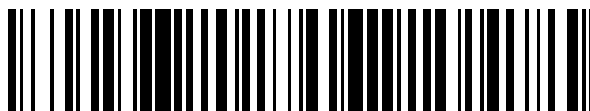


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 510 468**

51 Int. Cl.:

H01F 17/00 (2006.01)

H01L 27/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.02.2005 E 05715341 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.07.2014 EP 1721324**

54 Título: **Método de y diseño físico de un inductor para acoplamiento reducido de VCO**

30 Prioridad:

03.03.2004 US 549611 P

26.04.2004 US 565328 P

16.08.2004 US 919130

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

21.10.2014

73 Titular/es:

TELEFONAKTIEBOLAGET LM ERICSSON (PUBL)
(100.0%)

164 83 Stockholm, SE

72 Inventor/es:

MATTSSON, THOMAS

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 510 468 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

Método de y diseño físico de un inductor para acoplamiento reducido de VCO

5 **CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención se refiere a osciladores de tensión controlada (VCO – Voltage Controlled Oscillators, en inglés) del tipo utilizado en los transmisores receptores de radiofrecuencia (RF) y, en particular, a un diseño de inductor mejorado en un VCO.

10 **ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Recientes avances en la tecnología de la comunicación inalámbrica han permitido la implementación de un transmisor receptor de RF completo en un único troquel de semiconductor o chip. No obstante, integrar un transmisor receptor de RF completo en un solo chip presenta varios retos. Por ejemplo, en los transmisores receptores de acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access, en inglés), una solución de un solo chip requiere que dos VCOs de RF estén funcionando en el chip al mismo tiempo. Tal disposición puede producir una interacción no deseada entre los dos VCOs debido a varios tipos de mecanismos de acoplamiento mutuo, lo que puede resultar en respuestas espurias del receptor y frecuencias no deseadas en el espectro de la transmisión. El mecanismo principal del acoplamiento mutuo es normalmente el acoplamiento electromagnético (EM) fundamental entre los resonadores, es decir, las grandes estructuras del inductor en los VCOs.

Existen varias técnicas para reducir el acoplamiento EM mutuo entre los VCOs debido a los inductores. Una técnica implica la reducción del acoplamiento EM mediante un cuidadoso diseño de los inductores para proporcionar un aislamiento máximo de los inductores. El documento WO 2004/012213 describe una inductancia en un plano de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1, con arrollamientos en espiral en un plano en forma de un “ocho” con tres conductores cruzados. Para compensar el campo magnético de las líneas de suministro, se dispone que dos ojos del arrollamiento tengan diferentes tamaños, lo que limita la reducción del campo magnético resultante. Otra técnica requiere separación de frecuencias operando los dos VCOs a diferentes armónicos pares de la frecuencia deseada. Otra técnica más implica la separación de frecuencias utilizando un concepto de VCO regenerativo. Los métodos de separación de frecuencias aprovechan las propiedades de filtrado del resonador para reducir la interferencia. No obstante, estas soluciones requieren circuitos adicionales (divisores, mezcladores, etc.) que pueden incrementar el consumo de corriente, haciéndolas menos atractivas que otras alternativas de reducción del acoplamiento EM mutuo.

35 **COMPENDIO DE LA INVENCION**

Un diseño de inductor para reducir el acoplamiento EM mutuo entre los resonadores de VCO y el método de implementar el mismo en un chip semiconductor. Un método y sistema implican utilizar inductores que son substancialmente simétricos con respecto a sus ejes horizontal y/o vertical y proporcionar corriente a los inductores de manera que los componentes del campo magnético resultante tiendan a cancelarse entre sí en virtud de la simetría. Además, dos de tales inductores pueden estar situados cerca uno de otro y orientados de una manera que la corriente inducida en el segundo inductor debido al campo magnético que se origina en el primer inductor se reduce significativamente. Los inductores pueden tener forma de 8, forma de trébol de cuatro hojas, una sola vuelta, múltiples vueltas, estar girados uno respecto a otro y/o desfasados verticalmente uno respecto a otro.

45 En general, en un aspecto, un inductor que tiene un campo lejano reducido comprende un primer bucle que tiene una forma que es substancialmente simétrica con respecto a un primer eje predefinido, y un segundo bucle que tiene un tamaño y forma substancialmente idénticos a un tamaño y forma del primer bucle. El segundo bucle está dispuesto de tal manera que un campo magnético que proviene del mismo tiende a cancelar un campo magnético que proviene del primer bucle y de dos terminales muy cercanos entre sí conectados al primer bucle para suministrar corriente eléctrica a los bucles primero y segundo minimizando las contribuciones de los terminales al campo magnético.

55 En general, en otro aspecto, un método de reducir el acoplamiento electromagnético mutuo entre dos inductores en un troquel de semiconductor comprende la etapa de formar un primer inductor sobre el troquel de semiconductor que tiene una forma que es substancialmente simétrica con respecto a un primer eje predefinido, haciendo la forma que el primer inductor tenga un campo lejano reducido, al menos en algunas direcciones. El método comprende además la etapa de formar un segundo inductor sobre el troquel de semiconductor a una distancia predeterminada del primer inductor, donde un acoplamiento electromagnético mutuo entre el primer inductor y el segundo inductor se reduce como resultado de que el primer inductor tiene un campo lejano reducido.

60 En general, en otro aspecto, un diseño físico de inductor que tiene un acoplamiento electromagnético mutuo reducido comprende un primer inductor que tiene una forma que es substancialmente simétrica con respecto a un primer eje predefinido, haciendo la forma que el primer inductor tenga un campo electromagnético reducido a una cierta distancia del primer inductor, al menos en algunas direcciones. El diseño físico del inductor comprende además un segundo inductor situado a una distancia predeterminada del primer inductor, donde un acoplamiento

electromagnético mutuo entre el primer inductor y el segundo inductor se reduce como resultado de que el primer inductor tiene un campo electromagnético reducido.

5 Debe ponerse énfasis en que el término comprende / que comprende, cuando se utiliza en esta memoria, se toma para especificar la presencia de características establecidas, enteros, etapas o componentes, pero no excluye la presencia o adición de una o más características, enteros, etapas, componentes o grupos distintos en ella.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

10 Las anteriores y otras ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada y con referencia a los dibujos, en los cuales:

- la FIGURA 1 ilustra un inductor en forma de O de la técnica anterior;
- la FIGURA 2 ilustra un inductor en forma de 8;
- 15 la FIGURA 3 ilustra una disposición de inductores en forma de O de la técnica anterior;
- la FIGURA 4 ilustra una disposición de inductores en forma de 8;
- la FIGURA 5 ilustra una disposición de inductores en forma de 8 en la que un inductor está girado;
- la FIGURA 6 ilustra el impacto de la distancia en el acoplamiento EM utilizando la disposición de inductores en forma de 8;
- 20 la FIGURA 7 ilustra una disposición de inductores en forma de 8 en la que un inductor está desfasado con respecto al otro inductor;
- la FIGURA 8 ilustra el impacto de la distancia en el coeficiente de desacoplamiento utilizando las disposiciones de inductores;
- la FIGURA 9 ilustra un diseño de VCO en el que se mantiene la simetría;
- 25 la FIGURA 10 ilustra un inductor en forma de trébol de cuatro hojas;
- la FIGURA 11 ilustra una disposición de inductores en forma de trébol de cuatro hojas;
- la FIGURA 12 ilustra el impacto de la distancia en el acoplamiento EM utilizando la disposición de inductores en forma de trébol de cuatro hojas; y
- la FIGURA 13 ilustra un inductor en forma de 8 de dos vueltas.

30 **DESCRIPCIÓN DE REALIZACIONES ILUSTRATIVAS DE LA INVENCION**

Como se ha mencionado anteriormente, varias realizaciones de la invención proporcionan un diseño de inductor y método de implementar el mismo en el que el acoplamiento EM mutuo se reduce. El diseño de inductor y el método sirven para reducir el campo EM a una cierta distancia del inductor (es decir, el campo lejano), al menos en algunas direcciones, utilizando formas de inductor que son substancialmente simétricas. Como se utiliza en esta memoria, el término "simétrico" se refiere a simetría con respecto a al menos un eje. Este campo lejano reducido puede ser utilizado para reducir el acoplamiento mutuo entre dos inductores. El diseño del inductor y el método pueden ser también utilizados para reducir el acoplamiento entre un inductor y otra estructura sobre el chip o externa (por ejemplo, un amplificador de potencia externo). Esto ayuda a reducir la sensibilidad del VCO a las señales de interferencia procedentes de otro VCO distinto de un segundo VCO sobre el chip.

40 Elegir una forma substancialmente simétrica (por ejemplo, una forma en figura de 8 o de trébol de cuatro hojas) para el primer inductor ayuda a reducir el campo EM a distancias lejanas. Esto reducirá a su vez el acoplamiento EM mutuo hacia el segundo inductor, independientemente de su forma. Si el segundo inductor también tiene una forma similar o substancialmente idéntica, la tendencia del segundo inductor a tomar el campo EM del primer inductor se reduce también por medio de los mismos mecanismos. Así, el aislamiento global entre los dos inductores se mejora más. Debe observarse, no obstante, que los dos inductores no necesitan tener el mismo tamaño o la misma forma siempre que tengan una forma substancialmente simétrica. Hasta qué punto se muestran los diseños físicos de inductor idénticos en las figuras, es sólo con propósitos ilustrativos.

50 Además, aunque varias realizaciones de la invención se describen en esta memoria principalmente con respecto a problemas de aislamiento relacionados con los VCOs, los amplificadores de RF y los mezcladores con cargas LC particularizadas o degeneración inductiva pueden también acoplarse entre sí o a un VCO y crear problemas de interferencia. Así, resultará evidente para una persona no experta en la materia que el diseño del inductor y el método pueden ser utilizados para reducir el acoplamiento entre dos bloques funcionales de cualquier tipo con tal de que cada uno contenga uno o más inductores.

60 Con el fin de reducir el acoplamiento EM entre dos inductores, es típicamente necesario reducir el campo lejano generado por las bobinas de inductor. Desgraciadamente, esto no es una tarea sencilla porque existen muchas restricciones topológicas en un inductor integrado en un plano. Por ejemplo, un diseño de inductor típico utiliza dos o más capas de metal apiladas. Normalmente la capa superior es mucho más gruesa (es decir, tiene menor resistencia) que las otras capas. Resulta por lo tanto deseable utilizar principalmente esta capa con el fin de conseguir un factor Q máximo. Donde se cruzan los hilos, normalmente se utilizan capas de metal más finas y es necesario un diseño cuidadoso de los cruces para combinar alto factor Q con mínimo acoplamiento. Además, debe evitarse un acoplamiento electromagnético negativo entre segmentos de hilo paralelos cerca unos de otros para que la inductancia por unidad de longitud del hilo se maximice. No obstante, aprovechando la simetría del inductor en

una o más dimensiones junto con el control de los componentes del campo EM que proviene de diferentes partes de la bobina del inductor, el campo lejano puede ser reducido en algunas direcciones debido a efectos de cancelación.

Los diseños de inductor de VCO existentes son optimizados para factor Q máximo dadas las restricciones en lo que respecta al área de silicio, ancho del hilo y otros. La FIGURA 1 muestra un ejemplo de un inductor 100 existente comúnmente utilizado en los VCOs de RF. El inductor 100 es un inductor diferencial de 1,25 nH con una bobina 102 de inductor que tiene dos terminales 104. Como puede verse, las posiciones de los terminales 104a y 104b han sido optimizadas para la conexión al resto del VCO, incluyendo cualquier varactor e interruptor MOS (no mostrado) que pueda existir, pero se ha prestado poca atención al acoplamiento EM mutuo aparte de guardar una cierta distancia mínima desde otros hilos metálicos en la proximidad.

La FIGURA 2 muestra un ejemplo de un inductor 200. El inductor 200 tiene una bobina 202 de inductor y terminales 204a y 204b, y ha sido diseñado de manera que sea substancialmente simétrico con respecto a un eje horizontal X. En el presente ejemplo, la bobina 202 de inductor es en forma de una estructura en forma de 8 de una sola vuelta con un bucle superior 206a y un bucle inferior 206b. En virtud de la forma en figura de 8, la corriente en el bucle superior 206a va en una dirección (por ejemplo, en sentido contrario a las agujas del reloj, véanse las flechas) que es opuesta a la corriente en el bucle inferior 206b (por ejemplo, en el sentido de las agujas del reloj). Como resultado, los componentes del campo EM que proviene a una cierta distancia de los dos bucles 206a y 206b substancialmente simétricos también tienen direcciones opuestas y tienden a contrarrestarse entre sí. Las direcciones de los componentes del campo EM se indican mediante notación convencional en el medio de cada bucle 206a y 206b. En consecuencia, se ha encontrado que el inductor 200 tiene un campo lejano significativamente reducido a una cierta distancia de la bobina 202 del inductor. Así, haciendo los dos bucles 206a y 206b substancialmente simétricos, puede conseguirse la cancelación de una significativa cantidad de campo lejano a cada lado del eje de simetría horizontal X. Debe observarse, no obstante, que una perfecta simetría entre los dos bucles 206a y 206b puede resultar difícil de conseguir dada la presencia de los terminales 204a y 204b.

Además, la posición de los terminales 204a y 204b puede ayudar a minimizar el campo lejano. Por ejemplo, situar los dos terminales 204a y 204b lo más cerca posible uno de otro ayuda a hacer las contribuciones al campo de las dos partes del inductor 200 idénticas. También resulta deseable minimizar el bucle adicional externo al inductor 200 creado por las conexiones a los varactores y a los conmutadores. Este bucle extra puede comprometer la simetría del propio inductor hasta un cierto punto y puede reducir el efecto de cancelación. En teoría, debe ser posible modificar la geometría del inductor (por ejemplo, hacer el bucle superior ligeramente más grande) para compensar este efecto. La simetría del inductor 200 con respecto a un eje vertical central es también importante para minimizar la generación de componentes de señal en modo común.

Otras consideraciones pueden incluir parámetros de diseño básicos, tales como el ancho y la altura de la bobina 202 del inductor junto con el ancho y la separación de los hilos metálicos circundantes. Estos parámetros, no obstante, están principalmente determinados por los requisitos sobre la inductancia, el factor Q, el área del chip y las reglas de diseño del proceso y tienen sólo una influencia menor sobre las características de acoplamiento mutuo siempre que se mantenga la simetría de la bobina del inductor.

La FIGURA 3 ilustra una disposición de inductores de la técnica anterior de dos inductores 300 y 302 en forma de O. Los dos inductores 300 y 302 están situados uno al lado del otro y tienen bobinas de inductor 304 y 406 en forma de O. Las bobinas del inductor 304 y 306 en esta realización tienen substancialmente el mismo tamaño que la bobina del inductor en forma de 8 (por ejemplo, 350 x 350 μm) de la FIGURA 2 y son simétricas con respecto a su eje vertical Y. Los terminales para las dos bobinas de inductor 304 y 306 están etiquetados como 308a & 308b y 310a & 310b, respectivamente. Debido a que cada inductor 300 y 302 en forma de O proporciona poca o ninguna reducción EM individualmente, la disposición como conjunto proporciona poca o ninguna reducción del acoplamiento EM mutuo.

Por otro lado, una disposición de inductores que implica dos inductores en forma de 8 como el de la FIGURA 2 puede proporcionar un acoplamiento EM mutuo más reducido. Esto se ilustra en la FIGURA 4, donde se muestra una disposición de inductores similar a la disposición de la FIGURA 3, excepto porque los dos inductores 400 y 402 tienen bobinas de inductor 404 y 406 en forma de 8 en lugar de bobinas de inductor en forma de O. Los terminales para las bobinas de inductor 404 y 406 están etiquetados como 408a & 408b y 410a & 410b, respectivamente. Cada inductor 400 y 402 individual tiene un campo lejano reducido en virtud de la bobina de inductor 404 y 406 en forma de 8, como se ha explicado anteriormente con respecto a la FIGURA 2. Además, existe también una reducción en el acoplamiento mutuo entre los dos inductores 400 y 402. Esto es porque el mismo mecanismo que hace que el campo EM radiado desde el primer inductor sea reducido también hace que la "sensibilidad de recepción del campo EM" del segundo inductor sea reducida. Así, el efecto combinado de los dos inductores uno sobre otro proporciona la deseada reducción del acoplamiento.

Debe observarse que no es necesario que los dos inductores 400 y 402 tengan el mismo tamaño. Todo lo que se necesita para la reducción del acoplamiento EM mutuo es que tengan formas similares reductoras del EM. Además, una combinación de un inductor en forma de O y un inductor en forma de 8 puede aun resultar en una reducción del acoplamiento mutuo. No obstante, puesto que tal disposición sólo utiliza el efecto de cancelación de EM de un

inductor (el inductor en forma de O tiene poca o ninguna cancelación de EM), el aislamiento total entre los dos inductores es menor. En algunas realizaciones, se ha encontrado que puede conseguirse un aislamiento incluso mayor girando una de las bobinas de inductor, como se muestra en la FIGURA 5. En esta memoria, dos inductores 500 y 502 que tienen bobinas de inductor 504 y 506 en forma de 8 casi idénticas han sido puestos de nuevo uno al lado del otro. Sus terminales están de nuevo etiquetados como 508a & 508b y 510a & 510b, respectivamente. No obstante, una de las bobinas de inductor, digamos, la bobina de inductor 504 de la izquierda, ha sido girada 90 grados para reducir más el acoplamiento EM mutuo.

Además de los diseños anteriores, pueden utilizarse también otros diseños de inductor más complejos que son simétricos en más de una dimensión, por ejemplo, una forma de trébol de cuatro hojas. Estos diseños de inductor complejos resultan útiles porque mayores valores de inductancia típicamente necesitan tener más de una vuelta para no consumir demasiada área de chip. Además, tales diseños de inductor complejos son a menudo menos sensibles a la colocación y a la orientación por debajo del óptimo.

Para determinar la efectividad de los diseños de inductor anteriores en reducir el acoplamiento EM mutuo, se realizaron simulaciones utilizando el Momentum 2D EM Simulator™ de Agilent Technologies, habiéndose repetido algunas simulaciones en FastHenry™ de Computational Prototyping Group para verificar los resultados. Las simulaciones utilizaron un modelo de troquel de semiconductor simple que describía las capas de metal y de dieléctrico sobre un troquel de semiconductor típico. Los cuatro terminales de los dos inductores acoplados entre sí estaban definidos como los puertos de una red de 4 puertos lineal (véase la FIGURA 4). La interacción entre los inductores en tal red puede a menudo ser expresada utilizando una matriz de parámetros s. Personas no expertas en la materia comprenderán que la teoría del parámetro s es una técnica general utilizada para describir cómo son reflejadas y transmitidas las señales en la red. La matriz S de parámetros s que se encuentra a continuación proporciona una descripción substancialmente completa del comportamiento de la red cuando está conectada a los componentes circundantes.

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

No obstante, el acoplamiento mutuo entre los dos inductores es a menudo difícil de extraer directamente de los parámetros s donde, como aquí, la red tiene cuatro puertos de un solo extremo. Para este tipo de análisis, resulta a menudo conveniente tratar los dos inductores como una red de 2 puertos diferencial transformando la matriz de parámetros s de un solo extremo en una matriz S^{mm} de parámetros s mixta.

$$S^{mm} = M \cdot S \cdot M^T \quad (2)$$

donde M es la transformación de tensiones y corrientes en los cuatro puertos de un solo extremo en tensiones diferenciales y de modo común en los dos puertos diferenciales, y está dada por:

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

y M^T es la versión transpuesta de la matriz original M (es decir, con las filas y las columnas intercambiadas). Para más información relativa a esta transformación, véase David E. Bockelman et al., Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-43, pp. 1530 – 1539, Julio de 1995. El resultado de la transformación es:

$$S^{mm} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{d1d1} & s_{d1d2} \\ s_{d2d1} & s_{d2d2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s_{d1e1} & s_{d1e2} \\ s_{d2e1} & s_{d2e2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} s_{e1d1} & s_{e1d2} \\ s_{e2d1} & s_{e2d2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s_{e1e1} & s_{e1e2} \\ s_{e2e1} & s_{e2e2} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Como puede verse, la sub-matriz superior izquierda de 2 por 2 contiene los parámetros s de 2 puertos puramente diferenciales, mientras que las otras sub-matrices contienen el comportamiento en modo común. La ganancia de transferencia de tensión G_{vdd} se calculó entonces utilizando fórmulas de parámetros s de 2 puertos estándar, por ejemplo:

$$G_{vdd} = \text{real} \left(\frac{s_{d2d1}}{1 + s_{d1d1}} \right) \quad (5)$$

Este parámetro de ganancia G_{vdd} teórico extraído del resultado de la simulación de parámetros s de 4 puertos se utilizó entonces para comparar el acoplamiento mutuo entre diferentes combinaciones de diseños físicos de inductor.

Usando los parámetros s de modo mezclado anteriores, la ganancia de tensión diferencial G_{vdd} de los puertos del primer inductor a los puertos del segundo inductor fue calculada a 3,7 GHz. El coeficiente de acoplamiento correspondiente fue entonces estimado sobre la base de simulaciones de parámetros s en un circuito de prueba con dos inductores acoplados. La Tabla 1 muestra un resumen de los resultados de la simulación para el acoplamiento mutuo entre diferentes formas y orientaciones de bobinas para dos inductores a una distancia entre centros de 1 mm. En la Tabla 1, la "notación 8-forma_90" representa un inductor con forma de figura de 8 que ha sido girado 90 grados y la notación "8-forma_-90" representa un inductor con forma de figura de 8 que ha sido girado -90 grados, "Q1" es el factor Q para el Inductor 1, "At" es la atenuación del acoplamiento EM mutuo entre los dos inductores, y K es el coeficiente de acoplamiento estimado.

Inductor 1	Inductor 2	L1 [nH]	Q1	G_{vdd} [dB]	At [dB]	K
O-forma	O-forma	0,841	16,93	-54,0	referencia	0,002077
8-forma	O-forma	1,216	15,20	-75,6	21,6	0,001073
8-forma_90	O-forma	1,218	15,63	-74,9	20,9	0,000187
8-forma	8-forma	1,216	15,84	-86,5	32,5	0,000049
8-forma_90	8-forma	1,216	15,19	-89,7	35,7	0,000034
8-forma_90	8-forma_-90	1,217	15,69	-92,8	38,8	0,000024

Tabla 1

Como puede verse, el hacer uno de los inductores en forma de 8 mostró que reduce el acoplamiento mutuo en hasta 20 dB. Hacer los dos en forma de 8 mostró que mejora el aislamiento en hasta 30 dB. Hacer los dos conectores en forma de 8 y girarlos 90 grados en direcciones opuestas mostró que mejora el aislamiento en casi 40 dB.

Se realizó una segunda serie de simulaciones en las que la distancia entre centros de las bobinas se varió de 0,5 mm hasta 2,0 mm para dos inductores en forma de 8 en comparación con dos inductores en forma de O. Los resultados se representan en la FIGURA 6, donde el eje vertical representa la ganancia de transferencia diferencial G_{vdd} y el eje horizontal representa la distancia entre los centros de los dos inductores en milímetros (mm). Como puede verse, los inductores en forma de 8 (curva 600) resultaron en un acoplamiento mutuo mucho menor con respecto a los inductores en forma de O (curva 602). Además, los inductores en forma de 8 muestran un grado de comportamiento resonante en el que el acoplamiento mutuo es muy bajo a una cierta distancia (dependiendo de la frecuencia). La mejora "media" del aislamiento para la segunda serie (ignorando los mínimos locales cerca de 2,0 mm) está entre 30 y 40 dB.

La posición de los inductores unos con respecto a otros pueden afectar también a la cantidad de acoplamiento mutuo. Con el fin de obtener una comprensión de cuánto afecta la posición de los inductores al acoplamiento mutuo, se realizaron simulaciones adicionales en las que una de las bobinas de inductor se separó del eje de simetría ideal en una cantidad variable. Esto se ilustra en la FIGURA 7, en la que se muestran dos inductores 700 y 702 que tienen bobinas de inductor 704 y 706 en forma de 8 casi idénticas. Como puede verse, no obstante, la bobina de inductor 704 de la izquierda ha sido separada verticalmente con respecto al eje de simetría X ideal una cierta distancia Z hasta un nuevo eje X'. Los detalles de la simulación se muestran en la Tabla 2 que sigue, en la que Deg es la degradación en dB. Con esta disposición, se observó alguna degradación del aislamiento del inductor, pero incluso con una separación de 1 mm, que corresponde a una orientación de 45 grados, se consigue una mejora de aproximadamente 30 dB en reducción del acoplamiento mutuo para el inductor en forma de 8.

Separación [mm]	L1 [nH]	Q1	G_{vdd} [dB]	At [dB]	Deg [dB]	k estim.
0,0	1,216	15,19	-89,7	35,7	referencia	0,000034
0,1	1,216	15,19	-85,3	31,3	4,4	0,000057
0,2	1,216	15,19	-82,5	28,5	7,2	0,000078
0,3	1,216	15,19	-81,0	27,0	8,7	0,000093
0,5	1,216	15,19	-81,8	27,8	7,9	0,000085
0,7	1,216	15,19	-85,8	31,8	3,9	0,000053
1,0	1,216	15,19	-103,4	49,4	-13,7	0,000007

Tabla 2

Para investigar la relación entre la ganancia de tensión diferencial G_{vdd} y el coeficiente de acoplamiento k , se realizaron simulaciones de parámetros de los dos inductores en Spectre™. Después, se pudo calcular un coeficiente de acoplamiento k estimado a partir de los resultados de Momentum 2D EM Simulator™ e incluidos en la Tabla 1 y la Tabla 2.

5 Para verificar los resultados de la estimación del coeficiente de acoplamiento, se utilizó una herramienta alternativa FastHenry™ para calcular k . Los resultados simulados están representados en la FIGURA 8. En la FIGURA 8 el eje horizontal de nuevo representa la distancia entre los centros de los inductores en mm, pero el eje vertical ahora representa el coeficiente de acoplamiento k , la curva de abajo 800 representa los resultados de FastHenry™, y la curva de arriba 802 representa los resultados de Momentum 2D EM Simulator™. El acuerdo entre los dos conjuntos de resultados parece bastante bueno para distancias de hasta 1,5 mm, pero puede observarse alguna discrepancia a 2 mm. La explicación más probable para la discrepancia es que los resultados de Momentum 2D EM Simulator™ son más fiables.

15 De lo anterior, puede verse claramente que la reducción del acoplamiento mutuo está estrechamente relacionada con la simetría del inductor. Por lo tanto, el diseño del resto de VCOs deben ser diseñados para minimizar cualquier bucle de inductor adicional que pueda ser creado cuando el inductor es conectado a los componentes de VCO (por ejemplo, varicaps y conmutadores capacitivos), puesto que el campo magnético de este bucle adicional afectará al equilibrio entre los componentes del campo superior de signos opuestos y reducirá cualquier efecto de cancelación.

20 La FIGURA 9 muestra un diseño físico de ejemplo para un VCO 900 de 4 GHz típico con un inductor 902 en forma de 8 que puede ser utilizado para minimizar cualquier bucle de inductor adicional. Como puede verse, el diseño físico para el resonador (por ejemplo, conmutadores, varactor) y partes activas es substancialmente simétrico con respecto al eje vertical Y, La tensión de alimentación (por ejemplo, desviación y desacoplamiento) es también aplicada simétricamente, siendo los hilos encaminados unos encima de otros de manera que no crearán un bucle adicional. Preferiblemente, todos los componentes del resonador capacitivo son completamente diferenciales y tienen un diseño simétrico.

30 Como se ha indicado anteriormente, pueden utilizarse también diseños de inductor más complejos que son simétricos en más de una dimensión, por ejemplo, un diseño en forma de trébol de cuatro hojas. En general, incrementando el número de bucles de dos a cuatro, el efecto de cancelación puede ser mejorado más en algunas direcciones y para algunas distancias. Esto es porque, en general, (y al menos para los inductores en forma de 8), el aislamiento entre inductores depende de la posición relativa de las bobinas. La FIGURA 10 ilustra un ejemplo de un inductor 1000 en forma de trébol de cuatro hojas. Los cuatro bucles, 1002, 1004, 1006 y 1008 del inductor 1000 están conectados de tal manera que los campos magnéticos que provienen de cada dos bucles adyacentes tienen direcciones opuestas y tienden a cancelarse entre sí. Así, la cancelación de los diferentes componentes del campo magnético depende menos, por ejemplo, de la dirección de la segunda bobina de inductor en la que hay dos inductores en forma de trébol de cuatro hojas en el mismo chip.

40 Además, como se muestra en la FIGURA 11, se ha observado que una configuración en la que uno de los inductores (por ejemplo, el inductor 1100) está girado 45 grados con respecto al otro inductor (por ejemplo, el inductor 1102) tiene un acoplamiento EM incluso menor entre los dos inductores 1100 y 1102.

45 La ganancia de transferencia diferencial G_{vdd} está representada en la FIGURA 12 para la disposición de dos inductores en forma de trébol de cuatro hojas (curva 1200) en función de la distancia entre centros junto con el funcionamiento de dos inductores en forma de 8 (curva 1202) y dos inductores en forma de O (curva 1204). Uno de los inductores en forma de trébol de cuatro hojas ha sido rotado aproximadamente 45 grados (indicado por la "r") y asimismo uno de los inductores en forma de 8 ha sido rotado aproximadamente 90 grados (de nuevo indicado por la "r"). El eje vertical del diagrama representa la ganancia de transferencia diferencial G_{vdd} y el eje horizontal representa la distancia entre centros. Como puede verse, el aislamiento para la disposición de dos inductores en forma de trébol de cuatro hojas es casi 10 dB mejor que la disposición de inductores en forma de 8 para distancias por debajo de 1 mm y no muestra ningún comportamiento resonante a distancias mayores.

55 La mejora en el comportamiento direccional de la disposición de inductores en forma de trébol de cuatro hojas se muestra en la Tabla 3. Como puede verse, no hay ninguna degradación en el aislamiento con la separación del eje de simetría, sólo una pequeña mejora debido a la creciente distancia. No obstante, debido al más complejo diseño de hilos, que resulta en menos inductancia por longitud de hilo, el factor Q es ligeramente menor en comparación con la disposición de inductores en forma de 8.

Separación [mm]	L1 [nH]	Q1	G_{vdd} [dB]	At [dB]	Deg [dB]	k estim.
0,0	1,300	13,09	-92,5	38,5	referencia	0,000025
0,1	1,300	13,09	-92,9	38,9	-0,4	0,000024
0,2	1,300	13,09	-92,9	38,9	-0,4	0,000024
0,3	1,300	13,09	-93,4	39,4	-0,9	0,000022
0,5	1,300	13,09	-94,1	40,1	-1,6	0,000021

0,7	1,300	13,09	-94,9	40,9	-2,4	0,000019
1,0	1,300	13,09	-97,1	43,1	-4,6	0,000015

Tabla 3

5 En aplicaciones en las que se necesitan valores de inductancia más elevados, es posible utilizar bobinas de inductor con más de una vuelta, puesto que los diseños de una sola vuelta tienden a ocupar demasiada área de chip. Un ejemplo de un inductor 1300 en forma de 8 de dos vueltas se muestra en la FIGURA 13. Como puede verse, el inductor 1300 en forma de 8 de dos vueltas es esencialmente similar al inductor 200 en forma de 8 de la FIGURA 2, excepto porque los dos bucles exteriores 1302 y 1304 del inductor 1300 se convierten cada uno en un bucle interior 1306 y 1308 respectivamente. Los terminales 1310a y 1310b del inductor 1300 son entonces conectados al bucle interior 1308 inferior. Tal inductor 1300 de dos vueltas puede proporcionar un valor de inductancia más alto sin ocupar demasiada área de chip, y reduce también el factor Q. En la realización mostrada en esta memoria, el factor Q puede ser reducido aproximadamente de 15 a 12,5 a 4 GHz.

15 Aunque se ha mostrado el inductor en forma de 8 de dos vueltas, personas no expertas en la materia comprenderán que pueden utilizarse también otras configuraciones, tales como inductor en forma de trébol de cuatro hojas de dos vueltas, siempre que la simetría cercana pueda ser mantenida dado el cruce de los bucles interior y exterior, y los requisitos de posición de los terminales. Otras formas simétricas además de las descritas hasta ahora pueden mostrar también la misma o incluso mejor reducción del acoplamiento si puede conseguirse un equilibrio satisfactorio entre parámetros tales como el factor Q, el tamaño de la bobina y el coeficiente de acoplamiento.

20 Aunque la presente invención ha sido descrita con referencia a una o más realizaciones ilustrativas particulares, resultará evidente para los expertos en la materia que pueden realizarse muchos cambios a las mismas sin separarse del espíritu y alcance de la presente invención. Por ejemplo, aunque en lo anterior sólo se ha descrito la reducción del acoplamiento electromagnético, otros mecanismos de acoplamiento a través del substrato o de las líneas de alimentación así como los efectos de componentes situados entre los dos VCOs pueden tener una importante influencia sobre el máximo aislamiento que se puede conseguir. Por lo tanto, cada una de las realizaciones anteriores y variaciones de las mismas se contempla como dentro del alcance de la invención que se reivindica, que se presenta en las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

1. Un inductor (200; 900; 1000; 1300) que tiene un campo lejano reducido, que comprende:
 - 5 un primer bucle (206b; 1008; 1304) que tiene una forma que es substancialmente simétrica con respecto a un primer eje predefinido; y
 - un segundo bucle (206a, 1006; 1302) que tiene un tamaño y forma substancialmente idénticos al primer bucle, estando el citado segundo bucle dispuesto de manera que un campo magnético que proviene del mismo tiende a cancelar un campo magnético que proviene del primer bucle;
 - 10 **caracterizado porque** comprende también dos terminales con una separación muy pequeña entre sí (204a, 204b; 1310a, 1310b) conectados al primer bucle para suministrar corriente eléctrica a los bucles primero y segundo y que minimizan las contribuciones de los terminales al campo magnético.
- 15 2. El inductor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los bucles primero y segundo son substancialmente simétricos con respecto a un segundo eje predefinido.
3. El inductor de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el inductor es substancialmente en forma de 8.
- 20 4. El inductor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los bucles primero y segundo comprenden cada uno un bucle interior (1308; 1306) dentro de cada uno de los dos bucles.
5. El inductor de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además un tercer bucle (1004) y un cuarto bucle (1002), en el que los bucles tercero y cuarto están eléctricamente conectados a los bucles primero (1008) y segundo (1006), los cuatro bucles están simétricamente dispuestos en una formación en forma de trébol de cuatro hojas alrededor de un eje central común, teniendo cada uno de los citados bucles substancialmente el mismo tamaño y forma; y donde los cuatro bucles (1002, 1004, 1006, 1008) están dispuestos de manera que los campos magnéticos que provienen de cada dos bucles adyacentes tienen direcciones opuestas y tienden a cancelarse entre sí.
- 25 6. Un diseño físico de inductor que tiene un acoplamiento electromagnético reducido que comprende un primer inductor (400, 500, 700, 1100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 – 5 y un segundo inductor (402, 502, 702, 1102) situado a una distancia predeterminada del primer inductor, en el que un acoplamiento electromagnético mutuo entre el primer inductor y el segundo inductor se reduce como resultado de que el primer inductor tiene un campo electromagnético reducido.
- 30 7. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer inductor y el segundo inductor están formados sobre un único troquel de semiconductor.
8. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer inductor y el segundo inductor están orientados en una misma dirección.
- 35 9. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer inductor y el segundo inductor están orientados en direcciones diferentes.
- 40 10. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer inductor y el segundo inductor comparten un eje común.
11. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer inductor y el segundo inductor no comparten ningún eje común.
- 45 12. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer inductor y el segundo inductor son simétricos con respecto a un segundo eje predefinido.
- 50 13. El diseño físico de inductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el segundo es también un inductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 – 5.
- 55 14. Un método de reducir el campo magnético que proviene de un inductor, que comprende:
 - 60 formar un primer bucle (206b; 1008; 1304) que tiene una forma que es substancialmente simétrica con respecto a un primer eje predefinido;
 - formar un segundo bucle (206a; 1006; 1302), caracterizado por tener un tamaño y forma substancialmente idénticos al primer bucle;
 - orientar el segundo bucle con respecto al primer bucle de manera que un campo magnético que proviene del segundo bucle tiende a cancelar un campo magnético que proviene del primer bucle;
 - 65 **caracterizado porque** comprende también la etapa de

conectar dos terminales con una separación muy pequeña entre sí (204a, 204b; 1310a, 1310b) al primer bucle para suministrar corriente eléctrica a los bucles primero y segundo y minimizar las contribuciones de los terminales al campo magnético.

- 5 15. El método de acuerdo con la reivindicación 14, en el que la etapa de orientar el segundo bucle con respecto al primer bucle incluye situar los bucles primero y segundo substancialmente en forma de 8.
16. El método de acuerdo con la reivindicación 14, en el que el método comprende además:
- 10 formar un tercer bucle que tiene un tamaño y forma substancialmente idénticos a los bucles primero y segundo;
formar un cuarto bucle que tiene un tamaño y forma substancialmente idénticos a los bucles primero, segundo y tercero; y
15 orientar los bucles primero, segundo, tercero y cuarto para formar substancialmente una forma de trébol de cuatro hojas.
17. Un método de reducir el acoplamiento electromagnético mutuo entre un primer inductor y un segundo inductor sobre un troquel de semiconductor, que comprende:
- 20 formar un primer inductor de acuerdo con el método de cualquiera de las reivindicaciones 14 a 16 y situar el segundo inductor a una distancia predeterminada del primer inductor, donde el acoplamiento electromagnético mutuo entre el primer inductor y el segundo inductor se reduce como resultado de que el primer inductor tiene un campo electromagnético reducido.
- 25 18. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que la etapa de situar el segundo inductor incluye orientar los inductores primero y segundo en una misma dirección.
19. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que la etapa de situar el segundo inductor incluye orientar los inductores primero y segundo en diferentes direcciones.
- 30 20. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que la etapa de situar el segundo inductor incluye situar los inductores primero y segundo en un eje común que es compartido por los inductores primero y segundo.
21. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que la etapa de situar el segundo inductor incluye colocar los inductores primero y segundo de manera que no compartan ninguna eje común.
- 35 22. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que la etapa de situar el segundo inductor incluye colocar los inductores primero y segundo de manera que sean simétricos con respecto a un segundo eje predefinido.
- 40 23. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que el segundo inductor está formado de acuerdo con el método de cualquiera de las reivindicaciones 14 – 16.

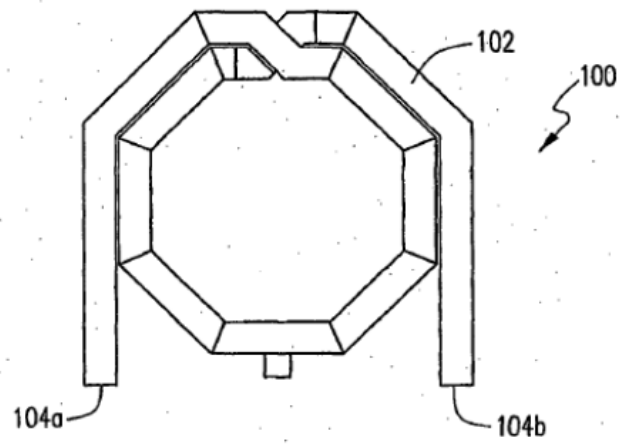


FIG. 1
(TÉCNICA ANTERIOR)

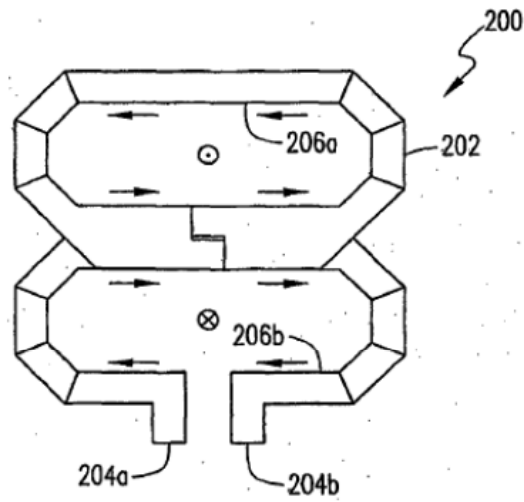
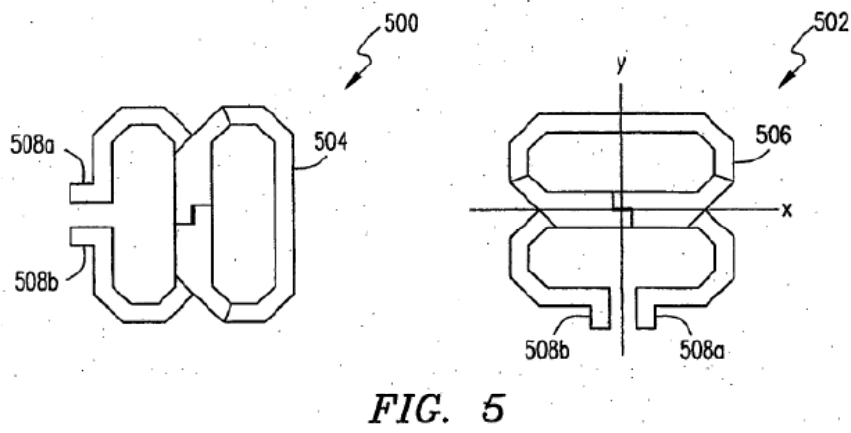
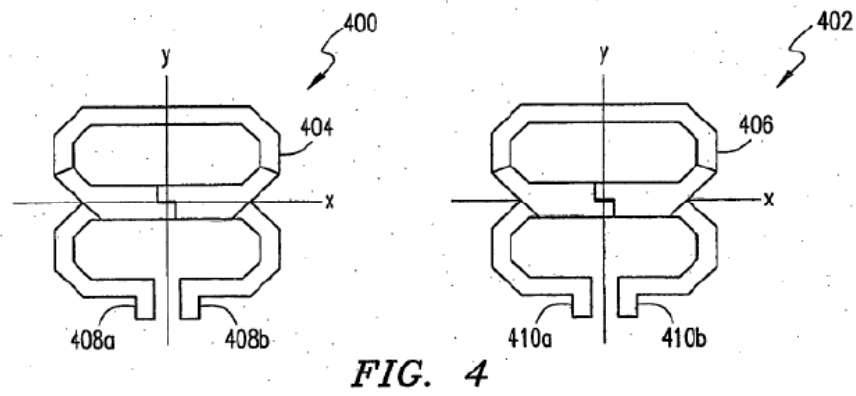
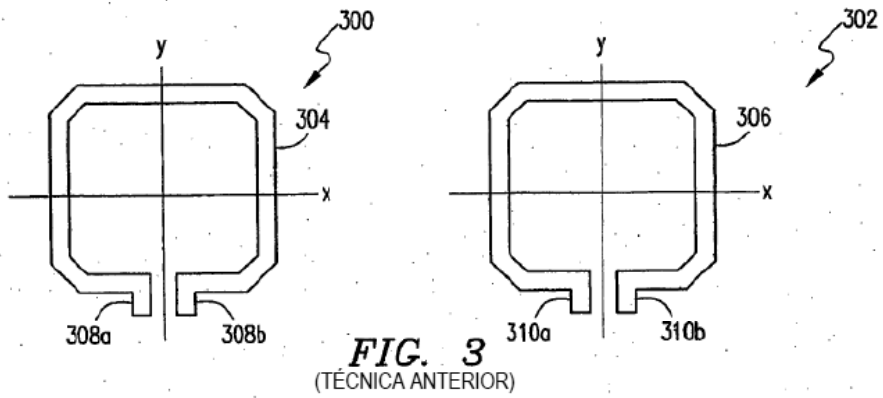


FIG. 2



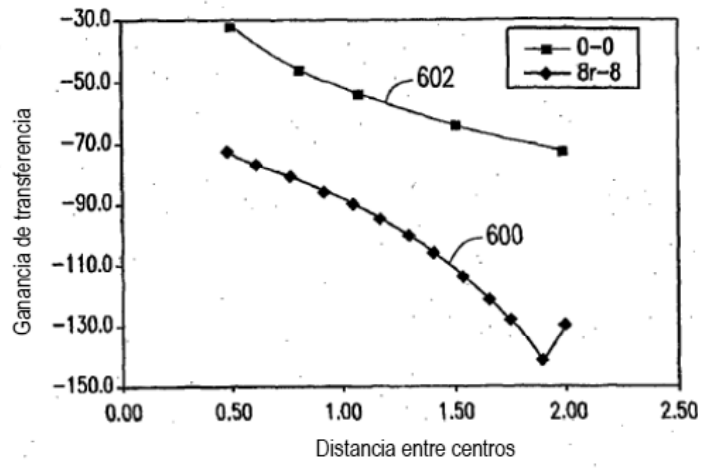


FIG. 6

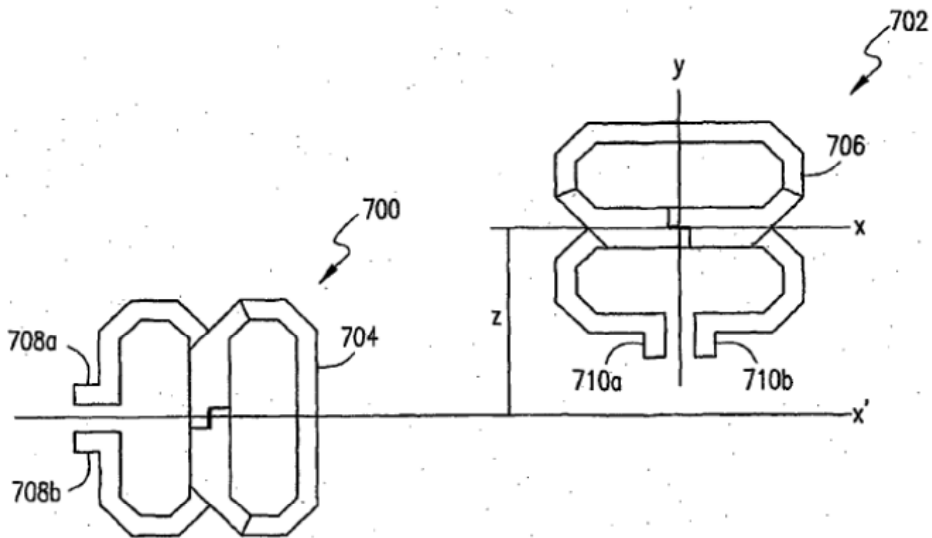


FIG. 7

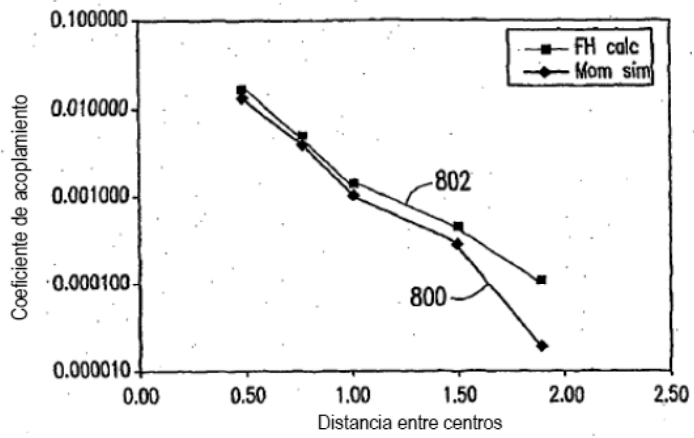


FIG. 8

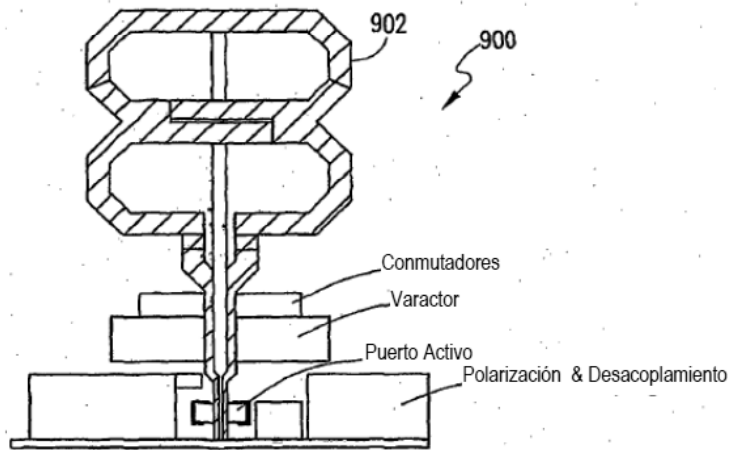


FIG. 9

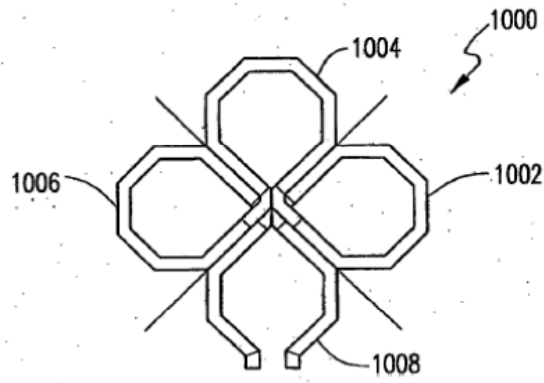


FIG. 10

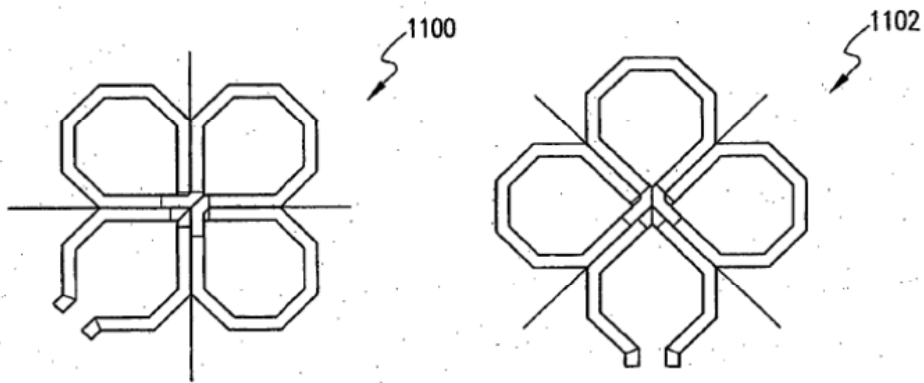


FIG. 11

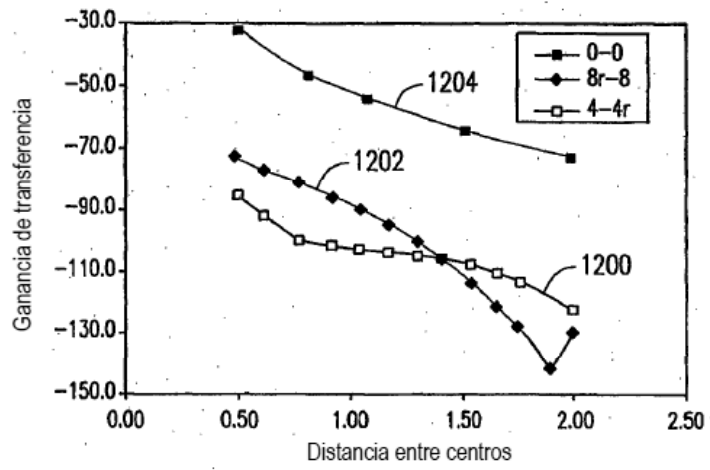


FIG. 12

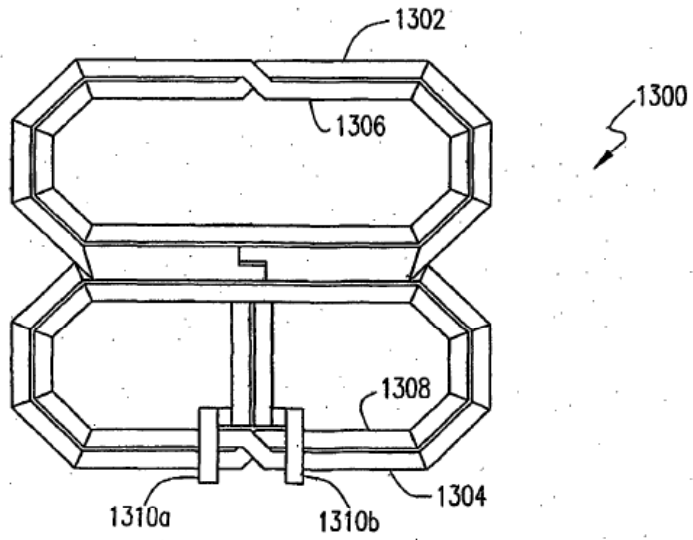


FIG. 13