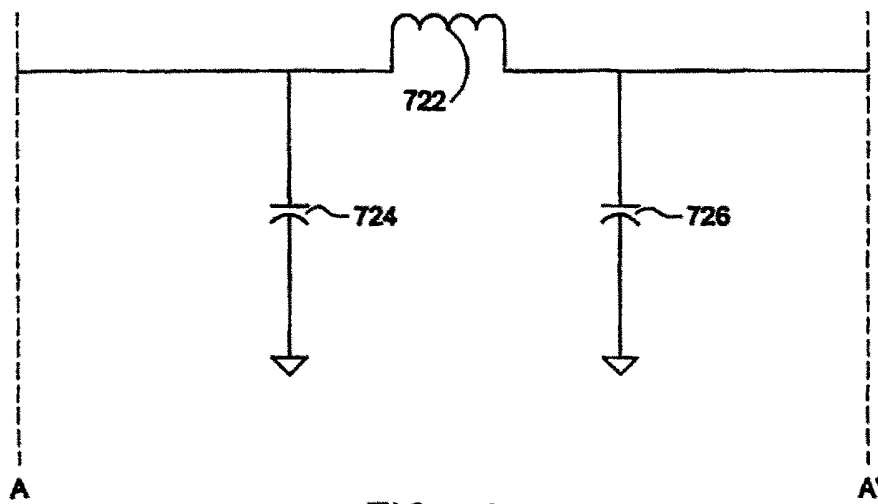


FIG. 4c

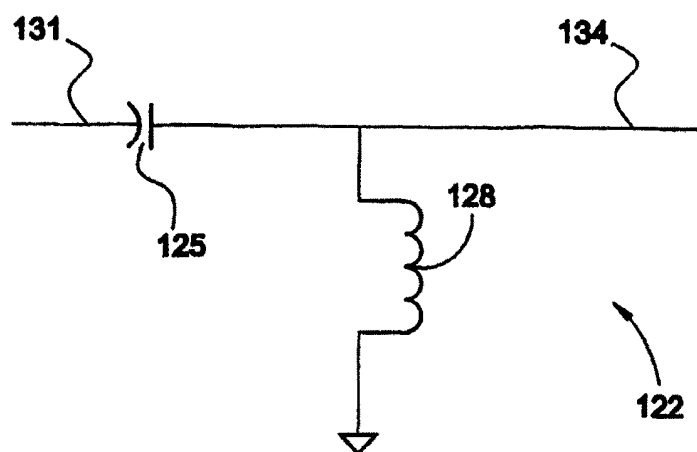


FIG. 5

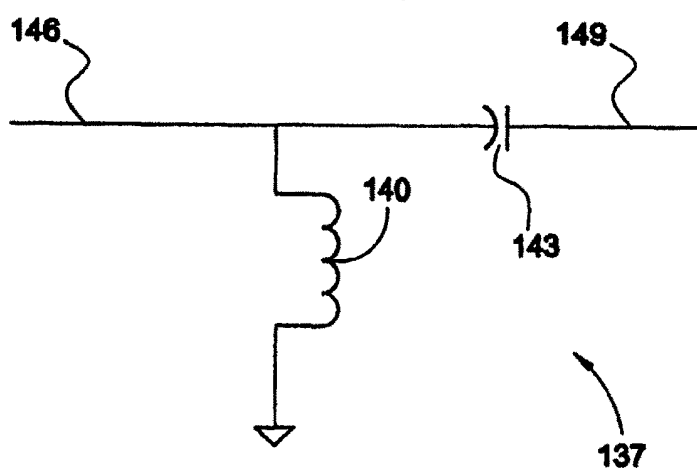


FIG. 6

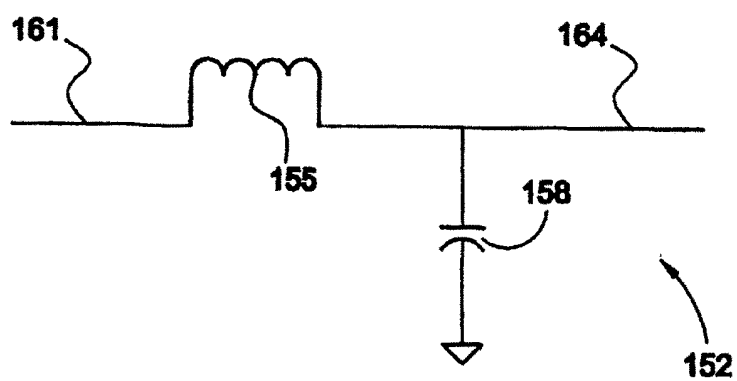


FIG. 7

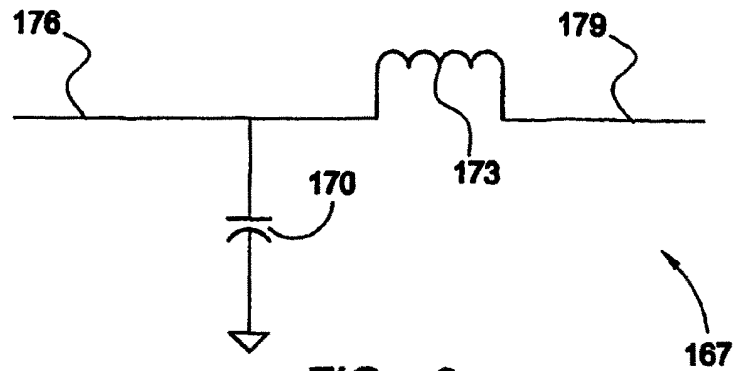


FIG. 8

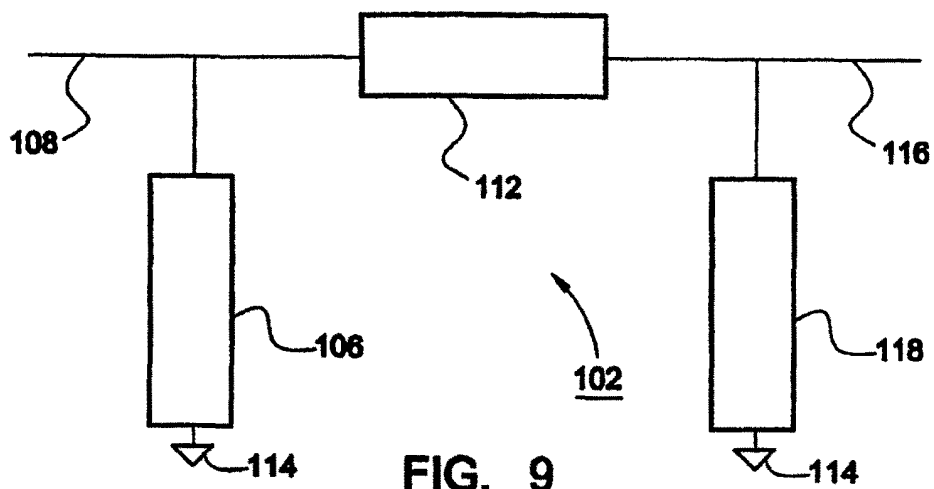


FIG. 9

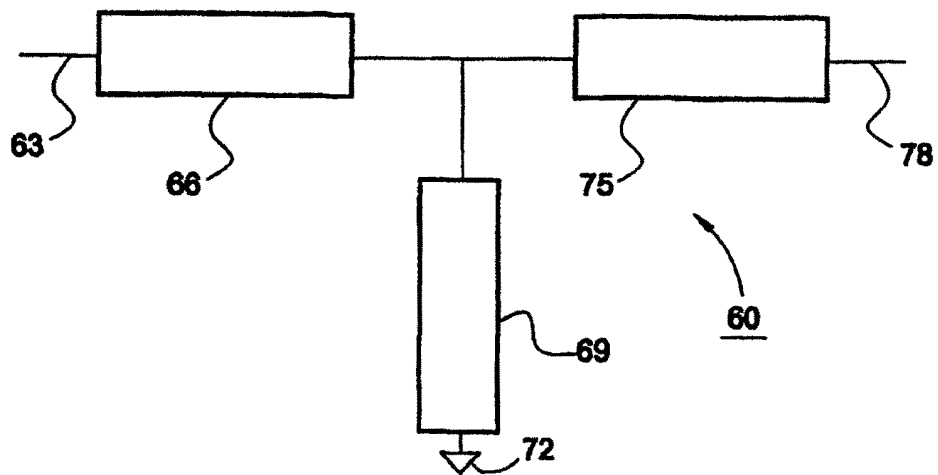


FIG. 10

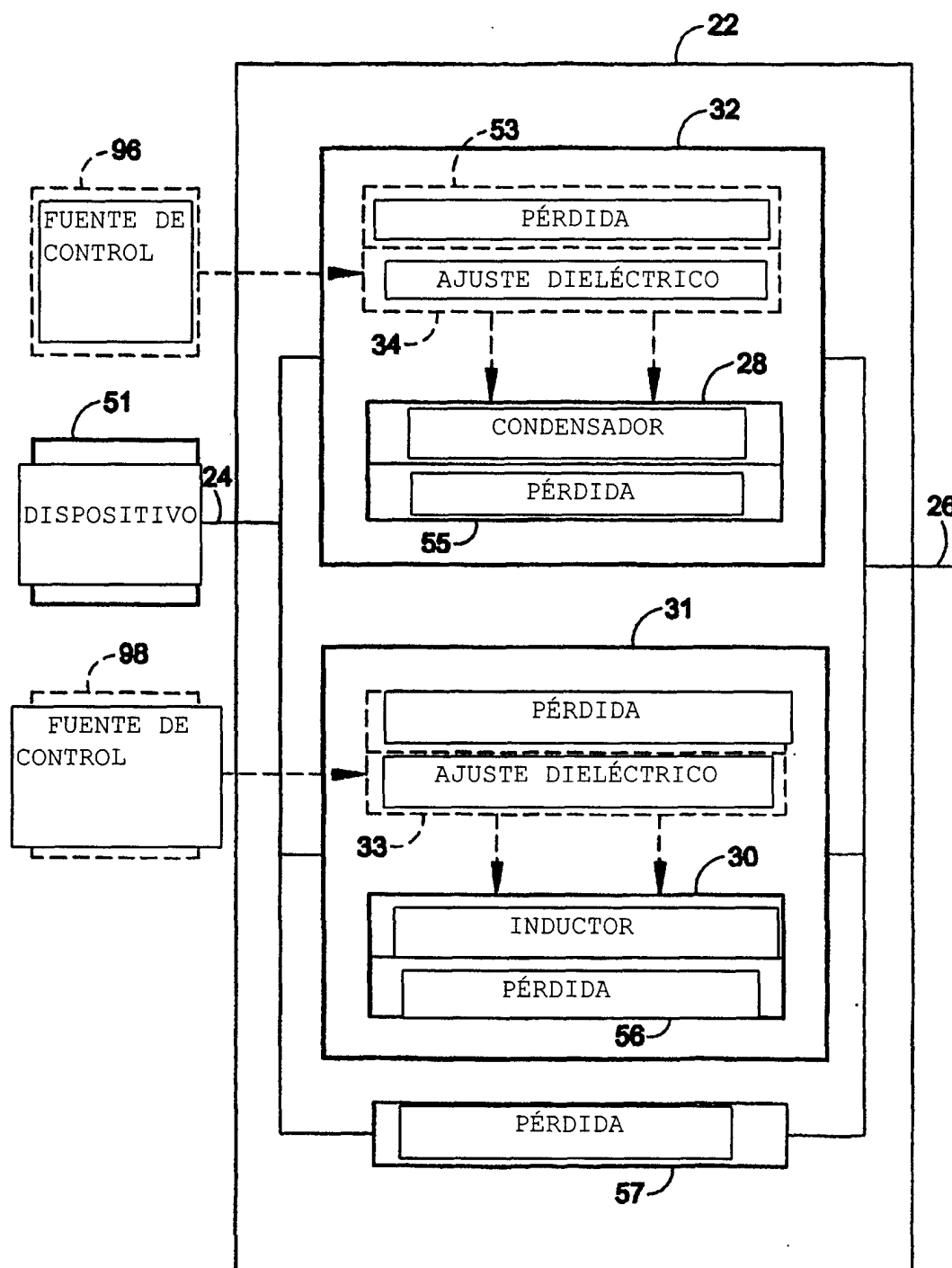


FIG. 11

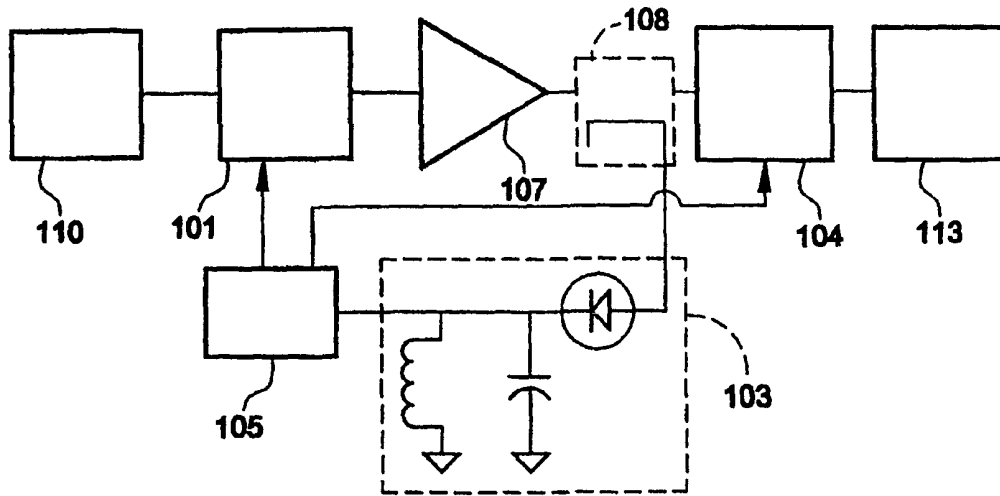


FIG. 12

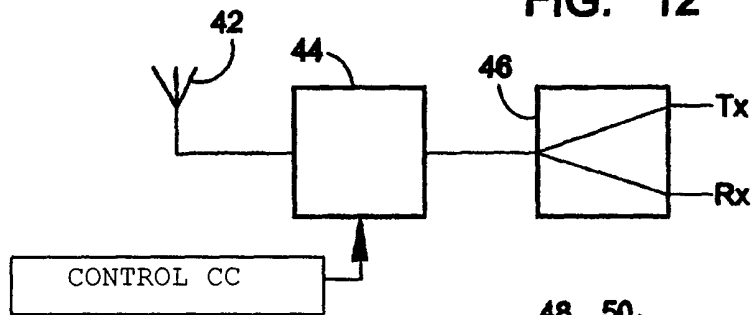


FIG. 13

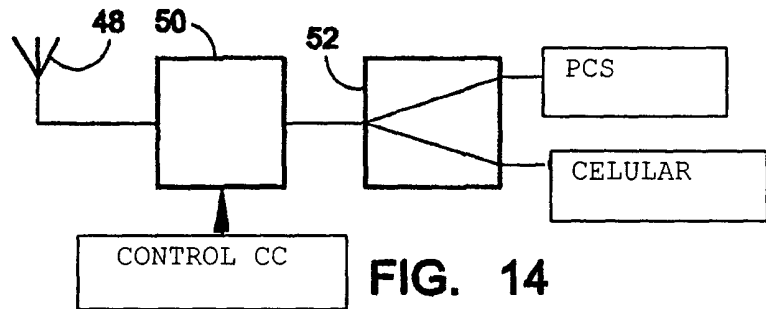


FIG. 14

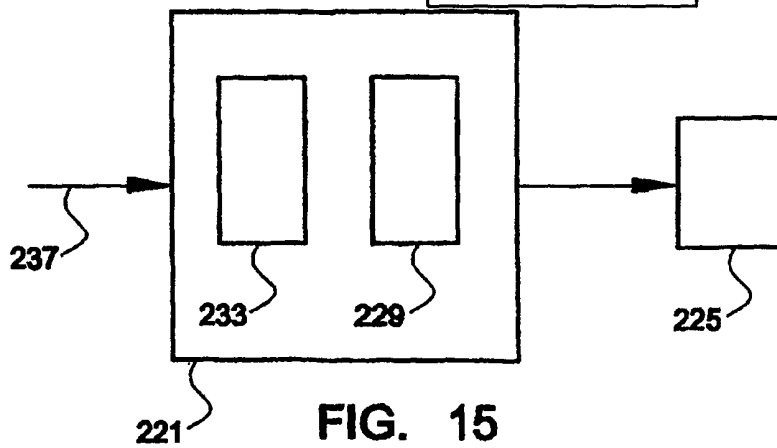


FIG. 15