

9- INDUCTORES INTEGRADOS

9.1- DISEÑO INDUCTORES EN PELÍCULA DELGADA [7]

El diseño de Inductores de película delgada PD, está limitado por valores bajos de inductancia, bajo Q y efectos de acoplamiento indeseados. Veremos datos experimentales y teóricos, así como métodos mejorados para reducir al mínimo estos obstáculos.

Un inductor debe tener buena estabilidad, el mayor valor posible de inductancia, un alto Q, y debe ser fácil de construir. Las dimensiones son pequeñas y la densidad de encapsulado es alta. Los problemas específicos son:

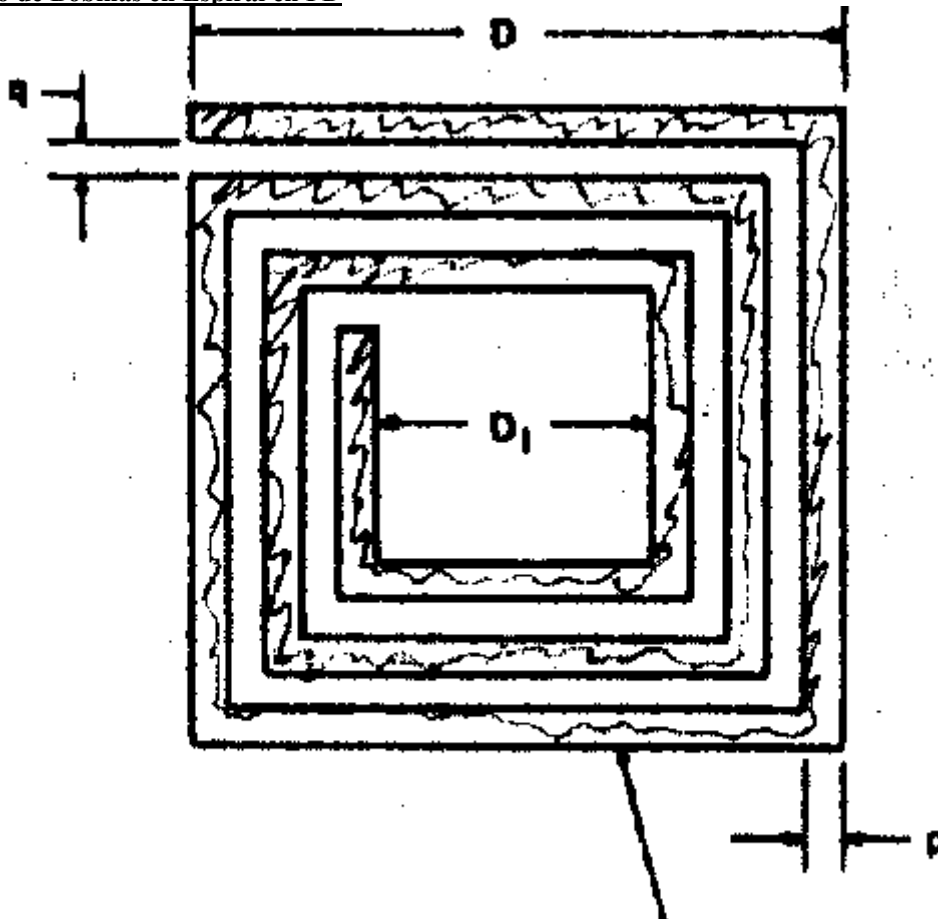
** La inductancia L disminuye debido a la pequeña sección de la bobina. Esto se puede compensar con un gran numero de espiras. Las limitaciones las impone el tamaño mínimo del alambre y la facilidad de fabricación.

** Los valores altos de resistencia en CC de la bobina y las perdidas electromagnéticas dispersas reducen el valor de Q.

** Los campos dispersos eléctricos y magnéticos en microelectrónica, provocan efectos de acoplamiento indeseables. Los efectos magnéticos se pueden disminuir utilizando bobinas con núcleos de material magnético. Esto además aumenta la inductancia.

** Problemas de fabricación, respuesta en frecuencia limitadas, perdidas y posibles alinealidades en las características del dispositivo.

9.1.1- Diseño de Bobinas en Espiral en PD



**Conductor de espesor W
y resistividad ρT**

Figura N° 9.1 Bobina Cuadrada Plana con Espiral extendiéndose al Centro.

En la figura 9.1 suponemos los valores de inicio según $D_1 = 0$ $p = q$ determinamos L, Q y la Frecuencia de autoscilacion f_0 como función de la superficie S de la bobina y el ancho p de la traza.

Las formulas a emplear son las siguientes:

$$S = D^2 \quad (1)$$

El numero de espiras N se calcula como:

$$N = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{q + p} \quad (2) \quad \text{y si llamamos a la relación } r = p/q \quad (3) \quad \text{resultara:}$$

$$N = \frac{D}{2 \cdot p} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{r}\right)} \quad (4)$$

La longitud de la espiral es:

$$l = 4 \cdot \frac{D}{2} \cdot N = \frac{D^2}{p} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{r}\right)} \quad (5)$$

La Inductancia se calcula con una formula empírica dada por Bryan (H.E. Bryan, "Printed Inductors and Capacitors", Tel-Tech, Vol.14, N° 12, p.68, 1955 – J.M.C. Dukes, Printed circuits Their Design and Application, MacDonald, Londres, 1961).

$$L = 85 \times 10^{-10} \cdot D \cdot N^{\frac{5}{3}} = 27 \times 10^{-10} \cdot \frac{D^{\frac{5}{3}}}{p^{\frac{5}{3}}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{r}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (6)$$

D = dimensiones en cm.

S = Superficie de la bobina para $D_1 = 0$

N = Numero de espiras.

L = Inductancia en Hy.

l = Longitud de la espiral en cm.

p = Ancho de la traza de la espiral en cm.

q = Distancia entre los bordes exteriores de dos espiras adyacentes en cm.

Se estima que la inductancia dada por esta formula tiene una exactitud del 5% para la mayoría de las bobinas de PD. Para los cálculos se considera que el ancho de la traza es igual a la separación entre espiras $p = q$ por lo que su relación $r = 1$. Esto resulta ser un buen compromiso en el diseño practico de bobinas en espiral. En las figuras 9.2; 9.3 y 9.4 se grafican la Inductancia L, la frecuencia de auto resonancia del inductor, f_0 y Q_0 medidos a $0,25 f_0$, como función de la superficie S, con el ancho p de la espiral, o el numero N de espiras como parámetro. Parte de los gráficos están mas allá de la tecnología en la actualidad, pero puede resultar importante si se mejora la resolución de los circuitos de película delgada. Se da el numero de espiras para evitar soluciones poco practicas. Para otras formas distintas a la cuadrada, L varia ligeramente. Para formas circulares, L aumenta ligeramente mientras que para formas rectangulares o cuando $D_1 \neq 0$. En la figura 9.3 la frecuencia de auto resonancia f_0 , se obtiene de considerar que la espiral constituye una línea de transmisión de longitud y que resuena a $l = \lambda / 4$. Una expresión aproximada para f_0 es:

$$f_0 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{4 \cdot l} \quad (7)$$

(J.M.C. Dukes, "Printed Circuit, Their Design and Application, MacDonald, London, 1961).

$C = 3 / 10^{10}$ cm / seg.

$\epsilon_r \cong 3/4$. (ϵ_r del sustrato) = 4 para sustratos comunes.

la expresión final para f_0 con $\epsilon_r = 4$ es:

$$f_0 = 75 \times 10^8 \cdot \frac{p}{S} = 18 \times 10^8 \cdot \frac{1}{S^{\frac{1}{2}} \cdot N} \quad (8)$$

la inductancia aparente L_a aumenta desde el valor de baja frecuencia L hasta infinito para f_0 , como se muestra en la ecuación (9), si se desprecia el efecto pelicular.

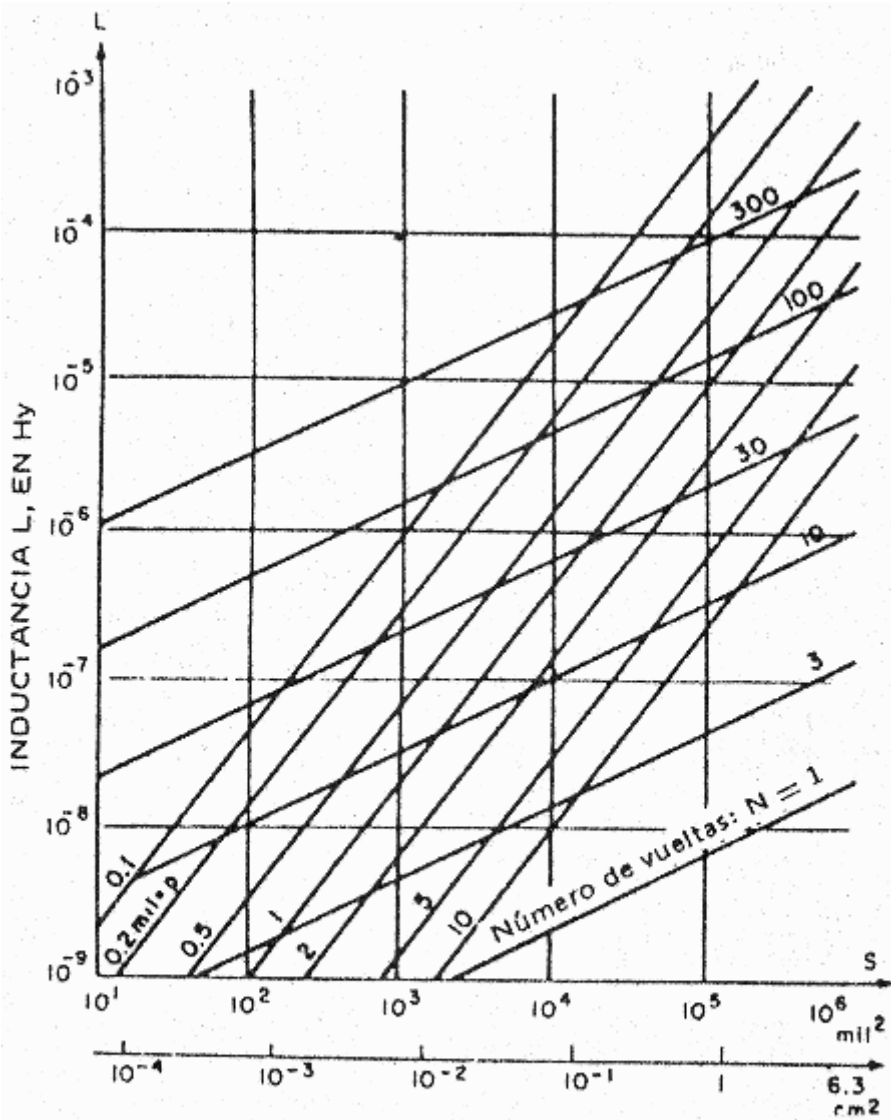


Fig. 2. La inductancia L, de bobinas planas, como función de la superficie S, con p, ancho de la espiral, o N, número de espiras, como parámetro

Figura N° 9.2

$$La = \frac{L}{1 - \left[\frac{f}{fo} \right]^2} \quad (9)$$

Los valores de Q₀ en la figura 9.4 se definen como:

$$Q_0 = \frac{\omega \cdot L}{R_s} \quad (10)$$

donde $\omega = \pi / 2 \cdot fo$ Q se mide para fo / 4.

$$R_s = \rho \cdot \frac{1}{Wp} = \rho \cdot \frac{S}{2 \cdot p^2 \cdot W} \quad (11)$$

W = 10⁻⁴ cm en figura 9.4, espesor del conductor en espiral.

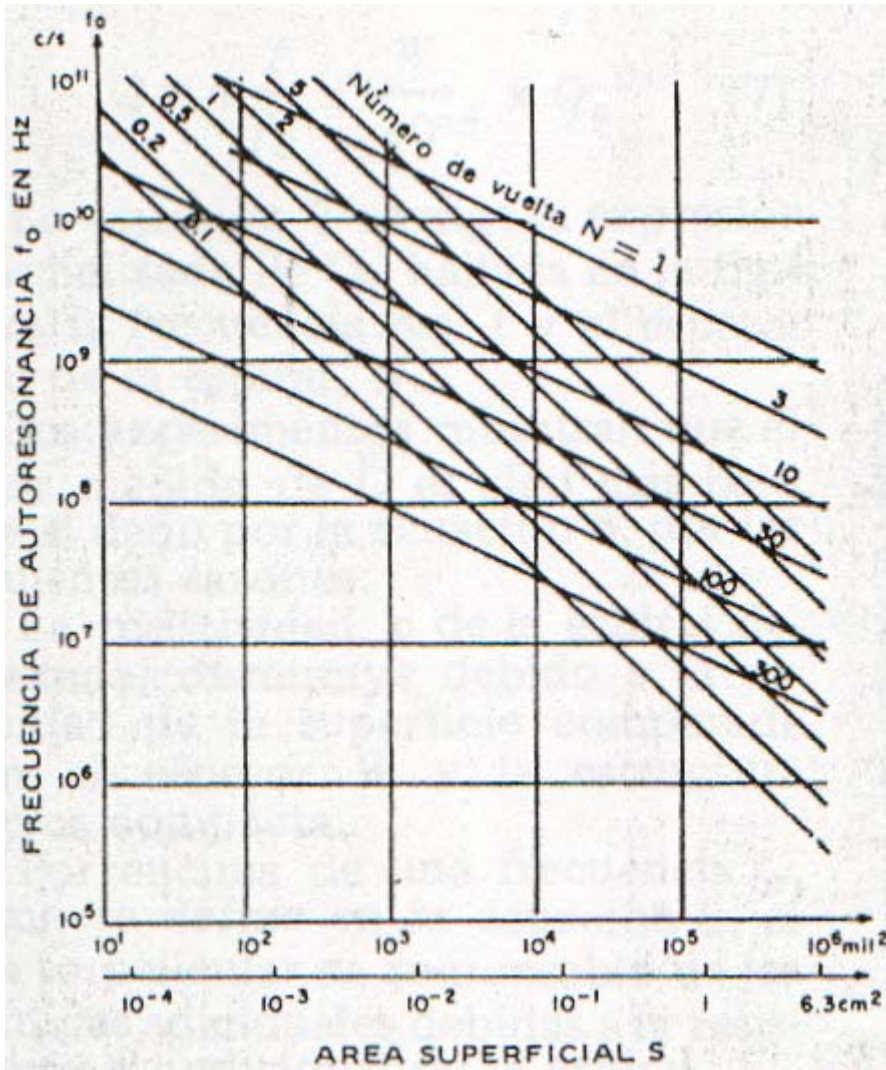


Figura N° 9.3 Frecuencia de Auto resonancia f_0 vs. S , con p ó N como parámetro. Constante dieléctrica del sustrato $\epsilon = 4$. ρ = la resistividad de la espiral. $\rho_{Ag} = 1,8 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ para la plata, valor usado en figura 9.4. Por lo tanto Q_0 a $f = f_0 / 4$ es:

$$Q_0 = 20 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho^4}{S^2}} \times \frac{W}{\rho} = \frac{3}{\sqrt[3]{N^4}} \times \frac{W}{\rho} \quad (12)$$

Q a una frecuencia de trabajo distinta de f_0 es:

$$Q = 4 \cdot \frac{f}{f_0} \times W \times 10^4 \times Q_0 \quad (13)$$

La ecuación (13) corrige la expresión normalizada de Q_0 hallada en la figura 9.4 para frecuencia real f y el espesor real de la espiral W . El valor medido de Q es algo menor que el dado por la ecuación (12) por las siguientes razones:

Razón 1. La resistividad ρ de la espiral depositada, disminuye debido a la rugosidad de la superficie comparada con el espesor W y la estructura menos compacta.

Razón 2. Por encima de una frecuencia f_r , como se define en la ecuación (14), el efecto pelicular es responsable de las pérdidas adicionales debidas a la resistencia R_s adicional de la espiral.

$$f_r \cong \frac{\rho}{\mu_r} \times \frac{2,5 \cdot 10^7}{W^2} \quad (14)$$

De la ecuación (14) cuando $\rho = 1,8 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$, $W = 10^{-4} \text{cm}$, $\mu_r = 1$ $f_r = 4,5 \times 10^9 \text{ Hz}$

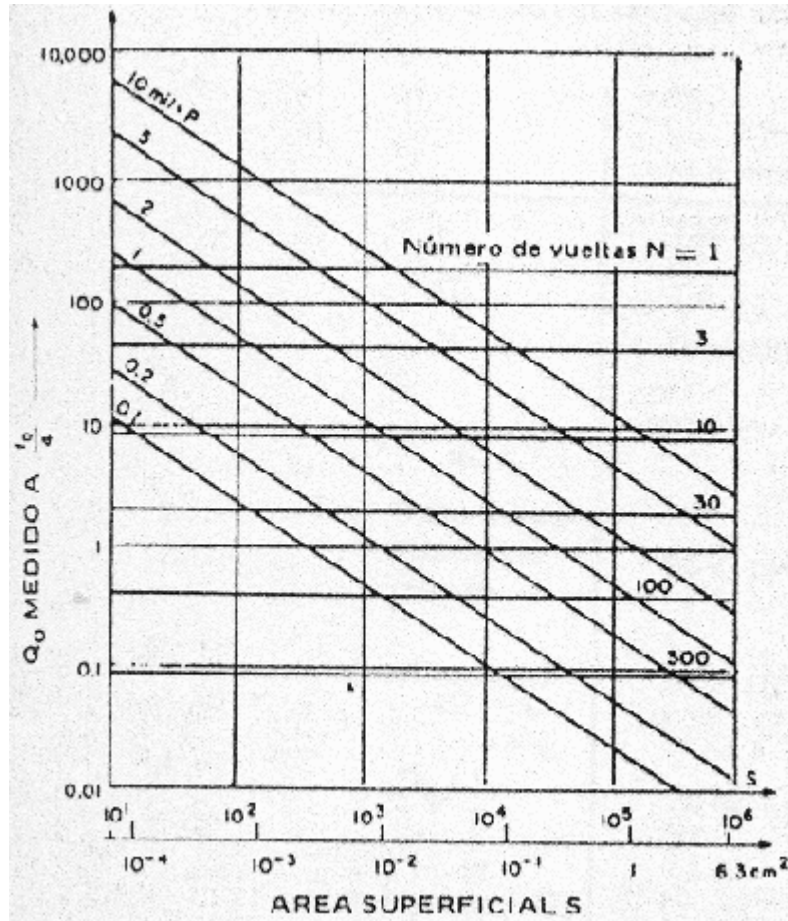


Figura N° 9.4 Qo de Bobinas planas, medido a fo / 4 como función del arrea S con p ó N como parámetro.

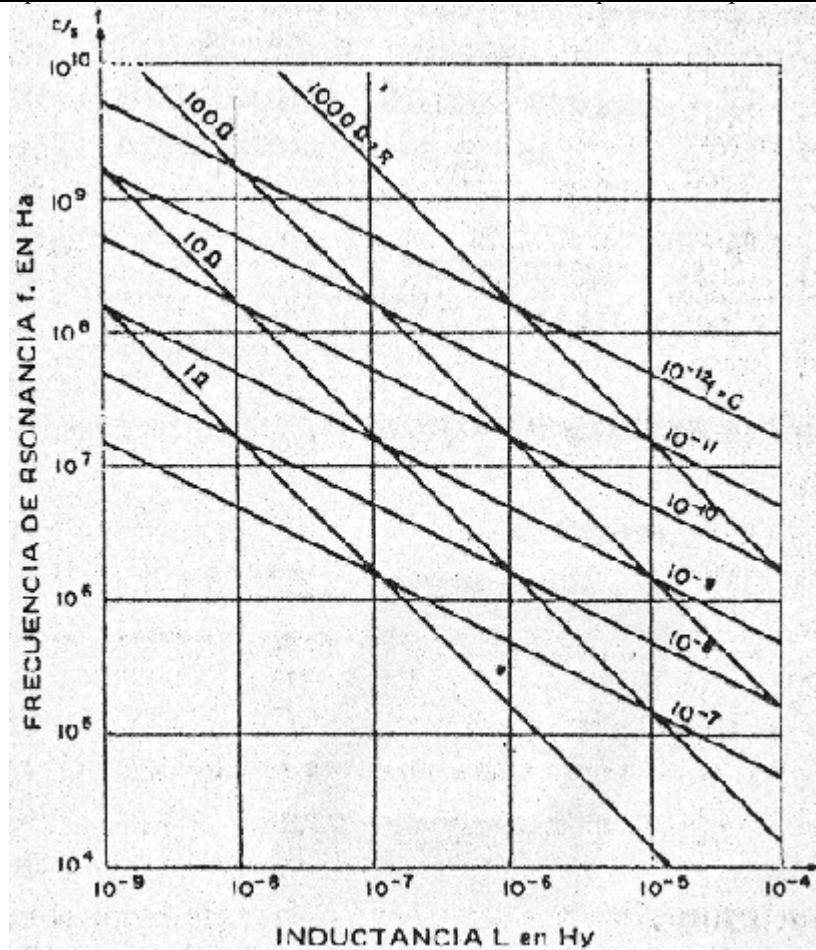


Figura N° 9.5 Frecuencia de resonancia f vs. L, con C ó R = (L / C)^{1/2} como parámetro

Razón 3. El fuerte campo eléctrico a lo largo de los bordes de la espiral, aporta pérdidas adicionales. Se puede calcular las dimensiones de las bobinas en espiral para obtener un valor de Q óptimo. El resultado es:

$$\frac{D}{D_1} = 5 \quad (15)$$

Esta ecuación indica que es deseable un espacio libre en el centro de la bobina, dado que para Q optimo:

$D_1 = 0,2.D$. Esta bobina también es más fácil de fabricar. El grafico de la figura 9.5, describe un circuito LC resonante:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{R}{2\pi \cdot L} \quad (16) \text{ en donde } R = \frac{L}{\sqrt{C}}$$

El grafico evalúa la capacitancia C y la impedancia característica

$$R \cong \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ para una inductancia L a la frecuencia de resonancia requerida } f.$$

Tabla N° 1. Características de Tres Bobinas Cuadradas en Espiral.

	S = 6,5 mm²	S = 0,65 mm²	S = 0,065 mm²
L	4.N.10 ⁷ Hy	2 x 10 ⁻⁹ -Hy	1 x 10 ⁻⁹ Hy
Qo	2,4	11	50
N	25 vueltas	8 vueltas	2 vueltas
$C_o = \frac{1}{40 \cdot f_o^2 \cdot L}$	0,7 x 10 ⁻¹² F	0,14 x 10 ⁻¹² F	0,028 x 10 ⁻¹² F
f de trabajo	30 x 10 ⁶ Hz	300 x 10 ⁶ Hz	3000 x 10 ⁶ Hz
$C = \frac{1}{40 \cdot f^2 \cdot L}$	70 x 10 ⁻¹² F	14 x 10 ⁻¹² F	3 x 10 ⁻¹² F
$R = \sqrt{\frac{L}{C}}$	75 Ω	38 Ω	18 Ω
$Q = \frac{4 \cdot W \cdot 10^4 \cdot Q_o}{f_o}$	1	4,4	20

Nota:

Cada bobina tiene un área S distinta. Espesor de conductor $W = 10^{-4}$ cm; Resistividad = $1,8 \times 10^{-6}$ Ωcm

La tabla 1 da los valores característicos para tres tamaños diferentes de bobinas. La baja inductancia restringe el diseño de circuitos resonantes por debajo de 30 MHz, aun con bobinas tan grandes como 6,45 mm² de superficie. El valor de Q puede aumentarse eligiendo $W > 10^{-4}$ cm. La técnica es aumentar la superficie S. Se deposita un bobinado con N espiras aisladas, que están conectadas en serie, formando un arrollamiento continuo, con técnicas de enmascarado, como se muestra en la figura 9.6. La frecuencia de auto resonancia f_o , es baja, debido a la capacidad distribuida entre espiras. El valor aproximado de f_o es:

$$f_o = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot N \cdot C_t \cdot L_t}} \quad (17)$$

donde N = numero de espiras apiladas.

C_t = capacitancia entre dos espiras sucesivas.

L_t = inductancia de una espira.

La técnica de evaporación actuales, permiten fabricar bobinas con un pequeño numero de espiras apiladas. Una estructura en dos bobinas planas evaporadas sobre ambos lados de un sustrato delgado. Si el acoplamiento magnético entre ellas es bueno, la inductancia de estas bobinas, puestas en serie, es cuatro veces mayor que la de una sola bobina. El segundo enfoque para aumentar L y disminuir el campo magnético disperso, consiste en utilizar materiales magnéticos. Un método es encerrar el bobinado entre dos capas de material magnético de las siguientes propiedades:

** Altas resistividad en corriente continua.

** Bajas perdidas magnéticas y eléctricas sobre un margen de frecuencias especificado.

** Alto μ y bajo ϵ .

Se puede depositar el material en forma de película delgada a temperatura ambiente lo que no constituye un daño para las otras partes del circuito. Las ferritas cumplen las condiciones antedichas pero son difíciles de aplicar como película delgada. Las bobinas impresas sobre el sustrato de ferrita son efectivas, pero aumentan las dificultades en el enmascarado. La bobina es apilada o de diseño en espiral con D_1 grande.

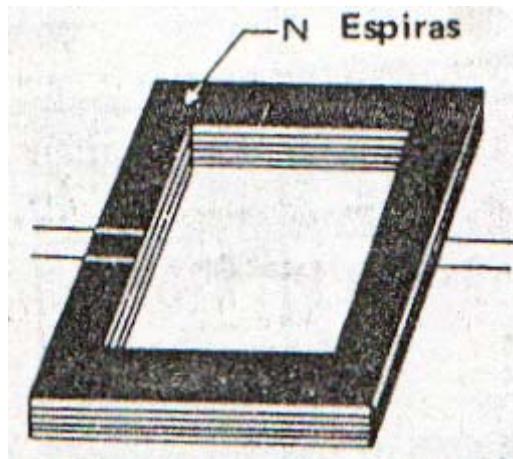


Figura N° 9.6 Bobina con una cantidad de espiras apiladas, utilizando técnicas de evaporación

Tabla N° 2 Valores Calculados y Medidos para dos Bobinas Planas

Tipo de Bobina		1	2			
N		9 vueltas	7 vueltas			
D / D₁		5,3	2,8			
Frecuencia Ensayo		8 MHz	8 MHz	20 MHz	30 MHz	50 MHz
Valores de baja Frecuencia de los Gráficos	L	$0,5 \times 10^{-6}$ Hy	$80,5 \times 10^{-6}$ Hy			
	f _o	150 MHz	150 NHz			
	Q _o	8	8			
	Q	50	50			
	N	10 vueltas	10 vueltas			
Mediciones en Aire	L	0,6 μHy	0,35 μHy	0,5 μHy		
	Q	66	34	73		
Mediciones en Ferrite	L	1.9 μHy	1,5 μHy	1,5 μHy	1,5 μHy	1,5 μHy
	Q	54	53	75	50	30

Nota: Las bobinas tienen diámetros interiores D₁ distintos.

La figura 9.7 muestra una bobina en espiral, construida por ataque químico con un blindaje de ferrita. Se midieron dos bobinas de distinto diámetro interior D₁, con blindaje y sin él. Los valores calculados y medidos se dan en la Tabla 2. Los valores calculados de la bobina sin blindaje, coinciden con los medidos.

La **Bobina 1** que fue construida con un cociente mejorado $D / D_1 = 5$, da un Q medido sin blindaje mayor que el calculado ($D_1 = 0$), o que el medido en la **Bobina 2** $D / D_1 = 2,5$. El aumento aparente de L con la frecuencia, se muestra en la Bobina 2 sin blindaje, a 8 y 20 MHz. El blindaje de ferrita en este experimento aumenta la inductancia solo tres veces, porque todavía existe una separación de aire entre espiras. Se trato de encerrar totalmente las bobinas en Ferrita. Esto ultimo es complicado porque en su formación se producen altas presiones y temperaturas que tienden a destruir la bobina.

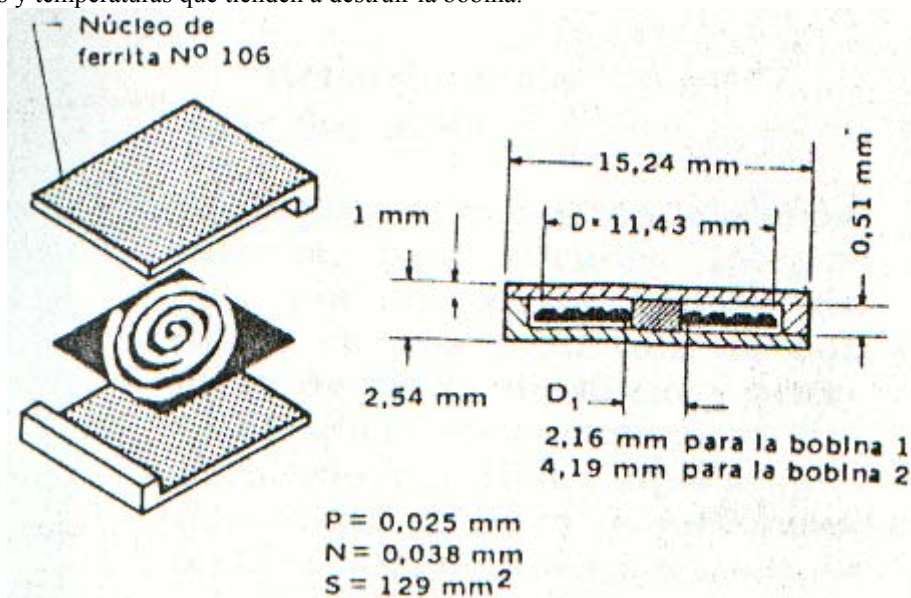


Figura N° 9.7 Bobina grabada químicamente con blindaje de Ferrita