

Evolution des technologies

d'interconnexion des composants

Document de base sur les circuits hybrides

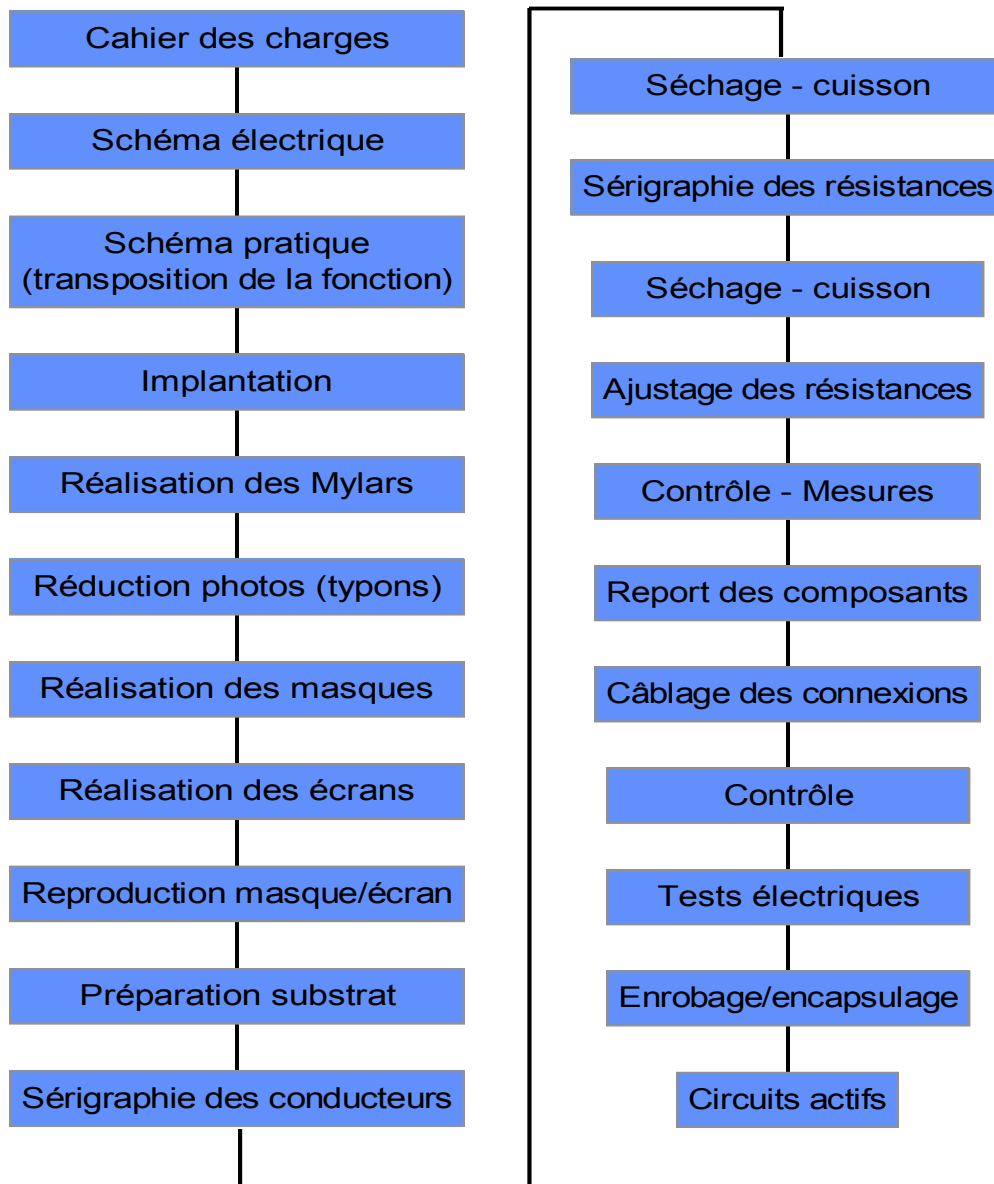
1. INTRODUCTION	3
2. PROCESSUS SIMPLIFIE DE FABRICATION D'UN CIRCUIT HYBRIDE EN COUCHES EPAISSES4	
3. ANALYSE THERMIQUE	5
3.1. ANALYSE THERMIQUE ET TECHNOLOGIE HYBRIDE.....	5
3.2. CONDUCTION, CONVECTION ET RAYONNEMENT	5
3.2.1. <i>Conduction</i>	5
3.2.2. <i>Convection</i>	6
3.2.3. <i>Rayonnement</i>	7
3.3. ETUDE ET REGLES PRATIQUES	7
3.4. DILATATION THERMIQUE.....	8
3.5. RESISTANCE AUX CHOCs THERMIQUES	8
4. LES SUBSTRATS POUR TECHNOLOGIE HYBRIDE.....	10
5. LA SERIGRAPHIE.....	11
5.1. PREPARATION.....	11
5.2. LA SERIGRAPHIE	11
6. MATERIAUX UTILISES EN SERIGRAPHIE.....	13
6.1. COMPOSITION ET FONCTION DES PATES	13
6.2. CRITERES DE CHOIX.....	14
6.3. ENCREs ET PATES	14
6.3.1. <i>Pâtes pour conducteur</i>	14
6.3.2. <i>Pâtes résistives</i>	15
6.3.3. <i>Pâtes diélectriques</i>	15
6.4. PROCEDURE GENERALE DE CUISSON.....	16
7. COMPOSANTS PASSIFS.....	18
7.1. COMPOSANTS SERIGRAPHIES	18
7.1.1. <i>Sérigraphie et ajustage des résistances</i>	18
7.1.2. <i>Sérigraphie des condensateurs</i>	19
7.2. COMPOSANTS EN MICROBOITIER CMS	20
7.2.1. <i>CHIPS résistifs</i>	20
7.2.2. <i>CHIPS capacitifs</i>	20
8. TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE ET SOUDURE	22
8.1. REPORT DES COMPOSANTS EN BOITIERS	22
8.2. REPORT DES PUCES (SEMI-CONDUCTEURS, TRANSISTORS, DIODES ...)	22
8.3. TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE PAR FILS.....	23
8.3.1. <i>Soudure par ultrason</i>	23
8.3.2. <i>Soudure par thermocompression</i>	24
8.3.3. <i>Soudure par thermosonique</i>	24
9. CONCLUSIONS.....	25

1. Introduction

Les circuits hybrides développés pour pallier les manques technologiques des circuits imprimés classiques sont aujourd'hui en perte de vitesse. En effet, de plus en plus souvent, ceux-ci sont remplacés par des MCMs. Néanmoins l'analyse de la conception et de la fabrication des circuits hybrides nous permettra de mieux comprendre les savoir-faire technologiques que ces derniers impliquent et leur impact sur les technologies actuelles.

La micro-électronique hybride est une technologie très souple, permettant l'emploi d'éléments actifs et passifs, et ce quelles que soient leur forme et leur présentation, d'où le terme « hybride ». L'hybrideur utilise essentiellement des puces ou des pastilles nues collées sur le substrat à l'aide de pâtes conductrices (pour les éléments actifs principalement) ou diélectriques (pour les passifs généralement). Les électrodes (émetteur, base) ou plage de contact sont reliées aux pistes par des fils d'aluminium ou d'or de faible diamètre, de l'ordre de 25 microns. Cependant, on est souvent amené à placer sur le substrat des dispositifs enrobés de taille plus importante, les boîtiers CMS, qui eux sont soudés (SnPbAg) ou collés à l'aide de pâte conductrice (AgPd). L'emploi quasi général des condensateurs, rarement sérigraphiés au-delà de 100pF, en est un exemple. Ces microcomposants, de par leur taille réduite, apportent dans la réalisation des circuits beaucoup plus d'avantages que d'inconvénients ou de contraintes. Citons-en quelques-uns : la réduction dimensionnelle de la carte du circuit d'un facteur 3 à 4 ; l'accroissement de la fiabilité dû au fait que le faible poids (très souvent inférieur au gramme) de ces composants les rend peu sensibles aux vibrations, accélérations et manipulations ; l'accroissement des performances en raison même de la faible longueur des pistes par lesquelles transitent les signaux ou informations ; l'exécution possible d'un prototype à l'aide d'un petit fer à souder.

2. Processus simplifié de fabrication d'un circuit hybride en couches épaisses



3. Analyse thermique

3.1. Analyse thermique et technologie hybride

Les problèmes de dissipation thermique revêtent une grande importance en circuiterie hybride. Ne pas les considérer et les maîtriser revient à fabriquer des modules n'offrant pas toutes les garanties de fonctionnement et de fiabilité. Une mauvaise ou insuffisante évacuation de la chaleur a des effets néfastes sur le bon fonctionnement du circuit. La chaleur est le résultat d'une puissance développée par les éléments actifs et passifs. Elle se répartit à travers l'ensemble des composants et du substrat.

Lors de la détermination de la surface du substrat nécessaire au placement des composants, il faut introduire un coefficient de dissipation thermique qui tient compte des dissipations individuelles des composants et du substrat ainsi que de leurs coefficients de conduction thermique. Cela signifie qu'à chaque surface occupée par un composant est appliqué un coefficient de dissipation dont la valeur dépend du mode d'évacuation.

Les effets peuvent se manifester de manière différentes :

- par une dérive en température des composants entraînant des variations importantes des caractéristiques électriques,
- par une rupture de soudure reliant le composant au substrat en raison des différences entre les coefficients de dilatation des matériaux, entraînant soit une défaillance partielle, soit une défaillance totale.

Trois modes de transfert de chaleur sont couramment rencontrés : conduction, convection et rayonnement.

3.2. Conduction, convection et rayonnement

3.2.1. Conduction

La conduction est l'échauffement ou la propagation de la chaleur dans un corps ou une substance sans déplacement de matière. Newton a établi la relation entre la température T_s d'un solide immergé dans un fluide à la température T_f et le taux de transfert de chaleur dQ/dt (watts) :

$$\frac{dQ}{dt} = hS(T_f - T_s) = -K \cdot S \frac{dT}{dx}$$

$$\text{avec } \frac{dT}{dx} = \text{gradient de température dans la direction du flux}$$

S : surface du corps exposé ;

h : coefficient de transfert de chaleur ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

La conductivité thermique exprimée par un coefficient K traduit la capacité de transfert de chaleur d'un matériau. Il mesure la quantité de chaleur traversant ce matériau compris entre 2 surfaces S normales à la direction du flux Q dans un intervalle de temps dt. Chaque matériau a son propre coefficient de température, les métaux étant les meilleurs conducteurs de chaleur.

Le refroidissement se fait par la distribution des calories à travers tous les matériaux composant le circuit. La résistance thermique est l'inverse de la conductibilité thermique. La résistance R_{th} d'un matériau est :

$$R_{th} = \frac{L}{K.S} \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$$

3.2.2. Convection

La convection est le transport de quantités de chaleur par les corps en mouvement. Ce phénomène est produit par un corps plongé dans un fluide, tel que l'air. En s'échauffant, ce fluide produit des courants de convection. L'importance des courants de convection dépend de la forme des solides en contact avec le fluide. La quantité de chaleur transférée d'une surface à la température T_1 à l'air ambiant environnant de température T_2 est :

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{K}{C\rho V} (T_1 - T_2)^{5/4} \text{ W / m}^2$$

V : volume du corps ;

C : coefficient de chaleur spécifique (J/kg/K) ;

ρ : densité du matériau (kg/m^3) ;

Refroidissement par convection forcée

Le phénomène de la convection forcée obéit aux lois de la convection naturelle, avec un mouvement de flux externe qui n'a pas pour seule origine la différence de température. La puissance en watts développée par convection forcée est donnée par la formule :

$$P = hcS\Delta T$$

hc : coefficient d'échange par convection forcée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

ΔT : différence de température entre le corps et le flux.

3.2.3. Rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique dans la gamme allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. Ce phénomène ne se produit que dans les milieux transparents ou dans le vide. L'énergie émise par rayonnement par un corps est proportionnelle à la puissance 4 de sa température. L'énergie rayonnée ne devient donc importante que pour les corps très chauds.

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_1^4 - T_2^4) \text{ W / m}^2$$

avec $\varepsilon = 5,66.10^{-8} \text{ W / m}^2 (\text{C})^4$

σ : coefficient thermique (constante de Boltzmann) d'émissivité égal à 1 pour une surface noire et égal à 0 pour une surface parfaitement réfléchissante.

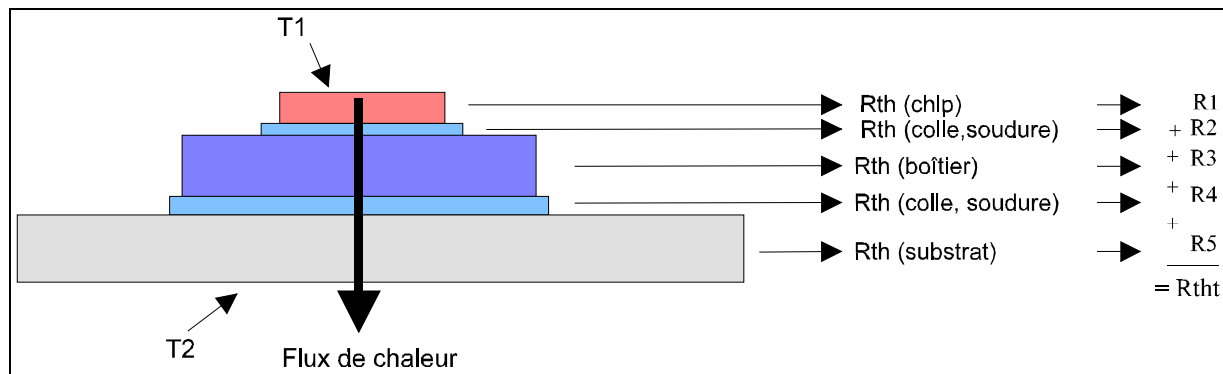
Pour une température donnée, un corps émet d'autant plus de rayonnement qu'il peut en absorber davantage. Les corps mats et de couleur foncée rayonnent plus pour une même température que les corps brillants ou de couleur claire.

3.3. Etude et règles pratiques

En général, seule la dissipation par conduction est à considérer, car les autres modes (convection naturelle, radiation) interviennent très peu. Pour la plupart des composants, la chaleur s'évacue par les fils, pattes de connexion ou plages de contact dans le substrat qui est (ou non) relié à une plaque de refroidissement. Ces points de connexion, à cause de leurs dimensions réduites, présentent de faibles surfaces d'évacuation et par conséquent de fortes résistances thermiques.

La haute résistance thermique de ces contacts s'explique par le fait que deux surfaces (celle de la connexion et celle du substrat) pressées ensemble présentent un contact imparfait, ramené à quelques points réduisant ainsi la surface réelle d'évacuation de la chaleur. Par conséquent, pour réduire la valeur de ces résistances, il faut agrandir la surface de contact en employant une interface (soudure, colle époxy) ou joint interstitiel suffisamment fluide, susceptible d'augmenter le nombre de points de contact.

La résistance thermique totale d'un dispositif se détermine en considérant toutes les résistances situées sur le chemin du flux de chaleur entre la puce et son support.



Il importe par conséquent au concepteur du dispositif électronique de bien cerner les modes de transfert thermique et de prévoir, après étude, les moyens d'évacuer les calories ; autrement que par convection naturelle si nécessaire.

3.4. Dilatation thermique

Lorsqu'un solide est chauffé, l'énergie thermique créée ou ajoutée augmente l'amplitude de vibration des atomes individuels. La distance séparant deux atomes s'en trouve ainsi augmentée, et le solide se dilate. Ce phénomène est décrit quantitativement par un coefficient α de dilatation linéaire, définie comme le rapport de la variation de longueur Δl par degré à la longueur l_0 du corps à 0°C .

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}$$

En micro-électronique, ce coefficient détermine la compatibilité entre le support (substrat) et les composants. α varie légèrement avec la température. Il est généralement caractérisé dans la gamme de 0 à 300°C .

3.5. Résistance aux chocs thermiques

L'aptitude pour un matériau à supporter une rapide élévation de température sans dommage a été définie par Winklemann et Schott (Ann. Physik. Chem. 51 ; 730 (1984)).

$$F = \frac{P}{aE} \sqrt{\frac{K}{rc}}$$

- F : facteur d'endurance thermique
- P : résistance à la traction
- a : coefficient de dilatation
- C : chaleur spécifique
- E : module d'Young (kgF/mm^2)
- K : conductibilité thermique
- r : densité

Matériau	F	α en ppm de 0 à 300°C
alumine	3,7	6
béryllium	3	6,1
verre	0,9	9
cuivre	-	17
fer	-	12

La résistance aux contraintes thermiques diffère de la résistance aux chocs thermiques en ce sens qu'elle définit l'aptitude d'un matériau à supporter des contraintes thermiques non uniformes en divers points. Ainsi deux matériaux soudés ensemble et ayant des coefficients α de dilatation différents, l'un se dilatera et l'autre pas.

4. Les substrats pour technologie hybride

Par rapport aux circuits imprimés, le choix des substrats de base pour fabrication des circuits hybrides est plutôt limité. Pour s'en persuader, l'alumine à pureté de 96% représente en valeur plus de 80% de la consommation de substrats pour la réalisation de circuits hybrides. Si l'on excepte le nitrure de bore et le carbure de silicium employés pour des applications très spécifiques et marginales, le choix se limite entre des substrats d'alumine à 96%, d'alumine à 99,6%, d'oxyde de béryllium et de nitrure d'aluminium.

Les considérations de dissipation thermique entrent en jeu lorsque la puissance à dissiper atteint typiquement 4W/pouce². A partir de cette valeur, le choix peut s'effectuer entre l'oxyde de béryllium et le nitrure d'aluminium. Le BeO présente une conductivité thermique supérieure à l'AlN.

Toutefois, si le substrat doit être usiné, l'emploi de BeO est délicat car l'oxyde de béryllium est toxique sous forme de poussières. Les caractéristiques électriques des différents substrats ne sont prises en compte que lorsque l'on monte en fréquence, typiquement à partir de 300 MHz. Ce bref survol des critères de sélection en hybride ne saurait s'affranchir du prix des substrats. Grossièrement, si le prix de l'alumine 96% vaut 1, celui de l'alumine 99,6% vaut 4 à 5, celui du BeO 10 à 20, celui de l'AlN 5 à 8. Cette considération de prix oblige à prendre en compte les coûts basse température dans la sélection des substrats. A partir de 1000 pièces un produit cuit basse température peut revenir jusqu'à 30% moins cher qu'un circuit hybride couches épaisses multicouches réalisé sur alumine. Les coûts basse température sont obtenus en assemblant plusieurs feuilles d'alumine en un seul substrat. Chaque feuille supporte une couche de signaux déposée par sérigraphie. La communication entre les différentes couches étant réalisée à l'aide de vias obtenus par perçage ou par poinçonnage.

CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX SUBSTRATS POUR CIRCUITS HYBRIDES				
	ϵ_r à 1mhz	Tangente de perte	Conductivité thermique	CTE en ppm/°C
Alumine 99,6%	9,9	1-2	30-40	6,7
Alumine 96%	9,5	4-10	25-35	6,3
Oxyde de Béryllium	6,5	3-4	240-290	8
Nitrure de Bore	4,7	4	35-60	1,2
Nitrure d'aluminium	8,8	3-10	140-260	4,4
Carbure de silicium	40	500	150-270	4
Silicium	11,8		124	4,2

5. La sérigraphie

5.1. Préparation

A partir du schéma d'implantation, un masque puis son typon sont réalisés. Ce dernier est mis en contact avec la face arrière de la partie sensible de la toile, puis l'ensemble est insolé aux rayons ultraviolets. A la fin de la durée d'exposition, le développement est effectué par aspersion d'un jet d'eau tiède (20 à 40 °C) sous une pression de 1 à 2 bars à l'aide d'un pistolet à peinture. La projection de l'eau se fait sur la face de l'écran devant entrer en contact avec le substrat. Une fois le dessin révélé, un séchage à l'air comprimée, filtré, débarrassera les mailles évidées de l'eau.

Pour la révélation des empreintes, la projection d'eau doit se faire sur la face arrière de la toile, c'est-à-dire celle qui sera en contact avec le substrat. Ainsi, la résine photosensible restante sera plaquée contre les mailles. Si la projection est effectuée sur la face avant, tout le dépôt photosensible est décapé, ôté. L'écran devient alors inutilisable.

Le dessin des empreintes apparaît en négatif sur la toile.

5.2. La sérigraphie

Le typon étant maintenant réalisé, nous en arrivons au stade de la fabrication dont la première phase consiste à appliquer sur un substrat des dépôts d'encre ou de pâte à travers un écran choisi suivant plusieurs paramètres.

L'encre ou la crème à braser sont transférées sur le substrat à l'aide d'une raclette au travers de l'écran de sérigraphie. Un écran est formé d'un cadre métallique rigide sur lequel une toile est tendue. Au centre de celle-ci est déposée une émulsion ou résine photosensible. La surface utile est égale aux 2/3 de sa surface totale.

La toile est définie par :

- sa nature : acier inox, polyester, nylon ...

Il est certain que la toile acier inox, en raison de sa résistance à la déformation et à l'usure, sera préférée dans la plupart des cas.

- le nombre de mailles par cm ou mesh par pouce

Le tressage de la toile ne se fait pas toujours suivant la même orientation : lorsque les fils de la trame sont parallèles aux bords longitudinaux de l'écran, celui-ci est dit à 90°, et à 45° lorsque les fils sont parallèles à une diagonale. L'écran à 45° est préféré car la pression est mieux répartie que sur celui à 90°. De même, la plupart des dépôts à réaliser étant orthogonaux, le parallélisme à ces directions des fils de la trame peut créer un effet d'ombre et ainsi diminuer la précision.

- son épaisseur

Dans la majorité des cas, l'émulsion photosensible, encore appelée résine photosensible, entraîne une surépaisseur de la toile. Avec une bonne approximation, l'épaisseur E_h de crème à braser humide déposée au cours de la sérigraphie peut se déterminer de la façon suivante :

$$E_h = (E_t \times F_o) + E_e$$

avec : E_t épaisseur du treillis ;

F_o pourcentage d'ouverture de la toile

E_e surépaisseur d'émulsion

Si d est le diamètre du fil : $E_h = E_t + E_e = (2 \times d) + E_e$

Plusieurs raisons conduisent à l'utilisation d'une surépaisseur d'émulsion photosensible :

- la surépaisseur a pour effet d'éloigner du substrat devant recevoir la pâte, les fils constituant la toile afin d'éviter l'effet de vague ou celui de peau d'orange ; l'épaisseur du dépôt de crème se trouve réduite à l'endroit des fils ;

- la surépaisseur d'émulsion permet d'assurer au moment de la sérigraphie une étanchéité avec le support et améliore de ce fait la définition en supprimant les bavures provoquées par la pression de la raclette ;

- pour les sérigraphies à haute définition, une surépaisseur optimisée fournit un dépôt constant évitant ou atténuant les traces de fils (effet "dents de scie" ou "dentelle") apparaissant sur les bords des empreintes.

- lorsque des dépôts très épais doivent être réalisés, il est impossible d'augmenter indéfiniment le diamètre des fils, ce qui conduirait à utiliser un grillage. La surépaisseur dans ce cas, sert de "réservoir" et permet ces dépôts. Cependant, exagérée, cette surépaisseur entraîne un dépôt irrégulier dans son étalement comme dans son épaisseur.

Le choix de l'écran est lié à celui de la dimension moyenne des grains métalliques contenus dans la crème. En effet, l'ouverture des mailles (surface non occupée par le fil) est un élément important à considérer car il intervient directement sur la qualité du dépôt. Il est conseillé de choisir un écran comportant une ouverture de mailles 2,5 à 5 fois plus grande que la taille moyenne des particules. De même l'épaisseur de l'émulsion ne dépassera pas 150 μ m pour diverses raisons : fragilité, faible durée de vie, prix de revient élevé ...

Une meilleure définition du dépôt est obtenue avec des particules sphériques. Cette forme permet un passage aisé de la crème au travers des mailles carrées. Les écrans utilisés ont des toiles de 80 à 150 mesh, orientées à 90° ou à 45° ou à 30°.

6. Matériaux utilisés en sérigraphie

6.1. Composition et fonction des pâtes

Composition

Trois parties sont essentielles : le matériau actif, le liant et le véhicule.

- Les matériaux (poudres minérales), conducteurs, résistifs, isolants, sont appelés fonctionnels ou actifs bien que leur rôle soit parfaitement passif. Ces poudres sont formées de particules métalliques de diamètre inférieur à 5 microns. Elles jouent un rôle important sur les propriétés électriques et physiques du film conducteur déposé. Leur poids représente 50 à 70% du poids de la pâte. Ce sont en général des métaux précieux : or, argent, palladium, platine. Il ne s'oxydent pas à haute température.

- Les liants organiques (résine ou polymère : méthacrylates, ...) donnent à l'encre ses propriétés rhéologiques en la rendant apte à la sérigraphie par le fait qu'ils gardent les matériaux actifs en suspension. Ils sont appelés liants temporaires car ils se consomment pendant la cuisson à une température de 250 à 400 °C. Ils contiennent aussi des matériaux d'adhésion visant à rendre solidaire les grains des matériaux fonctionnels et ceux du substrat. Leur poids est de 10 à 20% du poids total, correspondant à 60 à 80% du volume avant cuisson. Après cuisson, c'est-à-dire élimination des liants, l'épaisseur se réduit d'environ deux tiers.

- Le véhicule peut influencer les performances. Il est généralement formé de résines dissoutes dans des solvants, avec contrôle de la dissolution totale du soluté et de sa viscosité. Les solvants, gélifiants, plastifiants, donnent à la pâte la viscosité requise. Ils s'évaporent à une température de 100°C car ils ont en général un faible point de fusion, ce qui permet de les éliminer durant le séchage. Le poids varie de 10 à 25%.

La fonction impression

Au repos, la viscosité de l'encre est grande, ce qui l'empêche de couler spontanément au travers de l'écran ou de se répandre sur le substrat après impression. Lors du passage de la raclette qui lui applique une contrainte mécanique par cisaillement, sa viscosité s'abaisse rapidement ce qui autorise alors son transfert au travers de l'écran. Enfin, lorsqu'elle est déposée sur le substrat, elle n'est plus soumise à sollicitation, sa viscosité augmente à nouveau et permet un nappage limité (écoulement latéral, qui atténue ou efface l'image en relief des mailles de l'écran).

Le véhicule joue un autre rôle, celui de coller les matériaux solides de l'encre sur le substrat et de rendre l'ensemble transportable jusqu'au four de cuisson. Cette fonction doit subsister après le préséchage, qui vise à éliminer la partie la plus volatile de la fraction organique. Enfin le véhicule doit disparaître lors de la cuisson, en partie par distillation, en partie par combustion, sans réagir de façon nuisible avec la fraction solides des encres.

La fonction électrique

Les pâtes conductrices doivent présenter la plus faible résistance ohmique pour conduire un courant ou un signal. Elles doivent assurer les prises de contact pour recevoir des fils ou des pattes de composants discrets, ce qui implique une excellente adhérence au substrat.

6.2. Critères de choix

Le choix d'une encre repose sur un grand nombre de critères, dont les principaux sont les suivants :

- soudabilité ;
- résistance à l'action de dissolution du bain de soudure ;
- résistance aux désouduages et resouduages successifs ;
- possibilité de soudage par thermocompression ;
- possibilité de soudage par ultrason ;
- possibilité de fixation directe des composants actifs avec ou sans préforme eutectique ;
- résistance au vieillissement ;
- définition à l'impression ;
- conductivité ;
- adhérence au substrat (qui dépend de la nature du substrat) ;
- compatibilité avec les encres résistives et diélectrique (influence de la zone de recouvrement) ;
- possibilité de cuisson et conservation longue.

Il faut remarquer que les encres conductrices diffèrent des encres résistives par leur structure. Dans les couches conductrices, il y a frittage des particules de conducteur avec formation d'une structure continue et le liant ne sert qu'à sceller le matériau fritté au substrat. Dans les encres résistives, le liant vitreux joue les rôles de matériau de scellement, structurant et intergranulaire. L'influence des conditions de cuisson est bien plus grande sur les pâtes résistives que sur les pâtes conductrices.

6.3. Encres et pâtes

6.3.1. Pâtes pour conducteur

Or et argent, excellents conducteurs pas ou peu altérables, permettent de fabriquer des encres autorisant une cuisson dans l'air. Ils présentent malheureusement quelques défauts. L'or est très rapidement soluble dans la soudure étain-plomb des électroniciens, avec production de composés intermétalliques fragiles et non soudables. De plus, son prix est très élevé. L'or est cependant largement utilisé en sérigraphie, pour les dépôts de réseaux conducteurs très fin et pour les soudures eutectiques avec les pastilles des composants actifs.

L'argent, s'il donne des satisfactions, n'est pas compatible avec les encres résistives et diélectriques. Sous l'action d'un champ électrique ce métal migre

provoquant des instabilités dans les couches déposées. Cette migration peut être stoppée par l'adjonction de palladium (20%). L'alliage AgPd est sujet à l'oxydation.

En raison du prix des matériaux précieux, les fabricants proposent des encres au cuivre peu onéreuses, de résistivité inférieure à celle de l'or, parfaitement soudables tant à l'étain-plomb qu'au câblage par ultrason (fils d'aluminium). Ces encres sensibles à l'oxydation doivent être cuites en atmosphère azotée. Malheureusement, il n'existe pas encore d'encres résistives, diélectriques, parfaitement compatibles.

6.3.2. Pâtes résistives

Les premières pâtes résistantes se composaient de matériaux organiques (carbone) et voyaient leur valeur se modifier suivant les conditions d'emploi et dans le temps. Depuis, les fabricants ont réalisé de gros progrès et proposent aujourd'hui des pâtes composées de matériaux inorganiques avec des caractéristiques mécaniques et électriques stabilisées après cuisson à haute température (700 à 900°C). Ces métaux sont les oxydes d'indium, de ruthénium, d'argent de palladium, de bismuth et de thallium. Pour les fortes résistivités, on utilise le thallium mélangé à de l'oxyde palladique, et pour les faibles résistivités le thallium mélangé à de l'argent palladium.

L'oxyde de ruthénium est probablement le plus employé aujourd'hui en raison de sa stabilité chimique à plus de 1000 °C, de ses faibles TCR (ΔR en ppm/°C) et bruit électrique (1 à 5 mV/V). La gamme des résistivités obtenues s'étend de 10 $\Omega/$ à 1 M $\Omega/$, par multiple de 10. La résistivité dépend de la composition et de l'épaisseur de la pâte une fois déposée et séchée.

Les dépôts résistifs supportent mal de multiples cuissons, qui ont une action très nette sur la valeur de la résistance. Ils doivent être cuits en dernier, après les dépôts conducteurs et diélectrique (pour autant que ce soit possible).

6.3.3. Pâtes diélectriques

La haute densité d'intégration et la complexité toujours croissantes d'un circuit multicouches ne peuvent être obtenues sans couches diélectriques dont le rôle premier est de permettre le croisement des conducteurs sans contact entre eux. En couches épaisses, les encres diélectriques (verre-céramiques) interviennent en fait à trois niveaux :

- Réalisation de réseaux multicouches (croisement sans contact des conducteurs).
- Réalisation de condensateurs imprimés.
- Protection en partie, ou globale (coating), des circuits et en particulier des résistances.

Les qualités requises sont les suivantes :

- un coefficient de dilatation linéaire très proche de celui du substrat ;
- une structure compacte pour permettre l'impression sur l'isolant comme sur substrat céramique ;
- une excellente adhérence après dépôt et cuisson ;

- être fusible lors de la première cuisson (mise en place, nappage et densification) afin d'éviter une évolution lors des cuissons suivantes (le diélectrique joue alors le rôle d'un substrat) ;
- la compatibilité avec les encres conductrices et résistives ;
- une cuisson entre 850 et 950 °C ;
- un facteur de dissipation plus faible que 0,1% ;
- une faible constante diélectrique (6 à 8) pour les croisements, multicouches (3 pF/mm²) et les faibles capacités stables ;
- une constante diélectrique de 10 à 2000 pour la réalisation de fortes capacités (4000 à 30000 pF/cm²) avec une épaisseur de diélectrique de 40 microns ;
- des pertes diélectriques les plus faible possibles ;
- une résistance d'isolement la plus élevée possible : 10¹⁰ ohms ;
- une tension de claquage de 20 à 25 V/μm ;
- une longue durée de vie.

Les premières pâtes isolantes étaient au verre et cuites à 850 °C. Elles présentaient l'inconvénient d'être poreuses à ces températures (courts-circuits entre couches). D'autres compositions ont dû être recherchées pour aboutir à une pâte cristallisable proche des structures céramiques. Cette pâte se transforme en émail et ne craint pas les cuissons successives.

6.4. Procédure générale de cuisson

Une fois déposée la pâte doit être cuite pour acquérir ses propriétés définitives. Une bonne pâte doit être visqueuse au repos. Sous l'effet des contraintes appliquées par la raclette, la viscosité doit diminuer notablement pour reprendre ensuite et rapidement sa consistance initiale. Les pâtes conductrices après impression ne retrouvent pas immédiatement leur viscosité initiale. Le contour des lignes déposées montre l'empreinte des mailles. Un temps de repos de 10 à 15 minutes à température ambiante est alors nécessaire pour que, grâce à la thixotropie de la pâte, la surface du dépôt se tende pour atténuer et effacer les marques de l'écran. Ce temps de repos est suivi d'un temps de séchage de 10 minutes à 150°C (étuve, tapis chauffant) ; cela afin d'évacuer les solvants à points d'ébullition élevée (80 à 150°C) qui pourraient polluer le four à passage et se recombinaient avec la pâte, entraînant alors une dégradation de ses performances mécaniques et électriques (bulles, cratères, micro-coupures). Ce séchage étant effectué, le dépôt est alors cuit dans un four tunnel appelé plus communément four à passage et comportant plusieurs zones (4 à 10) de température réglables, permettant d'établir le profil recommandé par le fabricant. Ce profil doit être scrupuleusement respecté à +/- 2°C . La cuisson s'effectue en une heure au maximum, avec un temps de passage à la température la plus élevée de l'ordre de 15 minutes, après un préchauffage progressif et un retour à basse température plus rapide (cf. Figure 7.5.). Les fours sont souvent ouverts à chaque extrémité, avec une cheminée au-dessus des zones de combustion des agents temporaires pour évacuer les fumées, vapeurs des solvants. Suivant le type de pâte, on pourra être amené à cuire en atmosphère spéciale, réductrice ou neutre (pâtes au cuivre). Dans ce cas, on dispose d'une barrière à l'entrée et à la sortie, mais la cheminée du four reste ouverte. L'introduction du gaz requis se fait par une entrée passant par un manomètre avant

d'arriver dans le tunnel. Le tunnel a généralement une inclinaison de 6 à 7° par rapport à l'horizontale, l'entrée étant la plus haute.

7. Composants passifs

7.1. Composants sérigraphiés

7.1.1. Sérigraphie et ajustage des résistances

Les résistances, on l'a vu, sont obtenues par dépôt, à travers un écran, d'une encre résistive sur un substrat. Ce dépôt est considéré comme une couche d'épaisseur faible (15 à 20 μm après cuisson), mais constante, uniforme, de largeur l et de longueur L . Si la résistance par unité de volume de cette couche est ρ Ω/cm , alors la résistance R mesurée à travers la section s suivant L est :

$$R = \rho_s \frac{L}{l}$$

La résistance de couche $\rho_s = \rho$ (sheet resistivity) est définie en $\Omega/$ et se lit "ohms par carré".

On considère que tous les paramètres intervenant sur la valeur de la résistance (ceux liés à la sérigraphie : encre, écran, cuisson) sont maîtrisés, fixés, figés, et que les autres (ceux liés à l'encre : viscosité, tixotropie, épaisseur) sont constants. Dans ce cas, seules les valeurs dimensionnelles de la résistance détermineront la valeur ohmique de la résistance.

Plusieurs formes de résistances sont possibles. Cependant, pour des raisons évidentes de facilité de calcul, de sérigraphie et d'ajustage, les formes rectangulaires et à chapeau sont préférées.

Le rapport de la longueur à la largeur, qui est égal au nombre de carrés de la résistance, ne doit pas être inférieur à 1/3 ou supérieur à 10/1.

Les plages résistives déposées par sérigraphie doivent l'être dans des dimensions qui, après cuisson, donneront 70 à 80% de leur valeur nominale désirée. L'obtention de la valeur exacte se fera par diminution de la surface qui augmentera la valeur ohmique (ajustage par laser ou par sablage). En effet dans la formule ci-dessous, la section "S" est au dénominateur. En la diminuant, on augmente R :

$$R = \rho \frac{L}{l \times e} = \rho \frac{L}{S}$$

L = longueur du dépôt

l = largeur du dépôt

S = surface de la section = l x e

e = épaisseur du dépôt

r = résistivité volumique

Si la valeur de L/l est supérieur à 5, on préférera la forme en chapeau ou encore la forme en U. Cela pour diminuer l'encombrement et rendre l'ajustage plus aisé. Dans les angles, le courant suit toujours le chemin le plus court, et on a constaté que les carrés des angles ont une résistance d'un demi carré. Pour l'ajustage, on remplit de pâte une portion de la partie centrale. On obtient ainsi une valeur ohmique de 20 à 30% inférieure à la valeur désirée. Comme pour toutes les

résistances, la pâte résistive doit être déposée sur les conducteurs en recouvrement de 0,5 mm, et il faut conserver après ajustage 0,8 mm au moins de la largeur à la résistance.

Les dimensions des résistances sont calculées de la manière suivante :

Si P_a est la puissance admissible de la pâte (donnée par le fabricant) en W/cm^2 et P la puissance dissipée en watts par la résistance en fonctionnement, alors :

$$P = P_a \times L \times l = P_a \times S \quad \Rightarrow \quad L = \frac{P}{P_a \times l}$$

$$\text{avec } R = \rho_s \frac{L}{l} \text{ on obtient } R = \rho \frac{P}{P_a \cdot l^2} \quad \Rightarrow \quad l = \sqrt{\frac{\rho \cdot P}{P_a \cdot R}}$$

7.1.2. Sérigraphie des condensateurs

Les condensateurs sont formés de couches conductrices constituant les électrodes, séparées par des couches isolantes ou diélectriques. L'ensemble est cuit en une seule fois suivant le procédé de cuisson (technique difficile à maîtriser). Habituellement, la couche diélectrique reçoit deux impressions afin d'assurer un isolement parfait entre les électrodes.

Bien que la sérigraphie des condensateurs présente des avantages, ne serait-ce qu'économiquement, beaucoup de difficultés surgissent lors de la fabrication. En effet, quelles que soient la nature d'un circuit, sa complexité et les performances désirées, il est fort probable que deux sinon trois pâtes diélectriques différentes seront nécessaires à la réalisation des condensateurs de liaison, d'accord, de découplage. Il est tout aussi probable que ces diélectriques n'auront pas le même profil de cuisson avec son incidence sur la constante diélectrique, la résistance d'isolement et le facteur de dissipation. On perçoit déjà la difficulté de contrôler la tolérance, l'épaisseur du diélectrique, la valeur finale. De plus, les capacités de valeur supérieure à 1000pF occupent une surface non négligeable du substrat. La forme et les dimensions doivent être considérées avec soin, surtout si l'on veut obtenir une certaine compacité.

Quatre impressions sérigraphiques sont nécessaires pour réaliser un condensateur. La première permet le dépôt de l'électrode conductrice, les deuxième et troisième sont réservées au diélectrique, la quatrième constitue l'électrode supérieure. Les permittivités des encres actuelles autorisent la sérigraphie de condensateurs dans une gamme de 0,1 pF/cm² à 100 pF/cm².

Propriétés

Dans un condensateur réel, le courant est déphasé d'un angle δ par rapport au déphasage à 90° théorique. La tangente de cet angle est définie comme étant la tangente de pertes ou facteur de dissipation du diélectrique. La tangente de perte est une propriété du matériau et ne dépend pas de la géométrie du condensateur. En pratique, un faible facteur de dissipation est associé à une faible constante

diélectrique. De même, un fort facteur de dissipation est lié à une haute constante diélectrique.

Les diélectriques sont aussi caractérisés par un coefficient de température de capacité. Celui-ci est mesuré en portant la capacité à des températures extrêmes (-55 à +150 °C) et sa valeur comparée à celle de la température ambiante (25 °C).

Un bon diélectrique doit avoir un TCC inférieur ou égal à 1% pour 100°C de variation.

7.2. Composants en microboîtier CMS

7.2.1. CHIPS résistifs

Ces résistances aux dimensions très réduites sont des résistances couches minces déposées par évaporation sur substrat silicium et présentant des plages de connexions réservées au soudage par ultrason ou thermocompression de fils de 20 à 30 microns. Le matériau est du nickel-chrome ou du nitrure de tantale. Leur petite taille associée à leurs performances remarquables les rendent très appréciées dans les circuits hybrides couches minces : haute stabilité (de -55 à 125 °C), + 2 ppm/°C, bruit -30 dB.

Elles sont de plus passivées, c'est-à-dire protégées des ambiances corrosives. Elles n'exigent pas de conditions particulières de stockage. La gamme des valeurs s'étend de 10 à 300 k Ω sous 125mW de dissipation.

Ces résistances sont destinées à la réalisation de résistances de charge, de réseaux résistifs, d'atténuateurs, de résistances d'amortissement, etc ...

Leurs effets selfiques et capacitifs négligeables autorisent leur emploi à des fréquences bien supérieures au GHz.

Le montage de ces résistances sur le substrat d'utilisation peut être effectué par collage à l'aide d'une résine époxy.

7.2.2. CHIPS capacitifs

Pour diverses raisons (techniques et/ou économiques) l'hybrideur trouvera plus intéressant de rapporter par soudure des condensateurs en céramique feuilletée aux capacités élevées sous des surfaces plus faibles. Ces composants passifs, prévus pour CMS, sont fortement employés dans les circuits hybrides.

Ces composants se présentent sous forme de petits pavés rectangulaires, aux côtés métallisés constituant les électrodes. Les composants céramiques ont, avec les alumines sur lesquelles ils doivent être montés, des coefficients de dilatation très voisins. Il en résulte des contraintes thermiques très faibles et une très bonne résistance aux cycles thermiques. Ces composants sont soudés généralement à l'étain-plomb, mais aussi à l'aide de pâtes époxy argent-palladium. Ils peuvent être ou non précollés avant soudage.

Les condensateurs sont divisés en trois classes, suivant la nature du diélectrique. Ils ont en commun parmi d'autres caractéristiques (dimensions normalisées,...) la tenue en température de 250°C pendant quelques secondes sans altération ou modification de leurs caractéristiques électriques et mécaniques.

Classe COG/NPO

Ces capacités présentent une grande stabilité en fonction de la tension appliquée, de la température, et une faible perte diélectrique. Ils ont une résistance d'isolement élevée et sont désignés pour une utilisation HF.

Gamme de température de fonctionnement : -55 à +125°C ; facteur de dissipation : 0,1% ; TCC : NPO 30 ppm/°C.

Classe X7R

Pour emploi général, découplage. Ils varient d'une façon non linéaire en fonction de la température de +15% autour de leur valeur par rapport à leur point de Curie, de la tension appliquée et de la fréquence. Ils offrent des capacités élevées sous de faibles volumes.

La gamme de température de fonctionnement est de -55 à 125 °C. Le facteur de dissipation est de 3% au maximum.

Classe Z5U

Haute constante diélectrique qui permet de fortes valeurs capacitives sous un faible volume. Varie avec la température (coefficient de température non linéaire).

La gamme de température de fonctionnement est de -55 à +85 °C. Au-delà de cette gamme, la valeur peut varier dans de fortes proportions. Le facteur de dissipation est de 3%. Les tolérances sur les valeurs et sur demande peuvent aller de 1 à 20%. Les tensions appliquées peuvent varier de quelques volts à 3000 ou 4000 volts sur demande.

8. Techniques d'assemblage et soudure

8.1. Report des composants en boîtiers

Le soudage par pâte ou crème à souder, complémentaire du soudage par fil, est très employé dans la filière couche épaisse et CMS. Ce mode de soudage est très facilement automatisable. Une crème est une brasure constituée d'alliage en poudre très fine, distribuée d'une manière homogène dans un véhicule organique contenant différents agents chimiques. Sa viscosité ainsi que la rhéologie sont parfaitement contrôlées. Différentes compositions sont disponibles pour dépose au pochoir, sérigraphie, ou par applicateurs-doseurs automatiques.

Les crèmes offrent des avantages importants par rapport aux autres méthodes de brasage :

- suppression du stockage d'un grand nombre de préformes de dimensions différentes.
- simplification des méthodes d'assemblage.
- dépôt d'une épaisseur uniforme contrôlée.
- suppression de chocs thermiques.
- suppression de la pollution des bains.

La pâte à braser est le plus souvent déposée par sérigraphie. Avant toute fusion, il est recommandé de sécher la pâte pour favoriser l'évacuation des solvants. La fusion est réalisée dans des fours à refusion en phase vapeur ou infrarouge de la même manière que dans la filière CMS.

8.2. Report des puces (semi-conducteurs, transistors, diodes ...)

Il existe principalement deux techniques de soudure des puces sur le substrat : la soudure eutectique ; la soudure par colle conductrices électriquement et thermiquement. Ces procédés de montage sont les mêmes que ceux utilisés dans une filière MCM-C.

Soudure eutectique

Les contacts par eutexie requièrent des surfaces absolument propres, exemptes d'oxydes et de contaminants. Le nettoyage peut s'effectuer dans un bac à vibrations ultrasoniques. Ce procédé donne les meilleurs résultats de décontamination.

- avantages : résistivité électrique la plus faible, conductivité thermique la plus élevée, taux de production élevé.
- inconvénients : température de fusion relativement élevée pouvant causer des dommages aux semi-conducteurs ainsi qu'aux résistances couches minces (modification de la valeur).

La technique eutectique est toute indiquée pour souder les dispositifs (transistors et diodes de puissance) qui requièrent des contacts ohmiques très faibles ou pour des dispositifs non passivés très sensibles à la contamination.

Soudures par colles

Dans ce paragraphe, il ne sera question que de colles époxy destinées à réaliser le contact électrique entre éléments et non de colles chargées de maintenir temporairement ou définitivement en place les composants avant brasure.

Les principaux avantages sont la facilité et la souplesse d'utilisation, la température de polymérisation qui excède rarement 150 °C (température très inférieure à celle de l'eutectique or-silicium), la fiabilité et le rendement de production très élevés et réguliers des prix inférieurs (or remplacé par l'argent).

Les principaux inconvénients consistent en une résistivité légèrement plus élevée que pour l'eutectique, une conductivité plus faible, des dommages possibles causés aux semi-conducteurs par les constituants réactifs et volatils du système époxyde.

8.3. Techniques d'assemblage par fils

8.3.1. Soudure par ultrason

Définition

Technique de soudure associant énergie, pression et temps pour souder deux métaux ensemble. Ces soudures sont à froid, contrairement aux autres techniques de soudure car ici l'énergie ultrasonique produit un effet de ramollissement, de plasticité du fil semblable à l'effet obtenu par élévation de température. Pour ce type de soudure, le fil d'aluminium est préféré au fil d'or qui est d'un emploi plus délicat. Le fil d'aluminium est amené par l'outil appelé aiguille ou stylet, au contact de la plage à souder puis pressé avec une force de 20 à 30 g. Simultanément, une vibration de 50 à 70kc/s engendre le phénomène cité précédemment dans l'interface fil-plage.

Le fil se ramollit et se soude à la métallisation que par l'action combinée de la pression et de la vibration, en même temps les points en contacts sont décapés. En effet, les oxydes (couche très mince), recouvrant aussi bien le fil que la plage sur laquelle doit s'effectuer la soudure, sont brisés et repoussés à l'extérieur du point de soudure. Ainsi, plus aucun corps étranger ne subsiste entre les métaux en présence qui peuvent alors se souder.

La technique ultrasonique présente un autre avantage, celui d'éviter la formation de la peste pourpre qui est le résultat d'une association aluminium-or-silicium-chaueur.

Le diamètre des fils utilisés est similaire à celui des fils employés en thermocompression. L'étendue de la gamme s'étend de 18 à 50 µm pour les fils et au-delà pour les rubans de largeur pouvant dépasser 100 µm. Le diamètre le plus fréquemment utilisé est de 25 µm.

8.3.2. Soudure par thermocompression

Le soudage par thermocompression se fait avec apport de chaleur et pression pour obtenir une jonction par diffusion. Le stylet ou aiguille est cette fois un capillaire chauffé (100 à 200°C) exerçant une pression sur le fil qui, lui, peut être soudé indifféremment dans toutes les directions. Le fil est essentiellement un fil d'or. Une flamme d'hydrogène provoque la formation d'une boule à l'extrémité du fil. Cette boule en fusion est alors appliquée sur la métallisation puis déformée par la pression du capillaire. Un contact intime (liaison modulaire) est alors créé à l'interface entre le fil et la plage métallisée. Après la deuxième soudure effectuée, le capillaire se relève et la flamme d'hydrogène s'active pour couper le fil et former une nouvelle boule, rendant la machine ainsi prêt pour une nouvelle opération.

Cette technique est très fiable, requérant un minimum de contrôles. Son principal inconvénient par rapport à la technique ultrasons est de nécessiter un chauffage du substrat (200 à 350°C), cette température pouvant affecter les composants placés sur le substrat.

La pression du capillaire peut, suivant les caractéristiques mécaniques du fil et de la machine, varier de 20 à 80 g pour la première soudure, de 100 à 200 g pour la seconde, et le temps de 1/10 à 5 s.

8.3.3. Soudure par thermosonique

Dans ce type de machine, combinaison de l'ultrasonique et de la thermocompression, la tête ultrasonique est équipée d'un capillaire non chauffé. La flamme d'hydrogène nécessaire à la formation de boules à l'extrémité est conservée. La température du support est 100 à 150 °C.

En mode ultrasonique seul, le soudage de fils d'or de diamètre inférieur à 50µm est très difficile, alors qu'en mode thermosonique l'emploi de fils d'or de diamètre de 25 µm est courant. Les soudures peuvent se faire dans toutes les directions. La force appliquée pour la première soudure est de 20 à 80 g et de 100 à 200 g pour la seconde.

9. Conclusions

Dans ce rapport nous avons présenté les techniques de fabrication des circuits hybrides. Nous aurions aussi aimé présenter une étude du marché des circuits hybrides, malheureusement celui-ci est relativement fermé et limité, nous n'avons donc pas pu trouver de données chiffrées intéressantes sur le sujet.

Il est intéressant de noter que parmi la quarantaine de fabricants ou fournisseurs de circuits hybrides recensés en France, la plupart proposent aussi dans leur catalogue des circuits MCMs ou la possibilité de monter des puces en COB. On peut donc dire que les technologies et les moyens mis en jeu ont été transposés pour fabriquer d'autres produits. C'est notamment le cas de la filière MCM-C, laquelle peut être considérée comme une extension de la filière hybride.

La mise en place de la table des métiers versus filière permettra certainement de mieux mettre en évidence les relations entre les filières.