

Evolution des technologies

d'interconnexion des composants

Document de base sur les circuits imprimés

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 2 |
| 2. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES CIRCUITS PCB..... | 3 |
| 2.1. SUBSTRAT | 3 |
| 2.1.1. <i>L'hermétique alchimie des stratifiés.....</i> | 3 |
| 2.1.2. <i>Sélection du substrat</i> | 3 |
| 2.2. DENSITE D'INTERCONNEXIONS ET REGLES DE CAO | 6 |
| 2.2.1. <i>Les classes de circuits imprimés.....</i> | 6 |
| 2.2.2. <i>Plage d'accueil du composant sur le substrat : l'empreinte.....</i> | 6 |
| 2.2.3. <i>Estimation de la densité d'interconnexion</i> | 7 |
| 2.3. REPORT DES COMPOSANTS (ET DES PUCES) | 8 |
| 2.3.1. <i>Les différents types de machines de report.....</i> | 8 |
| 2.3.2. <i>Structure d'une machine de report.....</i> | 9 |
| 2.3.3. <i>Fonctionnalités complémentaires associées à la machine de report.....</i> | 11 |
| 2.3.4. <i>Pilotage de la machine de report</i> | 12 |
| 2.4. SOUDAGE | 13 |
| 2.4.1. <i>La filière du soudage à la vague</i> | 13 |
| 2.4.2. <i>La filière du soudage par refusion</i> | 16 |
| 2.5. NETTOYAGE DES CIRCUITS | 26 |
| 2.6. TEST ET CONTROLE DES PCB | 27 |
| 2.6.1. <i>Le test in situ.....</i> | 27 |
| 2.6.2. <i>Le test fonctionnel</i> | 27 |
| 2.6.3. <i>Comparaison des stratégies.....</i> | 28 |
| 3. LE MARCHÉ DU PCB..... | 29 |
| 3.1. MARCHÉ MONDIAL DU PCB DE 1987 A 1992 | 29 |
| 3.2. SYNTHÈSE DE L'ENQUÊTE SUR LA FABRICATION DES CIRCUITS IMPRIMÉS NUS | 29 |
| 4. CONCLUSION | 33 |

1. Introduction

La nécessité de réduire les volumes et les poids des équipements électroniques a conduit les fabricants de circuits PCB finis ainsi que leur sous-traitants à s'adapter à de nouvelles technologies.

L'utilisation de boîtiers CMS, notamment sous leur forme céramique, introduit de fortes contraintes aux niveaux mécaniques et électriques. En effet un CMS ne nécessite pas de trou d'insertion et permet donc d'équiper les deux faces du circuit imprimé. La réduction de la taille des boîtiers permet souvent de diminuer de 30% l'encombrement d'une même fonction électronique.

Tous ces facteurs conduisent à une nette augmentation des densités d'interconnexion et donc à bien préparer l'aspect évacuation thermique du circuit en fonctionnement.

L'introduction des boîtiers CMS a aussi permis l'utilisation d'une technique de report différente du soudage à la vague traditionnel ; le soudage par refusion.

Au cours de cette étude nous nous attacherons à décomposer le processus de fabrication des circuits PCB en partant des différents matériaux de base servant dans l'élaboration du substrat jusqu'au test du circuit fini, en passant par les différentes étapes de report, de soudage, etc.. . Nous compléterons cette étude par une étude du marché des circuits PCB et par les premiers résultats de l'enquête menée auprès de différents fabricants de substrats.

2. Caractéristiques techniques des circuits PCB

2.1. Substrat

A la base d'un système électronique, on trouve dans la majorité des cas un substrat stratifié.

2.1.1. L'hermétique alchimie des stratifiés

Un stratifié est composé d'une résine (époxy, polyimide, Téflon, cyanate ester, etc ...) associée à une charge généralement sous forme de tissu (verre, quartz, Kevlar) intégrant ou non une âme métallique de type cuivre-invar-cuivre, qui, selon que l'on combine tel ou tel composant avec telle ou telle proportion de résine présente des propriétés physiques, thermiques et diélectriques différentes.

Les époxy (FR4) sont réalisés avec des résines époxydes biphénol-A brominées qui sont formulées avec des accélérateurs, des agents de polymérisation et des charges.

Les polyimides résultent de l'addition de bismaléimides de méthylène dianiline et d'anhydride maléique ou d'autres produits chimiques similaires. Le BT est une bismaléimide triazine.

Les cyanates ester sont également des dérivés de chimies triazines. Par ailleurs, des époxy, avec plus de deux groupes époxydes par molécule, peuvent réagir et former des structures tridimensionnelles ; les epoxy sont alors nommés par leur degré de fonctionnalité relative (tétrafonctionnels, etc ...).

Pour simplifier le tout, il est par ailleurs possible de combiner les différents systèmes résineux (BT-époxy, epoxy-cyanate ester, etc ...).

2.1.2. Sélection du substrat

Les critères électriques constituent la première interrogation concernant le choix d'un matériau. Ces critères incluent la constante diélectrique, les pertes diélectriques ou facteur de dissipation, les résistances d'isolement et la tension de claquage. Les spécifications définies pour ces critères électriques concernent non seulement les valeurs souhaitées par le cahier des charges, mais également la tolérance sur la valeur, leurs stabilités en température et en fréquence, ainsi que l'isotropie des propriétés. A ce stade, suivant les spécifications, il est alors possible d'effectuer un premier choix grossier entre les substrats à base de Téflon (pour les applications à fréquence élevée) et les autres (époxy, polyimide, etc ...).

Le deuxième critère de sélection concerne l'aspect thermique. La réponse à la question - le circuit imprimé va-t-il fonctionner au-dessus de 120°C ou non ? - détermine le choix entre du verre-époxy ou du papier phénolique et les autres types de substrats. Les tenues en températures limites pour chaque famille de substrat généralement définies sont :

- 80°C pour le papier phénolique,

- 120°C pour le verre-époxy classique,
- 180°C pour les verres-époxy améliorés - tétrafonctionnel, verre-époxy à haut Tg (température de transition vitreuse), etc ...
- 250°C pour le polyimide, le triazine et le Téflon,
- au-delà pour les matériaux inorganiques (alumine, silicium).

La conductivité thermique des différents substrats est également prise en compte dans les critères thermiques : elle varie d'un rapport 1 à 10 entre les matériaux organique et l'alumine. Un moyen intermédiaire consiste à coller un drain métallique extérieur en aluminium ou en cuivre sur la surface du matériau organique.

Le troisième critère de choix est la compatibilité chimique du substrat avec les techniques d'assemblage. Selon que les substrats doivent recevoir ou non des puces nues, on n'utilisera pas les mêmes matériaux. Car tous les matériaux organiques sont soumis à un phénomène de dégazage, qui survient typiquement lorsque l'on dépasse la température de transition vitreuse. Ainsi, pour le report de puces nues, on choisira des substrats présentant un haut Tg. D'autres facteurs sont à prendre en compte dans les critères chimiques : la pureté ionique, la possibilité de collage, les tenues aux agents chimiques lors de la fabrication des substrats et la reprise d'humidité. Pour ce dernier paramètre, les équipementiers militaires proscrivent l'utilisation du Kevlar-époxy ou polyimide pour les applications CMS fiabilisées, en raison d'un taux d'absorption d'eau trop important dans une atmosphère humide, phénomène qui induit des problèmes de pollution et une mauvaise résistance d'isolement.

Le quatrième critère de choix concerne les contraintes mécaniques auxquelles sera soumis le substrat. Ces contraintes mécaniques peuvent être d'origine interne ou externe.

Par « interne », on entend les contraintes apportées par les composants reportés sur la carte dont le coefficient de dilatation (CTE) est différent de celui du substrat. C'est notamment le cas des circuits comportant des CMS céramiques dont le coefficient de dilatation de 6 ppm/°C est trois fois plus faible que celui des multicouches conventionnels (environ 17 ppm/°C). L'effort de cisaillement induit est tel qu'il provoque des craquelures au niveau des joints de brasure. Pour remédier à ce problème, l'une des approches consiste à utiliser un stratifié avec un CTE faible tel que ceux réalisés à partir de tissus de renforcement en fibres aramide Kevlar, en quartz et en fibres de graphite. Une autre approche consiste à utiliser une couche à bas CTE directement dans le multicouche et qui « dominera » le système et réduira le CTE effectif de l'ensemble. Les colaminés cuivre-invar-cuivre représentent la solution la plus répandue, malgré leur poids. Ils permettent de maintenir le CTE du stratifié de 8 à 10 ppm/°C tout en faisant office de drain thermique.

Les contraintes mécaniques externes impliquent l'utilisation de circuits souples.

Les circuits souples

Le polyester est le matériau le plus couramment utilisé pour des applications non critiques. Toutefois l'implantation des composants s'avère relativement difficile.

Pour des applications souples plus sophistiquées, le Kapton est le matériau prédominant. En effet celui-ci peut résister à une température de 250°C, bien que la

tenue en température de l'adhésif qui relie le diélectrique au cuivre ne soit pas aussi performante.

Une solution originale permettant de réaliser une fonction constituée de deux circuits non coplanaires est proposée par le fabricant allemand Schoelle. Elle consiste à réaliser la fonction complète sur un seul circuit imprimé rigide simple ou multicouche, puis à assouplir une zone du circuit imprimé par réduction de son épaisseur (par fraisage) pour le rendre pliable. Cette technologie baptisée Semiflex est applicable dans le cas de circuits imprimés en FR4 ou en FR3. Toutes les classes de circuits imprimés sont réalisables et toutes les finitions classiques sont possibles.

Les solutions à base de circuits souples permettent de réduire le poids et l'encombrement du système grâce à la suppression des connecteurs. Bien que plus cher en réalisation, la suppression des éléments de connexion permet souvent une réduction du prix total du système.

| Critères d'utilisation des principaux systèmes de résines | | | | |
|--|--|-------------------------------|-----------|---|
| Produits | Applications | Constante diélectrique | Tg | Vitesse de propagation (en m/ns) |
| Epoxy FR4 | Produit standard | 3,9 | 130°C | 0,154 |
| Epoxy tétrafonctionne I | Bonne résistance chimique | 3,9 | 135°C | 0,154 |
| Epoxy H.T. | Haut Tg | 4,2 | 175°C | 0,154 |
| Polyimide | Très haut Tg | 3,6 | 250°C | 0,160 |
| Epoxy BT | Haut Tg Bonnes performances électriques Bonne stabilité dimensionnelle | 3,4 | 200°C | 0,154 |
| Cyanate Ester | Très haut Tg Très bonne performances électriques | 2,9 | 230°C | 0,179 |
| Téflon | Performances électriques sans égal Mise en oeuvre difficile Cher. Haut TCE | 2,1 | - | 0,209 |

| Coefficients de dilatation thermique des principaux matériaux en ppm/°C | |
|--|---------|
| Résine Epoxy | 30 à 35 |
| Résine polyimide | 30 à 40 |
| Tissu avec verre de type E | 3 à 5 |
| Tissu de Kevlar | -2 à -4 |
| Cuivre | 17 |
| Cuivre/Invar/Cuivre | 5,5 |
| Feuillard d'aluminium | 22 à 23 |
| Alumine | 6 |
| Silicium | 4,7 |

2.2. Densité d'interconnexions et règles de CAO

2.2.1. Les classes de circuits imprimés

Les niveaux de définition et les classes se réfèrent à la norme NF C93713. Celle-ci définit des critères d'appartenance à une classe de circuit imprimé ; une classe représentant un niveau de complexité technologique donné.

| Critère d'appartenance à une classe Valeurs limites mesurées sur le cliché (en mm) | Classe | | | | | |
|--|--------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Largeur minimale des conducteurs | 0.7 | 0.45 | 0.28 | 0.19 | 0.13 | 0.09 |
| Espacement minimal entre conducteurs entre conducteurs et pastilles ou plages entre pastilles, entre plages | 0.6 | 0.45 | 0.28 | 0.19 | 0.13 | 0.09 |
| Ecart par rapport à sa position théorique du centre d'une pastille, ou plage, ou fenêtre (Centre déterminé à partir du contour du motif) | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 |
| Ecarts entre positions relatives de centres de pastilles, plage ou fenêtre théoriquement superposés (superposition des clichés) | 0.15 | 0.1 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |

2.2.2. Plage d'accueil du composant sur le substrat : l'empreinte

La surface métallisée qui réunit par soudage le composant à la piste conductrice est appelée « empreinte », mais aussi « plot », « plate-forme », « plage de soudage », « plage d'accueil ». En outre le terme empreinte peut aussi désigner une surface réservée au collage du composant sur le substrat.

Les dimensions de l'empreinte se définissent en fonction de la taille des composants, de leurs tolérances, des tolérances de phototraçage, de placement et

de recouvrement. La position du plot est définie par rapport à un point de référence sur le support.

Généralement les plots sont entourés d'un vernis épargne destiné à protéger les pistes contre l'oxydation et à empêcher la soudure de couler ou de souiller d'autres pistes en particulier au cours du brasage à la vague.

Une première étude simple donne des surfaces d'empreintes en fonction des dimensions et du nombre de broches du composant. Quatre catégories sont identifiées :

| Nombre de broches du boîtier | Surface d'empreinte |
|------------------------------|---------------------|
| $N_{IO} \leq 4$ | $S_e = L * l * 4$ |
| $5 < N_{IO} \leq 26$ | $S_e = L * l * 2$ |
| $28 < N_{IO} \leq 68$ | $S_e = L * l * 1.7$ |
| $N_{IO} > 68$ | $S_e = L * l * 1.6$ |

avec L : longueur du boîtier
l : largeur du boîtier
 N_{IO} : nombre de broches du boîtier

2.2.3. Estimation de la densité d'interconnexion

A partir de l'étude ICE sur le packaging de 1991 nous avons élaboré une méthode de calcul simple de la densité d'interconnexion requise par un boîtier. Cette estimation est une première approche du calcul de la densité d'interconnexion, elle sera affinée dans la suite du programme.

On part de la relation suivante :

$$L = 1.125 * (X + Y) * N_{IO} \quad \text{avec : } X : \text{longueur du boîtier}$$

$$Y : \text{largeur du boîtier}$$

$$N_{IO} : \text{nombre de broches du boîtier}$$

Le coefficient 1.125 est un coefficient empirique qui tient compte du nombre d'équipotentiels pour un nombre total de broches et de la densité de composants par unité de surface.

La formule pour le calcul de la densité d'interconnexion par boîtier en fonction de L est donnée par :

$$D = 1.125 * \frac{(X + Y) * N_{IO}}{S_e} \quad \text{en mm/mm}^2.$$

La densité moyenne d'interconnexion requise par la carte est donnée par la formule : $D_{moy} = \frac{\sum (S_e * D)}{\sum S_e}$

A partir de la densité moyenne, on déduit le nombre de couches estimées par la table de correspondance suivante :

| Nombre de couches | Classe | Densité d'interconnexion (mm^{-1}) |
|-------------------|--------|---|
| 2 | 3 | 0.7 |
| 2 | 4 | 0.9 |
| 4 | 3 | 0.9 |
| 4 | 4 | 1.1 |
| 6 | 4 | 1.7 |
| 8 | 4 | 1.9 |
| 10 | 4 | 2.7 |
| 10 | 5 | 3.2 |

2.3. Report des composants (et des puces)

2.3.1 Les différents types de machines de report

L'adoption des composants CMS a permis de réduire le nombre et la diversité des machines de placement des composants traversants. En effet, pour poser les composants traditionnels il faut disposer de trois types de machines différentes : une pour les composants radiaux, une pour les composants axiaux et une pour les boîtiers DIL.

Les machines de report automatique des composants CMS sont plus universelles en raison des formes standards des composants. On peut les classer en quatre catégories selon leur type de fonctionnement.

Les machines de placement en ligne

Dans cette technologie, le substrat se déplace sur un convoyeur et s'immobilise sous une tête de placement située à une position bien précise. La station place un seul composant dans une position prédéterminée sur le substrat. Ce genre de machine est utilisée pour des petits circuits avec peu de composants.

Les machines de placement simultané

Ce type de machine permet de placer simultanément tous les composants en une seule opération sur la surface du substrat. Un certain nombre de têtes de placement prend une rangée de composants et les dépose simultanément sur le substrat. Ces têtes sont guidées vers la position de pose par butées mécaniques ou par pilotage par ordinateur.

Ces machines sont rapides, assez peu flexibles et nécessitent surtout une conception particulière de la carte adaptée au pas des têtes de report pour une utilisation optimale.

Machine de placement séquentiel aléatoire

Dans cette catégorie, une simple, une double ou une quadruple tête de placement prend le composant depuis son magasin et le reporte sur le substrat. Dans certains cas c'est la table supportant le substrat qui se déplace en X,Y, dans d'autres, c'est la tête de saisie qui se déplace en X et Y.

Ces machines sont généralement très flexibles et pilotées par un micro-ordinateur. La séquence de report est établie par soft.

Machine de placement séquentiel/simultané

Pour ces machines de grandes cadences une table XY, support du substrat, se déplace sous une série de têtes de saisie/report qui placent chacune un composant simultanément. Le positionnement des composants est piloté par ordinateur. Il est obtenu soit par les déplacements de la table XY, soit par ceux de la table, soit encore, par une combinaison des déplacements de la table et de la tête.

Pour des machines à très grandes cadences, la flexibilité est assez faible et il est important d'adapter la conception de la carte (implantation des composants) aux capacités de la machine, suivant une grille au pas des têtes de saisie/report.

En conclusion, il existe deux technologies : le placement en ligne et le placement séquentiel ; chacune de ces deux techniques pouvant être « multiplexée » pour des raisons de gains de productivité.

La notion de cadence est à utiliser avec prudence : ce sont bien souvent des cadences optimales selon des conditions de fonctionnement bien précises et généralement éloignées des conditions réelles de production (les temps de chargement/déchargement du substrat, les divers temps de préparation ne sont pas compris dans ces calculs de cadence maximale, par exemple).

C'est notamment le cas des machines de report appelées « chip-shooter » qui annoncent des vitesses de placement de 60000 composants/heures mais qui sont réservées au placement des composants dont le nombre de broches est inférieur à 14 (boîtier type SOP14).

2.3.2. Structure d'une machine de report

Une machine de report est articulée autour de trois sous-ensembles indispensables : le magasin de composant, l'ensemble de saisie/placement des composants, et la table de fixation du substrat. Ces sous-ensembles sont complétés par des équipements annexes optionnels.

Les magasins et le conditionnement des composants

Les exigences auxquelles doivent répondre le conditionnement sont :

- économie,
- grand nombre de composants par unité de conditionnement,
- aptitude à l'utilisation sur machine automatique,
- faible encombrement par composant,

- sécurité contre les endommagements pendant le transport et les manipulations,
- protection contre les charges électrostatiques,
- assurer une position bien définie du composant (polarité notamment).

La bande alvéolée est une forme de conditionnement très fréquemment utilisée. C'est le type de conditionnement qui présente le plus d'avantages et qui est le mieux adapté au report automatique. Il existe deux types de bandes alvéolées : papier et plastique.

Conformément à une proposition CEI, les bandes sont normalisées dans le monde entier. Les bandes sont présentées sur des rouleaux de 180 à 380 mm de diamètre. Les largeurs de bandes sont de 8, 12, 16, 24 et 32 mm. Elles contiennent suivant les cas de 1000 à 10000 composants.

Les bandes sont placées sur la machine de report dans des distributeurs amovibles ou chargeurs. Certains systèmes coupent la bande régulièrement, d'autre conservent la bande intacte en l'enroulant autour d'une bobine spéciale. Compte tenu du coût des bandes alvéolées, les fournisseurs de composants sont intéressés par la possibilité de récupérer les bandes vides ; les systèmes à enroulement de bandes présentent donc un avantage certain. Ce système permet le stockage des chips résistances et condensateur, diodes et transistors en boîtier SOT et des circuits intégrés en boîtiers SO.

L'alimentation des composants peut se faire en vrac, à partir de systèmes vibrants rectangulaires ou circulaires qui remplissent les réglettes. La réglette est le conditionnement le plus ancien et s'emploie maintenant surtout dans le cas où le stockage dans des magasins en bande n'existe pas. Les systèmes à vibrations sont très délicats à régler. Le niveau des vibrations dépend de la quantité (masse) des composants. Il faudrait donc des réglages permanents en fonction de l'évolution du nombre de composants. Si les vibrations sont insuffisantes, les composants glissent difficilement dans la réglette, si celles-ci sont trop intenses, le composant en sortie de réglette est très difficile à saisir.

Les composant à gros boîtiers sont stockés dans des systèmes à empilage ou dans des boîtes alvéolées.

Prise et manipulation du composant

Le composant doit être saisi et transporté du point de prise (magasin) au point de pose (substrat), avec éventuellement des arrêts à des positions intermédiaires pour le recentrage, l'orientation, le test ou l'encollage du boîtier.

Les opérations de prise et de transport nécessitent une cinématique précise et fidèle. La solution généralement utilisée consiste à aspirer le boîtier par dépression d'air au bout d'une buse dont le diamètre est adapté aux dimensions du composant à déplacer. Le changement de buse est automatique. Il y a, en général, 3 à 4 types de buses différents pour couvrir la plage dimensionnelle des boîtiers à manipuler. Il existe également un système de buses rétractables, de diamètres différents et concentriques. Cette solution évite les temps de changement d'outil, par contre, en cas de détérioration d'une buse, il faut changer l'ensemble. Elle est par conséquent très peu répandue.

Les opérations de centrage et d'orientation de même que le test du boîtier s'effectuent lors du déplacement du composant, de son magasin au substrat.

Plusieurs solutions technologiques ont été trouvées :

- *le centrage embraqué* : le composant est orienté durant son transport par 4 pinces à 90°. Ce système permet un gain de temps car l'orientation du composant a lieu pendant son transport. L'inconvénient de ce système provient de la fragilité des mors des pinces qu'il faut changer souvent à cause des chocs et de l'usure. Ce type de centrage est bien adapté aux composants de petite taille.

- *le centrage en poste fixe* : Ce système est constitué de quatre mors en poste fixe. L'orientation peut être obtenue soit par la rotation du système de centrage, soit par la rotation de la tête. Ce système est fiable et précis, les mors sont beaucoup moins fragiles et ont une longue durée de vie.

- *le centrage optique* : Il est basé sur la reconnaissance de formes et l'analyse des images. Les systèmes performants combinent deux fonctions : centrage du composant par détection des décalages, vision de l'empreinte réceptrice sur le substrat et superposition des deux images. Ces systèmes sont très performants du point de vue de la précision de pose, mais ils sont plus lents que les systèmes mécaniques. Ils sont utilisés surtout pour le centrage des gros boîtiers à connexions multiples (PLCC, QFP, BGA,). Une attention toute particulière doit être portée sur l'éclairage, car la qualité de l'acquisition et donc de l'analyse de l'image dépend essentiellement de celui-ci.

Plateau support des substrats

La table de fixation du substrat est constituée d'un plateau fixe ou mobile suivant un ou deux axes, selon la structure cinématique de la machine.

Pour les ensembles mobiles en X-Y, la motorisation des axes doit permettre des déplacements rapides (plus de 600 mm/s) et précis (de l'ordre de 0,05 mm).

Sur la plupart des machines, le chargement du plateau peut se faire soit manuellement par l'opérateur, soit automatiquement. Dans ce dernier cas, la machine en tant que cellule de production est reliée aux autres cellules :

- soit par un système de convoyage des cartes, avec traversée de la machine (pass-through),

- soit par un système de convoyage avec dérivation sur la machine ou bien soit par un système à chariots guidés automatiquement.

Les plateaux permettent le montage de substrats ayant des dimensions allant jusqu'à 500x500 mm dans les configurations standard.

2.3.3. Fonctionnalités complémentaires associées à la machine de report

Dispositif de test

Certaines machines sont équipées d'électrodes judicieusement placées (tête de placement, dispositif de centrage) et reliées à un équipement de test pour identifier les composants bipolaires et vérifier leurs caractéristiques électriques. Cela permet d'accroître la sécurité du report. Ce contrôle permet de déceler et d'éliminer les composants mal triés ou défectueux ; la durée du test étant de l'ordre de 100

milli-secondes. Les éléments ainsi contrôlés sont : les résistances, les condensateurs, les selfs, les diodes, les diodes Zener, etc ...

Dispositif de collage

Le dépôt du point de colle peut être effectué, soit en amont de la machine de report par sérigraphie, ou sur un poste dédié de stamping ou de transfert par seringue (microdoseur), soit par intégration sur la machine de report d'un dispositif de stamping ou d'un microdoseur.

La technique de sérigraphie permet de déposer tous les points de colle simultanément. La surface du substrat doit être plane, ne pas présenter d'obstacles, sans déformation aucune afin de ne pas empêcher le contact substrat-écran. Les principaux inconvénients sont liés aux réglages et à la maintenance de l'écran.

Le stamping ou transfert par tampon est la méthode la plus simple dans son principe mais pas forcément la plus facile à mettre en oeuvre. Une aiguille, ou outil à empreinte permet de prendre une goutte de colle par capillarité et de la déposer à l'emplacement du composant avant la pose de celui-ci. Sur les machines de production grande série, on trouve non pas une aiguille mais un cadre-réseau d'aiguilles conçu pour correspondre exactement aux emplacements définis sur le substrat. Cela permet de déposer simultanément plusieurs points de colle. Cette solution est généralement retenue sur les machines de production grande série où la notion de cadence prend le pas sur la notion de flexibilité. Le transfert à aiguille ne permet pas de faire des gouttes de colle de volumes différents suivant les composants, mais il permet de contrôler l'épaisseur du dépôt plus facilement que par sérigraphie.

Le dispositif de collage par microdoseur actionne une aiguille pour poser une goutte de colle sur le circuit. Celle-ci est reliée à une réserve de colle de quantité fixée par l'intermédiaire d'un tuyau souple. La goutte est formée par une impulsion d'air comprimé de durée programmable. La pression de l'air est aussi réglable. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle permet de déposer des quantités de colle différentes à différents emplacements. Le nettoyage est très difficile et il est préférable de changer les différents éléments (tuyaux, aiguille...) lors des opérations de maintenance.

2.3.4. Pilotage de la machine de report

Ces machines sont pilotées par un micro-ordinateur. Le programme de report est établi à partir de celui-ci. Les ordres des opérations à effectuer pour le report sont transmis, via un bus de communication, aux diverses cartes microprocesseurs de commande des axes et autres entrées/sorties.

L'organisation logicielle varie suivant les machines. On peut tout de même définir une ossature générale commune à la plupart des machines. Cette ossature est constituée des fonctions indispensables au logiciel de pilotage.

Les fonctions usuelles sont les suivantes :

- autotest et initialisation de la machine,

- préparation du programme de report,
- commande de la machine de report avec le lancement par opérateur de lancement automatique de câblage (par exemple par la lecture d'un code à barre imprimé sur la carte, l'identifiant et faisant appel au programme de câblage à utiliser, stocké en mémoire),
- contrôles de l'opération de report effectuée et du bon fonctionnement de la machine, avec des messages pour une éventuelle intervention de l'opérateur (rechargement d'un magasin, recharge d'un substrat, ...),
- opérations de correction et contrôle du programme de câblage.

Un interfaçage avec la CAO permet de préparer de manière automatique le programme de câblage.

2.4. Soudage

2.4.1. La filière du soudage à la vague

Le soudage à la vague est une méthode de soudure relativement ancienne adaptée à une production de masse des cartes avec composants à insertion. L'avènement des CMS avec leur petite taille et leur tenue particulière en température a amené les constructeurs à modifier et améliorer les équipements de brasage à la vague de manière à répondre d'une manière satisfaisante à la production de cartes mixtes ou tous CMS. Ces équipements sont coûteux et demandent beaucoup de surface au sol. En revanche, ils requièrent un support technique léger.

Conduite de ce procédé

Une machine de soudure à la vague comprend un convoyeur à doigts ou à chariots chargé de transporter les cartes électroniques successivement dans les zones bien distinctes de fluxage, de préchauffage, de brasure et de refroidissement avant d'en être déchargé. Au cours du brasage, un bain de brasure en fusion est amené au contact de la carte et de ses composants préalablement collés.

Il existe principalement deux sortes de convoyeurs, tous deux se déplaçant dans un plan incliné variant entre 5 et 9° suivant le type de machine :

- le convoyeur à doigts : les doigts sur lesquels la brasure ne peut adhérer sont en métal noble afin de ne pas polluer par leur dissolution le bain de brasure ; ce type de convoyeur est susceptible de saisir des cartes de forme rectangulaire de dimensions variables.

- le convoyeur à chariots : des chariots accrochés à des chaînes assurent le transfert des cartes en les maintenant sur leur pourtour, la planéité de la carte est ainsi conservée ; ils offrent la possibilité de protéger des zones où aucun dépôt de soudure n'est désiré, de pouvoir être adaptés au format des cartes à traiter.

La vitesse des convoyeurs est réglable de 0,5 à 3 m/mn et peut varier de 5% durant le processus de brasage sans dommage pour les cartes.

Fluxage

La carte, sur laquelle sont maintenus par collage les composants CMS, passe dans une machine de fluxage dont le rôle est de projeter uniformément sur l'ensemble de la carte le flux qui favorisera la soudure. Ce flux, par ses propriétés de capillarité, pénètre les interstices et les trous métallisés et nettoie les empreintes en ôtant toute oxydation. Le flux est projeté à l'état de mousse, d'écume ou sous forme d'une vague à la surface de la carte. Sa distribution se fait à l'aide d'une brosse par déplacement d'une vague, par vaporisation, par immersion...

La production des joints de soudure de haute qualité impose un choix judicieux du flux. Si la soudabilité est bonne, un flux moyennement activé conviendra. En revanche, une soudabilité difficile requerra un flux fortement activé. Dans ce choix interviendront aussi les facilités de nettoyage des cartes pour l'élimination des résidus de flux qui, à long terme, peuvent entraîner des défaillances des circuits par corrosion, courts-circuits, conductivité non désirée entre les composants. Ceci est particulièrement vrai pour les flux solubles dans l'eau. Pour les flux à base de résine, le nettoyage dépend de l'activité du flux. Pour un flux moyennement activé, les résidus peuvent rester sur la carte où ils assureront une protection et un isolement.

Ces flux se composent :

- d'un composant actif chimiquement pour nettoyer et désoxyder les surfaces ;
- d'un agent de mouillage pour favoriser la dispersion des constituants du flux sur la carte ;
- de substances favorisant l'activation sur les parties métalliques.

Préchauffage

La carte, après avoir été soumise à l'aspersion du flux passe alors dans la zone de préchauffage toujours incorporée au système. Cette zone est séparée de la zone de brasage afin de ne pas affecter sa température et polluer la vague de brasure.

Cette opération a pour but de sécher le flux en volatilisant ses solvants tout en chauffant uniformément la carte à une température de 80-120°C. Le séchage augmente la viscosité du flux. Dans le cas d'une viscosité trop faible, le flux est chassé par la soudure en fusion et le mouillage devient insuffisant. Par ailleurs, le séchage accélère l'action chimique du flux sur les surfaces métalliques.

Le préchauffage permet également de réduire les chocs thermiques en particulier des CMS nécessitant un trempage par immersion totale dans la vague. Un choc thermique entraîne très souvent une courbure de la carte pendant la phase de soudure.

Le préchauffage est obtenu de différentes manières : par radiation, par circulation d'air chaud, forcée ou non, ou par combinaison des deux. La circulation d'air chaud permet en même temps l'évacuation des vapeurs indésirables. Cependant, et de plus en plus en CMS, le préchauffage par radiation est préféré, entre autre, en raison de la suppression des gradients thermiques que ce mode de transfert de chaleur permet d'obtenir.

La température de préchauffage, dont dépend la qualité des joints, est à définir en fonction de la nature du matériau constituant le substrat et des composants, mais aussi du point d'ébullition du flux employé, point d'ébullition pour lequel le flux deviendra actif. Les flux ayant un point d'ébullition élevé requièrent une température élevée et un séjour plus long de la carte dans la zone de préchauffage. Si la température élevée est trop haute, la viscosité augmente et dans le cas d'un flux résineux contenant de la colophane par exemple, celle-ci s'oxyde et commence à se polymériser avec pour conséquence la réalisation de joints de qualité médiocre. Le flux couramment employé est l'isopropanol avec un point d'ébullition à 82,4°C.

La quantité de chaleur $Q(J)$ transférée à la carte est liée à l'élévation différentielle de température $\Delta T(^{\circ}K)$ et à la capacité calorifique $C (J.K^{-1})$ de la carte. Si t est le temps de passage de la carte dans la zone de préchauffage. La puissance $P(W)$ requise par l'élément de préchauffage est :

$$P = \frac{C \cdot \Delta T}{t}$$

En prenant en compte les pertes de chaleur inévitables, et le fait que la valeur la plus haute de la température de la carte doit être obtenue avec la vitesse la plus élevée du convoyeur, un préchauffage fournissant 8 à 10 kW équipe généralement les machines.

Station de brasage

Après avoir traversé la zone de préchauffage, la carte arrive au-dessus de la vague de brasure en perpétuel renouvellement grâce à une pompe qui provoque et entretient ce mouvement.

Les équipements de base sont des machines générant une monovague à écoulement laminaire ou une double vague. Dans le cas d'une carte mixte, la brasure pénètre les trous métallisés sous l'effet de forces capillaires et de la pression hydrostatique.

Améliorations possibles :

- injecteur de gaz inerte : dans ce type de machine, une atmosphère d'azote permet lors des opérations de brasure de maintenir le niveau du dioxygène de l'air au-dessous du seuil de 5 ppm. Ce niveau suffisamment bas permet d'éliminer l'oxydation des parties métalliques et d'élargir la gamme des températures jusqu'à 300°C sans dommage pour les supports, composants et flux. De plus, le temps de brasure est réduit de 30 à 40%. Le nettoyage de la carte est aisé puisque le flux n'est ni oxydé ni brûlé.

- couteau d'air chaud : le couteau d'air chaud est un jet d'air porté à haute température, projeté à haute vitesse contre la face inférieure de la carte immédiatement après son passage au-dessus de la vague. Les projections ou excès de soudure sont soufflés avant leur solidification et les joints de soudure sont remodelés. Bien qu'un joint de soudure en voie de solidification ne doive pas être perturbé, le jet, par sa pression, enlève rapidement la soudure présentant une mauvaise adhérence et, par sa chaleur, permet au joint de se reformer sans y laisser de contraintes résiduelles excessives. Ainsi, cet air chaud améliore les résultats en faisant fondre les ponts ou traces de soudure éventuels. Malheureusement, il

favorise la formation de microbilles dont le nombre peut être réduit par un agent telle qu'une huile ajoutée à la vague.

Origine des défauts

Les principales causes des défauts sont :

- la formation de ponts de soudure entre les empreintes si la distance les séparant est faible ;
- un mouillage incorrect : les parties à souder doivent entrer directement en contact avec le flux de la brasure de manière à ce que celle-ci puisse pénétrer partout où elle doit s'y trouver ;
- un marquage à la vapeur des empreintes par des composants de haute taille ou trop rapprochés ;
- l'accumulation de soudure sur des connexions par suite d'un écoulement insuffisant de la brasure. Les connexions acquièrent alors une rigidité (perte d'élasticité) les rendant fragiles sous les contraintes mécaniques et thermiques.

Oxydation de la brasure

Le contact permanent de la crête de la vague avec le substrat et son renouvellement perpétuel empêchent la formation d'oxydes. Cependant, loin de la crête, la surface du bain réagit avec le dioxygène de l'air et rapidement oxydation et scories apparaissent. La couche de scories s'épaissit et doit être enlevée à intervalles réguliers pour éviter qu'elle n'adhère au substrat et pollue la crête de la vague. L'ajout d'une huile dans le bain réduit d'une manière significative ce phénomène.

2.4.2. La filière du soudage par refusion

Critères de choix d'un alliage

Les alliages contenus dans les crèmes à braser sont protégés par leur contact intime avec le flux. Leur fusion ne dure que quelques secondes durant le brasage. Ils offrent suivant leur composition, diverses caractéristiques : résistances à la traction, au cisaillement, ductilité, dureté, élongation, souplesse, mouillabilité, solubilité, eutectique...

Chacune des propriétés énoncées ci-dessus est à considérer suivant le type de soudure à effectuer, lui-même dépendant de la nature des matériaux à assembler et du coefficient de dilatation des composants et du substrat, de la méthode de dépôt...

Le choix de l'alliage et de sa température de fusion revêt une importance considérable et concourt au succès de la fabrication, de la qualité et de la fiabilité de celle-ci. Les critères de choix peuvent s'exprimer de la manière suivante :

- géométrie et résistance mécanique du joint de soudure ;
- nature de l'alliage (présence d'or ou d'argent par exemple) ;

- température de fusion ;
- fatigue et cycles thermiques du joint ;
- forme et intervalle d'utilisation du joint.

En technologie CMS, l'eutectique étain-plomb est le plus employé. L'alliage 62Sn/36Pb/2Ag forme des joints extrêmement résistants au cisaillement.

Pour les brasages sur des revêtements d'or, en raison des problèmes de dissolution de l'or dans l'étain, des alliages spécifiques doivent être utilisés : 50Pb/50In. Les alliages Pb/In sont tendres, ductiles, idéaux pour assembler des métaux aux coefficients de dilatation différents. En raison de la plasticité de l'indium, cet alliage peut supporter des températures cryogéniques.

Flux

Le flux entre dans la constitution du liant de la crème à braser. C'est une partie non métallique de celle-ci. Le flux, dont le rôle est multiple, doit en effet :

- éliminer toute trace d'oxyde qui pourrait recouvrir les grains métalliques ;
- nettoyer, décaper les surfaces à braser en éliminant le film d'oxyde et les graisses généralement présents sur les surfaces métallisées ;
- renforcer l'adhésivité. Il permet à la crème déposée de garder sa consistance et d'assurer par son pouvoir collant le maintien temporaire des composants sur leurs plages jusqu'au brasage ;
- réduire la tension superficielle existant entre l'alliage d'apport et le métal à souder, c'est-à-dire favoriser le contact entre la phase liquide et les métaux à réunir grâce à des substances miscibles ;
- favoriser le mouillage ;
- aider au transfert de chaleur entre les contacts métalliques ;
- éviter l'oxydation des contacts métalliques une fois établis.

Présentation des principaux types de flux :

| Flux non hydrosolubles | | | | |
|------------------------------------|--|--|---|--|
| Origine | Type | Caractéristiques | Applications principales | Remarque |
| Résines naturelles ou synthétiques | flux résineux activés (RA) avec des acides et/ou des halogènes | - forte action sur les oxydes et les surfaces métalliques | - utilisation en cas d'oxydation sévère | - difficiles à éliminer |
| | flux résineux moyennement activés (RMA) sans chlore ionisable | - action modérée - ni conducteurs, ni corrosifs à température ambiante | - les plus utilisés en électronique | - permettent d'obtenir un bon mouillage en particulier sur les surfaces ((Pt-Pd-Au), Ag et SnPb - éliminer par un mélange eau-détergent |
| | flux non activés (sans aucun agent activant) | - totalement inactifs - ne peuvent réduire les oxydes des métallisations de cuivre, de nickel ou de palladium | - utilisation avec des alliages dont le point de fusion est supérieur à 200°C | - alphas métal déconseille leur emploi avec des alliages dont le point de fusion est inférieur à 220°C |

| Flux hydrosolubles | | | | |
|---|--|--|---|---|
| Peu utilisés dans les circuits hybrides pour lesquels un nettoyage à l'eau est inacceptable | | | | |
| Origine | Type | Caractéristiques | Applications principales | Remarque |
| organique | flux organique en solution aqueuse à base d'acides (lactiques, oléiques, stéariques, phtaliques...), d'amines ou d'amides (urée, aniline...) | -corrosivité supérieure à celle des flux résineux - les résidus de flux sont souvent | - destinés à l'électronique et à la mécanique -excellents pour les | - après brasage, production de résidus très corrosifs qui |
| inorganique | flux inorganique en solution aqueuse à base d'halogènes (brome, chlore...) | ionisables donc lavables à l'eau. Leur dissolution est ainsi beaucoup plus aisée que celle des flux résineux | alliages à haut point de fusion (supérieur à 270°C) -destinés à assembler des pièces présentant une soudabilité médiocre | dans tous les cas doivent être éliminés immédiatement par un nettoyage à l'eau. |

Dépôt de la crème à braser

Plusieurs procédés permettent de déposer la crème à braser sur une carte. Cependant, la méthode par sérigraphie conserve la préférence des micro-électroniciens en raison des avantages qu'elle offre : précision, rapidité, uniformité, répétitivité, qualité du dépôt.

La crème à braser est transférée sur le substrat à l'aide d'une raclette au travers d'un écran de sérigraphie ou un pochoir comportant le motif à reproduire. Le choix de l'écran est lié à celui de la dimension moyenne des grains métalliques contenus dans la crème à souder. En effet, l'ouverture des mailles 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 des particules. De même l'épaisseur de l'émulsion ne dépassera pas 150 microns 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 à braser 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°.

Refusion en phase vapeur

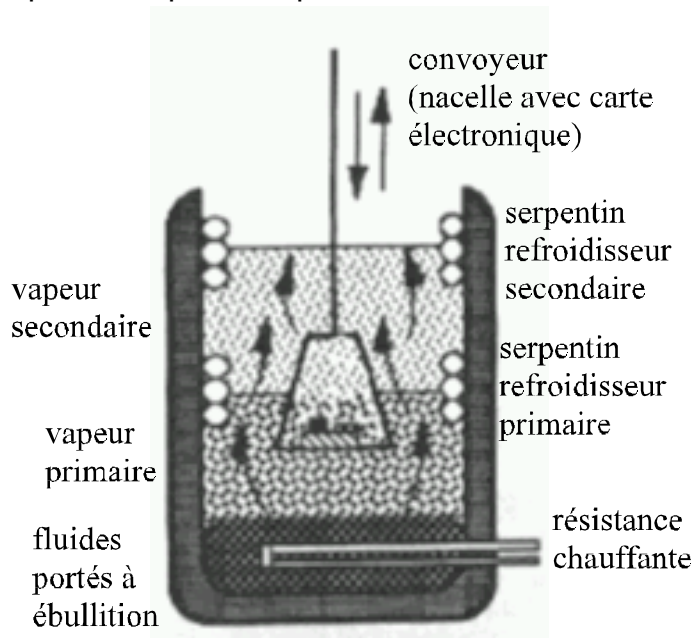
La méthode de brasage en phase vapeur est apparue au début des années 70. Très améliorée depuis, elle convient bien au brasage des composants CMS. C'est une méthode rapide de transfert uniforme de chaleur. Elle a été étendue à la cuisson d'encres polymères en couches épaisses.

L'opération de fusion de la crème à braser, entraînant la formation de joints de soudure, est conduite dans un bac équipé de condensateurs aux surfaces refroidies par circulation d'eau, placés contre les parties hautes et basses des parois.

Le bac contient un mélange de deux fluides de densité et de température d'ébullition différentes :

- le fluide dit primaire est à haut point d'ébullition et de densité forte ;
- le fluide dit secondaire présente des propriétés inverses au fluide précité.

Le mélange est chauffé à l'aide d'une résistance chauffante. Lorsque le point d'ébullition du fluide secondaire est atteint (50°C), celui-ci entre en ébullition et se transforme en vapeur qui s'élève dans la cuve et se maintient un court instant au niveau des serpentins primaires dont la température est légèrement supérieure à la sienne : 60°C. Ceci permet une surchauffe des vapeurs secondaires qui montent alors à hauteur des serpentins secondaires dont la température est maintenue entre 5 et 20°C. A cet instant, le point d'ébullition du liquide primaire est atteint : environ 125°C. Ce liquide produit alors une atmosphère de vapeur saturée, inerte, dont la température est légèrement supérieure au point de fusion de l'alliage utilisé pour le brasage des composants. La vapeur primaire piégée par les serpentins primaires repasse sous la forme liquide et retombe dans la cuve. Et le cycle recommence : liquide -- vapeur -- liquide...



La carte électronique placée dans une nacelle est descendue dans la zone d'évaporation ou vapeur saturée. La vapeur se condense en tous points de la carte et des composants. La chaleur latente de la transition de phase est transférée à

l'ensemble de la carte et se forment alors les joints de soudure. Le transfert de chaleur est proportionnel à $T_{\text{vapeur}} - T_{\text{composant}}$.

Les appareils de refusion en phase vapeur sont équipés de dispositifs éliminateurs d'acides, d'eau...

Les fluides disponibles et les plus utilisés ont les propriétés suivantes :

- ininflammables ;
- inertes chimiquement ;
- stables thermiquement ;
- point d'ébullition défini ;
- faible action solvante ;
- incolores, inodores ;
- non toxiques ou très faiblement ;
- non conducteurs (non dissociation en ions libres) ;
- densité supérieure à celle de l'air ;
- les résistances élevées de ces liquides permettent le test électrique dans la zone de vapeur sans dommages pour les circuits électriques.

Dans le cas d'un substrat verre-époxy chauffé par immersion, le verre conduit plus rapidement que l'époxy qui constitue la surface du substrat. Par conséquent l'époxy agit comme une barrière thermique et le substrat dans toute son épaisseur demandera 5 à 10 secondes pour atteindre la température du fluide. Dans le cas d'un substrat à trous métallisés, ce temps est réduit par le cuivre, le matériau de conductivité thermique élevée tapissant les parois des trous.

Le tableau suivant récapitule les différents avantages et inconvénients de la refusion en phase vapeur.

| paramètres | avantages | inconvénients |
|-----------------------------|--|--|
| fluide | | -perte de fluide durant la phase de brasage |
| température | -constante lorsque la température d'ébullition du fluide est atteinte. | -seules « quelques températures » (point d'ébullition des fluides) sont disponibles |
| vapeur | -aucune oxydation dans la zone de brasage | -demande une excellente ventilation pour éviter l'accumulation de vapeur -possibilité de pénétration de vapeur dans les dispositifs s'il y a fêlures provoquées par un choc thermique. |
| temps de chauffage | - chauffage relativement rapide de la carte avec ses composants. | - temps de chauffage amenant le fluide à son point d'ébullition assez long. |
| transfert de chaleur | - distribution uniforme de la température dans la zone de brasage. - chauffage des composants indépendant de leur géométrie, masse, volume, couleur. - aucune surchauffe des composants : la température de refusion contrôlée est plus basse que dans les autres procédés , infrarouge et air chaud. | - chocs thermiques lors de l'immersion de la carte dans la vapeur avec rapide évaporation des solvants de la crème à braser. - tous les matériaux des composants en particulier les plastiques, ne supportent pas l'association temps-température durant la phase de brasage. |
| flux | - un flux peu actif peut être utilisé. | - très mauvaise solubilité des résidus de flux dans les fluides. |
| procédé | - permet la soudure de masse - un seul processus de refusion. Seul le temps de maintien de la nacelle dans les vapeurs primaires varie. En production, cela revient à régler la vitesse de descente et de remontée du convoyeur. - utilisable dans le cas de cartes double face, multicouches, grand format, de circuits très complexes. - permet de réaliser des joints de soudure de meilleure qualité, ce qui réduit le taux de rebut, accroît la productivité et abaisse les coûts de production. | - fluides et équipements coûteux. |

Refusion au four à rayonnement infrarouge

La refusion infrarouge est une technique très employée pour des raisons de facilité de mise en oeuvre et de coût d'entretien inférieur aux autres techniques de brasage. Cette technique très fiable assure malheureusement un faible transfert de

chaleur. L'énergie est absorbée par les matériaux (composants et substrats), puis transférée par conduction aux terminaisons métalliques.

Principe : les cartes électroniques sont convoyées à travers un four à passage comportant plusieurs zones chauffantes. Le tapis avance en continu à vitesse constante et les composants voient la température s'élever progressivement de la zone de préchauffage à la zone de refusion. Puis la zone de refroidissement est traversée à son tour et l'assemblage est terminé.

Le transfert de chaleur est réalisé entre la source radiante et les surfaces solides (corps des composants, substrats) par l'air, milieu généralement utilisé.

Les tubes ou panneaux utilisés dans les fours I.R. représentent la source d'énergie dont la puissance émettrice varie avec la tension appliquée. Ils sont placés au-dessus et au-dessous de la courroie de transfert et leurs filaments sont perpendiculaires à la direction de la courroie.

La température de chaque zone est contrôlée par un thermocouple et un circuit électronique de stabilisation qui maintiennent une température stable par variation compensatrice de la température du filament entre 1000 et 2500°K. Ainsi, le four à infrarouge permet, grâce au contrôle rigoureux de la température, d'établir un profil susceptible d'éviter les chocs thermiques. Les radiateurs ou panneaux radiants placés de part et d'autre des faces du circuit, peuvent fonctionner indépendamment et sélectivement, respectant la sensibilité thermique des composants.

Les fours I.R. bien conçus permettent de contrôler avec précision l'atmosphère de cuisson qui intervient dans le transfert ou échange de chaleur provenant de la conduction et de la convection des éléments chauffés. Ce contrôle précis améliore fortement la qualité des joints de soudure.

Les fours comportent généralement un compartiment équipé d'une céramique poreuse à travers laquelle passe un gaz. Ce gaz, de par sa distribution rapide, élimine les dépôts de solvants sur les faces des éléments radiants.

L'air est le fluide gazeux le plus couramment employé. Il évacue rapidement dans la zone de préchauffage, toutes les vapeurs des solvants qui pourraient se recombinaison avec la soudure. Cependant sur le plan chimique, l'air est le fluide présentant le moins d'intérêt, bien qu'étant moins coûteux que les gaz purs. Contenant 21% de dioxygène, il provoque par oxydation la dégradation des matériaux organiques et métalliques.

C'est pourquoi l'azote, gaz inerte, retient l'attention des utilisateurs. Il ne présente pas les inconvénients de l'air, du moins dans les conditions de température et de pression utilisées dans le four. En présence d'azote, le volume de dioxygène se réduit de 21% à $5 \cdot 10^{-4}$ ou $10 \cdot 10^{-4}\%$. Ce résidu de dioxygène est insuffisant pour entraîner cette fois l'oxydation des parties métallisées, ce qui permet d'élargir la gamme des températures sans détérioration des composites FR4 et des flux. Des expériences ont montré que sous ces conditions, le circuit imprimé pouvait sans dommages supporter des températures de 300°C.

A cette température, le point de fusion de la soudure est rapidement atteint, ce qui permet d'augmenter la vitesse de défilement du tapis, de réduire de 30 à 40% le temps du processus de soudage, de réduire le temps d'exposition des composants aux fortes températures. Le microbillage (formation de billes de soudure) est fortement réduit. L'élimination du flux voit leur corrosivité fortement atténuée. L'atmosphère inerte a un effet très positif sur l'angle et les forces de mouillage.

Tous ces avantages ont une incidence productive et économique bénéfique.

Des travaux récents rapportés par les fabricants montrent que dans un four à 6 zones, sous atmosphère d'azote, la fiabilité des joints de soudure atteint un taux de 2ppm comparé aux autres techniques de soudage (brasage à la vague, refusion en phase vapeur) où le taux est nettement moins favorable.

Le profil de température adéquat de refusion peut être obtenu avec une grande souplesse et un contrôle rigoureux de la température de chaque zone.

- zone 1 : préchauffage ; évaporation des solvants et mise en température lente et progressive des composants permettant d'éviter en particulier des microfissures pour les condensateurs ;

- zone 2 : réduction des oxydes métalliques par le flux ; séchage de la crème à braser ;

- zone 3-4 : montée en température de la carte ou du circuit ; tend vers l'uniformisation de la température du circuit ;

- zone 5 : refusion complète des billes d'alliage de soudure ;

- zone 6 : refroidissement naturel ou forcé.

Les principales performances et limites du procédé

| Paramètres | | Remarques |
|--|----------------|---|
| M a t é r i a l s | Composants | <ul style="list-style-type: none"> - les composants chauffés dans l'air subissent l'oxydation durant leur chauffage. Ceci s'avérerait gênant si une seconde refusion était nécessaire. - les composants de grande taille peuvent provoquer le phénomène d'ombre ou une surchauffe. - le risque de redressement des composants (effet Tombstone) est très faible. |
| | Crème à braser | - le préchauffage et/ou séchage de la crème à braser ne sont pas absolument nécessaires. |

| Paramètres | | Remarques |
|--|---------------|--|
| R a y o n n e m e n t | Intensité | <ul style="list-style-type: none"> - l'énergie appliquée au circuit est fonction de l'intensité I.R. fournie par la source, de la distance de la source au circuit (l'énergie est inversement proportionnelle au carré de la distance). Ces deux variables ne sont pas linéaires. - des différences de température apparaissent entre composants d'une même carte selon leur masse, leur couleur, leur coefficient d'absorption... - l'arrêt du tapis convoyeur provoquera la destruction des circuits à l'intérieur du four. |
| | I.R. courts | - ils chauffent mieux les corps semi-transparents. Ils produisent un échauffement équivalent de la soudure, substrat et composants noirs, alors que les composants blancs y sont peu sensibles. |
| | I.R. moyens | <ul style="list-style-type: none"> - ils sont généralement absorbés. - sur les composants blancs, ils n'ont aucune capacité de pénétration. Ils produisent un échauffement en surface. |
| | Environnement | - le soudage par I.R. n'est pas nuisible pour son environnement. |
| | Coût | - ce mode de soudure demande un coût d'entretien et de maintenance le plus faible. |

| Paramètres | | Remarques |
|--|------------|--|
| T e m p é r a t u r e | Profil | - vitesse de montée ou de descente en température facilement ajustable procurant une grande souplesse dans l'établissement du profil de température. |
| | Composants | - la température des composants et du substrat dépend d'un équilibre thermique entre les rayonnements incidents, réfléchis et la conduction. |
| | Gradients | - des variations importantes de température apparaissent entre les composants et le substrat ainsi qu'en différents points du substrat. Cette remarque est valable surtout pour le circuit imprimé où sa mauvaise conduction thermique ne lui permet pas d'uniformiser la distribution de la chaleur à l'intérieur du matériau. Ces écarts de température peuvent être limités en utilisant des longueurs d'ondes très courtes. |
| | Four | <ul style="list-style-type: none"> - la température du four devra être ajustée pour le composant nécessitant le plus de chaleur (soit par sa taille soit par sa couleur), ce qui signifie que d'autres composants plus petits vont en souffrir. - le faible coefficient de transfert de chaleur est compensé par des températures de travail élevées. - il n'est pas nécessaire de mettre en service l'appareil longtemps à l'avance. |

2.5. Nettoyage des circuits

Après l'opération de brasage, le nettoyage s'impose pour tout circuit électronique en particulier si la brasure a été faite avec un flux actif ; ceci pour éliminer toute forme de contamination sous forme d'acides, de sels, d'agents ioniques, de produits de réaction et de décomposition de flux, de graisse, de poussières, d'impuretés...

Le niveau de qualité final d'une carte en fonctionnement est lié à son niveau de nettoyage. Les contaminants peuvent entraîner une dégradation des composants, altérer leurs caractéristiques électriques se traduisant par un dysfonctionnement prématuré, une défaillance lente mais certaine du circuit et ceci d'autant plus qu'ils sont souvent la cause de problèmes affectant dans le temps les soudures. En outre, ils peuvent empêcher toute protection ultérieure d'adhérer au substrat. Si de plus les circuits sont déjà recouverts d'une couche de protection, les contaminants non éliminés peuvent produire des boursouffures ou vésicules dans le film protecteur.

Les effets des contaminants se manifestent d'autant plus que les circuits d'assemblage voient leur taille se réduire continuellement alors que la densité des composants ne cesse d'augmenter avec des pistes conductrices de plus en plus fines et de plus en plus rapprochées.

La méthode de nettoyage la plus couramment utilisée, celle qui met en oeuvre les CFC, connaît actuellement de profonds bouleversements liés au développement de nouvelles technologies qui ne font plus appel à des produits entraînant la destruction de la couche d'ozone.

Trois procédés de nettoyage sont actuellement proposés :

- en milieu aqueux ;
- en milieu semi-aqueux ;
- en milieu émulsionné semi-aqueux.

Le choix d'une variante dépend de la conception du circuit imprimé, des spécifications de nettoyage et de la quantité de production.

Procédé de nettoyage en milieu aqueux

1) nettoyage par agitation mécanique de la solution : vibreur ultrasonique. Elimination de tous les résidus de flux hydrosolubles pour tous types de flux et de crème à braser.

2) rinçage par immersion + eau désionisée délivrée par jet : supprimer les résidus de détergents.

3) rinçage par immersion + eau désionisée délivrée par jet : ôter toute trace de contamination ionique.

4) séchage dans une chambre par courant d'air chaud.

Procédé de nettoyage en milieu semi-aqueux

1) nettoyage par agitation mécanique : turbulences dans le bain, 35°C à 50°C durée de l'opération : 1 à 3 mn. Eliminer tous les résidus de flux résineux et de crème.

2) rinçage par immersion + eau déionisée délivrée par jet, durée 3 mn. Suppression des impuretés ioniques et des traces de composés organiques.

3) rinçage par immersion + eau désionisée filtrée. Rinçage de finition.

4) Séchage dans une chambre par courant d'air chaud.

Procédé de nettoyage en milieu émulsionné, semi-aqueux

Le solvant utilisé forme une émulsion avec l'eau. Il peut être séparé des contaminants sans utilisation de filtres absorbants. Le procédé est identique au précédent avec cependant au moins une étape de rinçage supplémentaire.

2.6. Test et contrôle des PCB

2.6.1. Le test in situ

Pour effectuer le test in situ d'une carte, il faut appliquer celle-ci sur un lit à clous. Et pour cela, la grande majorité des interfaces utilise un système de dépression : la carte est « aspirée » contre le lit à clous. Ce mécanisme est assez compliqué, les sondes sont fixées dans une planche immobile solidaire du testeur. Au-dessus de cette planche, une planche mobile (montée sur ressort ou sur joint souple) peut monter ou descendre sous l'effet de dépression. Cette plaque mobile est percée de sorte que les sondes puissent la traverser lorsqu'elle descend. C'est sur cette plaque que l'on place la carte à tester (un point de test en regard de chaque trou). La dépression assure le maintien de la carte contre la plaque mobile qui descend jusqu'à ce que les sondes entrent en contact avec les points de test. Cette technique classique est transportable pour le test in situ des cartes.

Mais cette technologie nécessite de prendre certaines précautions. Ainsi, il faut éviter la concentration des points de test sur une petite surface : les forces exercées par les sondes (100 g/pointe environ) tendent à déformer la carte. Lorsque le substrat est mince ou rigide et fragile, cette concentration de forces peut entraîner une rupture. Il faut éviter ce genre de problèmes, utiliser un mécanisme qui compense les forces appliquées par les sondes. Les cartes comportant des CMS sur chaque face, prises en sandwich entre deux lits à clous, sont moins sensibles à ces déformations.

Pour s'assurer du bon positionnement des sondes par rapport aux points de test, il est important de tenir compte des tolérances mais aussi du positionnement de la carte pendant le test.

2.6.2. Le test fonctionnel

Principe : la carte en test est analysée via son connecteur (ou ses connecteurs) en activant sa ou ses fonctions.

La programmation est complexe car il faut trouver des vecteurs capables de trouver des fautes. Il y a pour cela deux conditions : il faut faire évoluer le signal jusqu'à une sortie.

Le coût de programmation sera dépendant de la testabilité, c'est-à-dire entre autres, de la visibilité (ou profondeur du circuit), de la contrôlabilité de l'initialisation et de la synchronisation (contrôle d'horloge), etc ...

Ce test bien conçu ne sacrifie pas à la productivité. Les données fournies doivent immédiatement entraîner la réparation de manière à corriger la fabrication et tendre vers un taux nul de défauts.

2.6.3 Comparaison des stratégies

La comparaison des domaines de performances et des limites conduit aux conclusions suivantes :

- le test fonctionnel est idéal pour une carte bonne.
- le test fonctionnel est très exigeant en testabilité. Il exige également l'accessibilité aux équipotentielles.
- le test in situ est efficace pour une carte mauvaise.
- le test in situ est limité aux fautes de fabrication.
- le test in situ limite ses exigences de testabilité à l'accessibilité des équipotentielles.

3. Le marché du PCB

3.1. Marché mondial du PCB de 1987 à 1992

Le tableau suivant présente l'état du marché mondial des circuits imprimés de 1987 à 1992. Ce tableau est tiré de l'étude réalisée par l'OMSYC en 1993. Nous ne possédons pas de données plus récentes sur ce sujet pour l'instant.

| | Millions de dollars à prix courants et aux taux de change de 1992 | | | | | | Part de marché relative | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|------|
| | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1987 | 1992 |
| Allemagne | 915 | 1252 | 1554 | 1712 | 1965 | 2201 | 8.0 | 11.3 |
| France | 676 | 694 | 652 | 778 | 1013 | 1055 | 5.9 | 5.4 |
| Italie | 240 | 323 | 377 | 418 | 475 | 527 | 2.1 | 2.7 |
| Royaume Uni | 646 | 741 | 775 | 671 | 659 | 606 | 5.6 | 3.1 |
| Reste de l'Europe | 881 | 952 | 1069 | 1145 | 1240 | 1332 | 7.7 | 6.9 |
| Europe | 3358 | 3962 | 4427 | 4724 | 5352 | 5721 | 29.3 | 29.5 |
| Amérique du Nord | 3837 | 4369 | 6537 | 5574 | 5752 | 5927 | 33.5 | 30.5 |
| Japon | 2976 | 3520 | 3621 | 4138 | 4682 | 5147 | 25.9 | 26.5 |
| Autres Pays | 1299 | 1436 | 1865 | 2086 | 2357 | 2631 | 11.3 | 13.5 |
| Total | 11470 | 13287 | 16450 | 16522 | 18143 | 19426 | 100 | 100 |

La croissance moyenne annuelle du marché des circuits imprimés est de 11,1%. On peut constater qu'il n'existe pas de marché du PCB majoritaire d'une région sur une autre.

3.2. Synthèse de l'enquête sur la fabrication des circuits imprimés nus

Afin de mieux cerner les technologies et les prix pratiqués actuellement et à l'avenir dans la fabrication des circuits imprimés une enquête a été menée auprès d'une quinzaine de fabricants de circuit imprimés. Pour l'instant nous n'avons reçu que 6 réponse à notre questionnaire.

Cette synthèse est basée sur 6 réponses aux questionnaires envoyés. Elle sera mise à jour si d'autres réponses sont obtenues.

Tous les prix relatifs sont donnés par rapport à une technologie de référence. Celle-ci correspond à un circuit FR4, 4 couches, classe IV, épaisseur 1,6mm, finition SnPb électrolytique. Pour des productions en grand volume, le prix moyen du dm² pour ce type de substrat est d'environ 25 francs.

Les substrats

Le substrat utilisé en majorité est le FR4. Toutefois toutes les réponses indiquent que le FR4 tend à être partiellement remplacé par le FR4 multifonctions, matériau qui supporte mieux les hautes températures, et dont le prix se rapproche de celui du FR4 classique.

Aucune des entreprises ayant répondu n'utilise de substrat CEM3.

| Matériau | Actuelle-ment utilisé | Pouvant être utilisé à l'avenir | Prix relatif moyen | Ecart type | Nb rép | Domaine d'application |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------|------------|--------|--|
| FR2 | 8% | 0 | 0,70 | 0,14 | 2 | Automobile, Grand public |
| FR3 | 1% | 0 | 0,78 | 0,04 | 2 | Automobile, Grand public |
| CEM1 | 5% | 0 | 0,87 | 0,11 | 3 | Grand public, autres |
| CEM3 | | | | | | Grand public |
| FR4 (epoxy std) | 56% | - | 1,00 | 0,00 | 6 | Informatique, Télécom, Industrie, autres |
| FR4 (epoxy multifonctions) Tg=150 | 7% | ++ | 1,08 | 0,04 | 2 | Informatique |
| FR4 (epoxy multifonctions) Tg=180 | 7% | ++ | 1,37 | 0,46 | 6 | Informatique, Télécom |
| BT-Epoxy | 1% | + | 2,08 | 1,14 | 4 | haute fréquence, Informatique, Télécom, Auto |
| Polyimide | 10% | + | 1,78 | 0,30 | 4 | flexible, Automobile, Militaire, Industrie |
| PTFE | 6% | + | 3,75 | 0,35 | 2 | antenne, Militaire, Télécom |

Les différentes catégories (ou classes)

Les résultats présentés sont rapportés aux dimensions de pistes définies par la norme française. Les réponses nous étant parvenues pour l'instant étant dans une large majorité d'origine française, les réponses des sociétés étrangères ont été rapportées dans le référentiel français. La catégorie 7 correspond à des dimensions inférieures à celles de la classe 6.

| Catégories | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Prix relatif | 0,94 | 0,95 | 1,00 | 1,18 | 1,43 | 2,08 |
| Ecart type | 0,10 | 0,07 | | 0,07 | 0,14 | |

Le nombre de couches

Peu de réponses pour les circuits comportants moins de 2 faces en trous métallisés.

Pas de réponses pour des PCB 2 faces trous polymères.

Bonne cohésion pour le reste des réponses.

| Nb couches | Prix relatif | Ecart type | Nb réponses |
|------------|--------------|------------|-------------|
| 1 | 0,31 | 0,12 | 2 |
| 2 nv | 0,15 | 0,21 | 2 |
| 2 ph | | | |
| 2 mh | 0,53 | 0,14 | 5 |
| 4 | 1,00 | 0,00 | 6 |
| 6 | 1,38 | 0,12 | 6 |
| 8 | 1,76 | 0,20 | 6 |
| 10 | 2,09 | 0,17 | 4 |
| 12 | 2,45 | 0,17 | 4 |

nv : no via

ph : polymerised hole

mh : metallized hole

Épaisseur finale du circuit

Pour de faibles épaisseurs les avis sont divergeants. Certaines entreprises font payer un circuit de faible épaisseur moins cher que le standard, ce qui explique le fort écart type obtenu pour les faibles épaisseurs.

| Épaisseur | Prix relatif | Ecart type | Nbréponses |
|-----------|--------------|------------|------------|
| 3.2mm | 1,34 | 0,14 | 6 |
| 2.4mm | 1,17 | 0,04 | 6 |
| 1.6mm | 1,00 | 0,00 | 6 |
| 1.4mm | 1,00 | 0,00 | 4 |
| 1.2mm | 1,00 | 0,04 | 4 |
| 1.0mm | 1,01 | 0,06 | 4 |
| 0.8mm | 1,05 | 0,09 | 4 |
| 0.4mm | 1,16 | 0,26 | 4 |

Les différents types de finition

Les résultats sont homogènes.

| Type de la finition | Prix relatif | Ecart type | Nbréponses |
|---------------------|--------------|------------|------------|
| SnPb selective(HAL) | 1,06 | 0,05 | 6 |
| SnPb electrolytic | 1,00 | 0,00 | 5 |
| PassivedCu | 0,96 | 0,01 | 3 |
| NiAu chemical | 1,14 | 0,04 | 6 |

Autres

Le test électrique des circuits est toujours compris dans le prix.

Une seule entreprise a donné un tarif pour la sérigraphie : le surcoût est de l'ordre de 2 à 3%.

4. Conclusion

Nous avons cherché au cours de cette étude à identifier les différentes étapes et machines nécessaires à la réalisation d'un circuit PCB. Cette étude constitue une base à partir de laquelle nous essaierons d'évaluer l'impact économique des différentes étapes du processus de fabrication.

En tant qu'étude de base, nous nous sommes limités à l'étude des technologies existantes. Un suivi régulier des publications sur le sujet nous permettra d'observer les évolutions possibles de cette technologie dans les prochaines années.

Enfin, en recoupant cette étude avec celles menées sur les modules multichip, la technique COB et les hybrides, nous pourrions identifier les technologies communes aux différentes filières technologiques.