

Estado actual y avances en las tecnologías de ensamblado de los módulos de potencia asociados al vehículo eléctrico

Itxaso Aranzabal, Asier Matallana, Oier Oñederra, David Cabezuelo, Iñigo Martínez de Alegría.
Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad del País Vasco, Bilbao, España.
Email: itxaso.aranzabal@ehu.es

Abstract—Las tecnologías de ensamblado empleadas en el diseño de los módulos de potencia son de suma importancia y afectan directamente al rendimiento, fiabilidad, eficiencia y coste del inversor.

El presente artículo trata de analizar y comparar las tecnologías de ensamblado empleadas actualmente en el diseño de módulos de potencia asociados al VE (Vehículo Eléctrico). En este sentido, se realiza una comparativa y se analizan las ventajas y desventajas que presentan los inversores de potencia empleados actualmente en los VE.

Index Terms—Vehículo eléctrico, módulos de potencia, tecnologías de ensamblado, fiabilidad, tecnologías de interconexión.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la actividad en el ámbito del VE (Vehículo Eléctrico) ha sido muy importante. Su desarrollo se ha visto motivado por la escasez de recursos petrolíferos, por el calentamiento global y por el cambio en la conciencia ecológica de la sociedad. Las nuevas tecnologías en el desarrollo de motores eléctricos, la mejora de la capacidad de almacenamiento de las baterías y los avances en el campo de la electrónica de potencia han hecho que el VE sea una alternativa al vehículo de combustión. No obstante, los nuevos avances deben ser compatibles con la producción en masa prevista para este tipo de vehículos y deben asegurar ciertas condiciones de fiabilidad y eficiencia [1], [2].

Hoy en día, en la electrónica de potencia asociada a la tracción de los VEs se utilizan módulos inversores dotados de transistores IGBT y diodos (ver figura 1). El ensamblado del módulo proporciona a los semiconductores (IGBTs y diodos) las interconexiones eléctricas necesarias, el soporte mecánico y la gestión térmica apropiada para obtener un buen intercambio de calor con el exterior.

Asimismo las especificaciones del VE imponen unos requisitos de diseño y fabricación muy estrictos: densidad de corriente elevada, mayor frecuencia de conmutación, capacidad de disipar grandes cantidades de calor, someterse a cambios de temperatura bruscos, trabajar en ambientes hostiles (suciedad en el motor, vibraciones), etc. En este sentido, el continuo y rápido avance en la tecnología de los semiconductores de potencia ha conseguido dispositivos muy efectivos capaces de conducir niveles de corriente cada vez mayores. El diseño del ensamblado, sin embargo, se ha convertido en un elemento limitador en muchos casos. Por ello, para abordar sus limitaciones,

en la actualidad la atención de muchos investigadores se centra en los aspectos de diseño del ensamblado.

Para implementar un diseño fiable del módulo inversor, es crucial analizar una serie de parámetros técnicos (parámetros eléctricos, térmicos y termo-mecánicos) que evalúen de manera cuantitativa la mejora en el rendimiento, fiabilidad, eficiencia, densidad de potencia y coste del inversor de potencia. Entre los parámetros técnicos a evaluar se encuentran: la impedancia térmica (resistencia y capacitancia), la temperatura máxima de operación, resistencia e inductancia máxima parásita, conductancia, el tiempo de vida (power cycling and thermal cycling), etc.

Este artículo presenta un estudio de las tecnologías de ensamblado de inversores de electrónica de potencia más innovadoras. Asimismo, se realiza el estado del arte de las tecnologías de ensamblado aplicadas a los inversores de electrónica de potencia asociados al PCU (*Power Control Unit*, Unidad de control de potencia) de los VEs.

II. TECNOLOGÍAS DE ENSAMBLADO DE LOS MÓDULOS DE POTENCIA

En la figura 2 se muestra una visión general de la disposición de las capas y elementos existentes en un módulo de potencia. Dependiendo de la configuración de ensamblado elegida se puede descartar el uso de alguna de las capas.

Los aspectos más importantes a tener en cuenta en el desarrollo de nuevos diseños de encapsulado son:

- Chip o dispositivo semiconductor: el material, las dimensiones y el diseño del dispositivo son determinantes para conocer el comportamiento del mismo en distintas condiciones de operación.
- *Die-attach*: representa la unión entre el chip y el DBC (*Direct bonded copper*) .
- El diseño del DBC (constituye el soporte en el que se ubican los semiconductores): material, espesor de cada capa, estructura del sustrato.
- *Substrate-attach*: el material y tecnología empleada en la conexión entre el DBC y el *base plate*.
- Tecnologías de interconexión: su objetivo es mejorar la conductividad, aumentar la corriente máxima admisible de los elementos de interconexión y disminuir las pérdidas debidas a las inductancias parásitas.

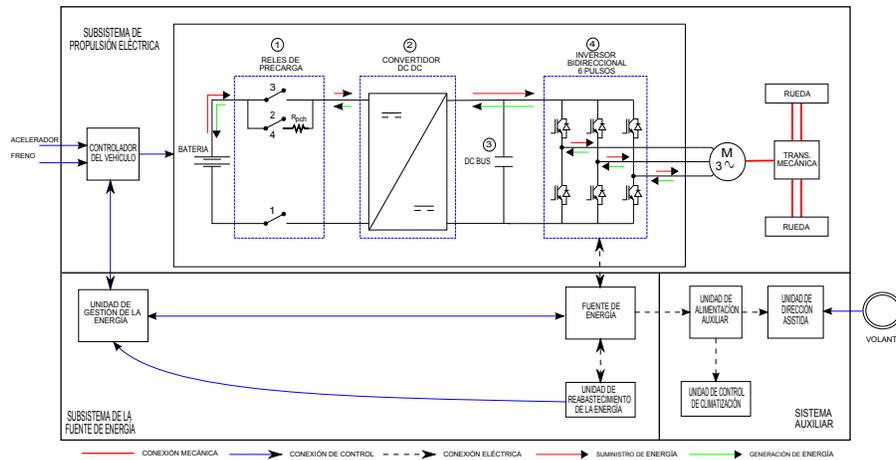


Figura 1. Topología de un inversor de potencia trifásico para el sistema de propulsión del VE.

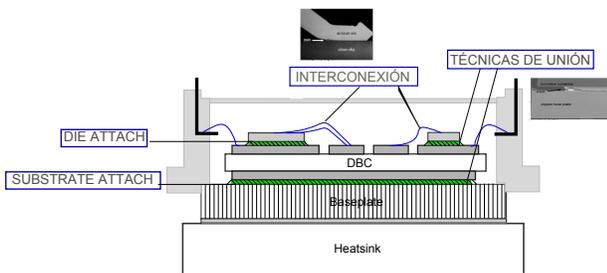


Figura 2. Ensamblado de un módulo de potencia estándar.

- *Base plate*: su objetivo es aportar un soporte mecánico adecuado. Suele ser útil cuando el sustrato donde se ubica es frágil.
- El método de refrigeración: las especificaciones del VE requieren mayor capacidad de corriente y mayor frecuencia de conmutación en los semiconductores de potencia. Esto impone unos requisitos de disipación de potencia en los semiconductores muy estrictos. Por ello es crucial un método de refrigeración que permita un buen intercambio de calor con el exterior.

La figura 3 muestra un resumen y comparativa de las tecnologías aplicadas en los módulos de potencia de los VEs en cada una de las capas.

III. TECNOLOGÍAS DE INTERCONEXIÓN

La eficiencia de la conversión eléctrica de un módulo de potencia depende en gran medida del rendimiento de los semiconductores de potencia. Sin embargo, las interconexiones dentro del módulo añaden pérdidas de potencia adicionales debido a las inductancias, resistencias y capacitancias parásitas. Para reducir estos parámetros, se han desarrollado nuevas técnicas de interconexión.

En la actualidad, la técnica de interconexión empleada principalmente es la unión por hilo o *wire bonding*. Esta técnica se utiliza para conectar una cara del semiconductor de potencia con otros elementos de conexión (p.e. otro semiconductor o una

lámina conductora que une los interruptores a los terminales del módulo). Esta técnica de soldadura se realiza a temperatura ambiente y se utiliza energía ultrasónica (a una frecuencia de entre 40 – 100kHz), para conectar un hilo de aluminio (alrededor de 100-500 μm de espesor) a una superficie hecha de aluminio, cobre u oro. Puesto que los citados hilos de unión están limitados por su capacidad de corriente, se utilizan varios hilos de conexión en paralelo para cubrir intensidades de corriente más altas [3]. Sin embargo, también hay que tener en cuenta, que la disposición de hilos en paralelo, provoca el acoplamiento mutuo entre las inductancias parásitas de cada hilo.

Otra técnica de interconexión que está emergiendo es la conocida como *ribbon bonding* o cintas de unión. Esta técnica mejora el rendimiento, ofrece capacidad de conducción de corriente mayor y permite mejorar la disipación del calor. Toyota Prius Hybrid III 2010 emplea los *ribbon bonding* como técnica de interconexión.

Las figuras 4(a) y 4(b) muestran los módulos de potencia que emplea Toyota en el Prius Hybrid 2004 y en el Prius Hybrid III 2010. Asimismo en las figuras 4(c) y 4(d) se muestra en detalle las interconexiones tipo *wire bonding* y *ribbon bonding*.

Por otro lado, el Fraunhofer Institute IZM [4] ha centrado sus estudios en *Ag sintered ribbon bonding*.

El siguiente nivel de mejora es el utilizar otros materiales como el Aluminio-Cobre (Al-Cu) o simplemente Cobre (Cu) que permitan superar los límites actuales de conductividad [5], [6]. En este sentido, la tecnología “*Infineon.XT*” implementada por Infineon apuesta por el *Copper wire bonding* y los *Ultrasonic welded terminals* [7]. La tabla I muestra los valores de conductividad térmica, resistividad eléctrica y CTE (coeficiente térmico de expansión) de los hilos de Cobre y de Aluminio. Tal y como se puede ver el Cobre presenta propiedades superiores al Aluminio.

SEMIKRON por su parte, ha desarrollado una tecnología de interconexión innovadora conocida como “*SKIN Technology*” [8]. En ella, una lámina flexible compuesta por capas de Ag/Cu/polymide y sinterizada sobre el chip sustituye a los hilos

	Toyota Prius 2004	Toyota Prius III 2010	Nissan LEAF	HybridPack 1 >30kW	HybridPack 2 >80kW	Semicon SKIM 63/93	Módulo J1-Serie - Mitsubishi Electric	Semicon Sklip 4	Toyota Lexus 600h
IGBT-die	Die Wire bonding (Al wires)	Die Ribbon wiring (Al)	Die Wire bonding (Al wires)	Die Al Wire bonding	Die Al Wire bonding /copper bonded terminals	Die Al Wire bonding	Die (SFM) (1)	Die No wire bonding (SKIN Technology) (2)	Die (SFM) (1)
Die-attach	solder	solder	soldadura libre de plomo	Solder	Solder	Sinterización (Skinter Technology)	Solder Lead (Pb)-free power module	Sinterización (Ag sintering)	Solder Lead (Pb)-free power module
DBC substrate	DBA Al AlN DBA Al	DBA Al AlN DBA Al	Placa de Cu-Mo soldadura libre de plomo Cu bar	DBC Cu DBC Al2O3 DBC Cu	DBC Cu DBC Al2O3 DBC Cu	DBC Cu DBC Al2O3/AlN DBC Cu	Cu Ti-PM	DBC Cu DBC Al2O3/AlN DBC Cu	Cu Cu
	Solder Baseplate	By brazing, soldadura fuerte No base plate (4)	No base plate	Solder Copper base plate	Solder cooper base plate with pin-fins	Por presión No base plate	Solder Lead (Pb)-free power module	Sinterización No base plate	Solder Lead (Pb)-free power module
Grasa térmica	ZnO Thermal Paste	No TIM	No TIM. New HTCI sheet	Grasa térmica	No TIM	Pressure contact technology	TIM	NoTIM	Doble TIM
Disipador	Al cold plate	Direct bond cooler. Cold plate	Cold plate	Al cold plate	No Cold plate.	Cold plate.	Cold plate	Cold plate	Cold plate
Refrigerante	Ethylene-Glycol/Water coolant			Refrigeración directa sobre base plate			Permite la refrigeración a doble cara.		Permite la refrigeración a doble cara.
Ventajas		* No base plate. * No capa TIM. * Al Ribbon bond. * El DBA directamente unido al cold plate * Aumenta un 30% el rendimiento térmico.	* No base plate. * No capa TIM. * Nueva capa HTCI [Heat spreading and insulating sheet] con conductividad térmica mejorada * Placa de Cu-Mo Compensa la diferencias de CTE entre el bus bar y el die. * Soldaduras libre de plomo. Reduce el fallo por fatiga térmica en las uniones por soldadura.		* No capa TIM. * No Cold plate. * Refrigeración directa sobre base plate. * Los pin fins sumergidos en el líquido refrigerante, reduce la R _{th} .	* No base plate. * Sinterización Ag entre el die y el DBC (Skinter Technology). * Contactos por presión. * Conexiones libre de soldaduras.		* No wire bonding. Tecnología SKIN (2) * No base plate. * Sinterización Ag entre el die y el DBC (Skinter Technology). * No base plate. * NoTIM Reduce la R _{th} del módulo.	* No base plate. * Conexión planar con laminas de Cu. (3) * Permite la refrigeración a doble cara.
Desventajas		* Base plate. * La capa interpuesta entre el DBA y el cold plate reduce la conductividad térmica del módulo.			* Fabricación compleja del base plate con pin fins.		* Necesita empaquetado para el conjunto del módulo. * Doble capa TIM. * Propiedades térmicas pobres del TCl		* Doble TIM * Ensamblado complejo, tanto eléctrica como térmicamente.

(1) La técnica DLB reduce las pérdidas de potencia disminuyendo la resistencia del conexionado y la inductancia del módulo. Para aplicar esta técnica es necesario que la parte superior del die se puede soldar. Para ello tanto IR como Mitsubishi emplean la técnica SFM (Solderable front metal) que consiste en recubrir la parte superior del die con un metal soldable.
 (2) Tecnología SKIN. Elimina las soldaduras, y emplea la técnica de la sinterización como técnica de unión entre el chip y el substrato.
 (3) Los Cu plates permiten la transferencia de calor hacia los cold plates (cooling tubes) por ambas caras.
 (4) Entre el DBA y el cold plate se inserta una capa perforada que permite reducir el stress térmico causado por la diferencia de CTEs.

Figura 3. Tabla comparativa de las tecnologías de ensamblado en los módulos de potencia de los VE.

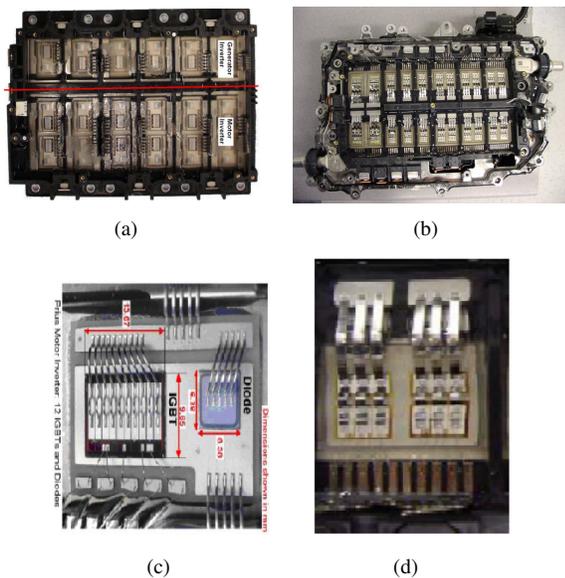


Figura 4. Tecnologías de interconexión en los módulos de potencia. (a) Wire bonds, Toyota Prius Hybrid 2004. (b) Ribbon bonding, Toyota Prius Hybrid 2010. (c) Detalle de los wire bonding. (d) Detalle de los ribbon bonding.

de conexión. Así se consigue aumentar los ciclos de potencia en un 70% [9].

Por otro lado, International Rectifier (IR) también ha desarrollado su propia tecnología a la que llama CoolIR. En ella, el chip ubicado en el DBC, presenta un recubrimiento superficial SFM (Solderable Front Metal) a doble cara (obtenido a partir de materiales como el titanio, níquel y plata) y permite eliminar

Tabla 1
VALORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL COBRE Y DEL ALUMINIO

	Aluminio	Cobre	Cobre us Aluminio
Resistividad eléctrica	2,7 $\mu\Omega \cdot cm$	1,7 $\mu\Omega \cdot cm$	-40%
Conductividad térmica	220 $W/m \cdot K$	400 $W/m \cdot K$	+80%
CTE	25 ppm / °C	16,5 ppm / °C	-35%

los wire bonds con la técnica “DLB (Direct Lead Bonded) die-attach” [10] (ver figura 5). El DLB reduce las pérdidas de potencia disminuyendo la resistencia del conexionado y la inductancia parásita del módulo.

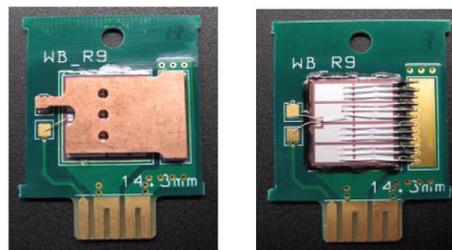


Figura 5. Tecnología de interconexión planar implementada por International Rectifier (IR)

Otros fabricantes también han desarrollado su propia tecnología de interconexión planar: Siemens AG por su parte ha

Tabla III
ESPESOR DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA PILA TÉRMICA.

DBC Material	Espesor de capa	
	Rangos (μm)	Valor típico (μm)
DBC Cu	200 - 600	300
DBC Al_2O_3 , AlN , AlSiC , Si_3N_4	250 - 850	500
DBC Cu	200 - 600	300

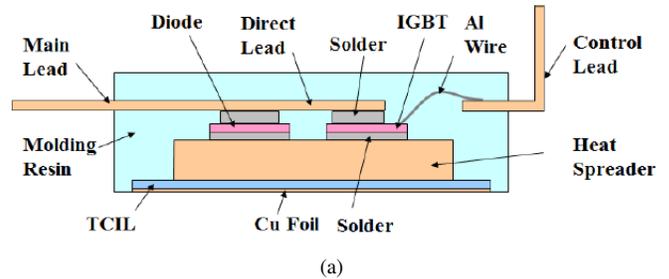


Figura 6. Estructura T-PM de Mitsubishi para el VE

desarrollado la tecnología *SiPlit* y *Mitsubishi* a desarrollado el *Cu lead bonded TPM automotive module* [11].

Sin embargo, aunque se están dando mejoras, aun deben superarse grandes retos técnicos (mejora de la conductividad eléctrica, mejora de conductividad térmica, aumento de los ciclos de vida, etc.) en estas tecnologías de desarrollo. En este sentido, en [12] se analizan los beneficios relativos y los desafíos de las tecnologías de interconexión. En la tabla II se muestra una comparativa de las diferentes tecnologías.

IV. DISEÑO DEL DBC

El DBC constituye el soporte en el que se ubican los semiconductores (IGBTs y diodos). Su objetivo es aportar un emplazamiento mecánico, dotar de aislamiento eléctrico y conducir adecuadamente el calor emitido por los semiconductores. El DBC está compuesto por tres capas, la primera y la última de un metal, bien cobre (Cu) o aluminio (Al), y la intermedia de cerámica (aislante eléctrico). En la tabla III se muestra el espesor aproximado de cada una de las capas que componen el DBC [13].

Existen distintas alternativas a la hora de seleccionar los materiales que componen las diferentes capas del DBC. El sustrato cerámico, por ejemplo, puede ser: Óxido de Aluminio (Al_2O_3), Nitrato de Aluminio (AlN), Óxido de Berylio, AlSiC o Nitrato de Silicio (Si_3N_4). La tendencia en cualquier caso es reducir el espesor de la capa cerámica y hacer la capa de metal más gruesa para incrementar la conductividad térmica, reducir la resistencia térmica total y permitir una mejor transferencia de calor [14]. Sin embargo la diferencia del CTE entre los distintos materiales es un problema.

Para solventar el problema que existe en la diferencia de CTE entre la capa cerámica y la metálica, *Mitsubishi Electric* ha desarrollado el módulo Serie J T-PM (*Transfer-molded Power Module*) donde se sustituye el DBC por una capa fina de Cu / TCIL / Cu. El TCIL (*Thermal Conductive Insulation Layer*) está compuesto por una capa de resina aislante y tiene una buena conductividad térmica. La capa fina de cobre ayuda también a reducir la resistencia térmica total [11](ver figura 6).

El módulo inversor del Nissan LEAF intenta solventar también este problema. Para ello los IGBTs se sueldan sobre una capa de Cu-Mo.

Por otro lado, Curamic ha desarrollado un nuevo concepto donde los canales de refrigeración están directamente integrados en el DBC. Se realiza insertando entre dos capas de

substrato varias láminas de cobre que cuentan con diferentes patrones de agujeros que cuando se apilan y se unen entre sí, forman canales internos.

Por último, Scheider Electronic propone sustituir el DBC empleando su propia tecnología p^2 Pack [15]. Esta tecnología permite diseñar módulos de potencia compactos, con características térmicas y eléctricas muy buenas.

V. DIE-ATTACH Y SUBSTRACT-ATTACH. TÉCNICAS DE UNIÓN POR SOLDADURA O SINTERIZACIÓN

En los módulos de potencia actuales la técnica de unión que se emplea para unir el chip de silicio con el sustrato, y al mismo tiempo, para unir el DBC con el *base plate* es la soldadura. Sin embargo, una de las causas de fallo predominantes en los módulos semiconductores se debe a la fatiga térmica a la que están sometidas las uniones de soldaduras (*solder creep/fatigue*) [16]–[19].

La tendencia tecnológica pasa por la eliminación de las soldaduras a favor de la técnica de sinterización. Las uniones sinterizadas chip-sustrato se consiguen mediante partículas de plata especiales que, en determinadas circunstancias, producen uniones sinterizadas que dan lugar a una unión robusta entre las partes. Es importante saber que cada una de estas partículas está rodeada de una capa de un material especial. El proceso de unión es sencillo ya que solo es necesario disponer de un número de partículas suficiente para conseguir el espesor deseado de la capa de unión y aplicar una temperatura y presión adecuadas durante un periodo determinado de tiempo. El resultado es una unión muy estable. La fuerza de unión de contacto que se consigue con la capa de sinterización entre los chips y el sustrato es extraordinariamente elevada. Así, las uniones sinterizadas muestran, en los tests de fiabilidad, una alta capacidad de resistencia a los ciclos de potencia. Otra ventaja de la tecnología de sinterización es que se consigue una mayor exactitud, del orden de $50 \mu\text{m}$, en el emplazamiento de los *dies* en el sustrato. En contraposición a esto, con la tecnología actual de soldadura sólo es posible conseguir una exactitud en la posición de $400 \mu\text{m}$. Asimismo, si se tiene en cuenta el espesor de la capa sinterizada, ésta es entre 4 y 5 veces más fina que la capa soldada y tiene una conductividad térmica 4 veces mejor.

Tabla II
COMPARATIVA DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE INTERCONEXIÓN

	Al wire bonding	Al ribbon bonding	Cu wire bonding	Semikron SKIN
Conductividad eléctrica	Tomado como referencia	Igual	40% Mejor	Igual
Conductividad térmica		Igual	200% Mejor	Prácticamente igual
Tiempo de vida		Mejorado	Mejora del rendimiento térmico	70% Mejor. Tec. Ag sinterizada
Estado		En producción. Coste elevado	Producción en masa	Cerca de la producción en masa

Tabla IV

PARÁMETROS DEL MATERIAL DE PLATA UTILIZADO EN LA SINTERIZACIÓN FRENTE AL MATERIAL DE APORTACIÓN USADO EN EL PROCESO DE SOLDADURA.

	Ag pura	Comp. Ag para sinterización	SnAg para soldadura	Factor
Punto de fusión (°C)	961	961	221	4
Conduct. eléc. (MS/m)	68	41	7.8	5
Conduct. térm.(W/mK)	429	250	70	4
Densidad (g/cm ³)	10.5	8.5	8.4	1
CTE (μm/mK)	19.3	19	28	1
R a la tensión (Mpa)	139	55	30	2

Por otro lado se puede decir que la unión sinterizada presenta unas excelentes propiedades térmicas y tiene un mejor comportamiento frente a los ciclos de potencia debido a que el punto de fusión del material de plata usado en la sinterización es 4 veces superior al punto de fusión del material de aportación en el proceso de soldadura. Además la estabilidad a altas temperaturas de la unión sinterizada hace que la unión no se deteriore con el tiempo. Sin embargo, la desventaja de la sinterización de difusión es que sólo se pueden conectar los materiales con una superficie de metal precioso, lo cual aumenta su coste [14].

En la tabla IV se puede observar como las capas sinterizadas presentan mejores propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas que la soldadura y mejoran la fiabilidad a largo plazo [9].

La tecnología *Skinter*, aplicada a los módulos de potencia SKIM 63/93, desarrollada por SEMIKRON, emplea la sinterización como técnica de unión (ver figura 7).

Por otro lado algunos fabricantes actualmente están investigando una nueva técnica de sinterización con nanopartículas: “*Nano powder sintering*”. Básicamente la técnica es la misma pero utiliza nano partículas de plata (Ag) para la sinterización. La compresión se realiza a temperaturas inferiores (220-275 °C) y se reducen también la presión (1-5 MPa) y el tiempo de compresión (60-120 s) y, así, se consiguen mejores resultados.

A. Contacto por presión

A diferencia de la soldadura, la sinterización y los hilos de conexión, los contactos de presión no son uniones metalúrgicas. Esto significa que los contactos asociados por presión pueden

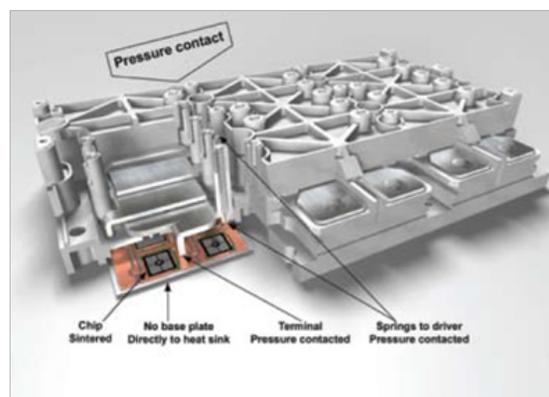


Figura 7. Estructura del módulo SKIM 63/93 de Semikron.

ser compensados entre sí, y pueden deslizarse unos sobre otros. Así pues, no aparecen tensiones termo-mecánicas en las uniones y, por ello, no muestran fatiga térmica durante los cambios de temperatura (debido a los diferentes coeficientes de dilatación térmicos). De esta manera, se explica la alta fiabilidad de los módulos en contacto con presión. La figura 7 muestra el módulo SKIM de SEMIKRON basado en esta tecnología .

VI. MÓDULOS CON O SIN PLACA BASE

El objetivo principal de la placa base es aportar un soporte mecánico adecuado (suele ser útil cuando el sustrato que se ha de ubicar en la placa base es frágil).

Ventajas

- Mecánicamente son más robustos durante el transporte y montaje.
- Presentan una masa térmica grande y una resistencia térmica baja. De esta forma, ante transitorios y picos de pérdidas de potencia el sistema tiene una constante de tiempo mayor, y hace que la temperatura no se incremente súbitamente.

Desventajas

- El módulo presenta mayor resistencia térmica (R_{thjs}) debido a la capa de pasta térmica que requiere la placa base para la unión con el disipador.
- Se reduce el número de ciclos de vida debido a que la placa base tiene una gran superficie soldada al DBC susceptible a los ciclos de temperatura.

- Aumento del peso y coste.

VII. MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN

La densidad de potencia exigida a los módulos inversores en el VE es elevada y por ello es necesario aumentar la capacidad de disipar más cantidad de calor al exterior. El objetivo es reducir la resistencia térmica mediante la mejora de materiales y la eliminación de capas intermedias. En este sentido, existe la tendencia de emplear métodos más sofisticados basados en la refrigeración líquida: *pin fins*, *spray cooling*, *jet impingement cooling*, *microchannels cooling*. Asimismo, la refrigeración a doble cara, la refrigeración termoeléctrica y la refrigeración por cambio de fase, aumentan considerablemente la capacidad de disipar calor.

VIII. CONCLUSIONES

La combinación de una técnica de unión eficaz, una buena tecnología de interconexión, así como un buen diseño térmico, termo-mecánica y eléctrico, asociado a la exitosa combinación de diferentes materiales, son factores cruciales para integrar con éxito el inversor de potencia en el sistema de propulsión EV.

En este sentido, la tendencia en los campos de desarrollo más importantes son:

- La mejora de las interconexiones eléctricas entre semiconductores, eliminando el *wire bonding* y sustituyéndolo por alternativas como el DLB (*Direct Lead Bonded*).
- La eliminación de las uniones por soldaduras a favor de la técnica de sinterización.
- Un buen diseño asociado a la combinación acertada de diferentes materiales teniendo en cuenta sus propiedades térmicas, termo-mecánicas (power cycling and thermal cycling), propiedades eléctricas (rigidez dieléctrica y conductividad) y coste del material.
- Emplear métodos más sofisticados basados en la refrigeración líquida: *pin fins*, *spray cooling*, *jet impingement cooling*, *microchannels cooling*. Asimismo, la refrigeración a doble cara, la refrigeración por cambio de fase y la refrigeración termoeléctrica aumentan considerablemente la capacidad de disipar calor.
- El volumen, el peso y el coste son también factores determinantes para poder integrar con éxito la electrónica de potencia en el sistema de propulsión del VE.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en esta publicación ha sido generado en la Unidad de Formación e Investigación UFI11/16 financiada por la UPV/EHU y patrocinado por el Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT394-10. El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación DPI2014-53685-C2-2-R y los fondos FEDER. Asimismo, ha sido financiado por el Gobierno Vasco a través del proyecto de investigación KT4TRANS del programa ELKARTEK (KK-2015/00047).

REFERENCIAS

- [1] E. Molero and A. Pozo, *El vehículo eléctrico y su infraestructura de recarga*, M. S.A., Ed. Marconbo S.A., 2013.
- [2] S. S.A., *Vehículos híbridos y eléctricos*. SEAS S.A., 2011.
- [3] A. Volke and M. Hornkamp, *IGBT Modules. Technologies, Driver and Application*. Infineon Technologies AG, 2012.
- [4] M. Schneider-Ramelow, T. Baumann, and E. Hoene, "Design and assembly of power semiconductors with double-sided water cooling," in *Proc. of International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2008, pp. 1–7.
- [5] D. Siepe, R. Bayere, and R. Roth, "The future of wire bonding is? wire bonding!" in *Proc. of International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2010.
- [6] R. Ott, M. Bable, R. Tschirbs, and D. Sierpe, "New superior assembly technologies for modules with highest power densities," in *Proc. of International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2010, pp. 528–531.
- [7] R. Tschirbs, G. Borghoff, T. Nubel, W. Rusche, and G. Strotmann, "Ultrasonic metal welding as contact technology for state-of-the-art power modules," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2008.
- [8] T. Stockmeier, P. Beckedahl, C. Gobl, and T. Malzer, "Skin: Double side sintering technology for new packages," in *Proc. of International Symposium Power Semiconductor Devices and Integrated Circuits (ISPSD)*, 2011, pp. 324–327.
- [9] C. Gobl and J. Faltenbacher, "Low temperature sinter technology die attachment for power electronic applications," in *Proc. of International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2010, pp. 1–5.
- [10] J. Marcinkowski, "Dual-sided cooling of power semiconductor modules," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2014, pp. 1–7.
- [11] H. Han and G. Song, "Consideration on igbt module lifetime for electrical vehicle (ev) applications," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2014, pp. 1–7.
- [12] J. Ling, T. Xu, R. Chen, O. Valentin, and C. Luechinger, "Cu and al-cu composite-material interconnects for power devices," in *Proc. of Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2012, pp. 1905–1911.
- [13] B. W. Williams, *Principles and Elements of Power electronics*. Published by Barry W Williams, 2006.
- [14] T. Stockmeier, "From packaging to un-packaging - trends in power semiconductor modules," in *Proc. of International Symposium Power Semiconductor Devices and Integrated Circuits (ISPSD)*, 2008, pp. 12–19.
- [15] T. Gottwald and C. Roessle, "p2 pack - the paradigm shift in interconnect technology," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2014, pp. 1–9.
- [16] M. K. Christmann, A. Thoben, M. "Reliability of power modules in hybrid vehicles," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2009.
- [17] M. Schafer, O. Schilling, and T. Yue, C. Kashko, "Comparison between active and passive thermal cycling stress with respect to substrate solder reliability in igbt modules with cu baseplates," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2014.
- [18] T. M. K. Mainka, R. Bayere, I. Graf, and M. Munze, "From vehicle drive cycle to reliability test of power modules for hybrid vehicle inverter," in *Proc. of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2008.
- [19] Z. Sarkany, A. Vass-Varnai, S. Laky, and M. Rencz, "Thermal transient analysis of semiconductor device degradation in power cycling reliability tests with variable control strategies," in *Proc. of Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2014, pp. 236–241.