

TECNOLOGIA DE PEL·LÍCULA GRUIXUDA. UNA APLICACIÓ: REALITZACIÓ D'UNA BOBINA HÍBRIDA D'ESTAT SÒLID

per

CARLES CANÉ I BALLART

*Departaments d'Electrònica i Teoria de Circuits
ETSETB. Universitat Politècnica de Catalunya*

1. ABSTRACT

The objectifs of this work are the analysis, design and fabrication of an hybrid coil in Thick Film technology. First of all the possibilities of this microelectronics technology will be examined. Then a method to design a multiport starting from his Scattering parameters will be presented, and finally a prototype to evaluate his performances will be constructed. The results and comparisons between predicted and real behaviour will be given as a conclusion.

2. TECNOLOGIA DE PEL·LÍCULA GRUIXUDA

2.1 *Introducció*

Durant el decenni dels anys 50 la indústria electrònica, pressionada per l'enginyeria aeroespacial, s'adonà de la necessitat de trobar formes de miniaturització que conduïssin a petits circuits electrònics, de baix consum i molta exactitud, amb gran capacitat funcional per unitat de volum. Diverses tecnologies s'encaminaren a satisfer aquestes necessitats. D'entre elles, les de més èxit foren les de circuits integrats monolítics i les tecnologies de circuits híbrids, tant «thin film» o de pel·lícula prima com «thick film» o de pel·lícula

Aquest treball va obtenir el primer premi de la convocatòria del 23 d'abril de 1986 del Premi per a Estudiants de la Societat Catalana de Ciències, en la seva Secció d'Enginyeria.

gruixuda. D'entre elles tractarem aquesta última, que per les seves possibilitats és l'adequada per a nosaltres.

Tecnologia de pel·lícula gruixuda és un terme genèric que engloba qualsevol procés que realitzi un circuit electrònic per diferents tècniques d'impressió dels components passius. Així, tant podem pensar en les tradicionals pastes de metalls nobles sobre un substrat ceràmic com en tintes a base de resines impreses en bases orgàniques, etcètera. L'adherència d'aquestes tintes al substrat és assolida mitjançant la cremació a temperatures entre 500 i 1.000 °C.

Si, idealment, amb la dita tecnologia hom pot realitzar tant resistors com capacitors o inductors, en la pràctica aquests últims no ofereixen grans avantatges sobre els components microencapsulats equivalents i per tant no se solen fabricar. Podem veure el procés de realització d'un circuit en tecnologia de pel·lícula gruixuda en el fluxograma de la fig. 1.

2.2 *Característiques especials*

Convé d'anomenar les propietats principals de la tecnologia de pel·lícula gruixuda que fan que ens decidim o no per aquest tipus de circuits. Hi ha criteris de diversa natura: des de totalment electrònics fins a econòmics i àdhuc de disponibilitat d'una tecnologia en una país. Així, els principals avantatges que té el thick film són la miniaturització, gran modularitat, disseny assistit per ordinador, petitíssima tolerància en les especificacions, alta fiabilitat i molt baix cost per a quantitats de producció mitjanes.

Tan important, però, com saber-ne els avantatges, és reconèixer els inconvenients dels circuits híbrids i les situacions on no convé d'utilitzar-los. Massa sovint hom passa de l'oblit d'una tecnologia a l'aplicació indiscriminada en camps on no és necessària i el seu funcionament no és el correcte. Si l'aplicació en què hom treballa no necessita dimensions petites, no hi ha circuiteria repetitiva o el volum de producció no és gran, els circuits híbrids no hi haurien d'ésser utilitzats.

2.3 *Procés de fabricació*

Examinarem ara les diferents etapes de fabricació d'un circuit de pel·lícula gruixuda des de la seva impressió fins a l'encapsulament, tot donant una idea dels equips necessaris i dels materials que hom hi fa servir.

Etapa d'impressió

El procediment bàsic d'impressió en tecnologia de pel·lícula gruixuda és la serigrafia, és dir, fer passar (mitjançant la pressió d'una regleta) unes pastes a través d'una pantalla on hi ha el motiu dibuixat. D'aquesta manera hom aconsegueix d'imprimir el dibuix desitjat sobre el substrat que hi ha sota la pantalla, podent-hi haver separació o no entre aquests dos elements.

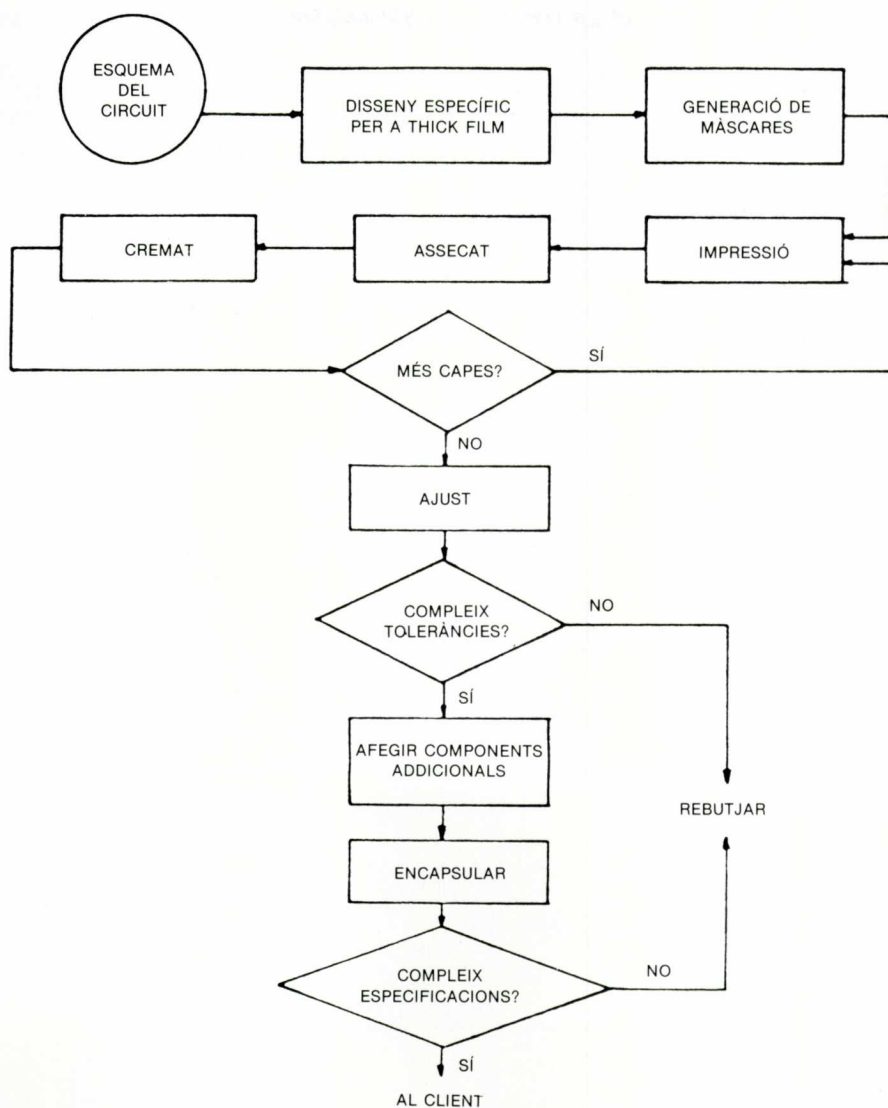


Fig. 1. Fluxograma del procés de fabricació d'un circuit híbrid de pel·lícula gruixuda.

El substrat és la base de tots els elements de capa gruixuda, així com dels afegits. Ha de tenir una gran resistència mecànica, bona conductivitat tèrmica, textura llisa i poca guerxesa; ha de poder suportar les temperatures de cremació i a més ha d'ésser barat. L'alúmina (Al_2O_3) reuneix la majoria d'aquests requisits i per tant és el material que hi serà utilitzat. N'han estat provats dife-

rents graus de puresa, i hom ha arribat a la conclusió que el més adequat és el 96 %.

La pantalla és formada per una tela o malla fina estesa sobre un marc. Hom la cobreix amb fotoresines que són tractades amb raigs ultraviolats per tal de deixar finestres en la malla per on passarà la tinta que ha d'ésser dipositada sobre el substrat.

Les pastes utilitzades són suspensions de partícules en un vehicle orgànic amb dissolvents. Per analogia amb el procés convencional de serigrafia, aquestes suspensions són anomenades tintes. De tintes, en principi n'hi ha d'haver de tants tipus com elements diferents vulguem imprimir. Així es poden classificar com a tintes conductores, resistives i dielèctriques, segons que hom les necessiti per a realitzar pistes conductores, elements resistius, capacitius o aïllaments entre circuits multicapa.

Hi ha dos tipus de màquines de serigrafia, segons que vulguem fer serigrafia amb contacte o sense. En la impressió sense contacte la pantalla és posicionada a una distància fixa del substrat i quan la regleta es mou sobre ella per tal de fer passar la tinta, produeix una deflexió de la malla fins a tocar el substrat. En canvi, en la serigrafia amb contacte, la pantalla toca directament el substrat i no s'hi produeix deflexió en passar la regleta.

Dels elements que formen la màquina d'impressió, el més important és la regleta, perquè afecta molt la gruixària de l'element dibuixat. Així, molt concisament, hom pot dir que si t és la gruixària de la pel·lícula impresa per diferents angles d'atac, en la fig. 2 es compleix:

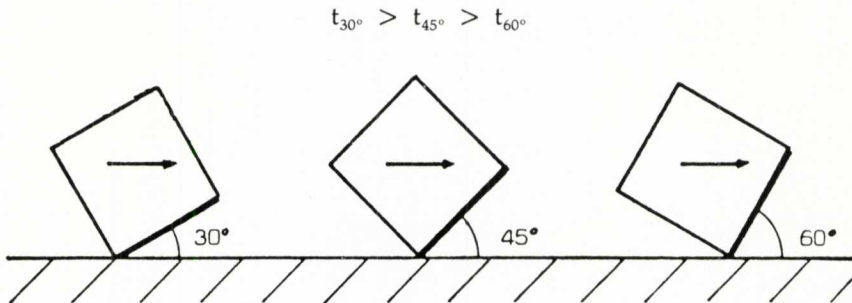


Fig. 2. Diferents angles d'atac de la regleta.

Quant al material, si la regleta és tova, l'angle d'atac es redueix respecte al d'un material més dur, tal com veiem a la fig. 3.

Etapes d'assecatge i cremació

Després que les tintes han estat impreses sobre el substrat, i abans de l'etapa d'assecatge amb aire calent, cal deixar reposar el circuit durant uns minuts

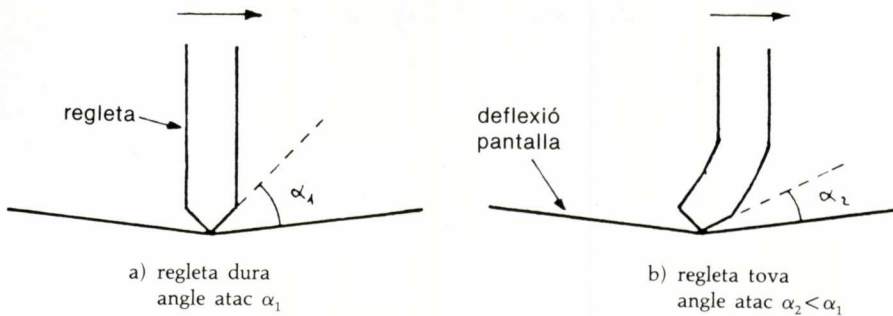


Fig. 3. Efecte de la duresa de la regleta sobre l'angle d'atac.

per tal que la pel·lícula perdi les irregularitats que queden del pas per una malla de fils encreuats. Aquests defectes són visualitzats a la fig. 4. Si hom deixa reposar la mostra, la tensió superficial farà que el component torni a tenir una secció homogènia.

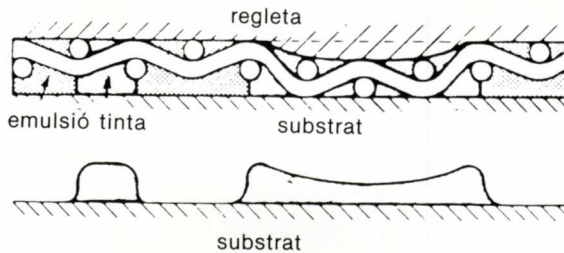


Fig. 4. Defectes d'impressió deguts a la regleta.

La fase següent és l'assecatge a 125°C per a evaporar els dissolvents volàtils que porta la tinta, i posteriorment hom durà a terme la cremació de les tintes. Aquesta etapa engloba tres fases diferents. Cal començar pel període de precoció, en el qual hom acaba d'extreure les substàncies orgàniques que quedaven dins la tinta. Per això hom la passa de la temperatura ambient a la màxima de cremació (850°C aprox.). La fase següent és la cocció durant 10 minuts, i és quan la pasta cristal·litza i s'enganxa al substrat. La cocció s'acaba amb un període de refredament que va de la temperatura màxima a la d'ambient altra vegada. Ni el refredament ni l'escalfament poden ésser fets a qualsevol velocitat, car es produïrien tensions i ruptures dins la pasta i s'inutilitzarien els components impresos.

Hi ha bàsicament dos tipus de forns per a cremar circuits de pel·lícula gruixada: els de raigs infraroigs i els tèrmics convencionals de cadena mòbil. Per tal de regular amb gran precisió la temperatura, solen ésser multizona, i per

tant permeten d'assolir molt fidelment els perfils de cremació necessaris. Un perfil estàndard de cremació no ha d'ésser necessàriament simètric, tal com veiem en el de la fig. 5, recomanat per un fabricant de tintes.

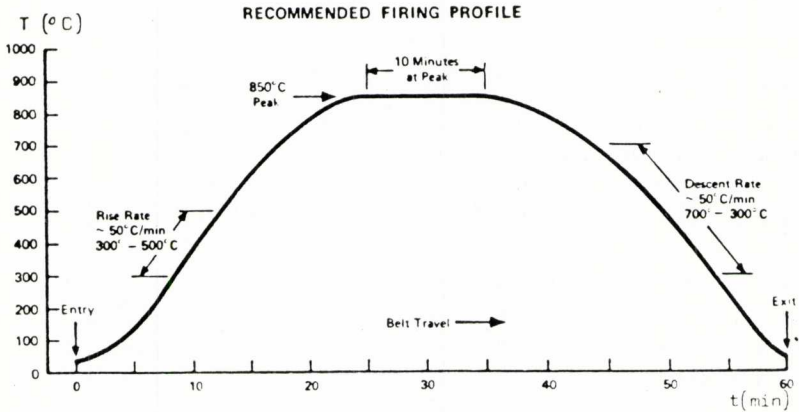


Fig. 5. Perfil estàndard de cremació de tintes.

Etapa d'ajustatge dels resistors

En totes les etapes de fabricació vistes fins ara hi ha múltiples paràmetres i variables que afecten el resultat final. Tenir-los tots dins uns marges de variació petits és molt difícil i antieconòmic, i si les toleràncies finals no fossin molt grans hom podria deixar els circuits tal com surten del forn. En la pràctica, però, ens podem trobar amb valors típics entre el 30 % i el 50 % de tolerància, i per tant es fa inevitable una etapa d'ajustatge.

Els mètodes per a assolir el valor desitjat per a un resistor fan augmentar el seu valor òhmic a mesura que es va ajustant. Això suposa que a l'hora de fer el disseny cal tenir en compte que posteriorment es reduirà l'àrea dels elements i per tant convé sobredimensionar-los. Hi ha múltiples tècniques d'ajustatge de resistors. En citem vuit, que són les més representatives: ajustatge mecànic, ultrasònic, per polsos de tensió, electroquímic, per sonda elèctrica, per doll d'aigua, per aire abrasiu i per làser. Els que han merescut més atenció per part de la indústria han estat els dos últims.

Etapa de muntatge i encapsulament

Probablement l'encapsulament ha rebut la mínima consideració en el context dels circuits híbrids, però és un factor important que pot determinar el funcionament del circuit acabat.

Abans d'encapsular hom procedeix al muntatge i soldadura dels components afegits, tant actius com passius, que no hagin estat realitzats en pel·lícula gruixuda. També cal soldar les potes connectores, que seran els únics punts als quals hom podrà accedir externament. Com que no hi ha normes estrictes,

tant podem dur a terme muntatges «single in line» com «dual in line», i hom en farà l'elecció tot procurant d'evitar els encreuaments entre pistes conductores.

Les pastes de soldar poden ésser dipositades en el lloc desitjat tant per serigrafia com per altres mètodes. Hom farà l'elecció de la pasta en funció de la temperatura de fusió i de la seva compatibilitat amb les tintes conductores utilitzades.

El components microencapsulats addicionals tant poden ésser actius com passius, com ja hem dit. Això és perquè el secret per a assolir unes especificacions bones consisteix a combinar els millors dispositius que hom pugui trobar en el mercat, sempre que aquests siguin acceptablement barats respecte als components realitzats per serigrafia. Així, incorporarem inductors i capacitors, si calen, a més dels importants components actius tals com transistors bipolars i d'efecte camp i sobretot els amplificadors operacionals. Tots ells poden ésser trobats microencapsulats, amb les millores que això ens suposarà.

Finalment, després d'incorporar-hi els components necessaris, hom procedeix a l'encapsulament del conjunt. Les dues formes bàsiques de fer-ho són amb resina i amb mòduls hermètics. La primera forma és barata i simple, mentre que hom fa servir la segona per a casos especials d'alta qualitat i alta freqüència, per l'efecte d'apantallament que comporta.

3. DISSENY D'UNA BOBINA HÍBRIDA A PARTIR DELS SEUS PARÀMETRES S

3.1 *Introducció*

Un cop són conegudes les característiques de la tecnologia de pel·lícula gruixuda, hom passa a veure el circuit al qual serà aplicada: la bobina híbrida. Veurem un mètode de disseny que sintetitza un multiport qualsevol com a circuit amb elements actius un cop són coneguts els seus paràmetres de Scattering. Nosaltres considerarem que el multiport a realitzar és la bobina híbrida, i veurem els avantatges que té la realització activa davant la convencional amb autotransformadors.

3.2 *Matriu de paràmetres de Scattering*

Les propietats d'un N-port queden completament descrites per a diferents conjunts de paràmetres. És normal d'utilitzar els famosos paràmetres Z o Y definits amb els ports en circuit obert o curt circuit. Tanmateix, per a certs problemes seria més convenient i simple de formular directament les propietats dels multiports en funció de les ones incidents i reflectides en cada terminal. D'entre els conjunts de paràmetres definits així, hom prendrà en consideració els paràmetres S o de Scattering per llurs propietats de visualitzar directament les relacions entre els ports i pel fàcil disseny a partir d'ells.

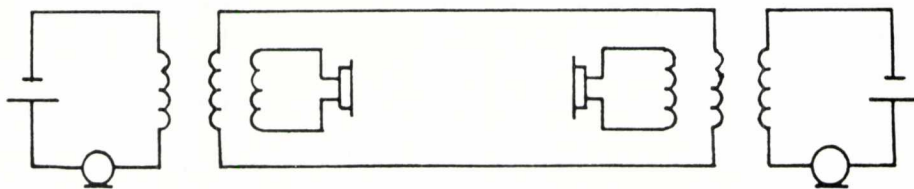


Fig. 8. Circuit simplificat d'una conversa bidireccional.

dors de senyal equilibrats, en detectors equilibrats de fase, en combinadors de potència, en la T-màgica de microones, etcètera. D'això, hom dedueix que és un component molt important i que tots els esforços per a assolir una millor bobina híbrida no són menyspreables.

En aquest treball hom proposa una realització activa construïda amb amplificadors operacionals i resistors, que tindrà grans avantatges respecte a la realització convencional amb transformadors tant de tipus electrònic com de pes, cost, fiabilitat, etc. i que, a més a més, permetrà d'ésser implementada en tecnologia de pel·lícula gruixuda.

3.4 Síntesi de multiports a partir dels paràmetres S

Tot això que hom ha dit fins ara dels paràmetres de Scattering ha servit com a introducció del mètode de síntesi que ara serà explicat. La filosofia en què es basa és la següent: un cop fixada la matriu S òptima del multiport que cal realitzar, hom implementarà els paràmetres que són diferents de zero amb un amplificador operacional i quatre resistors. Llavors, quan diversos paràmetres són no nuls, hom acoblarà els blocs pertinents, tot assolint un circuit compacte i fàcil de realitzar.

Partint de les definicions de les variables incident i reflectida ja vistes, hom arriba a una realització física entre a_k i b_k com la de la fig. 9. Introduint després la definició dels paràmetres S , hom arriba a la topologia mínima desitjada.

Aquest és el mètode que serà aplicat per a dur a terme el disseny de la bobina híbrida activa. Per tant, el primer pas serà trobar-li la matriu de paràmetres S . Pels mètodes ja enunciats, hom pot deduir que per a la bobina híbrida més general possible tindrem:

$$\tilde{S} = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & 0 \\ S_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Si apliquem principis pràctics d'optimització, sense perdre, però, la bidireccionalitat entre transmissor (3) i receptor (2), arribem a:

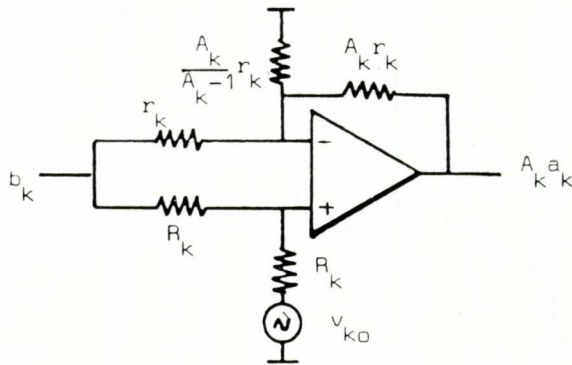


Fig. 9. Realització d'un bloc de conversió a_k - b_k .

$$\tilde{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} \\ S_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

car tant transmissor com receptor per ells mateixos són elements unidireccionals.

Així doncs, veiem la realització d'aquesta matriu amb el mínim d'elements a la fig. 10.

4. FABRICACIÓ DE LA BOBINA HÍBRIDA EN PEL·LÍCULA GRUIXUDA

4.1 Introducció

El motiu lògic de l'estudi d'una tecnologia microelectrònica és la seva aplicació a la fabricació de circuits amb certs avantatges respecte a altres implementacions. Això és el que pensem demostrar en aquest capítol.

Així, començarem a definir quins són els valors òptims dels components que formen la nostra bobina híbrida; després farem una simulació per ordinador per tal d'estar segurs que allò que ha estat dissenyat pot funcionar; continuarem amb el disseny especial o «lay-out» que requereix la tecnologia de pel·lícula gruixuda, i acabarem construint un nombre limitat de prototipus, tant per tal de demostrar la viabilitat de tot allò que haurà estat explicat, com per tal de poder mesurar característiques físiques de l'aparell funcionant i poder-les comparar amb les previstes.

4.2 Optimització de la bobina híbrida d'estat sòlid

Si a l'esquema de la fig. 10 hom li fa complir valors pràctics de funciona-

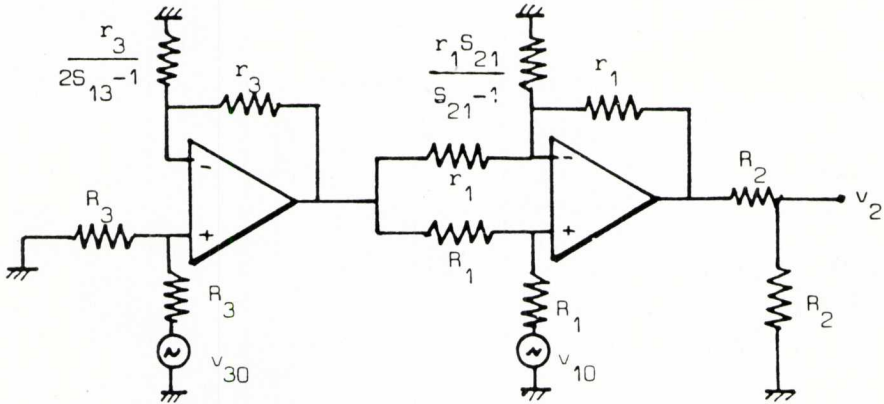


Fig. 10. Realització mínima de la matriu S d'una bobina híbrida.

ment que permetin simplificacions, com ara $S_{21}=1$ i $S_{13}=0,5$, d'altra banda perfectament vàlids en telefonia, ens queda el circuit de la fig. 11.

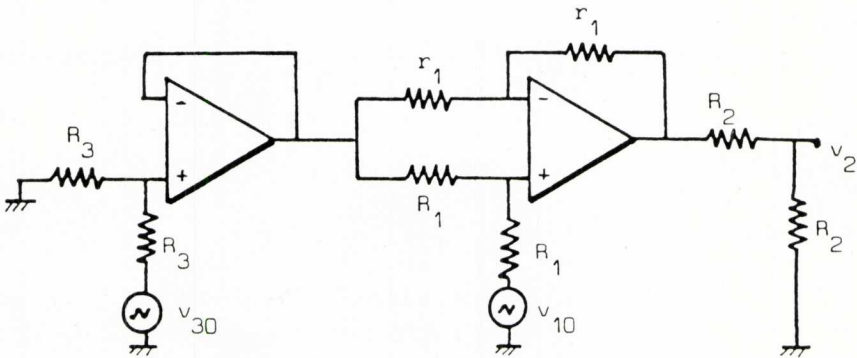


Fig. 11. Realització de la bobina híbrida amb $S_{21}=1$, $S_{13}=0,5$.

Tornant a aplicar criteris d'optimització i compatibilitat amb la xarxa telefònica, hom arriba a la conclusió que el millor circuit és el de la fig. 11 amb tots els resistors de 600Ω , el valor de la impedància característica de la xarxa telefònica. Per tant aquest serà el circuit que caldrà realitzar.

4.3 Disseny de components d'un circuit thick film

El procés normal de treball amb tecnologia de pel·lícula gruixuda comença per la fase de disseny del circuit que cal realitzar. A diferència dels circuits in-

tegrats monolítics, que requereixen tècniques de disseny especials, els de pel·lícula gruixuda poden ésser realitzats per una transformació més fàcil dels circuits convencionals, tot i que també hi sorgeixen problemes. Ara en veurem els passos més importants.

Generació de màscares

La primera elecció a fer és entre imprimir els circuits per una sola cara del substrat o per totes dues, en funció de la dissipació de calor, possibles interconnexions, etc. Sigui la que sigui la decisió, per a garantir la màxima precisió en la impressió de les successives capes conductores i resistives, cal fer els dibuixos de les màscares com a mínim a una escala de 10:1. Posteriorment seran reduïdes mitjançant procés fotogràfic i hom n'obtindrà els fotòlits. Amb ells hom procedirà a la sensibilització de l'emulsió de la pantalla, obtenint així la màscara d'impressió.

En la fig. 12 hom pot conèixer les dimensions mínimes que han de tenir els dibuixos de les màscares conductores, per tal d'assolir bons resultats. Normalment, però, hom treballarà amb dimensions estàndard cinc vegades superiors. Finalment, cal vigilar de no realitzar llaços tancats amb resistors impresos, car no podrien ésser ben mesurats a l'hora de fer l'ajustatge.

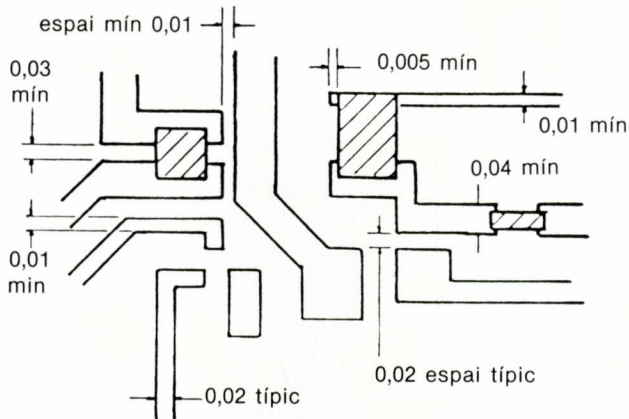


Fig. 12. Condicions de disseny de circuits híbrids. Els quadres ratllats són resistors sobreposats a les pistes conductores.

Disseny de resistors

Els resistors són els components més importants en la tecnologia de pel·lícula gruixuda. Llor valor és calculat exactament per a la funció circuital que han de dur a terme, i cal fer-ho igualment amb llurs dimensions, amb els avantatges de cost i espai que això suposa.

El valor ideal d'un resistor de pel·lícula és:

$$R = \rho \frac{L}{W \cdot t} = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W} = \frac{\rho}{t} \cdot RA$$

on ρ = resistivitat del material

L = longitud

RA = relació d'aspecte

W = amplada del resistor

t = gruixària.

Si hom considera que la gruixària t és constant, pot definir la resistivitat superficial com:

$$\rho_s = \frac{\rho}{t}$$

i per tant, substituint, queda:

$$R = \rho_s \cdot RA$$

Si hom permet que el resistor tingui una certa tolerància T i té en compte que en l'etapa d'ajustatge el resistor perd àrea i augmenta el seu valor, la fórmula de disseny serà:

$$0,7 \left(1 + \frac{T}{100} \right) \cdot R = \rho_s \cdot RA$$

o, aïllant la relació d'aspecte:

$$RA = 0,7 \left(1 + \frac{T}{100} \right) \frac{R}{\rho_s}$$

Segons el valor d'aquest paràmetre, els resistors hauran d'ésser realitzats amb geometries diferents. Per a valors de RA menors que 6 els resistors seran rectangulars; per a valors superiors, seran de tipus barret; si $RA > 10$ i hom no té una tinta de major resistivitat, el resistor serà de serpentina en sèrie, mentre que per a $RA < 0,2$ utilitzarem la serpentina en paral·lel. Podem veure aquestes geometries a la fig. 13.

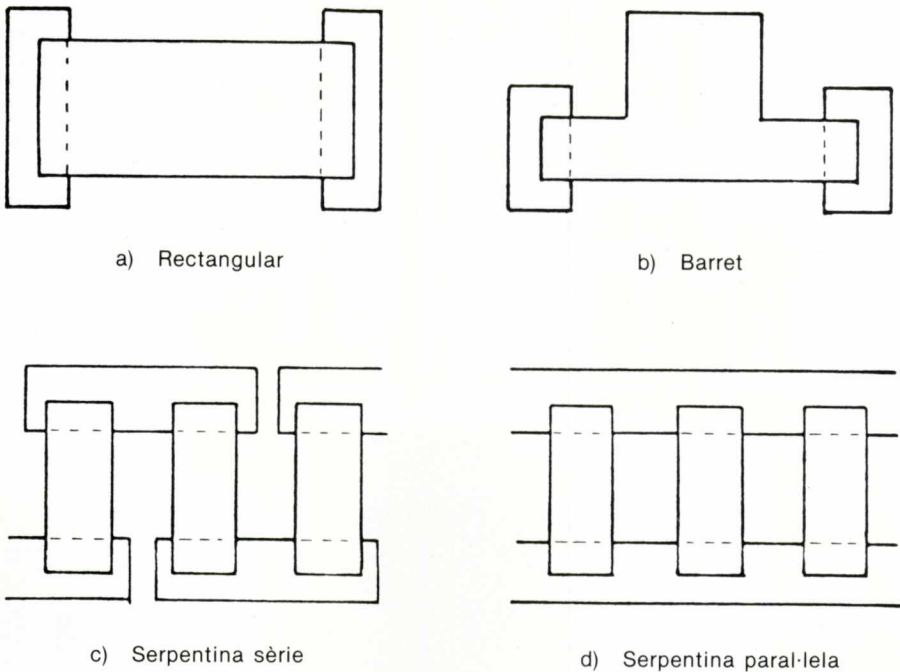


Fig. 13. Diferents geometries per a resistors impresos.

4.4 Disseny de la bobina híbrida d'estat sòlid

Ara ja és hora d'aplicar totes les bases desenvolupades al circuit de la bobina híbrida que ha estat escollit en el capítol anterior.

Ja hem vist que el valor òptim per als resistors és $R=600 \Omega$. Si ara calculem la potència que han de dissipar en el pitjor cas de funcionament, trobem un valor de 33,75 mW. Aquesta condició de disseny, juntament amb les limitacions normals de la serigrafia, porten a unes dimensions físiques dels resistors de $L=50$ mils i $W=128$ mils.

Un cop determinada la mida dels components que formen el circuit, hom procedeix a la seva distribució sobre el substrat. Les regles que hom hi segueix són: evitar encreuaments de pistes; imprimir en una sola cara per tal com no apareixen problemes de dissipació, i reduir el nombre de potes externes al mínim de 7 en línia.

Seguint aquestes recomanacions arribem a una distribució com la de la fig. 14. A partir d'ella, hom procedeix a fer els dibuixos de les diferents màscares a escala 10:1, després de fer la composició per tal d'imprimir sis circuits alhora i reduir a mida real les màscares conductores i resistiva. Podem veure aquestes a la fig. 15.

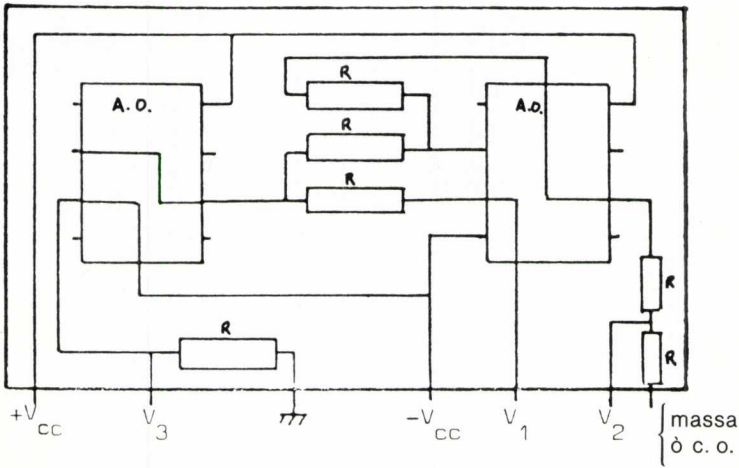


Fig. 14. Esquema bàsic de la distribució dels components sobre el substrat.

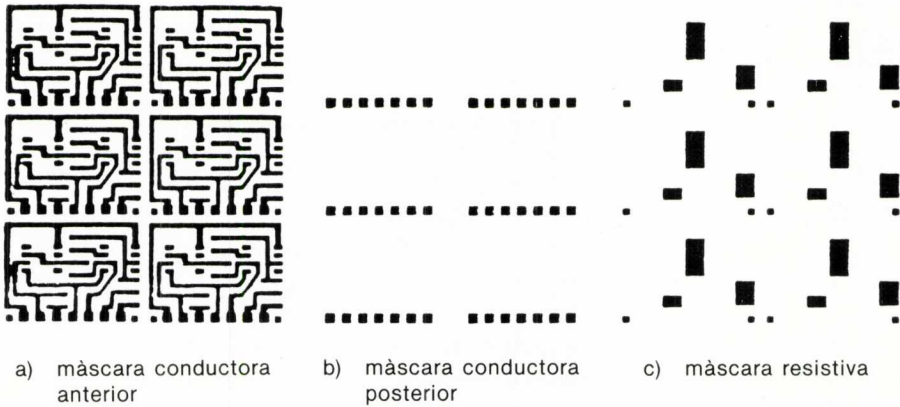


Fig. 15. Màscares conductores i resistiva, compostes per a imprimir 6 circuits alhora.

4. 5. *Procés de fabricació*

Un cop hom té els fotòlits de les màscares, procedeix a la fabricació de les pantalles, tot dipositant sobre tela d'alumini una emulsió que després serà revelada per tal de deixar els forats pertinents.

Per a la impressió, hom disposa d'un equip DEK-65 que permet la serigrafia sense contacte, amb regleta dura i angle d'atac de 45 graus. Primerament hom imprimeix les màscares conductores, que seran assecades i cremades abans d'imprimir les resistives per a evitar problemes de difusió i netedat. És

especialment crític el mètode de superposició de la màscara resistiva sobre les pistes conductores que ja hi ha en el substrat; convé, doncs, de treballar amb precisió. La resistivitat de la tinta utilitzada és de 1.000Ω per quadre.

El procés d'assecatge cal fer-lo molt lentament per tal d'assegurar que els dissolvents que contenen les tintes s'han evaporat lentament sense deixar bombolles a l'interior del component. Després d'aquesta etapa a 125°C , segueix la cremació de les tintes a 850°C . El forn que tenim és el DEK-850 de cadena mòbil i d'una zona. La cremació és duta a terme durant 60 minuts i sota un ambient oxigenat per renovació d'aire.

Posteriorment, un cop tenim el circuit realitzat, cal mesurar els resistors, i, mitjançant l'ajustatge per aire abrasiu, hom assoleix els valors desitjats amb una tolerància molt petita. Al final, hom talla el substrat en els 6 circuits individuals, i solda els connectors externs i els amplificadors operacionals microencapsulats. Només resta protegir les nostres bobines híbrides recobrint tot el circuit amb resina, perquè no hi cal una càpsula metàl·lica d'apantallament.

4.6 Resultats obtinguts

Han estat fetes un total de 60 bobines híbrides, de les qual n'han estat rebutjades 4 perquè no complien el valor desitjat en llurs resistors. Les altres tenen una tolerància menor del 2 %.

Hom ha comprovat el funcionament del circuit fabricat i l'ha comparat amb els resultats que dona el mateix circuit realitzat amb components convencionals. La conclusió és que el comportament a alta freqüència del circuit de pel·lícula gruixuda és sensiblement millor i a més coincideix amb els resultats previstos en la simulació per ordinador. L'amplada de banda mínima assolida és d'uns 100 kHz, molt superior a la necessària en telefonia de 300-3.400 Hz.

5. CONCLUSIONS

Com a treball d'enginyeria que és, tot el contingut teòric d'aquest resum resta justificat per la necessitat pràctica de realització d'una bobina híbrida. El funcionament del circuit que ha estat fabricat posa de manifest la capacitat d'assolir bons resultats en el disseny i fabricació de circuits thick film, amb uns béns de capital molt reduïts. Això demostra que la tecnologia que ha estat explicada en aquest treball és una bona solució per a situacions habituals que es presenten en l'àrea industrial del nostre país.

6. AGRAÏMENTS

Dono les gràcies a Juli Serra i Gibert, Joaquín Matilla Martín, Eugenio García Moreno i Jose M.^a Miguel López, de l'ETSETB.

7. BIBLIOGRAFIA

- GUTTENSOLN, A. E.: «A Realistic Approach to Thick Film Resistor Design». Solid State Technology. Set 1978.
- HAGSTROM, R. A.: «Hybrid Technology's Real Potential». Electronic Design. Juny 1978.
- HARPER, Ch. A.: «Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics». Mc Graw Hill. 1974.
- HEFTMAN, G.: «For High Performance, Go to Hybrid Circuits». Electronic Design. Juny 1978.
- HERNANDO, J. M. i MENÉNDEZ, P.: «Transmisión en Línea». ETSIT. Madrid 1980.
- HINOUL, M. i altres: «Tintas de Metales no Nobles para Circuitos Híbridos de Película Gruesa». Comunicaciones Eléctricas. Vol. 57-2. 1982
- JOYCE, B. T.: «Hybrids-a Look at the Total Cost». IEEE Trans MFT. Des 1977.
- MEIKSIN, Z. H.: «Thin and Thick Films for Hybrid Microelectronics». Ed. Lexington Books.
- MIGUEL LÓPEZ, J. M.: «Contribución a la Síntesis de Giradores mediante Nulors. Método Topológico y Directo». ETSET Barcelona. Set 1983.
- MIGUEL LÓPEZ, J. M. i altres: «Multipuertos. Parámetros de Dispersión». CPET. 1984.
- MILLER, L. F.: «Thick Films Technology and Chip Joining». Ed Gordon and Breach. 1972.
- NAGUIB, H. M.: «Silver Migration and Reliability of Pd/Ag Conductors in Thick Film Dielectric Crossover Structures». IEEE Trans CHMT. Juny 1979.
- NISHIHARA, A. i YANAGISAWA, T.: «Realization of Multi-Port Networks Using Operational Amplifiers and its Applications». IEEE ISCAS 1982.
- SERRA, M.: «Programa de Ayuda al Diseño de Circuitos con Tecnología de Película Gruesa». ETSETB. Setembre 1984.