

Reducción de deformación por pandeo en microcircuitos electrónicos por tratamiento térmico

VARGAS-Lidia[†], CABRERA-Eduardo, VALDEZ-Benjamín[†] & OLIVEROS-Amparo[†]

Universidad Politécnica de Baja California, Calle de la claridad S/N, Col. Plutarco Elías Calles, CP. 21376. Mexicali, Baja California. México.

Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Blvd. Benito Juárez y calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este. CP. 21280, Mexicali, Baja California. México.

Recibido 28 de Abril, 2015; Aceptado 9 de Junio, 2015

Resumen

El proceso de ensamble y empaquetamiento de microcircuitos semiconductores involucra estrés mecánico residual producto de la diferencia en el coeficiente de expansión térmica CTE para los diferentes materiales que forman el microcircuito, combinado con efectos como una limitante importante en el ensamble y prueba de microcircuitos. La modificación al proceso fue validada por pruebas de confiabilidad, donde se demostró que aún con un tratamiento térmico adicional, el cliente conserva oportunidades de reflujo adicionales, tal y como se establece en la descripción del producto. Al reducir la deformación por pandeo de los microcircuitos, la operación de prueba mejoró en el rendimiento por lote. Así como, los indicadores de utilización del equipo.

Semiconductores, ensamble y prueba, pandeo, tratamientos térmicos

Abstract

The process of packaging and test of semiconductor chips involves conditions of high pressure and temperature that induce warpage. Residual mechanical stress resulting from the difference in the coefficient of thermal expansion CTE for the different materials forming the chip, combined with thermomechanical effects recognized limiting the assembly and testing of microcircuits. Shadow Moiré method was used to measure by light inference without contact and complete information about the surface warpage at different temperatures. An alternative is presented by heat treatment that reduces warpage. The modification process was validated by reliability test showing that even with this additional heat treatment, the client retains additional opportunities of reflux, as stated in the product. Test operations improved yield and indicators of equipment utilization and as warpage was reduced on microcircuits.

Semiconductor packaging and test, warpage, thermal treatments

Citación: VARGAS-Lidia, CABRERA-Eduardo, VALDEZ-Benjamín & OLIVEROS-Amparo. Reducción de deformación por pandeo en microcircuitos electrónicos por tratamiento térmico. Revista de Tecnología e Innovación 2015, 2-3:538-548

[†] Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Las tendencias en el empaquetamiento de microcircuitos electrónicos incluyen: 1) Continuar la miniaturización, 2) Circuitos multifunción o sistemas. 3) Incrementar el número de capas en el laminado, 4 a 8 capas. 4) Líneas y micro vías ultra delgadas, 5-15 μm . 5) Alta densidad de componentes, reduciendo la distancia entre ellos y el tamaño de los mismos. [1]. Como se muestra en la figura 1, se ha encontrado que la deformación por pandeo representa un problema para el ensamble desde la oblea de silicio, en las etapas de rebajado de espesor, esta operación se realiza en frío para minimizarlo. Al igual que falla de circuitos BGA presentando fallas en campo o muerte prematura. [3].

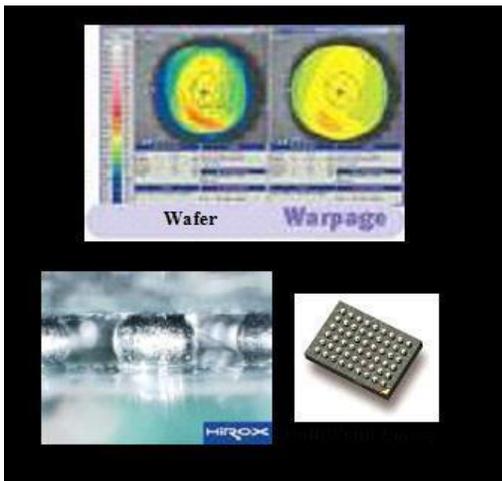


Figura 1 Problemas de ensamble relacionados con pandeo en la oblea de silicio o de contacto en los circuitos BGA.

Obtener y mantener sustratos razonablemente planos resulta crítico para el éxito de la mayoría de las operaciones de ensamble, limitando la capacidad de la manufactura en: Montaje de componentes, pegado de dados, alambrado, moldeo, cortado y prueba. La deformación por pandeo es inducida principalmente en los procesos de curado y enfriado de resinas, como el plástico de moldeo y adhesivos. Una vez que se alcanza el punto de gel, los componentes son unidos en una red interconectada del polímero y no se pueden expandir o contraer libremente. Las diferencias en la contracción química o los coeficientes de expansión térmica pueden causar deformación. El pandeo depende de la geometría y las propiedades de los componentes del paquete, así como las condiciones del proceso, esta también relacionado con el tamaño de dado de silicio, su geometría, el tamaño del circuito y las propiedades del plástico. En este estudio se revisa una alternativa de reducción de la deformación de pandeo por tratamiento térmico.

Materiales compuestos

Materiales diseñados que incluyen dos o más materiales, con características físicas o químicas muy diferentes, los cuales permanecen separados a nivel macroscópico, forman un solo componente con características modificadas y en su estructura muy superiores.

El material compuesto más primitivo es el adobe, que incluye paja y fango, para que juntos puedan formar ladrillos y usarlos en la construcción de casas. La Biblia menciona cómo los Israelíes opresos por el faraón egipcio eran forzados a hacer ladrillos sin la paja, en deterioro de sus condiciones de vida.

Actualmente, los ejemplos más avanzados se encuentran en aplicaciones espaciales para ambientes y condiciones muy exigentes. Los ejemplos más comunes incluyen el pavimentar caminos usando acero y Pórtland o concreto reforzado con asfalto o silicio; las duchas y tinas de baño hechas con fibra de vidrio, la superficie sólida, de imitación granito en fregaderos y cubiertas de cocina de mármol cultivado. Los materiales compuestos se encuentran también extendidos en la naturaleza, tales como el hueso y la madera.

En un material compuesto, los componentes cumplen dos funciones primordiales en la estructura del material:

Matriz y refuerzo. El material de la matriz rodea y apoya los materiales del refuerzo, manteniendo sus posiciones relativas. Los refuerzos imparten sus características mecánicas y físicas, realizando las características de la matriz. Se produce sinergismo, con características no disponibles en los materiales originales. Debido al total de materiales matriz y refuerzo disponibles, los potenciales de diseño son importantes.

Los principales factores del diseño involucran el tipo de matriz, refuerzo elegido y las cantidades a requerir. Solo la demanda en grandes cantidades justifica una inversión de capital y tecnología.

La mayoría de los materiales matriz son de tipo resina. Los más comunes son poliéster, vinil ester, fenólicos, poliamida, polipropileno. Los refuerzos más comunes son fibra o minerales molidos.

El moldeo se utiliza como operación principal en la fabricación de materiales

compuestos, con las siguientes ventajas, ya que permite unir el refuerzo y la matriz, alcanzar un volumen menor y evitar vacíos en el material final. Los procesos de moldeo son: moldeo abierto (moldes), cerrado (alta o baja temperatura) y autoclave (alta temperatura y alta presión). Otros métodos son: moldeo a presión por transferencia, compresión, fundido y fundido continuo. Las propiedades físicas de los materiales compuestos son generalmente no isotrópicos (la dureza no depende de la orientación de las fuerzas y momentos aplicados). Principalmente definidas por el Módulo de Young, la resistencia al rasgado y la relación de Poisson.

Fabricación de tableros (PWB) para semiconductores

El método más conveniente para montar e interconectar componentes electrónicos es usando un tablero PWB, Figura 2.

Los alambres para las interconexiones son delgadas líneas de un conductor y el componente Figura 2. Tableros de construcción diferente tamaño, mismo número de parte.

De apoyo, una hoja de material aislante que cumple además otros muchos usos. Los tableros de capas múltiples son usados cuando la densidad de componentes, es tal que una sola capa, resulta insuficiente para el total de interconexiones requeridas.

Las capas múltiples pueden ser de uno o dos lados, con capas conductoras en medio como en un sándwich, todas unidas por capas de adhesivo epóxico parcialmente curado. Una configuración de capas múltiples consiste en un tablero con 5 capas (El plano de tierra, el plano de potencia, la capa superior de montaje y dos capas de corte), pero se han usado tableros de hasta 42 capas.

El proceso de manufactura de los tableros involucra la combinación de pocas operaciones básicas. La capa conductora para interconexión, puede ser construida por un proceso aditivo o substractivo. En el proceso aditivo, el conductor es selectivamente depositado sobre el aislante, para crear una línea de conducción. En el proceso substractivo una hoja es selectivamente removida, dejando la línea de conducción sin remover, éste es más comúnmente usado en los tableros orgánicos.

Un laminado revestido de cobre es un material básico para la manufactura de tableros. Consiste de resina parcialmente curada, o poliamida, hojas de vidrio con hoja de cobre en cada lado. El proceso de fabricación típico consiste de las siguientes operaciones:

- Sellado de la superficie del tablero.
 - Separación del tablero del panel.
 - Prueba eléctrica.
 - Ensamble de componentes.
 - Inspección Final.
- Temperatura de transición vítrea (Tg).**
- Los materiales cristalinos tienen punto de fusión bien definido. El punto de fusión es la temperatura, a la cual el arreglo cristalino se destruye por completo al calentarlo. Sin embargo, los polímeros presentan un rango de temperatura sobre el cual, el cristal se desvanece. Cuando un polímero es enfriado se contrae debido a la disminución en la vibración térmica de las moléculas y una reducción en el espacio libre interatómico. En el caso de un polímero amorfo, esta contracción continúa por debajo del punto de fusión. Por otro lado, para el polímero cristalino la temperatura de transición vítrea por debajo de la temperatura de fusión se comporta como un líquido súper-enfriado y se vuelve extremadamente rígido con una densidad extremadamente alta, contrario al punto de fusión donde ocurre una transformación del líquido a la fase cristal.
- El material por debajo de la Tg es esencialmente un líquido muy viscoso. Tal fenómeno es comúnmente observado en vidrio inorgánico compuesto de silicatos. En el caso de los polímeros amorfos se trata de estructuras de vidrio hechas de moléculas orgánicas.
- Aunque la Tg no representa una transición de fase termodinámica, en muchas maneras es parecido al punto de fusión para los sólidos cristalinos. Muchas propiedades físicas cambian abruptamente al alcanzar la Tg.
- Preparación de la distribución en el tablero ó Artwork
 - Preparación del material.
 - Alisar, Perforar, quitar sobrante y limpiar.
 - Recubrimiento de cobre sin corriente.
 - Imagen. Aplicación en seco o líquido de la capa resistente. Máscara.
 - Recubrimiento con electricidad.
 - Remoción de la capa resistente.
 - Pulido con ácido.
 - Hacer conexiones eléctricas en el tablero.
 - Horno de Curado o reflujo.
 - Inspección.

El Poliestireno tiene una Tg de 100 °C y es rígido a temperatura ambiente. El caucho tiene una Tg de -75°C y es blando a temperatura ambiente. La Tg es función de la estructura del polímero. Aunque la Tg de los vidrios inorgánicos son al menos 100°C mayores que los plímeros. Ya que los vidrios inorgánicos presentan enlaces mixtos iónico covalente y mayor entrecruzamiento resultando en una mayor estabilidad térmica. Los polímeros presentan enlaces covalentes y de Van Der Waals.

Tableros con base de PTFE y dieléctrico mixto

Uno de los mejores diseños involucra el uso de laminados con base PTFE (politetrafluro etileno o teflón) en una técnica llamada de dieléctrico mixto. Capas de FR-4 con capas de vidrio relleno y con PTFE, en una estructura de varias capas. Este procedimiento permite diseñar circuitos de alta frecuencia que requieren una pérdida baja en la capa superior de PTFE, mientras que al mismo tiempo se transportan señales digitales menos críticas a un bajo costo.

Además, es posible alcanzar un alto nivel de integración en su construcción y la relación costo/funcionamiento alcanza mayor fidelidad. Aunque no está libre de problemas debido a los agresivos tratamientos con plasma y químicos para trabajar el PTFE, los cuales son agresivos al FR-4 y la rugosidad burda del terminado provoca fibras que se desprenden afectando el recubrimiento. Una dificultad adicional al usar dieléctricos mixtos es controlar lo plano del tablero final. Las inherentes diferencias en las propiedades elásticas y los coeficientes de expansión térmica causan pandeo después del proceso de laminado. El aplanado por constricción a altas temperaturas, representa una mejora disponible para este difícil problema. El proceso debe ser bien controlado respecto a las pendientes de calentamiento y enfriamiento. Aún cuando al tablero se aplanan, cierto pandeo regresa cuando se libera el mecanismo de constricción. Por supuesto que sería preferible eliminar el pandeo desde la etapa de laminado, en vez de añadir costo y etapas adicionales al proceso final. Además de eliminar la necesidad de procesar un tablero pandeado a través de perforado o chapeado. Una alternativa consiste en usar un autoclave o laminado "Isostático". Este tipo de laminado o una variación es usado en el sellado de capas múltiples a baja temperatura para cerámicos o LTCC [11].

La naturaleza del proceso de fabricación requiere sustratos que sean bastante uniformes y planos lisos con deformación mínima o distorsión. La estabilidad dimensional es otra característica importante, para asegurar que existe un mínimo desplazamiento durante el proceso. Se están realizando experimentos con laminados no tejidos para eliminar distorsión causada por la cadena misma.

Otros se basan en un alto módulo como las Aramidas. Se espera una respuesta debido al cada vez mayor número de micro vías y la constante reducción en su tamaño.

Metodología

Franjas de Moiré

En este proyecto TherMoiré permitió medir por inferencia la deformación del tablero sin contacto y obtener información completa acerca de la superficie. La sombra o franjas de Moiré pertenecen al campo de la óptica, mediciones por inferencia, sin contacto, que proporcionan información completa acerca de la superficie. La idea de sobreponer una rejilla y crear una sombra como referencia para un sistema de medición es antigua. Es Lord Rayleigh quien generalmente recibe el crédito como el primero con una publicación científica referenciado a Moiré. Rejillas lineales desarrolladas en los 50's y 60's para fines de metrología son ahora tecnología establecida. El uso de rejillas como una herramienta experimental para medir la deformación en 2 dimensiones fue analizado en teoría por Guild y puesta en práctica por Post. La interferencia de Moiré que incrementa grandemente la sensibilidad en los análisis de estrés y deformación, fue desarrollada en los 70's, mientras que los métodos más precisos de corrimiento aparecieron en los 80's. Las mejoras en el láser para iluminación y los detectores de imagen de estado sólido significan que la tecnología ha avanzado a un punto donde es ahora bien entendida, flexible y capaz de generar grandes cantidades de datos en una forma fácil de entender y que puede ser precisamente cuantificada.

Se produce un patrón de interferencia en forma de franjas de Moiré cuando dos patrones similares de líneas delgadas y oscuras se traslapan. Las medidas relacionadas con la franja o sombra de Moiré, se han utilizado con éxito para caracterizar superficies como los substratos o tableros electrónicos, pequeños componentes o áreas más grandes.

Las medidas son hechas colocando un cristal bajo en cuarzo, con líneas paralelas igualmente espaciadas grabadas en agua fuerte. Esta sirve como la rejilla de referencia. Una sombra de la rejilla de referencia es proyectada sobre la superficie del espécimen, usando luz blanca en un ángulo de 45 grados a través de la rejilla. Si el espécimen es plano y paralelo a la rejilla de la referencia, no se produce ningún patrón de la franja de Moiré. Cuando la superficie del espécimen se curva, comba, o pande, las franjas del Moiré se producen como resultado del patrón de interferencia geométrico creado entre la rejilla de la referencia y la rejilla de la sombra. El patrón de Moiré que resulta se utiliza para caracterizar la deformación en la superficie del espécimen. Para mas detalles del equipo utilizado consulte la figura 3.



Figura 3 Equipo TherMoiré PS400 con cámara de calentamiento.

Cada franja representa la distancia desviada fuera de una posición plana. Por ejemplo, si se utilizan 100 líneas por pulgada en la rejilla, cada franja de la imagen que resulta representa una dislocación de 1/100 pulgadas. Al alternarse franjas negras y blancas, es posible contarlas para obtener un valor de la desviación. La sensibilidad del equipo es un $\frac{1}{2}$ del ancho de la rejilla. Se obtienen mejoras en la resolución, cuando se mueve el plano del espécimen, y se sigue la franja al cambiar de lugar y fase.

Resultados

Pandeo por operación

Para un total de 180 tableros recopilados del mismo número de parte en proceso, se midió la deformación tiras de 180 x 60 mm para cada operación, usando el TherMoiré. Encontrando que el pandeo se incrementa a lo largo del proceso y que la operación de curado de plástico posterior al moldeo o PMC fue la operación con pandeo más pronunciado, alcanzando 100 milésimas de pulgada o 1.4%. Midiendo por separado las 4 unidades de moldeo individuales de 60 x 60 mm, el máximo alcanzado fue de 20 milésimas de pulgada o 0.85% predominando también PMC y las galletas centrales. (Figura 4)

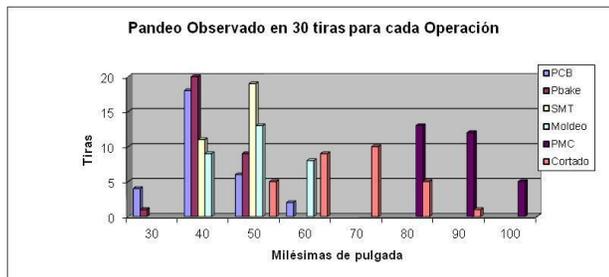


Figura 4 Deformación encontrada en la tira usando TherMoiré en las operaciones de ensamble

Simulación del proceso de curado posterior a moldeo usando TherMoiré

Se midieron 3 tableros moldeados con plástico, una medición de desplazamiento fue realizada cada 300 segundos con Thermoire. El material fue sometido a calentamiento tratando de reproducir las condiciones de curado posterior a moldeo ó PMC, siguiendo un perfil de la siguiente manera: 1) Pre calentamiento: 40 min de 30° C a 165° C, 2) Temperatura constante por 5 h a 165° C y enfriamiento con aire de 165° C a 80° C en 40 min, se observó un incremento en el pandeo por galleta de 5 a 7 y hasta 10 milésimas de pulgada. Al final del primer PMC, se programó el equipo para alcanzar 230° C en 40 min y se observó que después de alcanzar 210° C, el pandeo disminuyó abruptamente alcanzando niveles menores a 2 milésimas a 220° C. Como se muestra en la figura 4. Este comportamiento coincide con reportes del fabricante del tablero que establecen que la temperatura de transición vítrea o Tg es 210° C, sin embargo, el mayor pandeo se observó en las pendientes de calentamiento alrededor de 120° C y parece estar relacionado con la temperatura y los coeficientes de expansión del material, más que con la pendiente de calentamiento, ya que la pendiente de calentamiento fue de 3.3° C/min o 0.05° C/s muy baja comparada con las pendientes de pre calentamiento en el horno de reflujo menores a 2° C/s. (Figura 5)

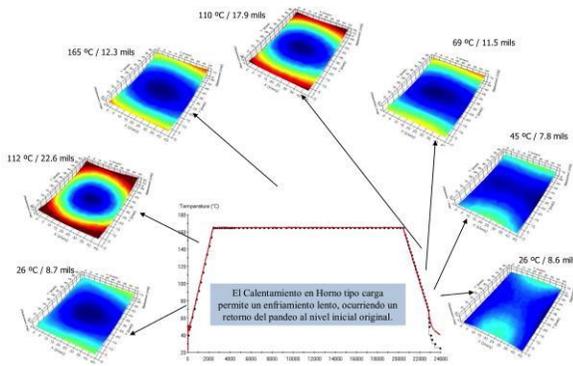


Figura 5 Simulación en TherMoiré de curado posterior a moldeo PMC y horno de reflujo a 220° C.

Caracterización de pandeo simulando PMC o curado posterior a moldeo en TherMoiré

Se buscó confirmar los datos de la primera simulación. Calentando por 40 min de 30 a 165° C, luego manteniendo a 165° C por 5 h y enfriamiento de 165 a 50° C en 40 min. Se encontró que el pandeo se incrementó a lo largo del calentamiento y retornó a su punto inicial posterior al del enfriamiento. Sin embargo, una muestra de 100 circuitos individuales recuperó el 31% de las piezas posterior al tratamiento térmico. (Figura 6)

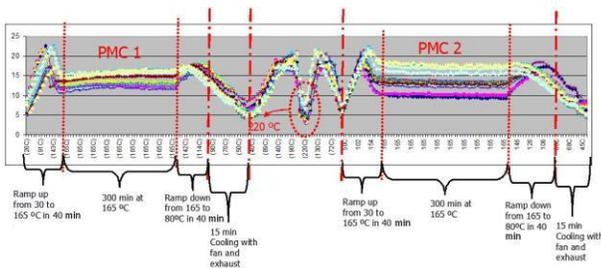


Figura 6 Caracterización de pandeo en curado posterior a moldeo por simulación en TherMoiré.

Caracterización del pandeo simulando el perfil de reflujo en TherMoiré.

El calentamiento y enfriamiento en el horno de banda con calentamiento por convección son mucho más rápidos. Se confirmó el mínimo en pandeo al alcanzar 220° C con una reducción mayor al 40%, se sospecha que un enfriamiento rápido no permite que el pandeo regrese, ocurriendo una disminución posterior al tratamiento del 40%. De mayor impacto es la disminución encontrada para una muestra de 100 circuitos individuales ya cortados y rechazo de prueba que recupero el 90% de las piezas posterior al tratamiento térmico. El tiempo completo del ciclo de calentamiento estuvo por debajo de los 5 min. (Figura 7)

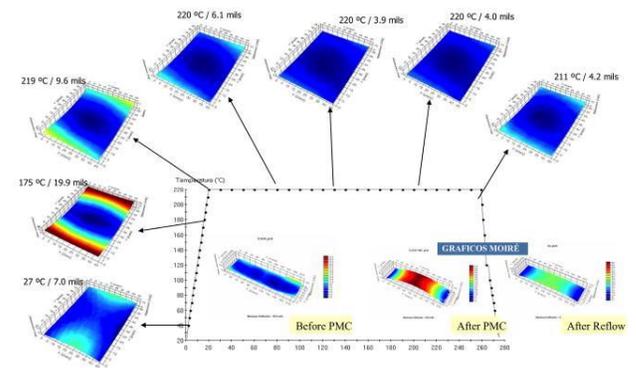


Figura 7 Caracterización de pandeo en horno de reflujo por simulación en TherMoiré

Reducción del pandeo usando el horno de reflujo a 220° C por 3 minutos en tiras

Después de comprobar la alta recuperación de circuitos en material cortado o circuitos individuales, se encontró lo poco viable que representaba esta opción debido al alto manejo de las piezas y las horas hombre requeridas, por lo que se propuso medir la reducción en el pandeo utilizando tiras listas para cortado con máximo estrés producto del curado posterior a moldeo o PMC. Se encontró una reducción del 40% y se perfiló como una opción para reducir el pandeo. (Figura 8)

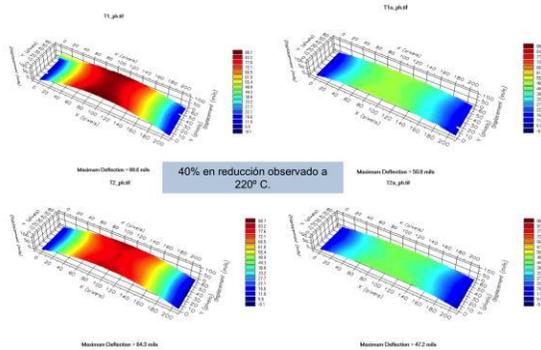


Figura 8 La sombra de Moiré muestra una reducción del 40% en el pandeo de tiras calentado a 220° C.

Resultados de confiabilidad apoyando un cambio de proceso que incluya una nueva operación, enviando material en tiras por reflujo antes de cortado

Se evaluaron tres números de parte diferentes para validar el cambio. Ya que juntos los 5 números de parte afectados, representaban 50% del volumen diario. 500 piezas con reflujo y 500 piezas de control sin reflujo. Identificando las piezas dentro y fuera del perímetro en el módulo de moldeo.

La pruebas de confiabilidad incluyeron ciclos térmicos entre -43 y 120° C, prueba de humedad con un nivel MSL3/250, prueba HAST acelerada de estrés con alta humedad y prueba HTOL de operación a alta temperatura. Obteniendo resultados positivos para todos los números de parte evaluados. Resultados de confiabilidad confirmaron que después de añadir +1X reflujo, los clientes contarían aún con 3X reflujo para el montaje de los circuitos.

Mejora en el rendimiento por lote al disminuir pandeo

PRODUCCION (Piezas [%])	Die	Trim	Hub	Flu	G2	47	Reduccion	% Reduccion
A	2.27	1.15	-	1.88	1.38	0.70	0.88	-50
B	0.75	0.25	0.25	0.25	0.25	0.22	0.88	-74
C	1.21	-	1.50	1.50	1.50	0.82	0.98	-80
D	1.51	0.50	-	1.12	1.12	2.17	4.25	-70
E	9.30	9.82	9.12	9.28	9.28	1.40	1.38	-57

Tabla 1 Rendimiento histórico y reducción alcanzada al incluir +1X reflujo.

Conclusiones

Se corrieron 12 millones de unidades para tres números de parte diferente, con una recuperación observada en el rendimiento al final del ensamble y prueba cercana al 1%, muestra suficiente para liberar el 60% de la producción diaria, para que corra bajo el flujo modificado incluyendo +1X reflujo antes de cortado. La modificación al proceso fue validada por el laboratorio de confiabilidad de la compañía en California. Aún cuando se envía el material por un tratamiento, el cliente conserva 3 reflujo adicionales tal y como se establece en la descripción del producto. Al tiempo que se reduce el pandeo en el horno como se demostró, cada reflujo mueve la estructura como se observó en la simulación con TherMoiré pudiendo ocasionar fracturas o fallas y disminuir la vida del circuito.

La operación de prueba mejoro en promedio un 1% y se reportaron mejoras en la utilización de los equipos de prueba y singulado, como beneficio adicional de esta modificación incrementando la producción de piezas buenas y el tiempo de ciclo.

Se piensa que a medida que se disminuya el espesor del plástico de moldeo para hacer los tableros más delgados, esta solución permitirá una exitosa transición.

Se espera que esta solución sea temporal y proporcione el tiempo necesario para que el pandeo sea estudiado a fondo y se encuentren alternativas que resulten en un mejor control del pandeo en todo el proceso de ensamble del microcircuito.

Referencias

Sounak Banerji, P. Markondeya Raj, Swapan Bhattacharya, and Rao R. Tummala. Warpage-Induced Lithographic of FR-4 and the need for Novel Board Materials for Future Microvia and Global Interconnect Needs. IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 28, No. 1. February 2005. Pages 102-113.

Swapan K. Battacharya, I. Charles Ume, and Anh X. H. Dang. Warpage Measurement of Large Area Multi-tilted Silicon Substrates at Various Processing Conditions. IEE Transactions on components and packaging technology, Vol 23, No. 3, September 2000. Pages 497-504.

Ananth Srivatsav Halvi, Wonkee Ahn and Dereje Agonafer. Simulation of PWB warpage During Fabrication and Due to Reflow. IEEE 2004 Inter Society Conference on Thermal Performance. ISBN 0-7803-8357-5/04. Pages 674-678.

Elisa Huang, Trent Thompson, Scott Chen. Thin Mold Array Package Warpage Control Study. IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. ISBN 0-7803-5502-4/99. Pages 223-229.

P. Hutapea, J. L. Grenestedt, "Reducing Warpage of Microelectronic Substrates by Modifying Electric Artworks," submitted, Applied Physics Letter, 2005.

P. Hutapea, J. L. Grenestedt, "Reducing Warpage of Printed Circuit Boards using Wavy Traces," ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 126, No. 3, pp. 282-287, 2004.

J. L. Grenestedt, P. Hutapea, "Influence of Electric Artwork on Thermo mechanical Properties and Warpage of Printed Circuit Boards," Journal of Applied Physics, 94(1), pp. 686-696, 2003.

J. L. Grenestedt, P. Hutapea, "Influence of Electric Artwork on Thermomechanical Properties and Warpage of Printed Circuit Boards," Journal of Applied Physics, 94(1), pp. 686-696, 2003.

A. Scandurra, R. Zafarana, Y. Tenya, S.Pignataro, "Chemistry of green encapsulating holding compound at interfaces with other materials in electronic devices. Applied surface science 235 (2004) pp. 65-72

Irving Y. Chien, Jack Zhanj, Lou Rector, Michael Todd, "Low warpage molding compound development for array packages". Henkel Electronics group. Global SMT & Packaging, pp 30-35, Jan 2007.

Charles Arthur Harper. High Performance Printed Circuit Board. Mc-Graw Hill Profesional. 2000. ISBN 007026138

VARGAS-Lidia, CABRERA-Eduardo, VALDEZ-Benjamín & OLIVEROS-Amparo. Reducción de deformación por pandeo en microcircuitos electrónicos por tratamiento térmico. Revista de Tecnología e Innovación 2015

Michael G. Pecht. Handbook of Electronic Package Design. CRC press. 1991. ISBN 0824779215

Krishan K. Chawla. Composite Materials. Science and Engineering. Sringer. ISBN 0-387-98409-7.

Colin A. Walker. Handbook of Moiré Measurements. CRC Press. 2004. ISBN 0750305223.

Y. Wang & P. Hazle. Measurement of a thermally induced deformation of a BGA using phase stepping Moiré. Experimental/Numer. Mech. Electrón. Packag. Vol. 2. pp 32-39. 1998.

A. Dang, I.C. Ume & S.K. Bhattacharya. A study on warpage of flexible ss substrate for large area MCM-D packaging". ASME J. Electro. Packag. Vol 122. pp 86-91. June 2000.

Liao, J.E.A. and Voloshin, A.S. Enhancement of the Shadow Moiré Method through digital image processing. Experimental Mechanics, Vol. 33. pp 59-63. (1993).

Jang, B.Z. Advance polymer composites: Principles & applications. ASM International, 1994.