

Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**“Evaluación de Metales Alternativos como Sustitutos del Alambre de Oro
en Interconexiones Microelectrónicas de Dispositivos RF”**

Tesis que para obtener el grado de:
Doctor en Ingeniería

Presenta:
José Francisco Ordóñez Iñiguez.

Director de Tesis:
Dr. Mario Alberto Curiel Alvarez

Co-Director de Tesis:
Dr. Benjamín Valdez Salas

Mexicali, Baja California

Diciembre de 2017

Contenido

Capítulo1. Introducción

1.1 Antecedentes o estado del arte.	7
1.2 Historia del Proceso de Alambrado o “Wirebond”.	9
1.3 Planteamiento del problema	11
1.4 Justificación.	13
1.5 Objetivos.	14
1.6 Preguntas de investigación o hipótesis.	14

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Técnicas de Alambrado .	15
2.2 Formación de la conexión a tablero.	17
2.3 Formación de Intermetálicos.	19
2.4 Limpieza del plasma.	22
2.4.1 Componentes del plasma.	23
2.5 Alambre de Cobre .	25
2.6 Fundamentos de solubilidad de aleaciones.	28
2.7 Evolución de fases.	29
2.7.1Evolución de fases entre el Oro y el Aluminio.	30
2.7.2 Evolución de fases entre el Cobre y el Aluminio.	31
2.8 Formación de capas de óxido .	32

Capítulo 3. Detalles experimentales.

3.1 Metodología utilizada.	31
3.2 Caracterización de intermetálicos a diferentes Temperaturas.	35
3.3 Evaluación del proceso de plasma para el alambre de cobre.	36
3.4 Optimización de la bola de Cobre.	36

Capítulo 4. Resultados y discusiones.	
4.1 Resultados de optimización de la bola de cobre.	37
4.2 Resultados del plasma.	38
4.4 Resultados de caracterización de intermetálicos a diferentes Temperaturas.	42
4.4.1 Exposición a 170C.	42
4.4.2 Exposición a 200C.	46
4.5 Optimización final del proceso.	48
 Capítulo 5. Conclusiones.	
5.1 Objetivos logrados.	53
 Capítulo 6. Trabajo futuro.	55
 Anexos. Producción reportada.	56
 Bibliografía.	57
 Glosario.	59

Índice de figuras

Figura 1.1 Tendencia del precio del oro durante los últimos 10 años.	11
Figura 2.1 Proceso de Wirebond.	16
Figura 2.2 Deformación de la capa de Aluminio y daño en el pad.	16
Figura 2.3 Formación de Stitch .	17
Figura 2.4 Capilares.	17
Figura 2.5 formación de stitch en alambre de cobre (arriba) y alambre de Oro (abajo).	18
Figura 2.6 Bola de Oro en superficie de Aluminio.	19
Figura 2.7a Formación de Intermetálicos a t=0 horas.	21
Figura 2.7b Formación de Intermetálicos a t=250 horas.	21
Figura 2.8 Comparación de stress en alambres de Cobre y Oro .	27
Figura 2.9 Diagrama de fase.	29
Figura 2.10 Evoluciones de fase entre el Au/Al.	30
Figura 2.11 Evoluciones de fase entre el Cu/Al.	31
Figura 4.1 Forma de bola con diferentes flujos de gas.	37
Figura 4.2 Resultados de plasma en diferentes condiciones.	38
Figura 4.3 Resultados de plasma a través del tiempo.	39
Figura 4.4 Resultados de plasma a través del tiempo.	41
Figura 4.5 Medición de intermetálico entre el Au/Al a través del tiempo.	42
Figura 4.6 Crecimiento intermetálico entre el Au/Al.	43
Figura 4.7 Medición de intermetálico entre el Cu/Al a través del tiempo.	44
Figura 4.8 Crecimiento intermetálico entre el Cu/Al.	44

Figura 4.9 Medición de intermetálico entre el Au/Al a través del tiempo.	46
Figura 4.10 Crecimiento intermetálico entre el Au/Al.	46
Figura 4.11 Medición de intermetálico entre el Cu/Al.	47
Figura 4.12 Crecimiento de intermetálico entre el Cu/Al.	47
Figura 4.13 Diámetro de bola comparado en varios niveles de BSS.	49
Figura 4.14 Resultados de ball shear en varios niveles de BSS.	49
Figura 4.15 Resultados de ball shear en varios niveles de BSS.	52
Figura 5.1 Materiales disponibles para el proceso de alambrado de semiconductores.	55

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Comparación del alambre de Cobre contra alambre de Oro.	27
Tabla 2.2 – Propiedades de los materiales.	28
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de los metales y sus capas de Oxido.	32
Tabla 3.1 Caracterización de intermetálicos a través del tiempo.	35
Tabla 4.1 Configuración del experimento de plasma en dos pasos.	38
Figura 4.2 Resultados de plasma en diferentes condiciones.	39
Tabla 4.3 Configuración del experimento de plasma en un solo paso.	39
Tabla 4.4 Configuración del experimento de plasma con tiempo elevado.	40
Tabla 4.5 Configuración del experimento de BSS a través del tiempo.	48
Tabla 4.6 Inspección de bolas removidas con diferentes condiciones de diámetros y BSS.	50
Tabla 4.7 Inspección de bolas removidas con diferentes condiciones de diámetros y BSS después de MSL.	51
Tabla 4.8 Inspección de bolas removidas con diferentes condiciones de diámetros y BSS después de HAST.	51
Tabla 5.1 Ventana de trabajo recomendada.	53

Capítulo 1 introducción

1.1 Antecedentes o estado del arte

En la actualidad existe una gran variedad de dispositivos micro electrónicos utilizados en una gran cantidad de aplicaciones que requieren alambre de oro como parte de su materia prima para lograr la interconexión del circuito de silicio/galio con el tablero micro electrónico, sin embargo los crecientes precios del oro a nivel mundial encarecen la fabricación de estos microcircuitos reduciendo el margen de ganancia para la compañía, sin embargo la utilización de este alambre representa el mayor porcentaje de confiabilidad y resultados eléctricos favorables para los circuitos semiconductores los cuales deben de ser sometidos a un gran número de pruebas de confiabilidad para asegurar su buen funcionamiento, sin embargo, existen varias funciones que afectan su funcionamiento como es el caso de una escasa formación de ínter metálicos al momento de soldar alambre de oro en superficies de aluminio, lo cual puede resultar en un desprendimiento de la conexión al momento de ser sometido a alguna de las pruebas de confiabilidad como ciclos de temperatura, Exposición al Tiempo, humedad o durante su funcionamiento en el dispositivo final, lo cual puede llevar a quejas por parte del cliente o consumidor.

Existen varias alternativas al alambre de Oro los cuales pueden usadas como sustituto a un menor costo de compra de materia prima como: Alambre de Cobre, el cual representa un costo de tan solo el 20% en comparación al alambre de Oro, sin embargo existen varias limitantes para el uso de este material como lo es su incremento de dureza en un 25% en comparación al alambre de Oro lo cual se traduce en una mayor probabilidad de daño a los “PADS” (almohadillas, por su traducción al español) de aluminio y su alta

tendencia a la corrosión al momento de ser sometida a pruebas de confiabilidad, sin embargo el recubrimiento de paladio le confiere una mayor protección contra la oxidación del Aluminio y una mayor ventaja en las pruebas de confiabilidad.

1.2 Historia del Proceso de Alambrado o “Wire Bond”

Uno de los métodos más comunes de interconectar un alambre a dos superficies es el proceso de wirebond, este proceso ayuda a completar la conexión eléctrica desde unos circuitos semiconductores o en tableros electrónicos mediante técnicas ya sea de termo compresión o energía ultrasónica.

Actualmente existen otras técnicas de interconexión avanzadas pero la técnica más común y dominante es el proceso de wirebond.

A continuación se presenta una línea de tiempo de los avances más significativos en el campo del proceso de wirebond.

Breve historia del proceso de Wirebond¹⁶

- 1957 – Los laboratorios Bell se convierten en los primeros en publicar un artículo acerca de la historia y el proceso de wirebond.
- 1959 - J.W. Beams publica sus resultados de investigación acerca de su trabajo de caracterización de filmes metálicos delgados.
- 1971 - Nowaskowski & Villela publican sus resultados sobre las pruebas de ciclos de potencia.
- 1972 - Horsting publica el primer artículo acerca de capas de intermetálicos, huecos y su relación con la pureza del oro.
- 1972 - Ravi & Philofsky crean el proceso de pruebas aceleradas de varios tipos de alambres.
- 1973 - Ravi & Philofsky publican el modelo de predicción de fallas en películas delgadas.
- 1973 - C.N. Adams desarrolla el primer modelo de fallas en el cuello del alambre cercas de la bola.

- 1974 - G. Harman publica tipos de fallas debido al estrés del medio ambiente o y defectos de manufactura.
- 1989 ~1991 - M. Pecht & A. Dasgupta crean modelos de flexión de alambres y pruebas de ball shear.

1.3 Planteamiento del Problema

Durante los últimos años la industria de los semiconductores ha ido desarrollando circuitos más complejos tanto en construcción como en tamaño, los cuales son cada vez más susceptibles a problemas de contaminación por exposición prolongada al medio ambiente o a la temperatura, o así como a las variaciones en el proceso, así mismo el aumento del precio del oro se ha disparado en los últimos años incrementando el costo de manufactura de los microcircuitos y reduciendo el margen de ganancia de los accionistas de la compañía.



Figura 1.1 – Tendencia del precio del oro durante los últimos 10 años.

Como parte del proceso en la industria, los circuitos son sometidos durante su ensamble a diferentes pruebas para asegurar la adecuada unión del alambre de oro con la superficie de soldado o PAD de aluminio, las pruebas más comunes para determinar la confiabilidad de la interconexión son ball shear y KOH.

La prueba de ball shear consiste en remover la bola de oro soldada a la superficie de aluminio o PAD nos provee con una buena herramienta para

determinar la correcta adhesión del oro con la superficie de Aluminio de acuerdo al valor en gramos requeridos para remover la bola de oro de acuerdo al estándar JEDEC (EIA/JESD22-B116)El cual revisa las pruebas necesarias para determinar la fuerza de adherencia de bolas de oro y cobre con respecto a una superficie de soldado y pueden ser efectuadas en piezas sin encapsular o previamente encapsuladas, estas pruebas son de naturaleza destructivas y es efectuado a fin de determinar la calidad del proceso y los controles necesarios.

Otra prueba es la utilización de una solución de KOH para remover las conexiones de oro soldadas a la superficie de Aluminio y observar el grado de inter-metálicos formados durante el proceso de soldado, sin embargo una de las desventajas del uso de alambre de oro es la excesiva formación de los mismos y la tendencia a formar uniones no-uniformes que se pueden traducir en fallas de confiabilidad o rupturas de la unión.

Por estas razones es necesario encontrar nuevas rutas o materiales opcionales que puedan satisfacer los requerimientos de funcionalidad de los alambres utilizados en las interconexiones.

1.4 Justificacion

El realizar este proyecto de Doctorado es un reto de superación tanto en lo personal como en lo profesional que pretende innovar mediante la aplicación del conocimiento en la selección del material adecuado y fiable para su uso comercial en dispositivos ensamblados en la industria de los semiconductores los cuales nos permitirán lograr cantidades significativas de ahorro y nos permitirá tener un catálogo más amplio de materias primas a utilizar en la fabricación de los circuitos micro electrónicos.

La presente investigación pretende caracterizar materiales alternos al uso del alambre de Oro que nos permita tener los niveles de confiabilidad requeridos por el cliente y que nos permita tener un proceso de manufactura confiable de bajo riesgo de corrosión y daño estructural a la superficie de soldado debido a las características físicas de los alambres a evaluar de los cuales se pretende escoger la mejor alternativa basados en las pruebas de caracterización y calificación del proceso, así mismo se tendrá un mejor entendimiento de las características físicas y químicas de cada uno de estos materiales a fin de poder escoger en un futuro la mejor alternativa a la fabricación de nuevos circuitos integrados de manera que se balancee su precio de fabricación con sus requerimientos de confiabilidad y operación.

Una gran ventaja para la realización de este proyecto es la disponibilidad de la infraestructura y los equipos de caracterización altamente especializados con los que cuentan en la Industria, así como el Instituto de Ingeniería de la UABC, que serán utilizados con la finalidad de presentar resultados precisos y congruentes que justifiquen las expectativas de este proyecto de investigación.

1.5 Objetivos

El objetivo general de la investigación es el de analizar las fallas del alambre de Cobre relacionadas con la oxidación debido a sus propiedades físicas, así mismo su respuesta eléctrica debido al cambio de resistividad de cada uno de los materiales, así como su dureza y posible impacto al superficie de soldado con la finalidad de proponer nuevos este alambre como material alternativo que cumplen con las pruebas de fallas establecidas.

1.6 Preguntas de Investigacion

Para lograr lo anterior se pretende dar respuestas a las principales interrogantes al implementar el proceso de alambre de cobre.

- Cuál es la posible afectación en el alambre de Cobre y su resistencia a la oxidación / corrosión debido a los procesos de manufactura y pruebas de confiabilidad.
- Cuál es la formación de intermetálicos en el alambre de cobre y su respuesta a largo plazo a pruebas aceleradas de envejecimiento
- Investigar el impacto del cambio de dureza debido a las propiedades de este material y su efecto en superficies sensibles de soldado.
- Caracterizar el cambio en la respuesta eléctrica de los dispositivos semiconductores debido al cambio de resistividad del alambre de cobre así como sus posibles formas de minimizar el impacto variando las longitudes de las conexiones.

Capítulo 2. Marco Teórico

MATERIALES Y TECNICAS UTILIZADAS PARA EL ALAMBRADO DE MICROCIRCUITOS.

2.1 Tecnicas de Alambrado

El proceso de Alambrado o comúnmente conocido en la Industria como “Wirebond” es una de las técnicas más utilizadas en las conexiones de microcircuitos encapsulados, esta técnica usa una combinación de temperatura, presión y energía ultrasónica para producir el *ball bond* o bola soldada.

Para realizar este proceso se requiere de alambre de oro el cual es alimentado por un capilar de cerámica a l cual se le dispara una chispa controlada, la cual derrite la punta del alambre de oro para formar una bola que posteriormente es comprimida contra la superficie de soldado en el circuito electrónico aplicando fuerza, corriente y temperatura durante unos milisegundos.

De esta manera se crea una bola soldada en la superficie de aluminio, la cual forma una capa de intermetálicos entre los materiales oro y aluminio que hace posible la conexión en el alambre y la superficie de soldado de Aluminio, posteriormente el capilar levanta el alambre para formar el loop y soldando el otro extremo del alambre con el substrato y de esta manera completar la conexión.



1-La grapa se cierra y el capilar se mueve hacia arriba haciendo que el alambre se rompa.

2-El capilar se mueve hacia el siguiente alambre, se abre la grapa.

3-El alambre corre a través del capilar.

4-La chispa se dispara.

5-Se forma la bola

6-El capilar baja y la bola hace contacto en el pad.

7-Se aplica energía ultrasónica y fuerza.

8-El capilar se mueve hacia la segunda terminal, se aplica energía y fuerza y se forma el stitch.

9-De regreso al paso 1.

Figura 2.1 Proceso de Wirebond

En el proceso de Wirebond una alta fuerza de soldado puede conducir a una deformación del material, rompiendo cualquier capa de contaminación presente en la superficie de soldado pero también rompiendo el dado de silicio.²

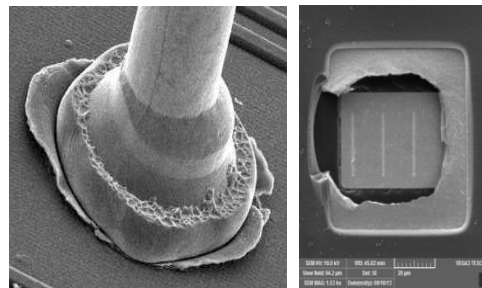


Figura 2.2 Deformación de la capa de Aluminio y daño en el pad

Este proceso también puede ser mejorado usando una baja energía ultrasónica, la temperatura también puede mejorar y acelerar la difusión interatómica y por consecuencia formación de íter metálicos.

2.2 Formacion de la conexión a tablero

Otro de los retos principales del alambre de Cobre es la formación de la conexión a tablero o comúnmente conocido como “Stitch”, el cual es el encargado de terminar la unión del alambre de cobre con el tablero o piso del circuito semiconductor.



Figura 2.3 Formación de Stitch

En el caso particular del alambre de cobre se tienen que tomar precauciones adicionales durante el proceso en cuanto al capilar que será utilizado y a la optimización del proceso de alambrado a fin de asegurar una correcta interconexión.

El capilar de alambrado utilizado en el proceso de cobre tiene atributos especiales que lo diferencian del capilar de oro.

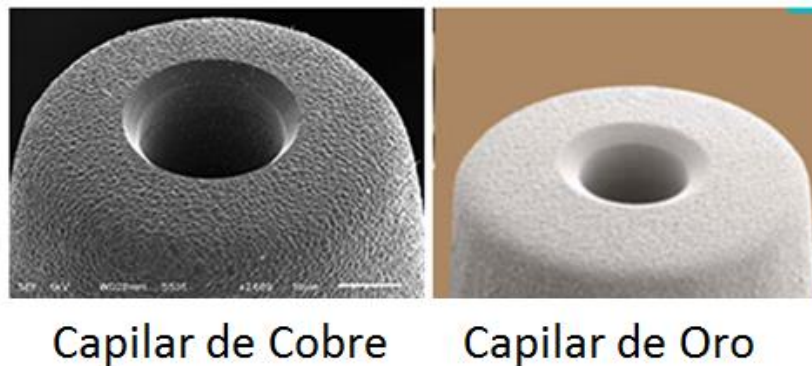


Figura 2.4 Capilares

El capilar de cobre lleva un terminado granulado el cual le permite deformar el alambre de cobre de una manera más eficiente y le ayuda a incrementar la fuerza de adherencia en el tablero, a diferencia del capilar de oro los cuales llevan terminados pulidos, en el caso particular del oro debemos recordar que el alambre es más suave y se deforma con mayor facilidad.

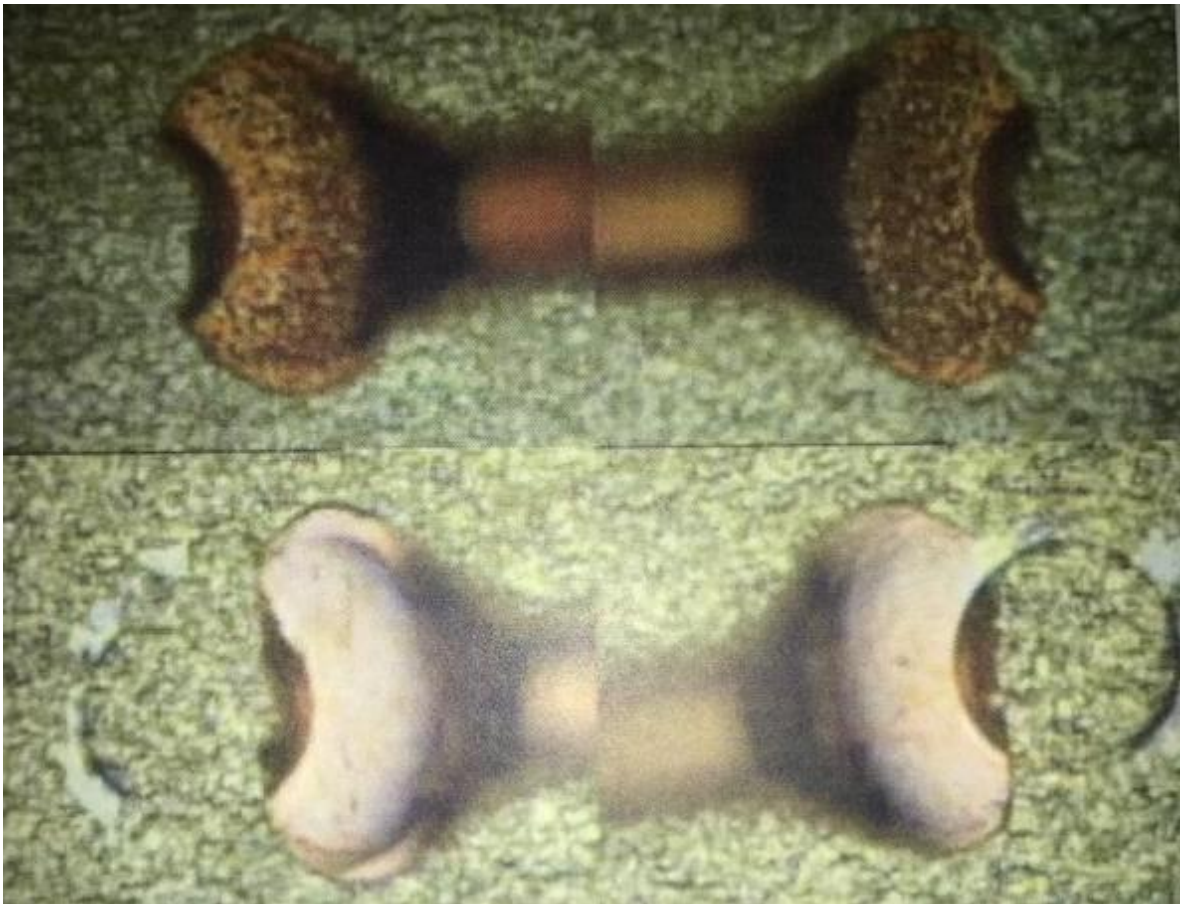


Figura 2.5 formación de stitch en alambre de cobre (arriba) y alambre de Oro (abajo).

2.3 Formación de Intermetálicos

Uno de los mayores problemas de confiabilidad es la formación de intermetálicos y la formación de huecos a altas temperaturas, estas formaciones pueden ser aceleradas cuando se opera a altas temperaturas y con el paso del tiempo.

El alambre de oro favorece la formación de compuestos intermetálicos de manera acelerada mas no siempre de manera controlada,^{4,6} cuando la superficie de Aluminio es muy gruesa se genera un crecimiento muy rápido y no uniforme que favorece la generación de huecos o micro fracturas que empiezan a debilitar la interconexión conforme pasa el tiempo o el paquete se somete a pruebas de stress.^{4,6,11}

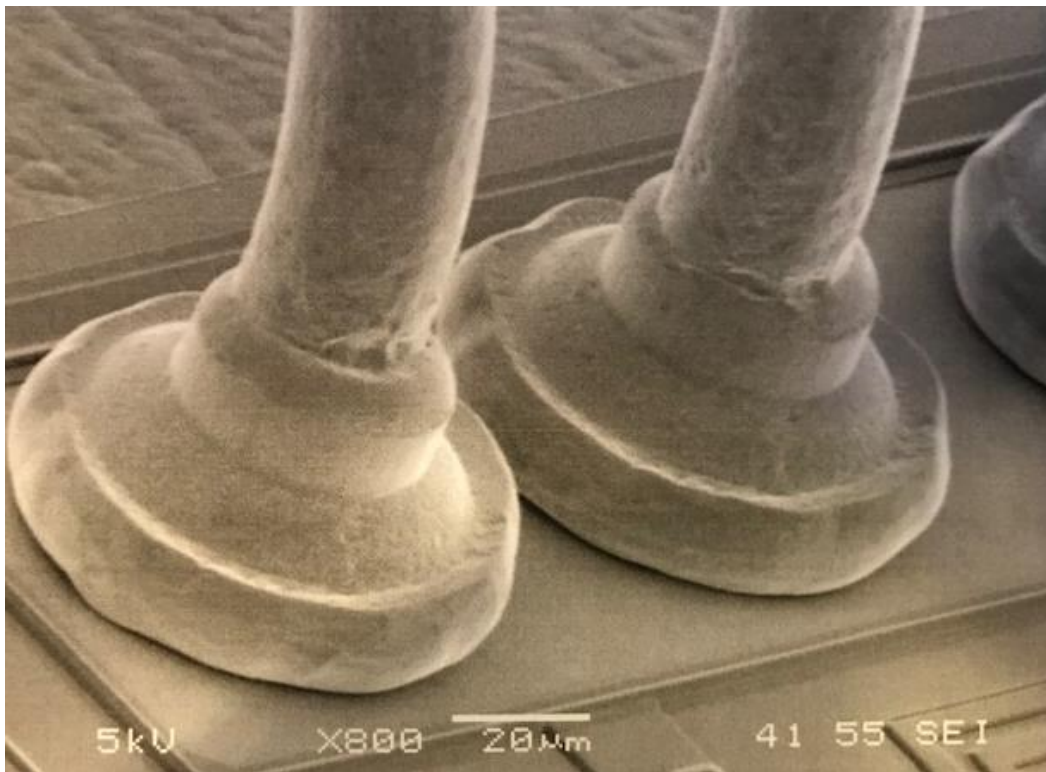


Figura 2.6 Bola de Oro en superficie de Aluminio

En la figura 2.6 se puede observar una bola de Oro soldada en superficie de Aluminio en un dado semiconductor de Silicio.

En este tipo de conexiones uno de los mayores problemas de confiabilidad es la poca formación de Intermetálicos a tiempos de soldado = 0 horas y la formación de huecos cuando la pieza se somete a altas temperaturas de trabajo y al paso del tiempo.

Actualmente se conocen varios tipos de compuestos intermetálicos formados en estas uniones de los cuales los más estudiados son Au_5Al_2 y AuAl_2 , los cuales son creados a partir de temperaturas altas de trabajo.

El compuesto Au_5Al_2 crece muy rápidamente en los lados del alambre de Oro y la formación AuAl_2 es extremadamente lenta en la superficie de aluminio, sin embargo estos sistemas presentan problemas de confiabilidad a temperaturas menores a 150c.

En el caso del alambre de Oro la formación de intermetálicos inicia desde el $T=0$ horas, sin embargo existen varios factores que afectan su calidad de formación la cual continua a través del tiempo y actuando de manera dependiente de la temperatura causando aparición de huecos debido a la difusión no uniforme del oro y el aluminio, estos pueden causar fracturas en la conexión con el paso del tiempo.

Una de las variables principales del proceso de alambrado cuando se utiliza el alambre de oro es la condición inicial de la fuerza de soldado la cual se mide en la industria por el valor de g/mil^2 utilizado durante el proceso.

En las siguientes figuras se aprecia la cantidad de Intermetálicos creados en cada condición y su nivel de cobertura en la bola de Oro.

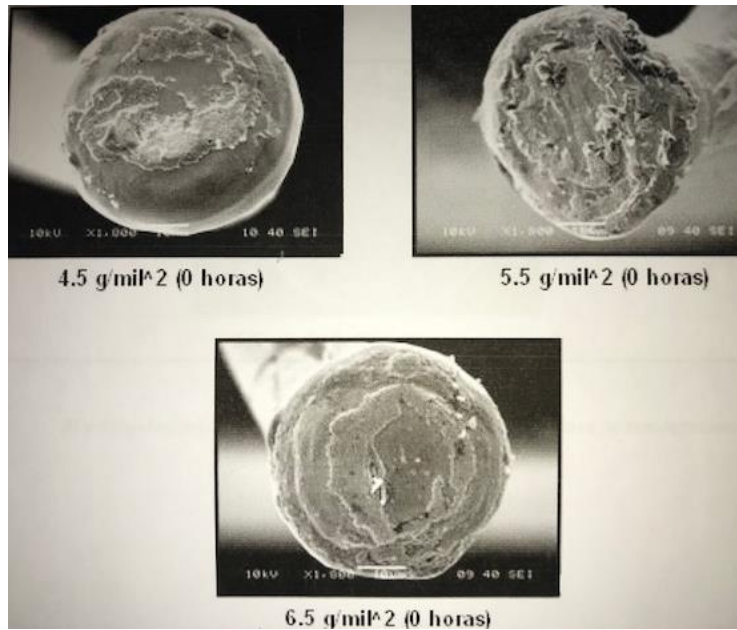


Figura 2.7 Formación de Intermetálicos a t=0 horas

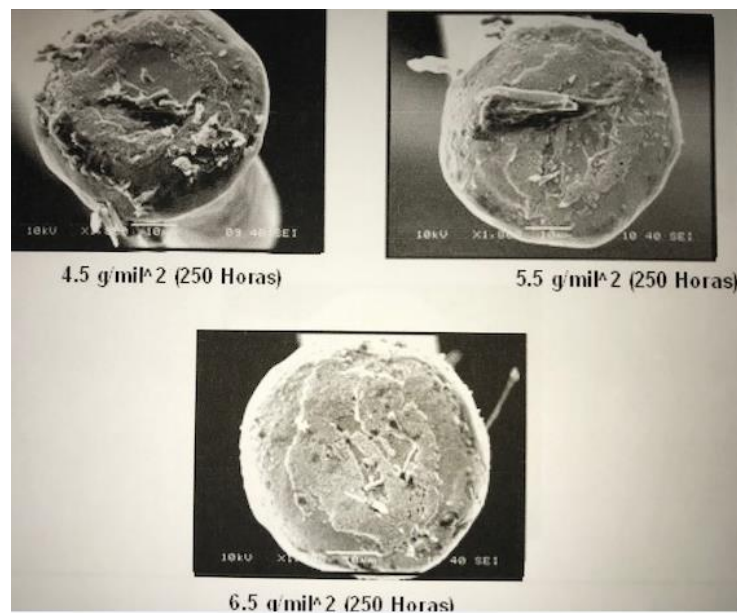


Figura 2.7 Formación de Intermetálicos a t=250 horas

Actualmente se consideran como valor mínimo 4.5 g/mil^2 , Sin embargo estudios han demostrado que al usar procesos optimizados alrededor de 5.5 g/mil^2 o incluso 6.5 g/mil^2 se consiguen valores de soldado constantes y un crecimiento de intermetálicos mas uniformes a través del tiempo.

2.4 Limpieza del Plasma

¿Qué es Plasma? Plasma es frecuentemente descrito como el cuarto estado de la materia. Plasmas son gases parcialmente ionizados que son eléctricamente conductivos y magnéticamente controlables. El plasma consiste en iones, electrones, radicales libres y otras especies neutrales. En las aplicaciones que se tratarán aquí, los plasmas de baja temperatura son creados ionizando el gas en cámaras de vacío (en este caso las presiones típicas son de 10 a 1000 mTorr) con una fuente RF de alta potencia creando plasma en equilibrio no-térmico

En este caso la temperatura del gas es de 30 a 50 grados centígrados por encima del ambiente, mientras que la temperatura de los electrones puede ser varios órdenes de magnitud mayor a la temperatura de los iones

A raíz de este planteamiento el plasma es frecuentemente llamado el cuarto estado de la materia, como el plasma es un estado de muy alta energía, es muy reactivo químicamente. Esta reactividad es lo que hace que el plasma sea útil para que ocurran reacciones químicas a baja temperatura y modificar la superficie de los materiales.

Las condiciones básicas para generar plasma son:

- Fuente de energía (electromagnética o térmica)
- Átomos o moléculas de un gas

2.4.1 Componentes del Plasma

Cuando el plasma es creado, los átomos y las moléculas son fragmentados y recombinados en una manera muy compleja, muchos de los componentes químicos que son producidas en el plasma no existen de una manera significativa en los estados sólido, gaseoso y líquido.

El mecanismo por el cual el plasma es creado se explica más fácilmente si la estructura básica del átomo es entendida. Los electrones son los componentes negativos de un átomo y normalmente se encuentran en constante movimiento en la órbita alrededor del núcleo el cual contiene el componente positivo del átomo, el protón. En el estado gaseoso unos cuantos electrones estarán libres de la fuerza del núcleo para iniciar el plasma cuando sean expuestos a una fuente de energía. Estos ganan velocidad y colisionan con otros átomos con la energía suficientes para liberar electrones de estos átomos, entonces se inicia una reacción en cadena.

Cada vez que un electrón es liberado de un átomo o molécula, se forma un Ion positivo. Un Ion positivo es un átomo o molécula que contiene un menor número de electrones que protones en el núcleo. Por otra parte, un Ion negativo contiene más electrones que su número normal. Esto ocurre cuando un electrón con una cantidad adecuada de energía bombardea el átomo o la molécula con ciertas propiedades y comienza a orbitar el núcleo creando un Ion negativo.⁸

Otra posibilidad es que un electrón libre separara los átomos de la molécula, como la molécula de hidrogeno o la molécula de oxigeno sin quitar o agregar ningún electrón. Los átomos en este estado son llamados radicales

libres. Un radical libre es una especie que tiene uno o más electrones impares, estas especies son altamente reactivas por su tendencia a formar especies neutrales, que requieren reaccionar con otra especie para liberar su energía extra.

Puesto que los iones y radicales libres creados en la plasma son inestables, estos continuamente se están revirtiendo a su estado gaseoso normal vía colisión, recombinación o emisión de protones, cuando estos liberan energía en forma de luz o calor, las especies emiten un fotón. Esta luz visible es lo que causa el brillo característico del plasma.

En cualquier plasma estable siempre hay igual número de cargas positivas y negativas, es este balance el que hace al plasma estable.

2.5 Alambre de Cobre

El alambre de cobre ha ganado interés en los últimos tiempos debido a sus ventajas sobre el alambre de Oro como su costo más bajo, mejor conductividad eléctrica, su lento crecimiento de intermetálicos y su mejor confiabilidad en altas temperaturas. El alambre de cobre tiene una resistividad eléctrica de $0.017 \text{ micro-ohm m}^{12}$ a temperatura ambiente comparado contra la resistividad del Oro de $0.022^{12} \text{ micro-ohm m}$ lo cual lo convierte en un mejor conductor y una mejor opción para aplicaciones de alta potencia debido a su mejor conducción a menores diámetros de alambre, también tiene una mejor conducción térmica del $25\%^{12}$ en comparación contra el oro y disipa el calor dentro del paquete de una manera más eficiente.

Una de las mayores ventajas del alambre de cobre es su menor tendencia a formar intermetálicos con el Aluminio, los átomos del Oro tienden a crear una alta inter difusión entre el Oro-Aluminio los cuales pueden crear huecos entre sus interfaces¹⁰, sin embargo su medición no es muy fácil ya que se requiere de microscopios de muy alta potencia como el SEM a fin de ver los niveles de intermetálico obtenido en las conexiones, así mismo el tiempo y tendencia de crecimiento será objeto de estudio durante esta investigación a fin de predecir su comportamiento de una manera más certera.

Sin embargo, una de sus principales desventajas es su alta tendencia a oxidarse lo cual hace necesario el uso de una mezcla de gas inerte⁵ a fin de prevenir la oxidación del alambre durante la formación de la bola y durante su soldado en la superficie de aluminio, así mismo debido a su dureza es necesario utilizar parámetros más elevados que los necesario en el alambre de Oro a fin de obtener la misma calidad de soldado.

El uso de alambre de cobre requiere utilizar una atmosfera inerte al momento de la formación de la bola, típicamente tanto en el alambre de cobre como el

de oro la bola es formada a temperaturas de (175c ~ 225c), a estas temperaturas el cobre se oxida muy rápidamente y no permite ser soldado sin algún tipo de protección adicional a sus superficie como lo es una atmosfera reducida creada por la mezcla de gases (N2 95%/H2 5%), esta composición de gas es muy comúnmente usada por los proveedores de gas y es considerada no explosiva debido a que su nivel de H2 es considerado bajo.

Además estudios adicionales sugieren que el efecto del óxido en el alambre de cobre afecta también a la formación del *stitch* (o conexión a tablero).

Una de las ventajas del oro es su fácil soldado en el tablero electrónico mediante la aplicación de fuerza y energía ultrasónica, sin embargo este no es el caso para el alambre de cobre debido a que al momento de abrir un carrete de cobre de su empaque hermético empieza a crear una superficie de óxido el cual retarda su habilidad de soldado del Stich, estudios adicionales también sugieren que el mecanismo de endurecimiento y de deformación del alambre de cobre induce variación en la fuerza de soldado en el *stitch* con una misma receta de soldado, una sugerencia muy común de la industria es evaluar alambres de cobre con dopantes que ayuden a minimizar esta variación, otro de los mayores retos de esta tecnología es el daño causado al pad de aluminio o comúnmente conocido como “pad cráter” debido a la dureza del alambre de cobre y que se requiere una mayor fuerza de soldado para deformar la bola y obtener los mismos niveles de soldado requeridos para el oro.

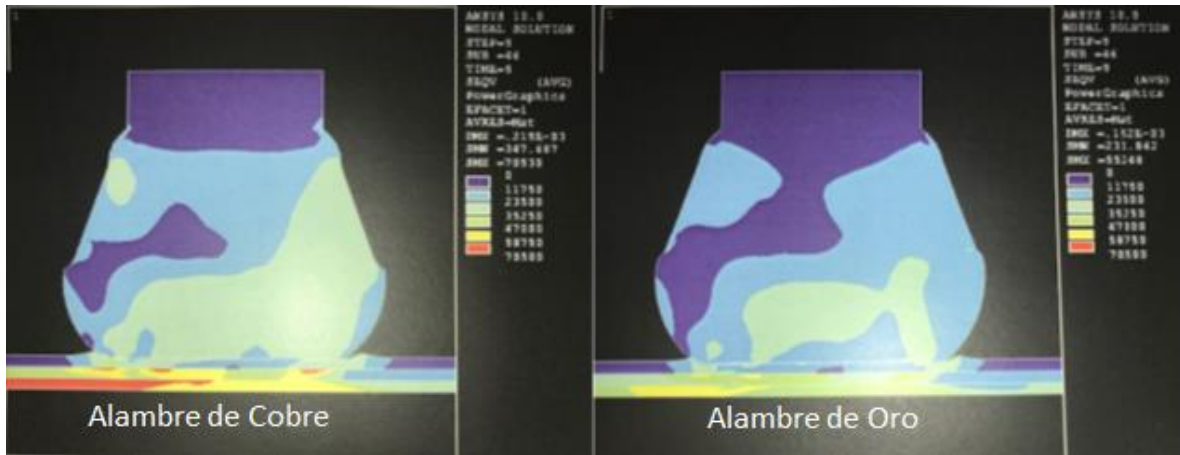


Figura 2.8 Comparación de stress en alambres de Cobre y Oro

En la figura 2.8 se puede apreciar un 25% de incremento en el nivel de stress de una bola de cobre comparada con na bola de Oro.

Item	Unit	Copper	Gold
Symbol	-	Cu	Au
Atomic Number	-	29	79
Atomic Weight	-	63.546	196.967
Crystalline Structure	-	fcc	fcc
Lattice Constant	Angstrom	3.6147	4.0785
Melting Point	°C	1083.45	1063.15
Boiling Point	°C	2582	2710
Density	g/cm3	8.93	19.32
Electrical Resistivity	$\mu\Omega\text{cm}$	1.69	2.3
Thermal Conductivity	W/mK	394	293
Coefficient of Linear Expansion	$10^{-6}/\text{K}$	16.6	14.2
Tensile Strength	MPa	240	230
Young Modulus	10^{10}N/m^2	13.6	8.8
Elongation	%	15.0	4.5

Tabla 2.1 Comparación del alambre de Cobre contra alambre de Oro

2.6 Fundamentos de solubilidad de aleaciones

Elemento	Electro - negatividad	Valencia	Radio Atómico	Diferencia de radio Vs. Al	Estructura Cristalina
Al	1.61	3	0.143	0%	FCC
AU	2.54	1	0.144	0.70%	FCC
Cu	1.9	1	0.128	10.50%	FCC
Pd	2.2	10	0.137	4.20%	FCC

Tabla 2.2 – Propiedades de los materiales

Regla de Hume-Rothery para la solubilidad:

-El factor tamaño: Los átomos deben ser de tamaño similar, con un radio atómico no mayor del 15% para minimizar la tensión en la estructura

-Estructura Cristalina: Los materiales han de tener la misma estructura cristalina; de otra manera existirá algún punto en el que ocurrirá una transición desde una fase a otra con diferente estructura.

-Valencia. Una valencia similar favorece la formación de solución sólida. En el caso opuesto se favorece que un átomo de baja valencia se disuelva en otro de valencia alta, más que el caso opuesto.

-Electronegatividad. Se favorece con igual electronegatividad, de otra manera se forman más bien compuestos que soluciones sólidas

El compuesto intermetálico es más probable de formar cuando la electronegatividad entre 2 metales es muy diferente, la Entalpía de la formación del compuesto depende de la valencia de estos y la diferencia de electronegatividad.

Todos los materiales descritos en la tabla xx (Au, Cu, Pd) forman compuestos intermetálicos con el Aluminio.

2.7 Evolución de Fases

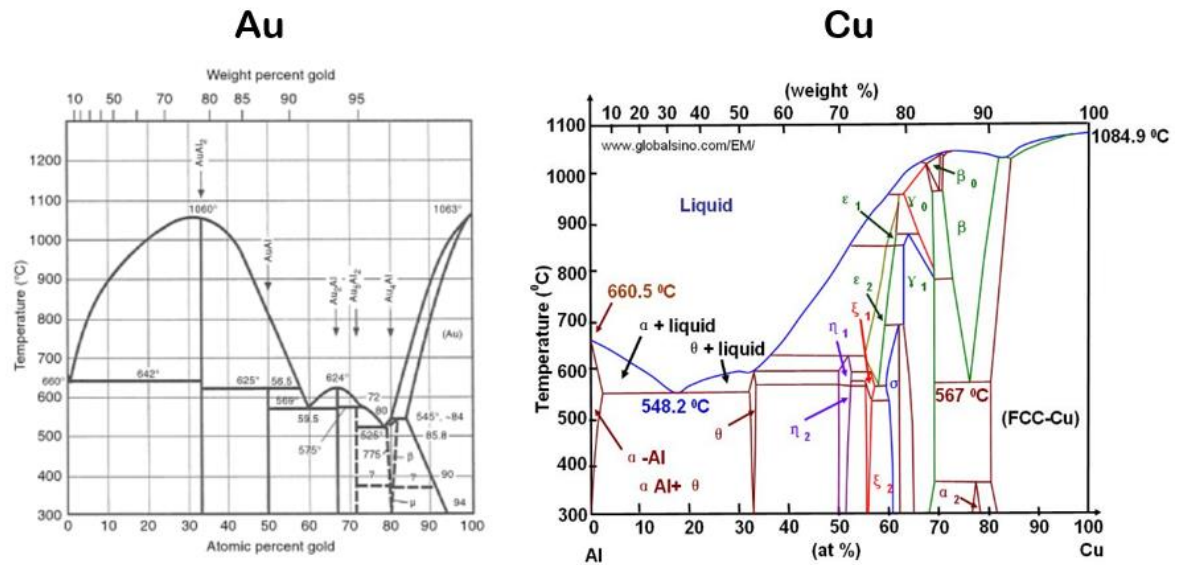


Figura 2.9 Diagrama de fase

Las fases de intermetálicos se logran de la disolución del Cobre en el Aluminio o viceversa y en Oro en el Aluminio, sin embargo los factores y tiempos que afectan a sus respectivas fases de Intermetálicos no son las mismas.

2.7.1 Evolución de fases entre el Au/Al

Fase	Conc. (AT. % Au)	Estructura cristalina	Dureza (HV)	Resistividad ($\mu\Omega$ cm)	Color
Au	84-100	FCC	60-90	2.3	Dorado
Au ₄ Al	80-81.2	Cubica	334	37.5	Caf e
Au ₅ Al ₂	71.4	HCP	271	25.5	Cafe
Au ₂ Al	65-66.7	Ortorrombico	130	13.1	Cafe
AuAl	50	Monoclinico	249	12.4	Blanco
AuAl ₂	32.3-33.9	FCC	263	7.9	Purpura
Al	0.006	FCC	20 – 50	3.2	Plata

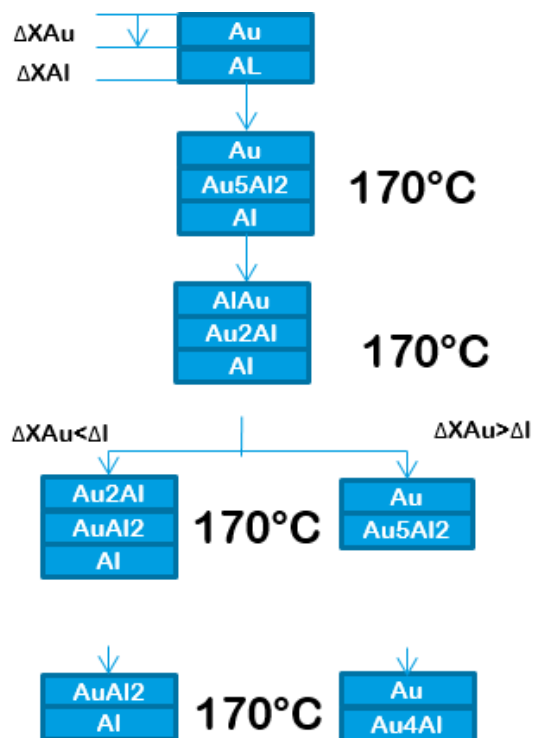


Figura 2.10 Evoluciones de fase entre el Au/Al

Las reacciones entre Au/Al se presentan a una temperatura menor y continúan a través del tiempo.

2.7.2 Evolución de fases entre el Cu/Al

Fase	Conc. (AT. % Cu)	Estructura cristalina	Dureza (HV)	Resistividad ($\mu\Omega$ cm)	Color
Al	0.0 - 2.84	Cubica	20 – 50	2.4	Plata
CuAl ₂	31.9 – 33	Tetragonal	324	7 – 8	Amarillo - Blanco
CuAl	49.8 – 52.3	Monoclinico	628	11.4	Gris
Cu ₄ Al ₃	55.2 – 56.3	Monoclinico	616	12.2	Blanco - Amarillo
Cu ₃ Al ₂	59.3 – 61.9	Trigonal	558	13.4	Blanco - Gris
Cu ₉ Al ₄	62.5 – 69	Cubica	549	14.2 – 17.3	Blanco - Amarillo
CU	80.3 - 100	Cubica	60 -100	1.7	Rojo

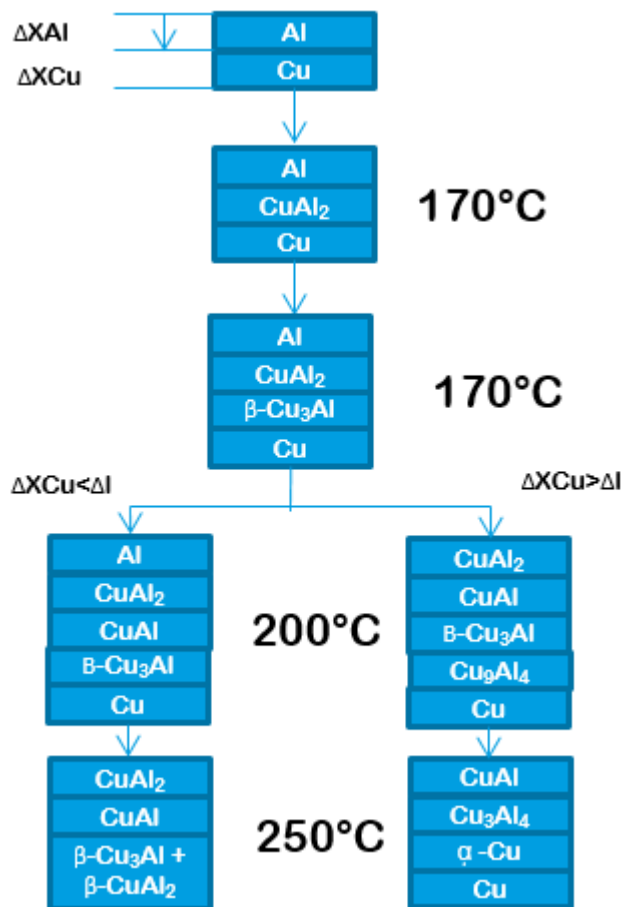


Figura 2.11 Evoluciones de fase entre el Cu/Al

Las reacciones entre Cu/Al se presentan a una temperatura mayor y el crecimiento es favorecido solamente al incrementar la temperatura.

Las reacciones de Intermetálicos son más severas $> 200^{\circ}\text{C}$, esta es una de las razones por las cuales los Intermetálicos son muy difíciles de detectar a $T=0$, el proceso de WB se lleva a cabo entre los 150°C y los 175°C , esto dificulta el estudio de las muestras, sin embargo se intentaran diferentes experimentos a fin de terminar la caracterización de las mismas.

2.8 Formación de capas de óxido

Formación de capas de óxido en el pad de Aluminio y alambre de Cobre

A temperaturas ambiente se forman delgadas capas de óxido de 20-100Å de espesor, esta formación ocurre en todos los metales expuestos a la atmosfera (excepto el Au), esta capa tiene tendencia a crecer al estar en contacto con las altas temperaturas, de allí radica la importancia de entender propiamente la naturaleza de su crecimiento y su posible impacto en el proceso de Wirebond el cual toma lugar a temperaturas de 125-225Å°C.

Una de las principales desventajas de esta capa de Al₂O₃ es su dureza comparada contra el Óxido de Cobre (Cu₂O).

Metal	VHN Kg/mm ²	Threshold deformation %	Surface Oxide	Oxide Hardness VHN
Al	35-48	40	Al ₂ O ₃	1800
Cu	49-97	78	Cu ₂ O	160

Vickers micro-hardness number (HVN)

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de los metales y sus capas de Oxido¹⁴.

Durante el proceso de wirebond la energía Ultrasónica se propaga a través del capilar de cerámica el cual provoca que la bola de Cobre se talle contra la superficie del pad de Aluminio y rompa la capa de óxido presente.

Las capas duras de óxido como el Al₂O₃ (1800 VHN) son típicamente más difíciles de romper comparadas con otras capas de óxido de metales suaves. Sin embargo, las condiciones a las que se somete el material durante su proceso así como el proceso de limpieza del plasma al que es sometido juega un papel importante en el grosor final de la capa de óxido y su resistencia al Soldado.

Aun y cuando el proceso de wirebond se lleva a cabo a altas temperaturas es importante mencionar que su duración es mínima $\sim 50\text{ms}$, por lo que se debe analizar si este corto tiempo es significativo en el crecimiento de la capa de óxido.

Capítulo 3. Detalles experimentales

3.1 Metodología utilizada

El método de investigación será experimental y se desarrollará siguiendo el estándar de la industria para pruebas de confiabilidad “HAST” JESD22-B102D (JEDEC)¹. En este estándar se describen los pasos a seguir y los materiales que deben ser utilizados para llevar a cabo la prueba de confiabilidad. Para el experimento se utilizara dos tipos de alambres. Oro como control y Cobre como evaluación, así mismo se considerara las características eléctricas del material, su impacto a la superficie de soldado causado por la dureza del material² así como su impacto en las pruebas de confiabilidad a largo plazo. Se utilizaran pruebas de confiabilidad de temperatura, presión y humedad a fin de verificar cualquier posible impacto en su vida útil y bajo condiciones de stress y también se tomaran en cuenta las diferentes variables del proceso.

En paralelo a las pruebas de confiabilidad las muestras se someterán a diferentes pruebas de calidad como BALL SHEAR, SEM, FIB, CROSS SECTION¹⁰, mediante las cuales revisara el tamaño de Aluminio desplazado del pad y su impacto en capas interiores⁸.

3.2 Caracterización de Intermetálicos a diferentes temperaturas

Como evaluación inicial se procedió a caracterizar el proceso de Oro en superficies de Aluminio a fin de establecer las condiciones de control que se utilizarían para comparar el alambre de Cobre.

Como primer paso se procederá a alambrar una muestra típica de material semiconductor utilizando alambre de Oro, de la misma manera se crearan muestras utilizando alambre de Cobre a fin de comparar los resultados del proceso.

Las muestras resultantes se someterán a pruebas de confiabilidad, así como exposición a temperaturas de trabajo de 170C y temperaturas altas de 200C, a fin de estimular el crecimiento de intermetálicos y poder caracterizar su comportamiento en ambos materiales, se tomaron mediciones en tiempo = cero y tiempo = 200 horas.

Grosor del Intermetálico	Exposición a la Temperatura en Horas				
Au/Al	T=0	T=50	T=100	T=150	T=200
Cu/Al	T=0	T=50	T=100	T=150	T=200

Tabla 3.1 Caracterización de intermetálicos a través del tiempo.

3.3 Evaluación del proceso de Plasma para el alambre de Cobre

Como parte de la evaluación inicial se procederá a experimentar con diferentes combinaciones de gases a fin de verificar la adherencia de la bola de Cobre en la superficie de Aluminio.

La hipótesis inicial sugiere lo siguiente: La oxidación durante del proceso de limpieza utilizado actualmente (descarga de plasma en Ar + O₂ ambiente) en combinación con la oxidación durante la exposición del material el área de producción conlleva a los problemas de alambrado.

El experimento inicial se llevará a cabo realizando doble plasma a la muestra a fin de evaluar la adherencia de las mismas.

3.4 Optimización de la bola de Cobre

Uno de los pasos más importantes para un buen proceso de alambrado de cobre es la optimización de la formación de bola antes de su alambrado.

En los procesos de alambrado la formación de bola es lograda mediante la ionización del espacio de aire entre el alambre de Cobre y el electrodo de disparo el cual se le conoce como EFO o por su referencia en Ingles “Electronic Flame-Off”, la bola resultante se le conoce como FAB o “free air ball”. A diferencia del proceso de Oro donde la bola formada se comprime en el pad de aluminio por medio de energía ultrasónica, la bola de cobre es susceptible a oxidación por lo cual este proceso se debe de llevar a cabo bajo una atmosfera Inerte libre de Oxigeno la cual solo puede ser lograda mediante la instalación de un kit de cobre en el equipo el cual proporcionara un flujo constante de gas mezclado el cual consta de 95%N₂/5%H₂, la cantidad de flujo de gas que se proporciona durante el proceso es sumamente crítico para la formación de la bola de cobre de manera uniforme, por lo cual es crítico optimizar el proceso de manera previa a la experimentación.

Capítulo 4. Resultados y discusiones

4.1 Resultados de optimización de la bola de Cobre

La forma y tamaño de la bola de cobre o “FAB” afecta la calidad de alambrado del proceso de cobre, en base a la experimentación se puede determinar que la forma de bola preferida es esférica y centrada.



Figura 4.1 Forma de bola con diferentes flujos de gas.

Un flujo muy bajo de gas puede ocasionar oxidación en la bola y deformidades iniciales debido a la atmosfera creada durante la flama inicial (ver imagen de 0.4 L/min) Este tipo de formación tendrá como resultado la pobre adherencia inicial de la bola de cobre.

Un flujo muy alto de gas puede ocasionar una formación incompleta (ver imagen de 0.7 L/min) debido al efecto de enfriamiento causado por el flujo del mismo gas la cual ocasionara una bola soldada deforme o no concéntrica, flujos demasiados altos también pueden ocasionar oxidación en la bola de cobre debido a la distribución no uniforme o turbulenta del gas alrededor del FAB¹⁶.

4.2 Resultados del plasma

Sample	1 st Paso			2 nd paso		
	Gases		Time [s]	Gases		Time [s]
	Ar [sccm]	O ₂ [sccm]		Ar [sccm]	FG [sccm]	
A (Control) Limpieza Standard	6	10	20	N/A		N/A
B	6	10	20	16	0	10
C	6	10	20	0	16	10

Tabla 4.1 Configuración del experimento de plasma en dos pasos.

Los resultados iniciales muestran que el segundo paso de plasma adicional no contribuyó en la mejora del proceso.

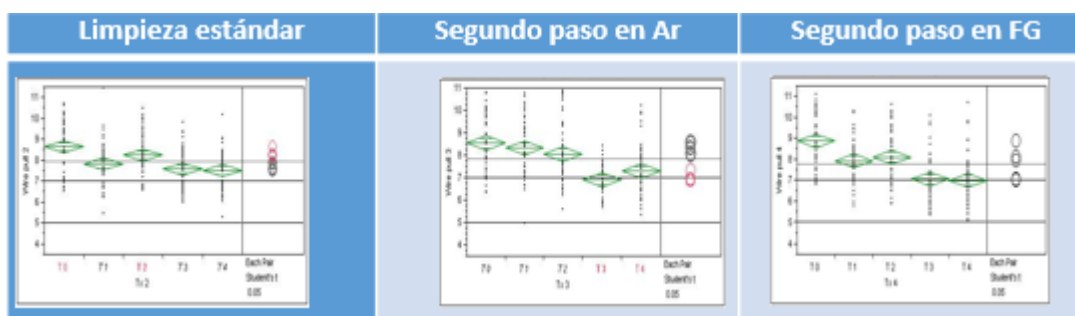


Figura 4.2 Resultados de plasma en diferentes condiciones.

Varios estudios realizados previamente durante el verano científico demostraron que la contaminación encontrada en los materiales proviene principalmente de del mismo proceso de fabricación utilizado en las mismas compañías. Para verificar la validez de esta hipótesis se fabricaron muestras variando el cociente entre los gases Ar y O₂ y el tiempo de limpieza por plasma, a continuación, se muestran las condiciones experimentales.

Sample	Limpieza de plasma de un paso		
	Gases		Time [s]
	Ar [sccm]	O ₂ [sccm]	
D (Control)	6	10	20
E	6	10	30
F	4	12	20
G	8	8	20

Tabla 4.3 Configuración del experimento de plasma en un solo paso.

Después del proceso de limpieza se aplicaron pruebas de Ball Shear and Pull test con intervalos de tiempo de 30 min, 3 ½ h, 6 h y 8 h (tiempos T0, T1, T2 y T3 en Figura 2).

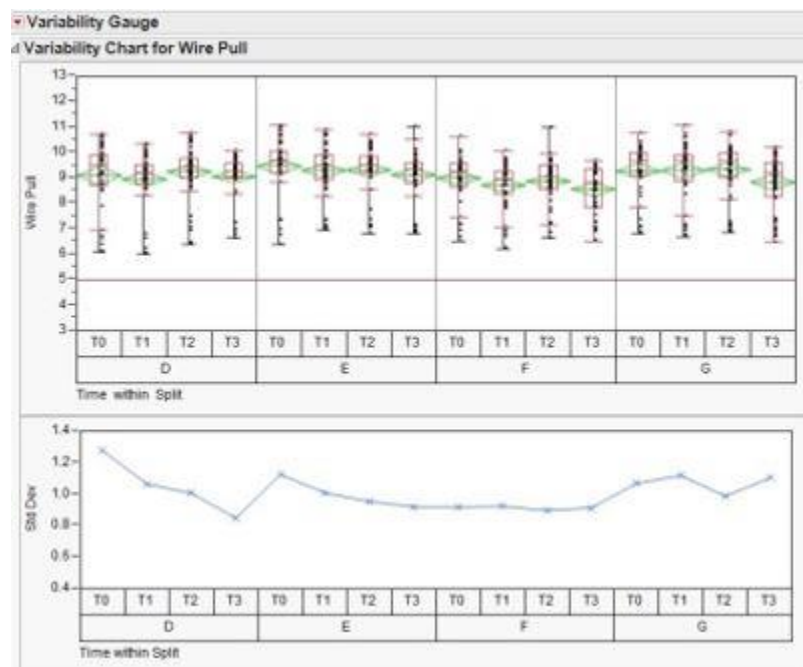


Figura 4.3 Resultados de plasma a través del tiempo.

Los resultados de la Figura 4.3, muestran que el incremento del tiempo de limpieza tiene como resultado un mejor tiempo de vida (muestra E, la gráfica superior). Otra conclusión es que el tratamiento con mayor cantidad de oxígeno en el gas de plasma conlleva un menor valor y una menor variación

de la desviación estándar con el tiempo (muestra F, la gráfica inferior) lo que es de gran importancia para obtener mejor tiempo de vida en el área de producción.

Los resultados obtenidos con el segundo grupo de muestras indican que el incremento del tiempo de tratamiento con plasma así como el incremento de la cantidad del oxígeno en la mezcla de los gases de plasma mejora el tiempo de vida de limpieza por plasma. Para optimizar el proceso así como para verificar la hipótesis de contaminación con elementos orgánicos en el proceso de fabricación se estudiaron las muestras fabricadas bajo las condiciones en la siguiente tabla.

Muestra	Gases		Tiempo (s)
	Ar (sccm)	O2 (sccm)	
I (Control)	6	10	20
J	6	10	30
K	4	12	30
L	4	12	30
M	6	18	30
N	6	18	30

Tabla 4.4 Configuración del experimento de plasma con tiempo elevado.

En estas muestras se usó el tiempo de limpieza de 30 s así como el cociente más favorable entre los gases: $Ar/O_2 = 1/3$. Adicionalmente con este cociente

se incrementó la cantidad total de los gases en la descarga de plasma quedando en los límites de la presión de trabajo de plasma (muestras M y N).

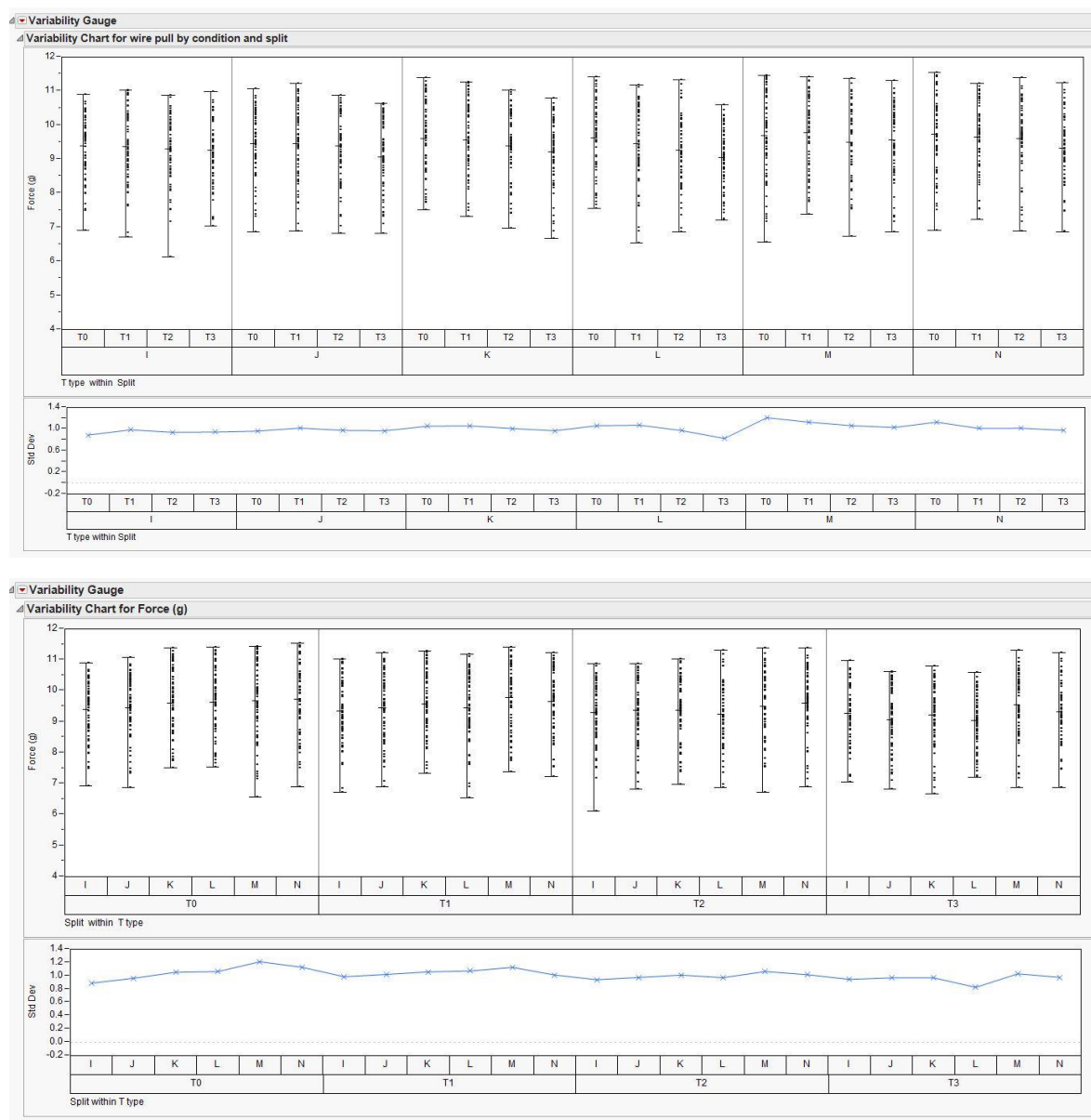


Figura 4.4 Resultados de plasma a través del tiempo.

Se observa claramente que se logró una optimización del tiempo de vida > 8 horas para las muestras M y N.

4.4 Resultados de caracterización de intermetálicos a diferentes temperaturas

4.4.1 Exposición a 170C

Al someter la muestra de Control de Oro/Aluminio a la temperatura típica de trabajo de 170°C se puede apreciar el comportamiento de Intermetálicos y adherencia a través del tiempo.

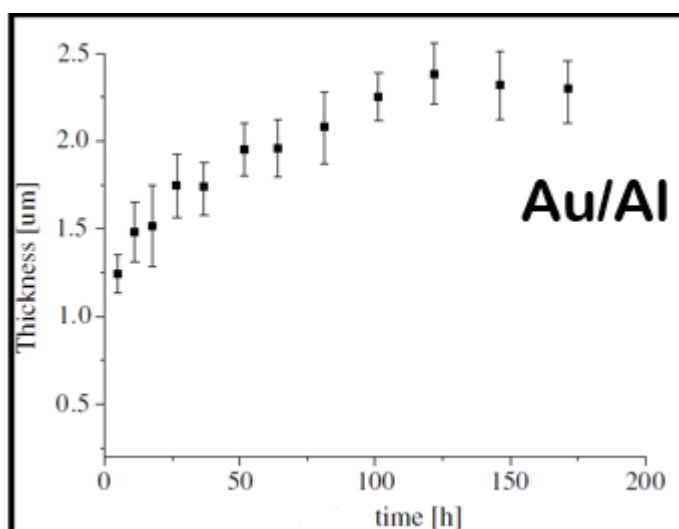


Figura 4.5 Medición de intermetálico entre el Au/Al a través del tiempo.

Las piezas fueron sometidas a esta temperatura durante 200 horas y se tomaron muestras de su adherencia a fin de graficar su comportamiento.

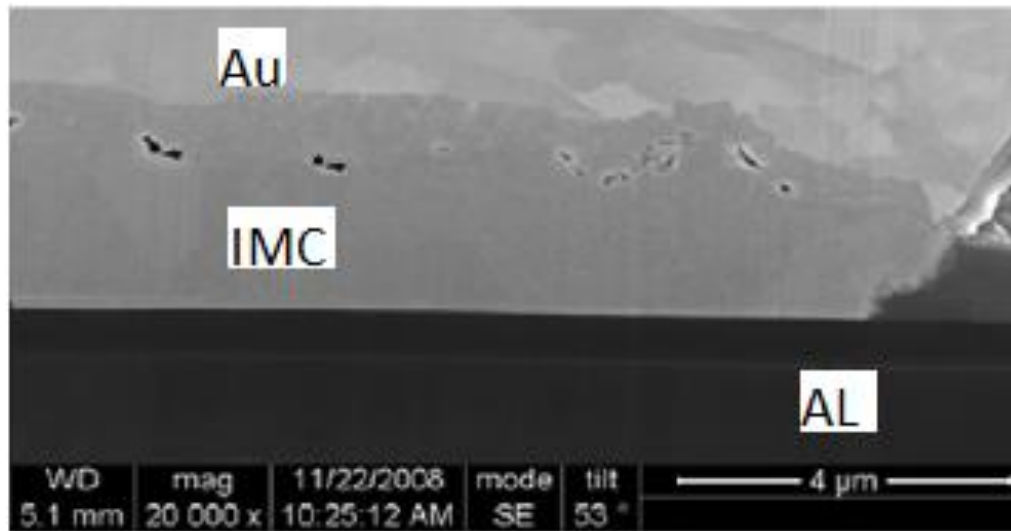


Figura 4.6 Crecimiento intermetálico entre el Au/Al.

Se aprecia el crecimiento de intermetálicos en la conexión Au/Al desde el $T=0$.

Su crecimiento es sostenido a través del tiempo y durante su misma temperatura

Al someter la muestra de Cobre/Aluminio a la misma temperatura típica de trabajo de 170°C se puede apreciar el comportamiento de Intermetálicos y adherencia a través del tiempo.

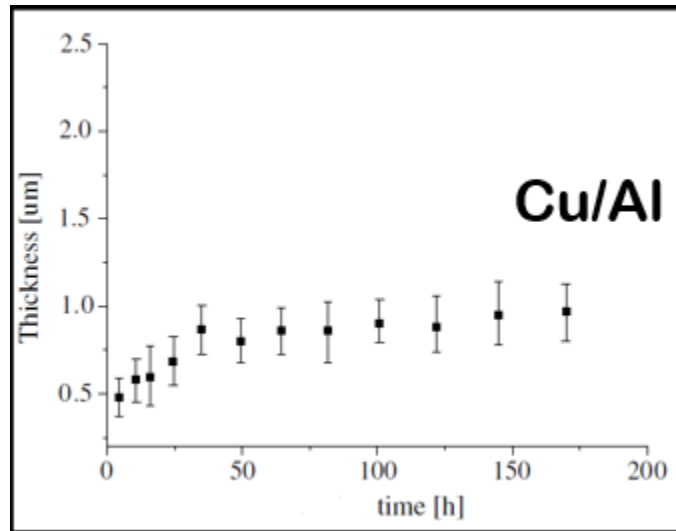


Figura 4.7 Medición de intermetálico entre el Cu/Al a través del tiempo.

Las piezas fueron sometidas a esta temperatura durante 200 horas y se tomaron muestras de su adherencia a fin de graficar su comportamiento.

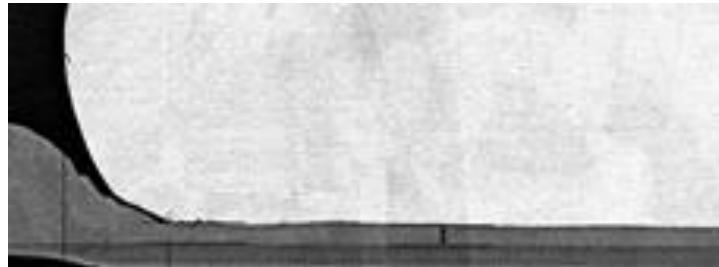


Figura 4.8 Crecimiento intermetálico entre el Cu/Al.

El crecimiento de Intermetálicos es difícil apreciar en el $T=0$ en la conexión Cu/A, No se aprecia un crecimiento notable manteniendo la misma temperatura a través del tiempo.

Basados en los análisis iniciales, el modo de crecimiento de las uniones de Cu/Al difiere en forma y estructura de las uniones de Au/Al, la cual se asume que es debido a sus propiedades atómicas.

Datos obtenidos en evaluaciones anteriores indican que la velocidad de crecimiento de IMC en alambre de Oro es 10 veces mayor al alambre de Cobre, en el alambre de Oro es posible ver crecimiento de IMC a un $T=0$, incluso varios procesos requieren un nivel de cobertura $\sim 70\%$ para $T=0$ a fin de considerar la conexión como confiable, en este proceso se forman pequeñas islas de IMC a través de la superficie de soldado.

La temperatura promedio de trabajo de las piezas de Cobre es $\sim 170^\circ\text{C}$, a esta temperatura el Oro presenta cambios drásticos en su estructura de Intermetálicos los cuales pueden ocasionar aumentos de resistencia del material y la aparición de huecos lo que en algún momento favorecerá la aparición de fracturas extensas que debilitaran el material.

4.4.2 Exposición a 200C

Al someter la muestra de Control de Oro/Aluminio a la temperatura atípica de 200°C se puede apreciar el comportamiento de Intermetálicos y adherencia a través del tiempo.

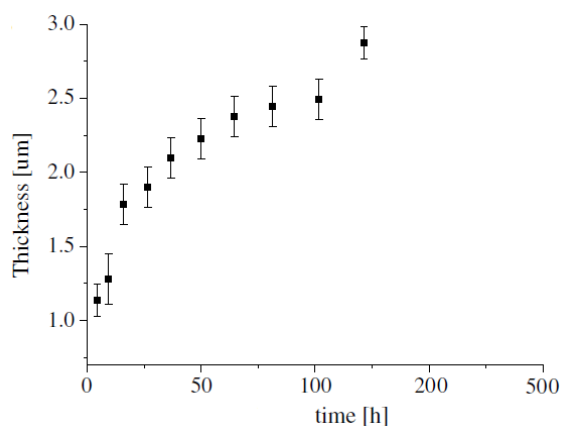


Figura 4.9 Medición de intermetálico entre el Au/Al a través del tiempo.

Así mismo se puede observar un crecimiento pronunciado de compuestos Intermetálicos y desbordamiento exterior así como la aparición de huecos intermitentes.

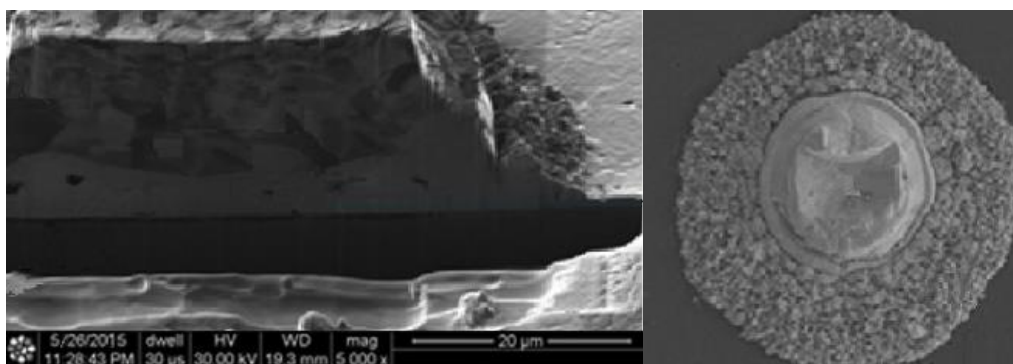


Figura 4.10 Crecimiento intermetálico entre el Au/Al.

Al someter la muestra de Cobre/Aluminio a la temperatura atípica de 200°C se puede apreciar el comportamiento de Intermetálicos y adherencia a través del tiempo.

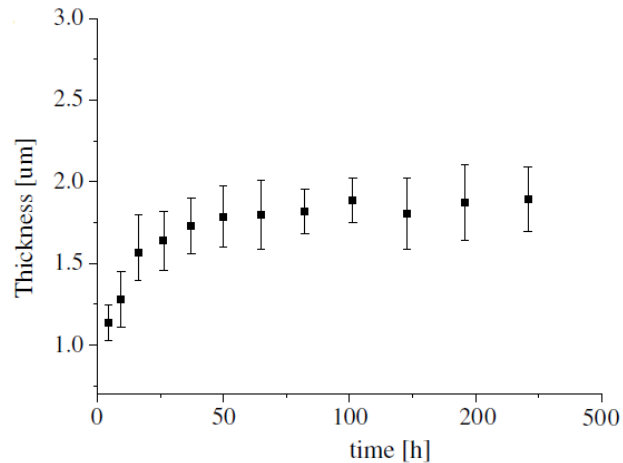


Figura 4.11 Medición de intermetálico entre el Cu/Al.

Así mismo se puede apreciar la aparición de compuestos más uniformes.

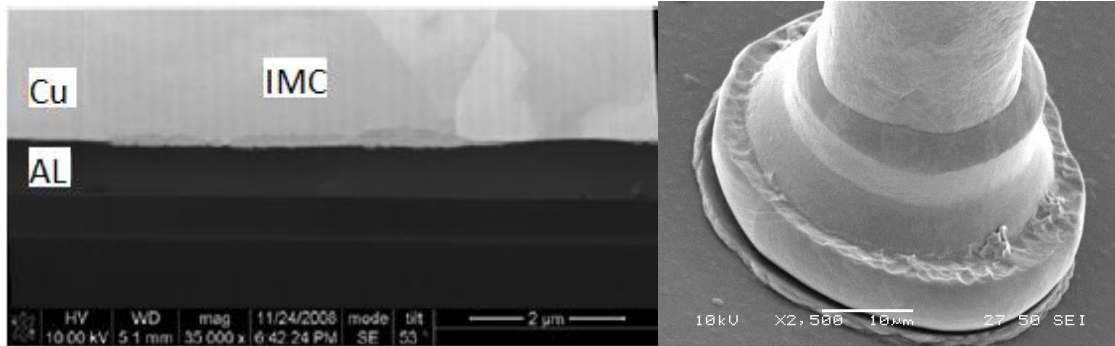


Figura 4.12 Crecimiento de intermetálico entre el Cu/Al.

Con el alambre de Oro el IMC es observado a un $T=0$, sin embargo se puede notar un crecimiento desmedido de intermetálicos cuando la pieza se somete a altas temperaturas.

En cambio el alambre de Cobre solo presentara crecimiento intermetálico después de alguna exposición a temperatura y tiempo lo cual lo hace más

difícil de predecir de manera confiable cuál será su comportamiento en el campo de trabajo.

Los resultados anteriores nos indican una tendencia del alambre de Cobre a obtener compuestos intermetálicos más estables a través del tiempo cuando la pieza se mantiene en su temperatura de trabajo.

4.5 Optimización final del proceso

Debido a las fallas iniciales encontradas en las muestras de confiabilidad se realizará la optimización del proceso de WB a fin de encontrar las variables más importantes que afectan la prueba de HAST.

Mediante Diseño de experimentos se realizó la siguiente investigación a fin de obtener las variables de entrada más importantes en el proceso de Wirebond con alambre de Cobre.

Inputs			Output						
Wire	Diameter (μ)	BSS (grams/mil ²)	T0	Decap	T1 (after MSL3/260)	Decap	HAST	T1	DECAP
Cu	36	8	97.70%	?	?	?	?	?	?
Cu	36	10	98.25%	?	?	?	?	?	?
Cu	36	12	97.77%	?	?	?	?	?	?
Cu	39	8	98.73%	?	?	?	?	?	?
Cu	39	10	95.51%	?	?	?	?	?	?
Cu	39	12	96.49%	?	?	?	?	?	?
Cu	43	8	95.88%	?	?	?	?	?	?
Cu	43	10	92.40%	?	?	?	?	?	?
Cu	43	12	99.43%	?	?	?	?	?	?

Tabla 4.5 Configuración del experimento de BSS a través del tiempo.

Se tomaron mediciones a las muestras para adherencia (ball Shear), diámetro de bola y relación de diámetro de bola vs adherencia (BSS o Ball Shear Stress).

En base a las primeras mediciones se puede apreciar los 3 niveles de diámetros utilizados para la evaluación, 36 μ , 39 μ y 43 μ .

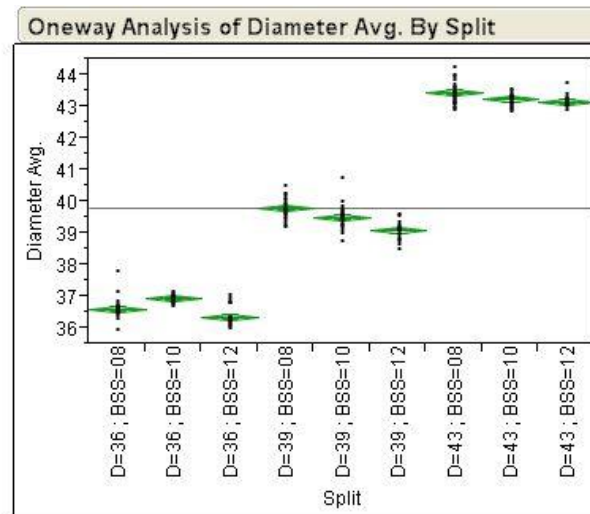


Figura 4.13 Diámetro de bola comparado en varios niveles de BSS.

Así mismo los 3 niveles de BSS (gramos/mil²) deseados, 8, 10 y 12.

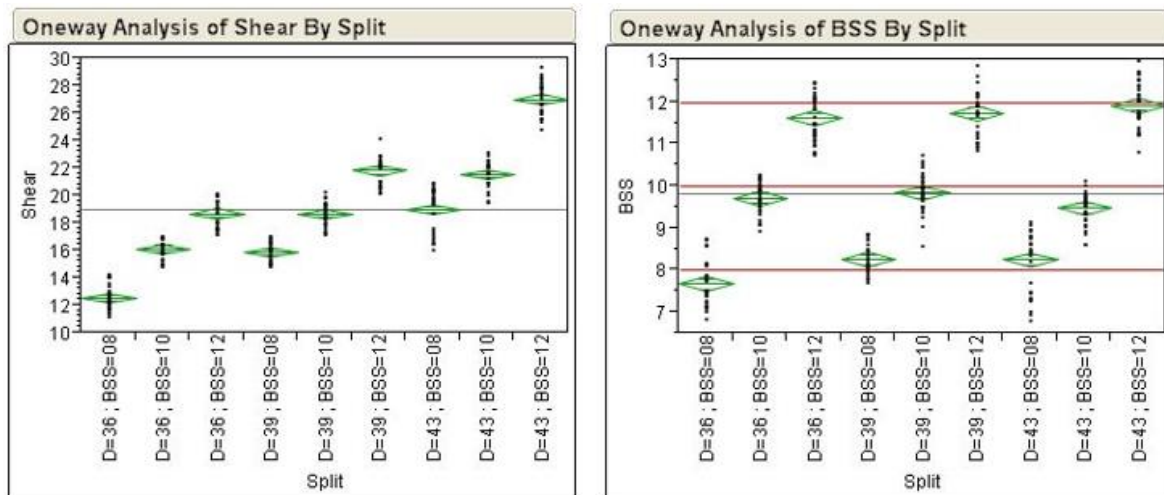


Figura 4.14 Resultados de ball shear en varios niveles de BSS.

De experimentación previa se conoce el valor óptimo de BSS para conexiones Au/Al el cual requiere un valor mínimo de 4.5 gramos/mil²¹⁷.

Sin embargo, este valor es desconocido para conexiones de Cu/Al y los posibles efectos en la conexión con el Aluminio.

Se inspeccionaron las primeras muestras inmediatamente después del alambrado (T=0) a fin de verificar posibles características de la bola después de ser removida del pad de Aluminio, de la misma manera se analizaron después de MSL y después de HAST.

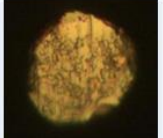
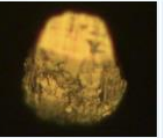
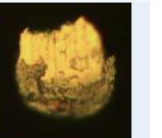
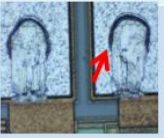
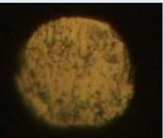
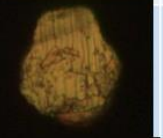
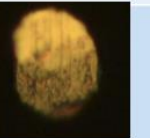
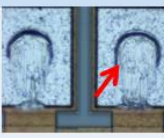
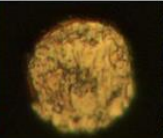
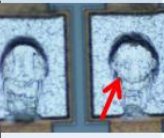
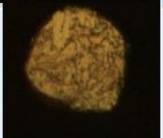
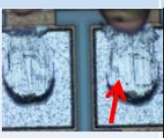
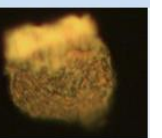
	Diámetro de bola = 36		Diámetro de bola=39		Diámetro de bola=43	
	Pad	Ball	Pad	Ball	Pad	Ball
BSS=8						
BSS=10						
BSS=12						

Tabla 4.6 Inspección de bolas removidas con diferentes condiciones de diámetros y BSS.

No se observa ninguna característica específica en la muestra que indique una malformación o falla.

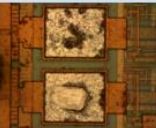
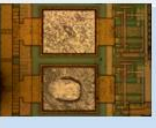
	Diametro de bola = 36		Diametro de bola=39		Diametro de bola=43	
	Pad	Ball	Pad	Ball	Pad	Ball
BSS=8						
BSS=10						
BSS=12						

Tabla 4.7 Inspección de bolas removidas con diferentes condiciones de diámetros y BSS después de MSL.

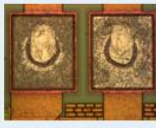
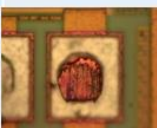
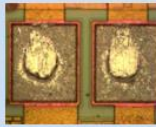
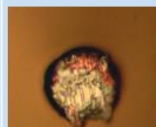
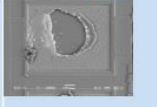
	Diametro de bola = 36		Diametro de bola = 38		Diametro de bola=43	
	Pad	Ball	Pad	Ball	Pad	Ball
BSS=8		 Valores bajos de BS				
BSS=12					 	  Pad Crater

Tabla 4.8 Inspección de bolas removidas con diferentes condiciones de diámetros y BSS después de HAST.

Las inspecciones iniciales de la muestra después de HAST indican valores bajos de Ball shear correspondientes a bolas desprendidas o con poca adherencia, así mismo se observa daño en el pad o pad cráter en las muestras con valores de BSS más altos.

La grafica de respuesta a través del tiempo nos indica un posible rango de trabajo para las muestras de cobre.

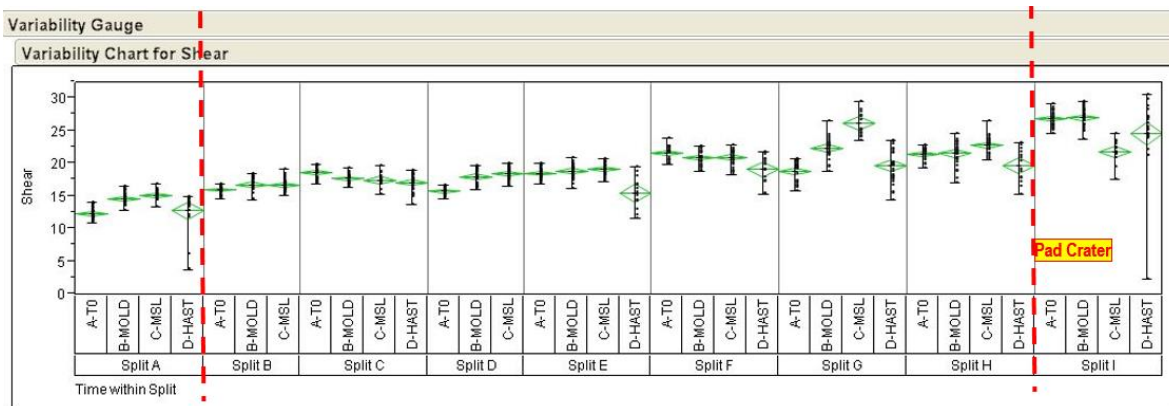


Figura 4.15 Resultados de ball shear en varios niveles de BSS.

Se observan áreas negras alrededor de la bola de cobre después de la prueba de MSL, esto no refleja alguna posible corrosión.

Se observan valores bajos de ball shear después de MSL/HAST cuando se utilizan combinaciones bajas de diámetro/BSS, los valores altos de BSS causan pad cráter.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Objetivos logrados

La introducción del alambre de cobre en los procesos de manufactura permitirá a las industrias reducir costos de materiales de una manera dramática sin afectar los resultados eléctricos esperados por los clientes.

En la actualidad el método de manufactura de “Flip Chip” está generando más fuerza debido a la facilidad de poner circuitos más complejos en un espacio más reducido, sin embargo el costo de un circuito con alambre de cobre sigue siendo una gran ventaja.

Mediante la siguiente investigación se logró concluir una ventana de trabajo recomendada para el proceso de cobre.

Split	Diametro (μ)	BSS (grams/mil^2)	Desencapsulado despues de Moldeo	ATE (Prueba Electrica) t=0	ATE despues de SML	Desencapsulado despues de MSL	ATE despues de HAST	Desencapsulado despues de HAST
A	36	8	no fallas/anomalias	98%	100%	no fallas/anomalias	100%	No rastros de Cu en el pad / valores bajos de BS
B	36	10	no fallas/anomalias	92%	100%	no fallas/anomalias	100%	No se considero
C	36	12	no fallas/anomalias	98%	100%	no fallas/anomalias	100%	No rastros de Cu en el pad
D	39	8	no fallas/anomalias	99%	100%	no fallas/anomalias	100%	No rastros de Cu en el pad
E	39	10	no fallas/anomalias	96%	100%	no fallas/anomalias	100%	No rastros de Cu en el pad
F	39	12	no fallas/anomalias	96%	100%	no fallas/anomalias	100%	No rastros de Cu en el pad
G	43	8	no fallas/anomalias	96%	100%	no fallas/anomalias	100%	No rastros de Cu en el pad
H	43	10	no fallas/anomalias	92%	100%	no fallas/anomalias	100%	No se considero
I	43	12	no fallas/anomalias	99%	100%	no fallas/anomalias	100%	Rastros de Cu en el pad / Valores bajos de BS / Pad Crater

Diameter	36	36	36	39	39	39	43	43	43
BSS	8	10	12	8	10	12	8	10	12
B. Shear	12.6	15.8	19	14.8	18.5	22.3	17.2	21.5	25.8

Tabla 5.1 Ventana de trabajo recomendada

Así mismo usando este trabajo como referencia se puede implementar un nuevo método de control para el proceso de cobre el cual no lo controle la fuerza de adherencia mínima requerida para las conexiones, sino también

controle los valores mínimos y máximos de BSS en conjunto con un control adecuado de diámetro de bola a fin de transferir la energía ultrasónica de manera eficiente sin ocasionar conexiones débiles o daños en la superficie o “*Pad*” de Aluminio, En la actualidad para el proceso de oro se controla el diámetro de bola y el valor mínimo de BSS en 4.5 gramos/mil^2 ¹⁷.

Mediante la siguiente investigación se logró lo siguiente:

- Caracterizar el impacto eléctrico causado por la diferencia de impedancia del alambre de cobre a fin validar la substitución del mismo, los resultados de los experimentos indican que no hay una diferencia significativa en los resultados esperados en cuanto a prueba eléctrica, el alambre de cobre se puede utilizar como una alternativa viable a fin de reducir costos.
- Caracterizar la confiabilidad del alambre en pruebas de envejecimiento acelerado a fin de verificar la posible corrosión causada por el alambre de cobre, los resultados iniciales indican una mayor estabilidad de intermetálicos a través del tiempo al utilizar el alambre de cobre los cuales se traducen en menos ocurrencias de fallas debido a huecos o fisuras internas debido a fallas entre las diferentes capas de intermetálicos.

Capítulo 6. Trabajo Futuro

Se requiere continuar esta investigación a fin de evaluar los avances en aleaciones de cobre y sus impactos en la industria ya que en la actualidad se cuenta con nuevas aleaciones y nuevos procesos de dopajes los cuales afectan la manera en que el proceso de manufactura se lleva a cabo en la Industria.



Figura 5.1 Materiales disponibles para el proceso de alambrado de semiconductores

Actualmente se utiliza en producción el alambre de cobre recubierto de paladio, esta aleación le permite al alambre de cobre soportar los procesos de oxidación de una manera más efectiva e incrementar el tiempo de vida en el piso de manufactura, uno de las desventajas de este material es el incremento de la dureza del alambre debido al recubrimiento de Paladio.

De la misma manera otra alternativa es el alambre de Plata el cual se encuentra en fase de desarrollo y puede llegar a ser una alternativa viable para el proceso de alambrado, sin embargo hay poca experiencia en la industria de los semiconductores en cuanto a los riesgos presentados por estas nuevas aleaciones.

Anexo 1. Producción

Como parte de los trabajos de Investigación se logró tramitar la patente US 9,269,887 B1.



US009269887B1

(12) **United States Patent**
Juskey et al.

(10) **Patent No.: US 9,269,887 B1**
(45) **Date of Patent: Feb. 23, 2016**

(54) **ULTRATHIN FLIP-CHIP PACKAGING
TECHNIQUES AND CONFIGURATIONS**

(71) Applicant: **TriQuint Semiconductor, Inc.**,
Hillsboro, OR (US)

(72) Inventors: **Frank J. Juskey**, Opopka, FL (US);
Robert C. Hartmann, Opopka, FL
(US); **Thomas S. Morris**, Lewisville,
NC (US); **Howard T. Glascock**,
Graham, NC (US); **Jose F. Ordonez**,
Longwood, FL (US)

(73) Assignee: **TriQuint Semiconductor, Inc.**,
Hillsboro, OR (US)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this
patent is extended or adjusted under 35
U.S.C. 154(b) by 0 days.

(21) Appl. No.: **14/619,927**

(22) Filed: **Feb. 11, 2015**

(58) **Field of Classification Search**

CPC H01L 21/56; H01L 23/315
USPC 257/778, 698, 724; 438/108, 124
See application file for complete search history.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

2004/0227258	A1 *	11/2004	Nakatani		H01L 23/49805
					257/787
2008/0023805	A1 *	1/2008	Howard		H01L 23/3121
					257/666
2008/0076209	A1 *	3/2008	Klink		H01L 21/56
					438/112
2008/0224324	A1 *	9/2008	Kawada		H01L 23/3121
					257/778
2008/0284045	A1 *	11/2008	Gerber		H01L 21/561
					257/778
2010/0244229	A1 *	9/2010	Vittu		H01L 25/561
					257/692
2013/0234344	A1 *	9/2013	Juskey		H01L 25/16
					257/778
2014/0162404	A1 *	6/2014	Zhang		H01L 23/49582
					438/108
2015/0194377	A1 *	7/2015	Mahler		H01L 23/49586
					257/676

BIBLIOGRAFÍA

1. JEDEC Solid State Technology Association (2004, Julio). *Wirebond shear Methods (EIA/JESB22-B116)*.
2. WIRE BONDING IN MICROELECTRONICS MATERIALS George C. Hartman
3. Department of Defense United States of America (2004, junio). Test Method Standard Microcircuits (MIL-STD-883F). Estados Unidos. Department of Defense.
4. Intermetallic Formation in Gold-Aluminum Systems. Philofsky, E., Solid State Electronics, Vol. 13
5. 5. Kulicke And Soffa. (2005). Wirebondin Microelectronic Industry.
6. [http://www.kns.com/Intermetallic Formation.-](http://www.kns.com/Intermetallic%20Formation.-)
7. http://www.techiedo.com/intermetallic_formation.htm
8. 7. Preliminary failure Analysis Reports for 77330: Skyworks Solution.
9. 8.Milton Ohring, “Reliability and Failure of Electronic materials & devices”.
- 10.9. J. Devaney, “Thermalsonic Ball Bond Evaluation by a Bond Pluck Test”, Proceedings of ISTFA IRPS, 1984.
- 11.10. E. Philofsky, “Design Limits When Using Gold Aluminum Bonds”, 9th Annual Proceedings, Reliability Physics, 1971.
- 12.11. G. Clatterbaugh, J. Weiner and H. Charles, “Gold-Aluminum Intermetallics: Ball Bond Shear Testing” IEEE, December 1984.
- 13.Heraeus Wire Division
- 14.<http://elementos.org.es/oro>
- 15.A. Pequegnat, Effect of EFO parameters on Cu FAB hardness and work hardening in thermosonic wire bonding.

16. <https://nepp.nasa.gov>
17. J. Ordonez, Caracterizacion de la formacion de intermetálicos en unions de soldado de alambre de oro con superficies de aluminio, Octubre 2007.
18. A. Bischoff, F. Aldinger, “ Reliability criteria of new low-cost materials for bonding wires and substrates,” 34th Proceedings ECTC, New Orleans, 1984 pp 411-417.
19. “Stres test qualifications for Automotive-Grade Integrated Circuits” Automotive Electronic Council: CDF – AEC – Q100 – Rev June, 1994.
20. B. Angel, E. Levine, And A. Shore (2004), The Art of Cros Sectioning, ASM microelectronics Failure Analysis Desk Reference.
21. Department of defense United States of America. Wire Pull Method for Microelectronics (MIL-PRF-38534). Department of Defense.
- 22.

Glosario

Glosario de términos en Ingles usados comúnmente en la Industria de los Semiconductores.

Termino Ingles	en Traducción	Descripción
A		
Alloy	Aleación	Sustancia con propiedades metálicas compuestas de dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es metal.
Assembly	Ensamble	Serie de pasos encaminados a la construcción de los circuitos semiconductores.
B		
Backgrinding	Rebajado	Proceso de rebajar las obleas de Silicio mediante una rueda dentada con polvo de diamante hasta alcanzar el espesor deseado.
Bond Fingers	Niveles de Soldado	Porción del paquete en el tablero en el cual se habrá de conectar el alambre con el dado.
Bond Off	Cortado de alambre	Una soldadura extra que se pone en el tablero con el propósito de

preparar la siguiente bola que se soldara.

Bonding Diagram	Diagrama de Alambrado	Diagrama que nos muestras la distribución de los alambres al momento de conectar el dado con el substrato, el mismo puede contener información acerca de las distancias y altura de los alambres.
-----------------	-----------------------	---

Bonding Pad	Pad de Soldado	Es un área metálica en la superficie del dado que se utiliza para soldar el alambre.
-------------	----------------	--

C

Curing	Curado	Exposición a una temperatura que promueve el enlace molecular de un adhesivo epóxico o resina de moldeo con la finalidad de alcanzar su rigidez final.
--------	--------	--

D

Defect	Defecto	Imperfección física la cual no permite que la pieza alcance su calidad requerida.
--------	---------	---

Die	Dado	Microcircuito proveniente de una oblea de Silicio o Galio.
-----	------	--

Die Attach	Pegado de Datos	Etapa del proceso donde se selecciona un dado de la oblea de Silicio o Galio y se monta en un tablero electrónico adhiriéndolo mediante el uso de una resina epóxica.
DOE (Design of Experiments)	Diseño de experimentos	Combinación de variables críticas estadísticamente diseñadas con la finalidad de predecir las variables de salida como consecuencia de la variación de variables de entrada.
Doping	Dopante	Es la Introducción de una impureza en una estructura de un cristal semiconductor para modificar sus propiedades eléctricas creando una concentración de portadores N o P .
F		
Failure Analysis	Análisis de Fallas	Es una Investigación que se realiza con circuitos que han fallado con el propósito de verificar la falla reportada y verificar el mecanismo de la misma.

Failure Rate	Índice de Fallas	Es el porcentaje de fallas que ocurrirán en una población de circuitos. Se expresa normalmente en términos de porcentajes, partes millón.
--------------	------------------	---

Foreign Material Fracture	Partículas Externas Fractura	Cualquier material que es externo al microcircuito. Rompimiento o Fractura de un material.
---------------------------	------------------------------	---

G

Gallium Arsenide (GaAs)	Galio Arsénico	Material Semiconductor cuya gran movilidad de electrones lo lleva a ser altamente usa
-------------------------	----------------	---

H

High Temperature Storage	Almacenamiento a alta temperatura	Almacenamiento de piezas en hornos de alta temperatura, usualmente a 150°C por periodos cercanos a las 1000 horas.
--------------------------	-----------------------------------	--

I

Interconnect	Interconexión	Metalización que conecta dos o más elementos activos en la superficie de un dado, también se les llama así a los alambres que conectan el dado con el tablero electrónico.
Intermetallic Compound	Compuesto Intermetálico	Compuesto formado entre dos metales que se encuentran unidos a nivel molecular uno con otro.

K

Kirkendall Voids	Huecos de Kirkendall	Es una corrosión que resulta de la Interacción del oro con el Aluminio, esta corrosión puede disminuir la adhesión de la bola de oro soldada y disminuir la conducción de la corriente en la interface, en casos extremos los alambres puede llegar a desprenderse.
------------------	----------------------	---

M

Microcrack	Microfisura	Es una fisura muy pequeña entre alguna metalización del circuito típicamente no detectable usando magnificación óptica en las áreas de metalización, típicamente ocurre en la zona de contactos lo cual puede
------------	-------------	---

		llegar a ocasionar discontinuidad del circuito.
Micron	Micrón (μm)	Unidad de longitud $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$
Moisture Resistance	Resistencia a la humedad.	Prueba en la cual se someten piezas a ciclos de alta humedad y stress de alta temperatura para determinar la habilidad de supervivencia de las piezas a severas condiciones ambientales.
Molded Device	Paquete Moldeado	Circuito micro electrónico el cual es completamente encapsulado en resina epóxica o compuesto de moldeo.
P		
Probe	Prueba	Se utiliza una punta de metal para hacer el contacto eléctrico en cada uno de los pads del circuito,
S		
Sample	Muestra	Circuitos individuales aleatoriamente seleccionados de un lote de material el cual se asume que representan las mismas características eléctricas que el resto del lote.

Scanning Electron Microscope	Microscopio de barrido electrónico	Técnica de microscopía que alcanza una alta resolución mediante la utilización de electrones para detectar la imagen logrando una amplificación de la imagen varias veces mayor a la lograda en un microscopio óptico.
Substrate	Substrato	Superficie base en donde el dado u otros componentes son montados.

T

Thermal resistance	Resistencia térmica	Normalmente expresada en términos de °C/F, es el indicador de la capacidad del paquete para disipar el calor generado por los microcircuitos durante su operación.
Thermal shock	Choque térmico	Similar a ciclos de temperatura, excepto que esta prueba es mas agresiva y usualmente se somete al circuito a ciclos desde los 0°C hasta los 100°C.

V

Void	Hueco	Ausencia del material dentro de un volumen macroscópicamente uniforme.
------	-------	--

W

Wafer	Oblea	Disco de material semiconductor en cuya superficie se crea una matriz de dados con diferentes arreglos electrónicos.
Wafer Saw	Cortado de Oblea	Proceso de ensamble donde se corta la Oblea en paquetes individuales.
Wire Bond	Alambrado	Proceso de ensamble donde se conecta el dado semiconductor con el substrato mediante alambres.
Wire Pull	Jalón de alambre	Jalar los alambres hasta destruirlos con el propósito de medir la fuerza de adherencia de las conexiones.

Y

Yield	Rendimiento	Proporción de las piezas buenas en un lote de material.
-------	-------------	---