

relación de aspecto y envejecimiento en capas gruesas rectangulares

Al realizar el diseño de los resistores de un circuito en capa gruesa, hay que tener en cuenta, entre otros factores, la relación de aspecto (AR). Esta ejercerá una adecuada influencia sobre las características de las resistencias una vez fabricadas, así como al cabo de un tiempo de almacenamiento o de funcionamiento.

El objetivo del presente artículo, es estudiar los valores de las resistencias y circuito equivalente de los resistores obtenidos para diferentes AR, así como su evolución con el tiempo en unas condiciones especificadas.

J.M. López e I. Berral

ASPECT RATIO INFLUENCE WITH TIME IN THICK-FILM RESISTORS

At the time of designing the different resistors in a thick-film circuit, special care should be taken on a very important factor: the Aspect Ratio (AR), since it will exercise a deep influence on the characteristics of the resistor once manufactured, as well as under storage or working conditions.

The objective of this paper is the study of resistance values and equivalent circuit of the obtained resistors for different AR, as well as, their evolution with time, under specific conditions.

DISEÑO Y OBTENCION DE MASCARAS

El cálculo de las resistencias rectangulares (figura 1) se realizó según la expresión:

$$R = \rho s \frac{L}{h} \quad (1)$$

En la que ρs es la resistividad superficial en ohmios/cuadro; L y h son la longitud y la anchura respectivamente de la capa resistiva y L/h es la relación de aspecto AR.

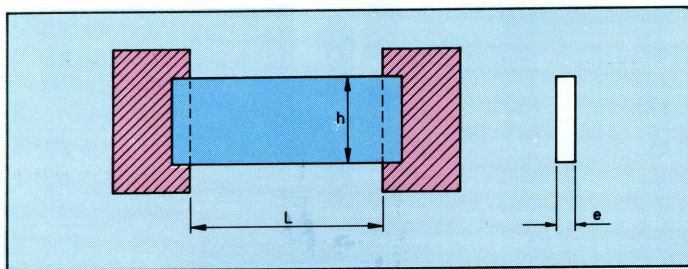


Figura 1.

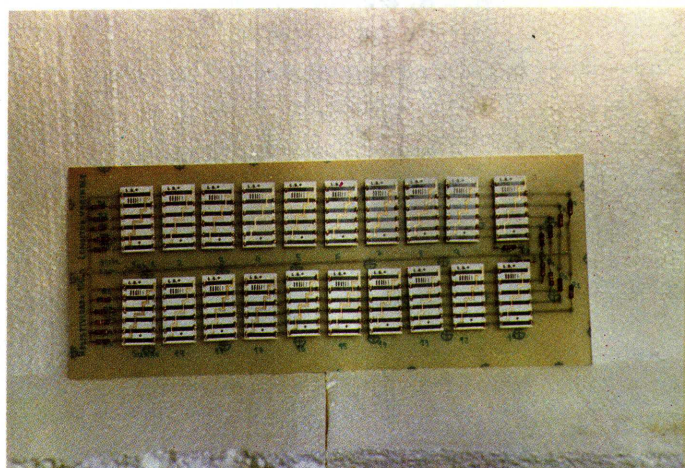


Foto 1.

Para obtener diferentes valores de R , podemos variar AR y/o la ρs . Como es previsible que valores diferentes de ρs den características diferentes para una misma AR, dentro de los valores más usuales de ρs , elegiremos un valor bajo, y otro alto, de una misma tinta, para de esta manera, poder obtener (extrapolando y sin realizar un ensayo para cada valor de ρs) conclusiones significativas. En nuestro caso los valores elegidos fueron:

$$\begin{aligned} \rho s_1 &= 115,7 \Omega / \square \\ \rho s_2 &= 100,1 \text{ k}\Omega / \square \end{aligned}$$

Por otro lado (observando la expresión 1) vemos que AR se puede variar, tanto modificando L como h . Por lo tanto, hemos de diseñar resistores en los que se modifique L manteniendo constante h y viceversa.

En cada sustrato de alúmina del 96 % de Al_2O_3 de 2×1 pulgadas, se introdujeron dos resistores idénticos ($R=R'$), con cinco relaciones de aspecto diferentes.

La potencia nominal disipable por el resistor se calculó según la expresión (2)

$$P_n = P_m \times h \times L \quad (2)$$

siendo $P_m = 16 \text{ w/cm}^2$, dato obtenido de las características de la tinta.

Capas resistivas con ancho constante y longitud variable

El ancho elegido fue de 2,8 mm y al variar L se obtuvieron las siguientes relaciones de aspecto:

$$\begin{aligned} R_1 &= R'_1 \text{ con AR} = 0,892 \\ R_2 &= R'_2 \text{ con AR} = 2,014 \\ R_3 &= R'_3 \text{ con AR} = 4,285 \\ R_4 &= R'_4 \text{ con AR} = 5,428 \\ R_5 &= R'_5 \text{ con AR} = 7,164 \end{aligned}$$

Capas resistivas con longitud constante y ancho variable

La longitud elegida fue de 8,04 mm. y las relaciones de aspecto:

$$\begin{aligned} R_1 &= R'_1 \text{ con AR} = 8,04 \\ R_2 &= R'_2 \text{ con AR} = 2,407 \\ R_3 &= R'_3 \text{ con AR} = 1,608 \\ R_4 &= R'_4 \text{ con AR} = 1,086 \\ R_5 &= R'_5 \text{ con AR} = 0,98 \end{aligned}$$

Los valores teóricos calculados quedan resumidos en la tabla 1.

Longitud variable		Ancho variable		Potencia
$\rho_s = 115,7 \Omega/\square$	$\rho_s = 100,1 \text{ k}\Omega/\square$	$\rho_s = 115,7 \Omega/\square$	$\rho_s = 100,1 \text{ k}\Omega/\square$	
$R_1 = R'_1$ 103,30357	89,37499 K	930,228	804,804 K	A.V. 1,286 W L.V. 1,12 W
$R_2 = R'_2$ 233,05286	201,63 K	278,51137	240,95928 K	A.V. 4,3 W L.V. 2,526 W
$R_3 = R'_3$ 495,85714	429 K	186,0456	160,9608 K	A.V. 6,432 W L.V. 5,376 W
$R_4 = R'_4$ 628,08571	543,4 K	125,70649	108,7573 K	A.V. 9,52 W L.V. 6,81 W
$R_5 = R'_5$ 828,90786	717,145 K	113,44244	98,146829 K	A.V. 10,548 W L.V. 8,9868 W

A.V.: ancho variable.
L.V.: longitud variable.

Tabla 1

Realizados los cálculos teóricos, se procedió al diseño y corte de máscaras mediante el coordinatógrafo a escala 5:1. A continuación se redujeron fotográficamente a escala 1:1 según se muestra en las figuras 2 y 3:

Las pantallas elegidas para conductores y resistores (de acuerdo con la tinta elegida) fueron de hilo de acero inoxidable de 250 y 200 mesh respectivamente. En ambos casos con la trama a 45° respecto a la dirección de desplazamiento de la rasqueta. La tensión de la malla fue

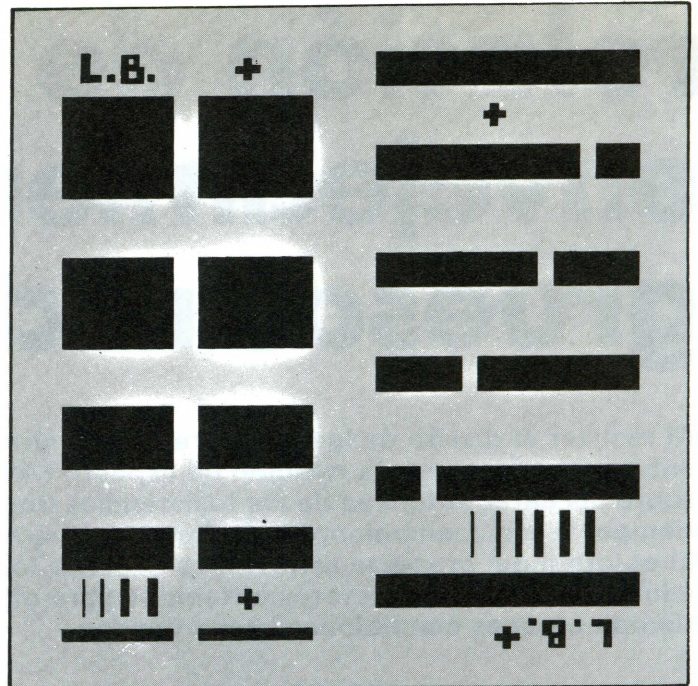


Figura 2.

32 Nw. El motivo se transfirió a la pantalla por el método indirecto. La medida de las pantallas fue de 5 x 5 pulgadas.

SERIGRAFIA Y QUEMADO

El serigrafado se realizó con las tintas 6120 de Pd/Ag para conductores y la 4921 y la 4951 para resistores, todas ellas compatibles y de la firma Du Pont. La viscosidad de la tinta utilizada fue la que especifica el fabricante.

La rasqueta se situó con un ángulo de 45° y a una presión, sobre la pantalla, de 4 kg/cm² en todos los casos. La

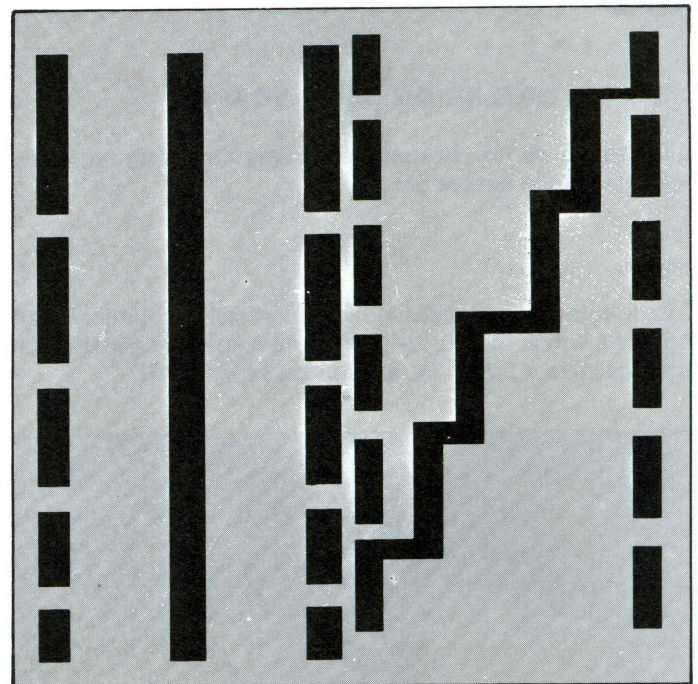


Figura 3.

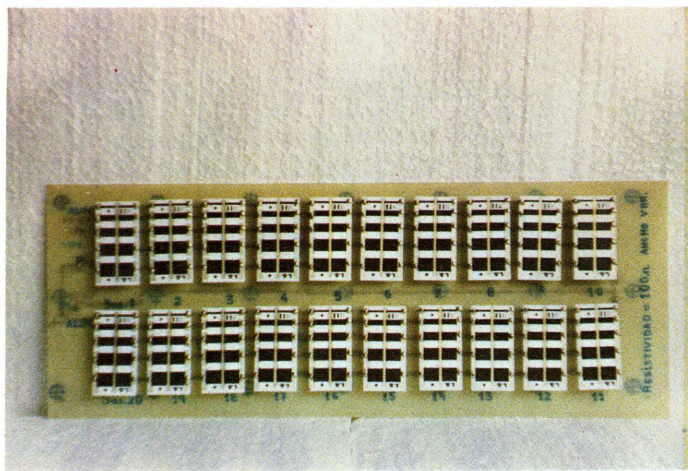


Foto 2.

distancia entre pantalla y substrato fue de 90 micras en los resistores y de 88 micras en los conductores.

Los perfiles de quemado utilizados se muestran en las figuras 4, 5 y 6, que corresponden a los conductores, resistores de 115,7 Ω/\square y resistores 100,1 $k\Omega/\square$ respectivamente:

NORMAS Y ENSAYOS

Se realizaron dos tipos de ensayos:

- Envejecimiento en almacenamiento (calor).
- Envejecimiento en funcionamiento.

Para la realización de estos ensayos, nos acogemos a la norma NF C96-411 que especifica las condiciones en las

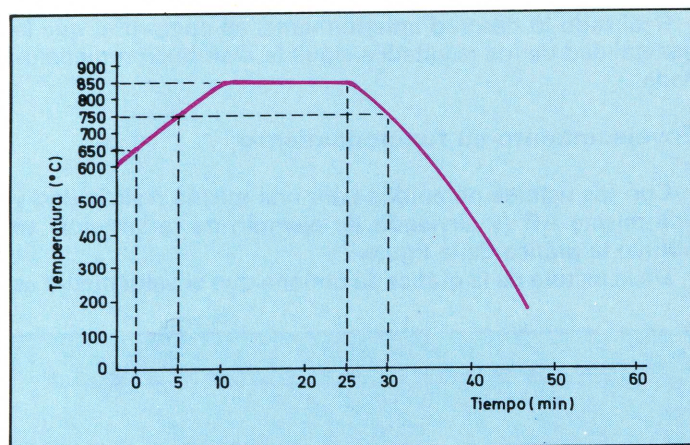


Figura 4.

que tienen que producirse los ensayos y las condiciones de medida.

En el ensayo «envejecimiento en almacenamiento en calor», se mantuvieron los sustratos en una cámara climática a la temperatura de 70°C y una humedad relativa del 50 %.

Para el ensayo «envejecimiento en funcionamiento», se hizo funcionar a los resistores a un porcentaje de la potencia nominal en las mismas condiciones climáticas especificadas en el ensayo anterior.

En ambos ensayos se tuvieron funcionando los 40 resistores de cada tipo durante mil horas y se hicieron

$\rho_s(\Omega/\square)$	Potencia disipada %	
	Longitud variable	Ancho variable
115,7	0,14 1	2,94 2
100,1	0,2 3	1,117 4

Tabla 2

interrupciones para medir cada 168 ± 10 horas, tal y como especifica la norma.

Los resistores se conectaron adecuadamente en placas de circuitos impresos tal y como se muestra en las fotografías, de tal forma que el porcentaje de potencia que disipó cada uno fue el que se resume en la tabla 2.

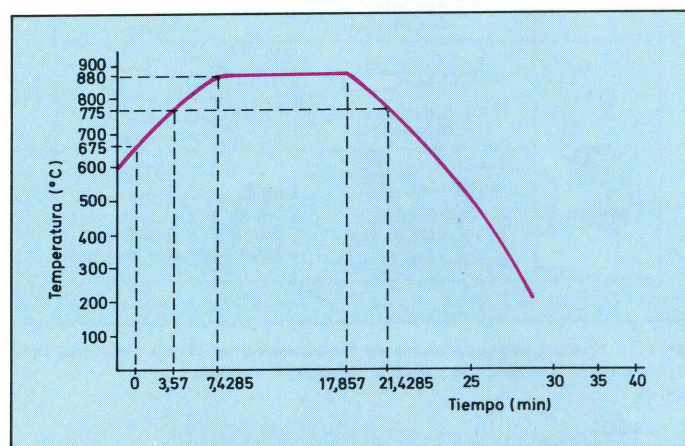


Figura 5.

RESULTADOS OBTENIDOS

Debido a que el número de datos a considerar es muy elevado, se sistematizó la toma y anotación en unas tablas que fueran fáciles de manejar, una de las cuales se muestra a continuación (tabla 3).

Como vemos, en esta tabla se especifica:

- Ensayo realizado.

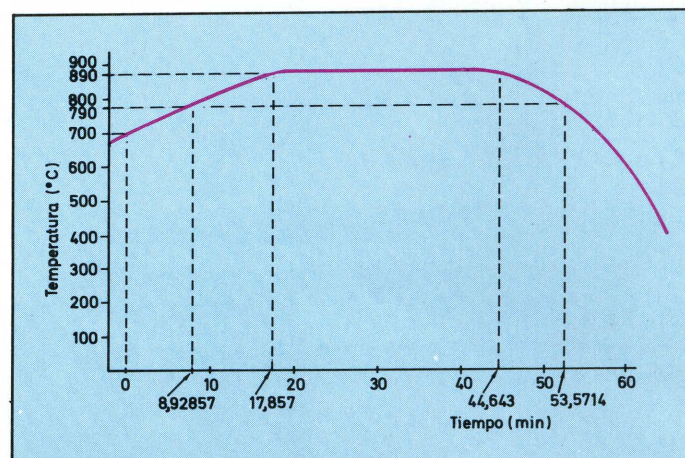


Figura 6.

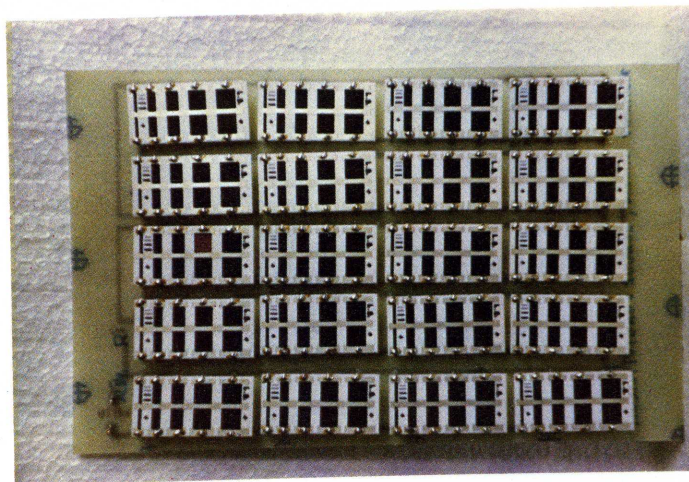


Foto 4.

ESTUDIO DE LOS RESULTADOS

En primer lugar, se demostró que los valores de los resistores obtenidos en los resultados, siguen una distribución normal de media \bar{R} y desviación típica σ . Esto se hizo utilizando un papel de escalas funcionales. De tal suerte, que anotando los valores de las resistencias (ordenados en orden creciente) en abscisas, y en ordenadas, la estimación de la función de distribución para cada valor, si los sucesivos puntos pueden ser alineados según una recta, se demuestra que la distribución es una normal.

El estimador utilizado fue:

$$F_{(R_i)} = i/(n+1) \quad (3)$$

en el que $i=1, \dots, n$ y $R_i = R_1 \leq R_2 \leq \dots \leq R_i \leq \dots \leq R_n$

Realizado lo descrito anteriormente, se comprobó que la generalidad de los resultados sigue la distribución mencionada.

Envejecimiento en funcionamiento

Con los valores obtenidos para una misma resistividad y una misma AR (y sirviendo de ejemplo de lo anterior) se obtuvo la gráfica de la figura 7:

De la lectura de la gráfica se obtiene que el valor medio es

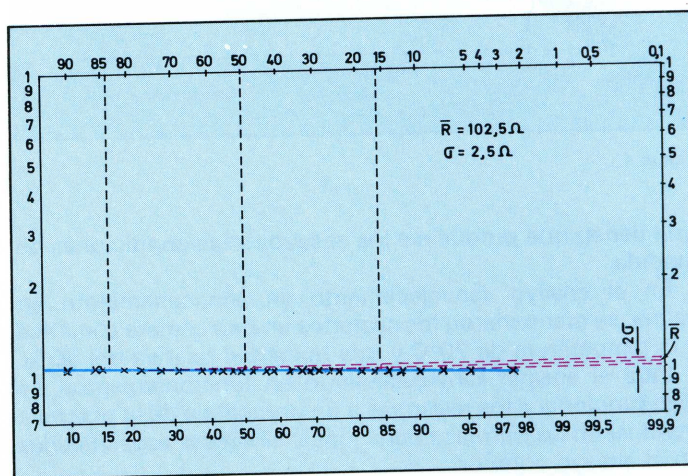


Figura 7. Resistencias de longitud variable, $\rho_s = 100$ ohmios/cuadrado y $AR = 0,89$; medida 1.

	$\rho = 100 \Omega/\square$	$\rho = 100 K\Omega/\square$
R_1	100,9	59,8K
R_2	220	184K
R_3	447	420K
R_4	541	545K
R_5	735	753K
R'_1	103,9	60,5K
R'_2	226	180K
R'_3	437	396K
R'_4	551	541K
R'_5	723	700K
Circuito equivalente a:		
100 Hz	 $L=0$, para todas las resistencias	 $C=0$, para todas las resistencias
1KHz	 $L=0$, para todas las resistencias	 $C=0$, para todas las resistencias
500KHz	$Z_1 = Z'_1 = 100 / -21^\circ$ $Z_2 = Z'_2 = 203 / -27^\circ$ $Z_3 = Z'_3 = 390 / -40^\circ$ $Z_4 = Z'_4 = 460,5 / -43^\circ$ $Z_5 = Z'_5 = 582,3 / -52^\circ$	$Z = 1315,78 / -71,57^\circ$ En todas igual, pero en las de menor longitud el ángulo y la impedancia disminuyen pero muy poco

Tabla 3. Ensayo: envejecimiento en funcionamiento. Capas resisoras con ancho constante y longitud variable. Sustrato 1, medida 1.

- Tipo de capa resistiva al que se refiere la medida.
- Sustrato al que se refiere la medida.
- Número de medida.

Como ésta tenemos:

- a) 80 tablas del ensayo «envejecimiento en funcionamiento» en capas resistivas de ancho constante y longitud variable.
- b) 80 tablas del ensayo «envejecimiento en funcionamiento» en capas resistivas de longitud constante y ancho variable.
- c) 30 tablas del ensayo «envejecimiento en almacenamiento (calor)».

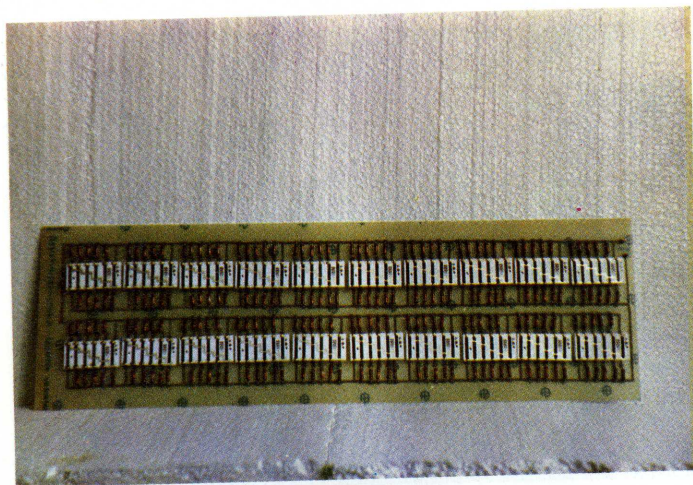


Foto 3.

102,5 Ω, y que la desviación típica es 2,5 Ω.

Resultados que concuerdan calculándolos analíticamente según las expresiones:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} \quad (5)$$

con las cuales se ha realizado el cálculo de todas las medidas y desviaciones de todos los resultados convenientemente clasificados.

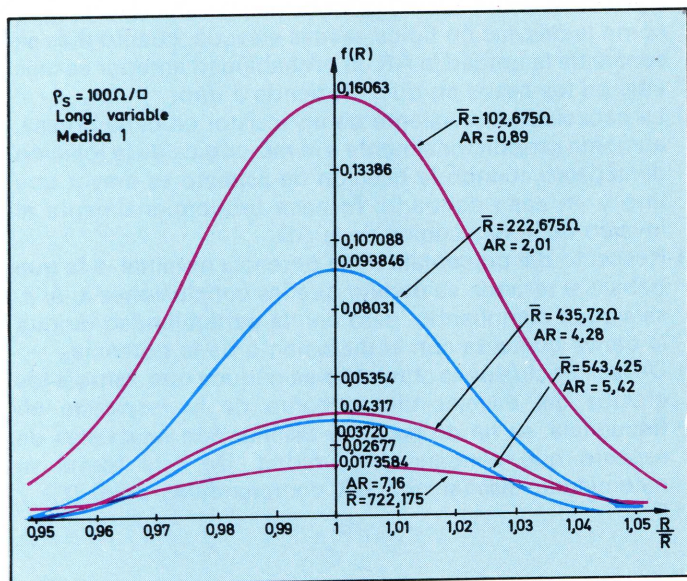


Figura 8.

Así por ejemplo, en el caso de los resistores de ancho constante y longitud variable, se obtuvieron unos valores numéricos a través de los cuales resultaron las gráficas 8 y 9. De las cuales se desprende, que a medida que AR es mayor, la desviación típica es a su vez mayor; con lo cual la

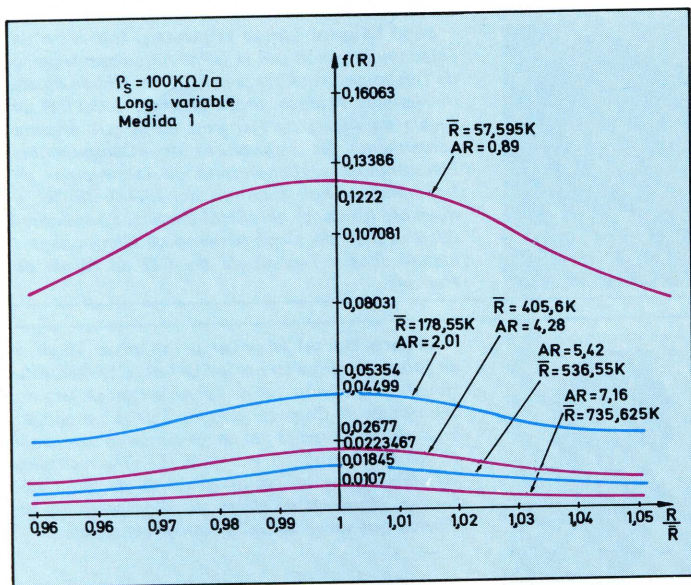


Figura 9.

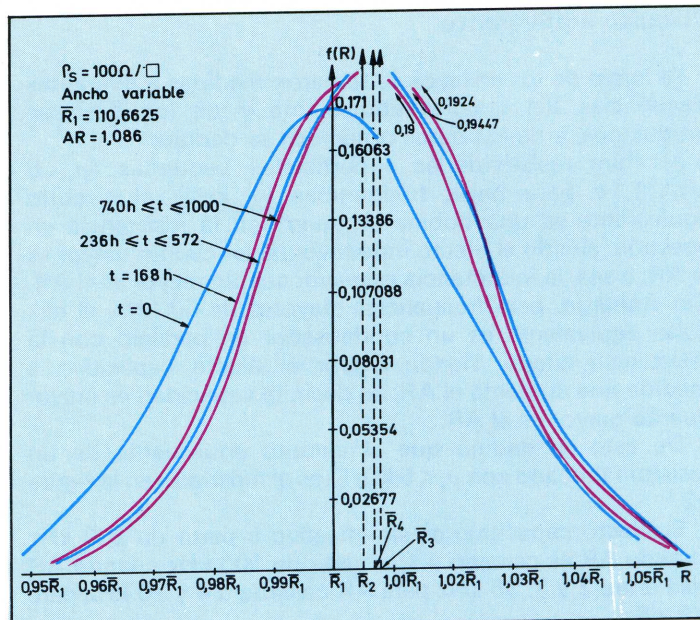


Figura 10.

probabilidad de que un valor de resistencia esté dentro de un margen de confianza definido, es menor a medida que el AR es mayor. Asimismo, para una misma AR se obtiene que la desviación es mayor cuanto mayor es la resistividad de la tinta.

Por otro lado se comprobó que en el envejecimiento continúa cumpliéndose la ley normal, sólo que los valores

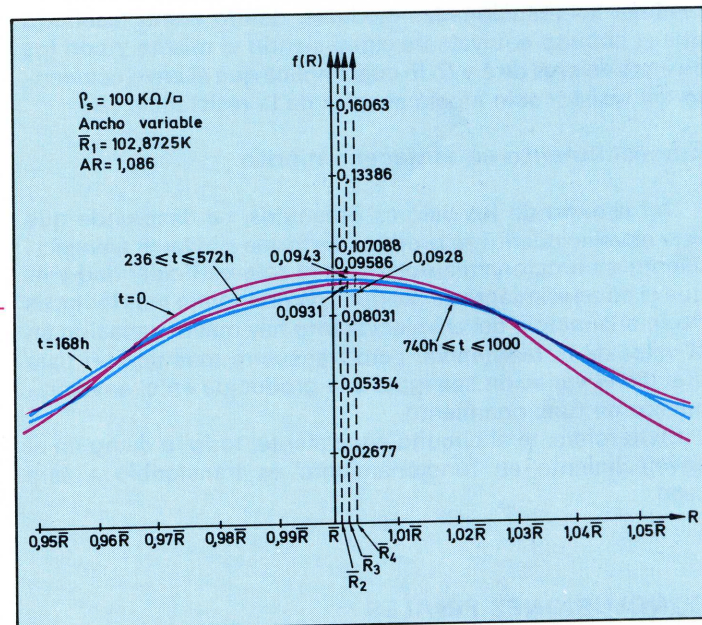


Figura 11.

medios y las desviaciones típicas pueden variar tal y como se muestra en las gráficas 10 y 11 obtenidas para una resistividad y AR constantes, cada 168 horas acumulativas de envejecimiento.

De las gráficas se desprende que la deriva es más acusada en las primeras horas de envejecimiento. Asimismo obtenemos que a mayor resistividad, el envejecimiento es menor y más constante para una misma AR.

Circuito equivalente

Al inicio de los ensayos se tomaron medidas a diferentes frecuencias del circuito equivalente y de los desfases producidos, y de los datos obtenidos se dedujo:

a) Para resistividades superficiales pequeñas ($\rho_s < 5 \text{ k}\Omega/\square$), y para bajas frecuencias (1 kHz) el circuito equivalente es una bobina en serie con la resistencia en cuestión, siendo el efecto inductivo mayor cuanto mayor es el AR; o sea, la inductancia es mayor cuanto mayor es el AR. Sin embargo, para frecuencias mayores de 50 kHz, el circuito equivalente es un condensador en paralelo con la resistencia citada, siendo mayor el efecto capacitivo a medida que aumenta el AR; es decir, la capacidad es mayor cuanto mayor es el AR.

De esto se dedujo que el circuito equivalente de un resistor fabricado con $\rho_s \leq 5 \text{ k}\Omega/\square$ es el mostrado en la figura 12.

El efecto capacitivo es significativo a partir de 200 kHz cuando AR es cercano a 1, a partir de 100 kHz cuando AR está entre 2 y 3, 35 kHz para AR cercano a 4 y 20 kHz para $AR \geq 5$.

b) Para resistividades superficiales mayores que $5 \text{ k}\Omega/\square$, el circuito equivalente es un condensador en paralelo con la resistencia en cuestión, siendo el efecto capacitivo mayor cuanto mayor es el AR.

El efecto capacitivo es significativo para frecuencias comprendidas entre 20 y 50 kHz, correspondiendo a $AR = 5$ y $AR = 1$ respectivamente.

De aquí se deduce que la frecuencia a la que pueden funcionar los resistores es menor cuanto mayor sea ρ_s y también será menor cuanto mayor sea AR.

En medidas intermedias (cada 168 ± 10 horas) se tomaron también las mencionadas medidas, dando como resultado que el circuito equivalente sigue siendo el mismo y con los mismos valores de L y C , lo cual implica que el envejecimiento del resistor sólo afecta al valor de la resistencia (R).

Envejecimiento en almacenamiento

Del estudio de los valores obtenidos, se desprende que este envejecimiento se produce de forma similar al envejecimiento en funcionamiento, con una sola particularidad y es que el envejecimiento se produce de una forma más lenta; es decir, al principio del envejecimiento hay mayor variación en el valor de la resistencia, pero transcurre más tiempo para que dicha variación sea igual a la producida en el envejecimiento en funcionamiento.

En lo referente al circuito equivalente, todo lo dicho en el envejecimiento en funcionamiento es transferible a este caso.

CONCLUSIONES FINALES

A la hora de realizar el diseño de una capa resistiva rectangular en capa gruesa será conveniente tener en cuenta las siguientes conclusiones:

1) Para una misma AR la variación del valor esperado de la resistencia (R) es más acusada en las tintas de resistividad más pequeña; sin embargo la probabilidad de que el valor de la resistencia se encuentre en un margen de confianza en torno al inicial es mayor para menores resistividades aun cuando la disminución de esta probabilidad es mayor en estas últimas.

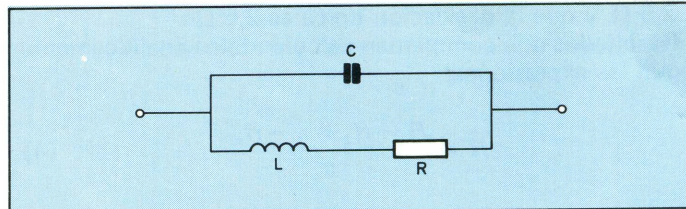
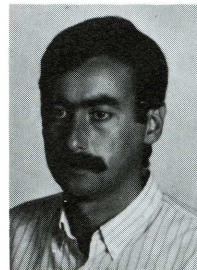


Figura 12.

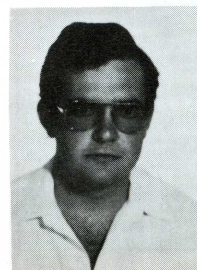
- 2) Para una misma resistividad, a mayor AR el desplazamiento con el tiempo del valor medio es menor, con lo que la probabilidad de que el valor esperado de la resistencia (valor inicial) prácticamente se mantiene, pero como la desviación típica es más elevada, cuanto más se separe de la unidad la AR, la probabilidad anterior es más alta, en los casos en que AR tiende a uno.
- 3) La capacidad equivalente de un resistor en capa gruesa, aumenta proporcionalmente a la raíz cúbica de la relación de aspecto cuando la relación de aspecto es mayor que uno y en caso contrario, lo hace proporcionalmente al inverso de la raíz cúbica de la AR.
- 4) Respecto del porcentaje de la potencia nominal, a la que trabaje el resistor, se dedujo que las conclusiones a, b, c, se siguen cumpliendo, pero con la particularidad de que la deriva aumenta con el incremento de la potencia.
- 5) De las conclusiones anteriores se deduce que, tanto a los efectos del envejecimiento como de la respuesta en frecuencia, se ha de procurar diseñar con relaciones de aspecto que tiendan a la unidad. De esta forma se recomienda diseñar con AR comprendidas entre 0,2 y 5. ●

REFERENCIAS

- [1] Charles A. Harper «Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics».
- [2] «Artículos de la publicación Solid State Technology».
- [3] Lewis M. «Thick Film Technology».
- [4] Textos de conferencias de las II Jornadas Nacionales de Microelectrónica Híbrida.
- [5] Páginas 20, 21, 22 y 23 de la documentación del curso «Iniciación en la técnica de la Fiabilidad» desarrollado en el ITE de Alcalá de Henares.
- [6] Normas NF C96-411 para ensayos de circuitos híbridos.



José Miguel López Higuera. Ingeniero de Telecomunicación por la UPM Ingeniero Técnico de Telecomunicación por la EUIT del CEI de Alcalá de Henares. Profesor titular en la EUIT del CEI de Alcalá de Alcalá de Henares, en la que imparte actualmente las asignaturas de «Componentes Electrónicos» y «Laboratorio de Tecnologías de Integración». Fue miembro del ISHM EE.UU. y miembro fundador del ISHM España. En la actualidad es Jefe del Departamento de Componentes Electrónicos y Tecnología del CEI de Alcalá de Henares.



Isidoro Berral Montero. Ingeniero Técnico de Telecomunicación por la EUIT del CEI Alcalá de Henares en el año 1984. Técnico especialista en Electrónica de Comunicaciones. Le fue concedido un diploma y premio por su rendimiento académico de los cursos 1.º y 2.º de ITT. Ha realizado estudios sobre la Tecnología Híbrida de Capa Gruesa. Matrícula de Honor en el proyecto Fin de Carrera que versó sobre la citada tecnología.