

金属直接敷接陶瓷基板与敷接方法

井 敏 傅仁利 何 洪 宋秀峰

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

文 摘 综述了金属直接敷接陶瓷基板及敷接方法,介绍了国内外金属直接敷接陶瓷基板的结构和性能特点,敷接关键技术以及基于金属敷接陶瓷基板的功率电子封装新技术,展望了金属敷接陶瓷基板的新进展和今后的应用前景。

关键词 金属敷接陶瓷基板,敷接方法,功率电子

Direct Bonded Metal Substrates and Bonding Methods

Jing Min Fu Renli He Hong Song Xiufeng

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract This paper describes bonding methods and direct bonded metal substrates. The typical structure and properties of such direct bonded metal substrates are introduced. The key fabricating process and the new development of packaging technique for power electronic devices based on direct bonded metal substrate is summarized. The developing and application prospect of direct bonded metal is discussed.

Key words Direct bonded metal substrate, Bonding method, Power electron

0 前言

随着电子装备的日益小型化和多功能化,大规模、超大规模集成电路的集成度越来越高,并且基板上各类 IC 芯片的组装数及组装密度也越来越高,元件数越来越多,器件结构也愈来愈复杂^[1],功率密度也越来越大,20世纪 80年代末的功率密度为 $2.5\text{ W}/\text{cm}^3$,而 90年代已达 $6\text{ W}/\text{cm}^3$ 以上^[2]。此外,现代功率微电子封装除承担热耗散外,还必须具有 Si、GaAs 相匹配的线胀系数以及强度高、结构质量轻、工艺性好、成本低等特点。要满足这些性能的关键是基板。在微电子封装中,散热是电子封装的可靠性设计中一个重要部分^[3-5]。因此,大功率密度封装基板越来越受到行业的重视。在电力电子技术中,功率模块正朝着高频、高可靠性、低损耗发展,对绝缘导热基板的性能提出严峻的挑战。金属直接敷接陶瓷基板正是以导热性和导电性为目的开发出的一种基板材料,出现后便以优良的电气、力学性能和散热性能而广泛应用

于微电子装备的封装结构当中。

金属与陶瓷的连接出现于 20世纪 50年代^[6-7],具有代表性的钨锰法活性金属钎焊工艺已广泛应用于真空电子器件的封接^[8]。在微电子封装领域出现了直接敷铜法(DBC),是一种基于氧化铝陶瓷基板的金属化技术,最早出现于 20世纪 70年代^[9-11],到 80年代中期,美国 GE公司的 DBC研制小组将该技术实用化^[12-13]。日本东芝公司借助高导热 AlN陶瓷基板的研究优势^[14],在 AlN陶瓷基板的直接敷铜技术上取得很大进展^[15-16]。经过几十年的发展,该技术不仅在制备工艺、结合强度和热循环疲劳寿命等方面取得了突破性进展^[17],而且在电子封装领域也取得了长足进步^[18-19]。目前,该技术已应用于 SiN陶瓷直接敷铜^[20]、敷铝^[21-22]和 SiC基高温微电子封装结构当中^[23]。本文详细介绍了金属直接敷接陶瓷基板的种类、敷接关键技术和基板材料的性能特点,展望了金属直接敷接陶瓷基板在电力电子、汽车电子

收稿日期:2007-11-26;修回日期:2008-01-14

基金项目:南京航空航天大学科研启动基金资助

作者简介:井敏,1981年出生,硕士,主要从事陶瓷基板材料的研究。E-mail: jm85212003@yahoo.com.cn

宇航材料工艺 2008年 第3期

— 1 —

等方面的应用前景。

1 金属直接敷接陶瓷基板的结构与性能特点

1.1 金属直接敷接陶瓷基板种类、结构与敷接原理

铜由于具有优良的导电导热性能、综合性能优越,是金属直接敷接陶瓷基板首选材料。铝导电性能稍差,但来源充足、价格较低,也适合金属直接敷接陶瓷基板。目前金属直接敷接陶瓷基板主要为 Al_2O_3 与 AN 陶瓷的敷铜、敷铝。

1.1.1 金属直接敷接陶瓷基板结构

用于电子器件封装的基板材料要求有良好承载大电流能力、良好的热传导性能和与硅半导体器件相匹配的线胀系数和良好的高频性能^[3]。为此,金属敷接陶瓷基板通常敷接厚度为 0.15~0.65 mm,敷接强度要求 $>65 N/cm^{18}$ 。

图 1 为典型直接敷铜陶瓷基板的结构示意图。在电子器件的封装结构中,半导体芯片、金属敷接陶瓷基板和热沉布置如图 2 所示。

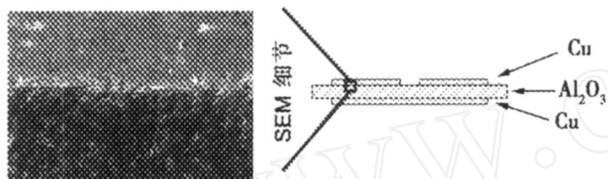


图 1 典型直接敷铜陶瓷基板的结构

Fig 1 Typical structure of direct bonding copper substrate

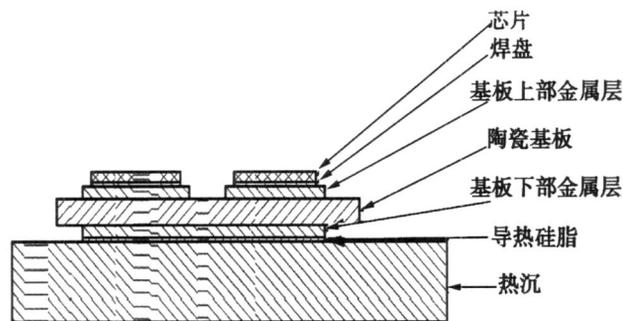


图 2 功率电子器件封装结构单元示意图

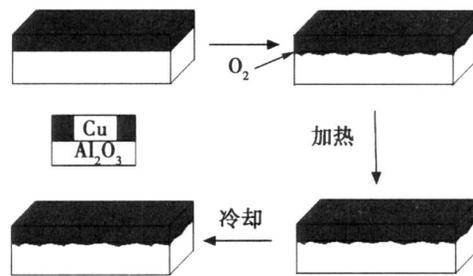
Fig 2 Packages structure of power electronic device

1.1.2 金属直接敷接陶瓷基板敷接工艺原理

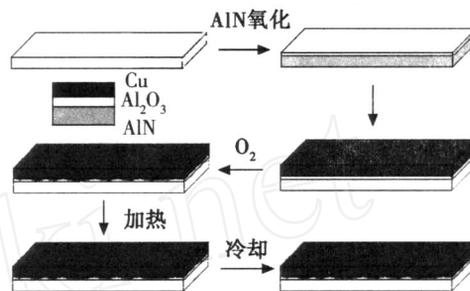
1.1.2.1 直接敷铜

直接敷铜技术是利用铜的含氧共晶液直接将铜敷接在陶瓷上,其基本原理是敷接前或过程中在铜与陶瓷之间引入适量的氧元素,在 1 065~1 083 ℃,铜与氧形成 Cu-O 共晶液^[9],DBC 技术利用该共晶液一方面与陶瓷基板发生化学反应生成 $CuAl_2O_2$ ^[9, 24]或 $CuAl_2O_4$ ^[25]相,另一方面浸润铜箔实现陶瓷基板与铜板的结合。陶瓷基板直接敷铜板的工艺过程见图 3^[15~16]。由于 AN 陶瓷对铜的浸润性能差,所以在敷接前必须对其表面氧化处理,通常是将 AN 陶瓷在

空气中加热氧化,在其表面生成一层致密的氧化铝,再通过该氧化铝层实现铜与 AN 陶瓷基板的结合, Al_2O_3 膜厚度决定了敷接质量^[26]。后续程序与氧化铝直接敷铜工艺基本相同。



(a) Al_2O_3 陶瓷基板敷铜板工艺



(b) AN 陶瓷基板敷铜板工艺

图 3 直接敷铜陶瓷基板工艺示意图

Fig 3 Process of direct bonding of copper on ceramic substrate

1.1.2.2 直接敷铝

直接敷铝基板 (DAB) 是利用 DBC 技术发展起来的新型金属敷接陶瓷基板。铝与铜相比,具有低熔点、良好的塑性等特点。在 700 ℃ 以下,纯 Al 液与 Al_2O_3 陶瓷有较好的润湿性^[27],与 Al_2O_3 、AN 陶瓷是物理结合^[21~22, 28~30]。在 660 ℃ 以上液态 Al 和陶瓷湿润后,随着温度的降低,Al 在陶瓷表面的晶核结晶生长,冷却到室温实现两者结合。

1.2 金属直接敷接陶瓷基板性能特点

1.2.1 直接敷铜

在过去的几十年里,敷铜基板在功率电子封装方面做出了很大的贡献^[31~32],这主要归因于直接敷铜基板具有如下性能特点^[18]:导热性能好、低电容性能、很高的绝缘性能、与 Si 相匹配的线胀系数、导电性能优越,载流能力强。

1.2.2 直接敷铝

采用 0.2~0.3 mm 厚的铝箔与氧化铝陶瓷进行敷接。DAB 具有与 DBC 不同的性能^[22]:优良的抗热震疲劳性能、良好的热稳定性、结构质量轻(与同结构的 DBC 相比减轻 44%)、良好的 Al 线键合能力。

DAB 最显著的特点是具有优良的抗热震疲劳性能。由于 Al 具有较低的屈服强度 (20 MPa),热循环

作用时,较低的内应力就使之发生塑性变形以协调 Al与陶瓷之间的应力。L Dupont^[32]等人的研究结果表明,DAB基板经过 800次热循环后未发现裂纹。

2 金属直接敷接陶瓷基板的制备技术

2.1 陶瓷基板敷铜制备技术

2.1.1 Al₂O₃陶瓷基板敷铜

由铜—氧二元相图可知,在 1 065 ~ 1 083 即可实现敷接,但在敷接过程中要生成一定量的共晶液,若共晶液相对较少则难于实现敷接或结合强度较低。而共晶液的产生和敷接温度有直接的关系,因此董维智等^[33]在 1 075 时才实现了铜与氧化铝的敷接。其他研究者也发现^[34~37],在 1 070 以上可以得到理想的 DBC基板。

在 DBC工艺中氧的引入量是另一个重要因素。氧元素能促进铜箔对 Al₂O₃的润湿性^[9,25]。在工艺过程中氧的引入有两种方式:(1)将铜箔在空气中氧化在铜表面生成一定厚度 CuO层。(2)在弱氧环境下将铜箔氧化生成一定厚度 Cu₂O。两者作用近乎相同,从经济方面考虑方式(1)是较有价值的。Ning^[38]指出,通过方式(1)氧化铜的最佳温度、时间为 250 ~ 300 、30 ~ 90 min。何洪等^[39]在引入氧方式上通过在氧化铝陶瓷表面涂覆 Cu₂O 并进行烧结,获得 CuAlO₂过渡层后在氮气条件下也成功实现了敷接。热力学计算表明在 1 173 K以上、氧分压在 10⁻² Pa 以下,CuO可以分解生成 Cu₂O,这与将铜预氧化生成的 Cu₂O一样可以达到相同的效果。所以将铜表面氧化生成 CuO后,在真空环境下敷接也为 DBC技术的发展开辟了新途径。

随着封装密度增加、体积减小,散热问题就显得更加突出,为了将电子器件的温度控制在安全工作温度以内,必须提高基板散热能力。要想提高其散热性能则要减少陶瓷基板厚度(图 4)。

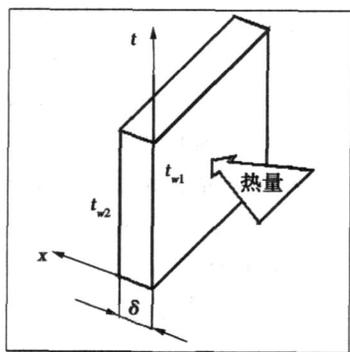


图 4 陶瓷基板的热传导示意图

Fig 4 Schematic diagram of thermal conduction of ceramics substrate

由热传导方程(1)知,

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \cdot \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1)$$

式中, q 为热流密度, Q 为热量, A 为侧面面积, λ 为热导率, t_{w1} 、 t_{w2} 为两侧面的温度, δ 为陶瓷基板厚度。

典型的铜箔与陶瓷基板厚度分别为 0.10 ~ 0.35 和 0.60 mm。也可以将比陶瓷厚的铜箔敷接其上。较厚的铜箔大大提高电流负载和耐浪涌能力,可保证基板具有优良载流能力基础上提高散热性能。

2.1.2 AlN陶瓷基板敷铜

AlN陶瓷基板敷铜是基于 DBC工艺技术发展起来的,由日本东芝^[15~16]率先实现,随后美国 IXYS公司^[30]和德国的 Curamik 电子公司^[17~19]研制出各种规格的 AlN-DBC 电子封装基板。

由于纯铜与 AlN 陶瓷不润湿,在 1 100 下液态铜对 AlN 接触角为 147^[40~41],因此,改善铜与 AlN 陶瓷润湿性是实现 Cu 与 AlN 陶瓷敷接的关键。通过添加活性金属钎料^[40,42]可以降低 Cu 与 AlN 陶瓷的接触角,但同时会对铜的导电性能产生不利影响。研究发现^[40,43],铜中溶解的氧能改善 Cu-AlN 之间的润湿性能且几乎不影响铜的导电性能,因此,氧元素可以充当活性金属元素的作用,实现 Cu 与 AlN 陶瓷的有效结合。氧元素可以通过将 AlN 陶瓷表面氧化引入,经过氧化处理后与铜敷接可以得到优良的结合性能^[37~43]。

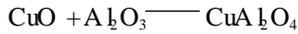
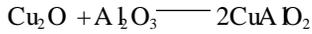
Cu 箔或 AlN 陶瓷预氧化引入氧元素进行敷接的方法对工艺要求较高,且体系中氧成分不易控制,因此对敷接方法改进以减少 Al₂O₃膜与 AlN 线胀系数不匹配所产生的内应力尤为重要。AlN 陶瓷表面等离子喷涂和化学镀金属是一种有益的尝试,潘文霞^[44]等采用减压等离子喷涂方式在 AlN 表面镀铝,然后将 AlN 基板进行氧化处理,最后再和铜箔敷接,其强度大幅提高。此法对基板的加热温度较低,且对其导热性能影响较小,有效减少了 AlN 基体和 Al₂O₃ 层之间应力。宁洪龙等^[45~46]通过对 AlN 陶瓷表面进行预氧化,然后经过 NaOH 溶液侵蚀再化学镀铜的金属化工工艺,AlN 陶瓷经过 NaOH 溶液侵蚀后表面粗糙度增加,从而提高两者的敷接强度。

离子注入应用在 AlN-DBC 工艺中,其主要作用在陶瓷表面形成纳米层以改善陶瓷浸润性能。M. Barlak 等^[47~48]采用 Ti、Fe 和 O 离子注入 AlN 陶瓷方式替代传统的 AlN 陶瓷热氧化预处理,经 10¹⁶ ions/cm² 的 Ti 离子注入预处理后,与铜敷接的剪切强度达到 700 MPa,为传统敷接剪切强度的 5 倍。真空敷接也是改善 AlN 与 Cu 润湿性的有效方法,A. Kara-Slimane 等^[26]将 AlN 陶瓷在真空情况下,于 1 000 、4 ~ 12 MPa 下制备出敷接强度达到 32 MPa 的 AlN-

DBC基板。

2.1.3 铜陶瓷界面相和界面结合强度

金属与陶瓷敷接强度取决于敷接界面物相的种类和存在形式,有氧存在的情况下,铜与 Al_2O_3 可以按反应式 (1) 或 (2) 生成六方结构的 CuAl_2O_4 相^[9,24] 和立方尖晶石结构的 CuAl_2O_4 相^[25]:



铜与氧化铝之间的化学反应和反应产物强烈依赖于环境气氛条件,其中氧气氛起到至关重要的促进作用^[9,24,26,40]。 Al_2O_3 与 CuO 反应易于生成立方结构的 CuAl_2O_4 相^[25],而 Al_2O_3 与 Cu_2O 反应易于生成六方结构的 CuAl_2O_4 相^[9,24]。 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 Cu/AN 敷接通常是在惰性气氛或弱氧化气氛条件下进行的,界面可能存在的物相主要是 CuAl_2O_4 相^[9,24]。C. W. Seager^[49] 等在氩气气氛下进行敷接时, $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面上得到不连续的针状 CuAl_2O_4 贯穿于界面有效增强其结合强度。A. Kara - Slima^[26] 等发现界面结合强度与敷接时间、温度、压力关系很大。敷接时间较短时没有明显的界面层,敷接强度较低,随着敷接时间的延长,界面产物变厚,界面强度也随之提高。然而,敷接时间过长会导致界面反应层过厚,自身的结构缺陷增多,界面结合强度会随之下降^[35]。在一定的氧含量情况下,敷接温度较低不能生成足量的共晶液,温度过高则会导致铜熔化。除此之外,在 AN 表面氧化生成 Al_2O_3 层的厚度和敷接过程中生成 Cu_2O 层的厚度,均对界面结合强度有影响。由于 Al_2O_3 与 AN 的线胀系数失配,必然造成两者之间存在内应力的问题。当氧化层厚度 $> 10 \mu\text{m}$ 时,残余张应力将远大于致密氧化铝陶瓷的强度^[26,37],因此,AN 陶瓷 DBC 基板最脆弱的部位是在 Al_2O_3 与 AN 的结合处。要实现 AN 陶瓷与 Cu 的有效结合须在保证形成致密氧化膜的前提下尽量减少氧化膜的厚度^[38],以尽可能减少内应力。

2.2 陶瓷基板敷铝制备技术

由于纯净的液态 Al 和 Al_2O_3 有比较好的湿润性能^[27],Al 与陶瓷的敷接温度可以设置在 Al 的熔点以上,利用两者之间的湿润性能实现敷接。Al 在高温下极易氧化生成 Al_2O_3 膜,包裹在 Al 液表面。这样就大大降低 Al 液与陶瓷的润湿性^[50-51],很难敷接成功。因此必须去除铝液表面的 Al_2O_3 层,或者采取一定防护措施隔绝氧气,阻止铝溶体表面生成 Al_2O_3 膜。彭榕等^[21,28] 采取石墨模具压铸的方法,将纯净的 Al 液通过压力铺在 Al_2O_3 基板和 AN 基板表面,同时 Al_2O_3 膜由于没有流动性而留在模具空腔里,冷却

后制得敷接完好的 DAB 基板。A. Kara - Slimane^[26] 采用 Al 作为中间层敷接 AN/Al/Fe 时,敷接过程中必须施加一定的压力,以打破液态 Al 表面的 Al_2O_3 层,才能实现 Al 与 AN 和 Fe 的有效敷接。

Al 和陶瓷之间的敷接是物理敷接,与 DBC 相比其结合力比较小。但由于两者之间的结合没有第二相生成,和 DBC 相比具有低界面应力和高界面热导的优势。在敷接 Al 之前,对陶瓷进行表面处理以增大敷接强度是非常关键的工艺环节。Hisashi^[52] 发现,陶瓷基板表面粗糙度在很大程度上影响敷接性能,保持一定的粗糙度可提高敷接强度。

3 基于金属敷接陶瓷基板的新型微电子封装工艺

3.1 直接敷铜与引脚整体成型技术^[17-19]

近年来德国的 Schulz - Harder 博士陆续报道了金属敷接陶瓷基板的微电子封装工艺^[17-19]。在 DBC 工艺中所敷接上的铜箔是固态,允许铜的尺寸大于陶瓷基板,而又不影响敷接效果,超过陶瓷基板表面的铜箔可以形成整体引脚,其结构见图 5^[18]。

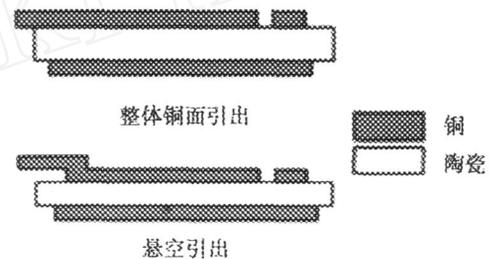


图 5 集成引脚结构示意图

Fig 5 Structure of integrated terminals

铜箔引脚可以直接从整体铜面上或悬空引出。采用集成引脚无需焊接引脚,具有无焊接疲劳、承载大电流、电阻极低等优点。

3.2 双面 DBC 陶瓷基板导电通道形成技术^[17-19]

在 DBC 基板的应用中,采用双面 DBC 基板导电通道技术可以使陶瓷基板的上下电路相连。通道技术最初的形式是内置球形通道,见图 6(a)。该方式是以直径稍大于陶瓷基板厚度的铜球内置于预先制好的陶瓷孔中,然后将两块铜箔分别敷接陶瓷基板上,铜球部分熔化与上下两块铜箔键合,构成导电通道。该方式造价高、程序复杂。图 6(b)所示的通道技术,在敷接之前将陶瓷基板钻一小孔,可以通过加载力量使上层铜箔大变形和下层铜箔相连。这种形式成本低,但每个通道都需要占用较大空间,且上层铜箔不平整。内置 - 焊接通道综合了上述两种技术的优点,见图 6(c),用比陶瓷薄的铜碟代替铜球,再加压连接上下电路,减少了铜箔的变形。图 6(d)是新近发展起来的一种通道技术,通过在双面铜箔同时

加压连接上下电路,这种方式所需空间较小、造价较低,但以这种方式形成的通道使铜箔发生变形,且随着洞的增大和铜箔厚度增加变形越明显。以上所述的四种通道的电阻不会超过 $100 \mu\Omega$,容许较大电流通过。

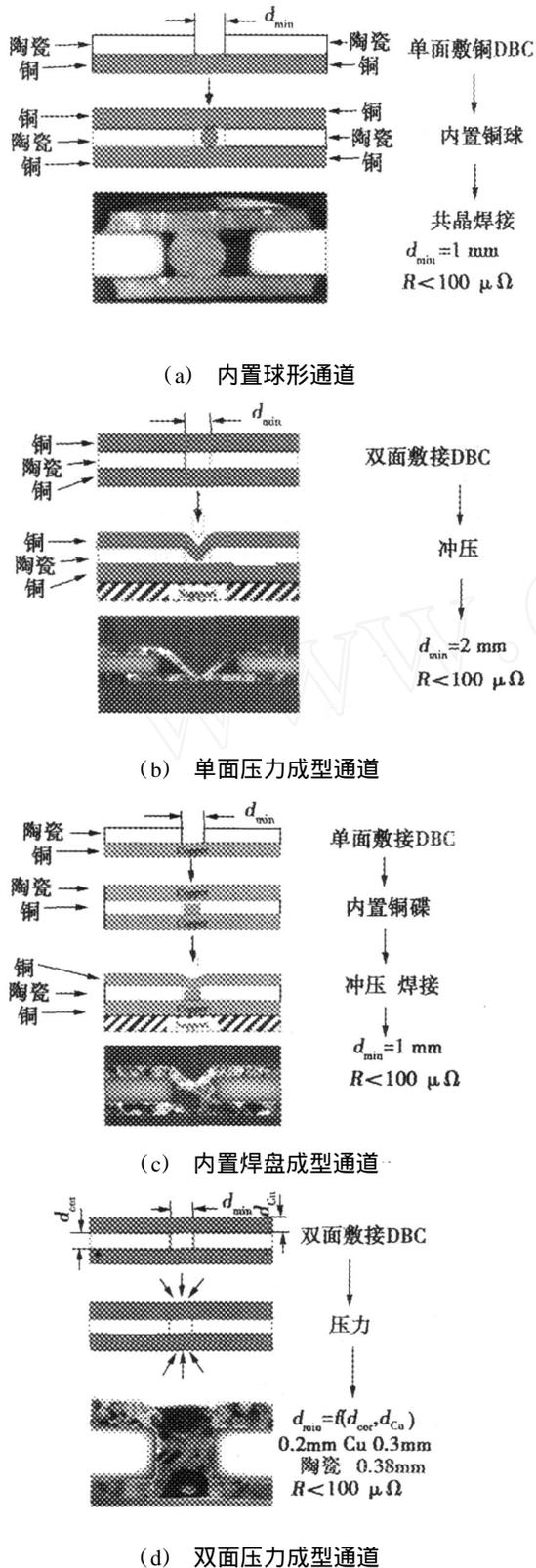


图 6 DBC基板导电通道成型技术^[18-20]

Fig 6 DBC - Via technology

3.3 DBC 陶瓷基板密封封装技术

集成引脚和通道技术导致了结构密封和绝缘体多组模块封装技术,其中较典型的有侧向引脚封装、向上引脚封装和向下引脚封装三种方式:见图 7。

(1)侧向引脚封装:多层 DBC基板组合构成整体引脚和导电通道,可阀合金框架铜钎焊在 DBC上部铜板上,引线键合之后,将金属盖焊接在可伐合金框架上构成密封封装,如图 7(a)所示。

(2)向上引脚封装:DBC基板组合构成的多层结构,DBC基板上部铜板在芯片安装位置留有四方形的开槽,边缘留有微孔,引线端子通过小孔直接键合在下层 DBC铜层上。引线键合后,采用可阀合金框架和金属盖板进行密封封装,如图 7(b)所示。

(3)向下引脚封装:单层 DBC陶瓷基板,引线端子通过 DBC基板上预留的小孔直接键合在 DBC基板上层导体铜板的背面。引线键合后,采用可阀合金框架和金属盖板进行密封封装,如图 7(c)所示。

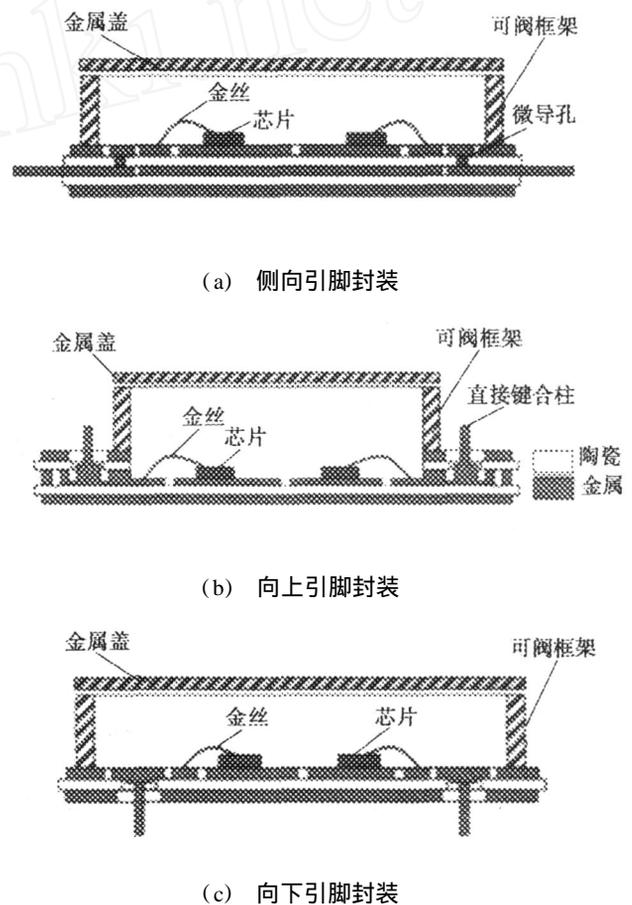


图 7 DBC陶瓷基板密封封装方法^[17-19]

Fig 7 Hemetically sealed DBC packages

4 金属敷接陶瓷基板发展趋势

在大功率、高密度封装中,电子元件等在运行过程中产生的热量主要通过陶瓷基板散发,陶瓷基板在散热过程中担当了重要的角色。 Al_2O_3 陶瓷导热率较低,在大功率、高密度封装器件运行时须强制散热。

BeO陶瓷导热性能最好,但因环保问题,基本上被淘汰。SiC陶瓷金属化后键合不稳定,作为绝缘基板用时,会引起热导率和介电常数的改变。AN陶瓷具有好的导热性能,适用于大功率半导体基片,在散热过程中自然冷却即可,还具有很好的力学和电气性能。目前国内其年增产率比 Al_2O_3 陶瓷高4倍以上,有望取代BeO和一些非氧化物陶瓷。采用AN陶瓷做绝缘导热基板已是大势所趋^[3,5,31,53]。

DAB基板以其独特的性能应用于绝缘载体,特别是功率电子电路。这种新型材料在很多方面都有和DBC基板相似的地方,而自身又具有显著的抗热震性能和热稳定性,对提高在极端温度下工作器件的稳定性十分明显^[21~22,28~30]。由Al- Al_2O_3 基板、Al-AN基板做成的电力器件模块已成功应用在日本汽车工业上^[24]。DAB基板在对高可靠性有特殊要求的器件上具有巨大的潜力,非常适合优化功率电子系统、自动化、航空航天等。

5 结语

金属直接敷接陶瓷技术近年来发展迅速,其驱动力主要大功率电力电子器件迅猛发展的需求。其中,AN-DBC基板既具有AN陶瓷的高导热特性又具有铜箔的高导电特性,并可像PCB板一样能刻蚀出各种图形。目前国外的 Al_2O_3 -DBC已经成熟,AN-DBC基板基本形成工业化生产。国内DBC产品产量很小且性能不稳定,有必要进行相关基础理论研究和工艺条件的优化,期望有效解决工业级电力电子、汽车电子冷却问题。预计金属敷接陶瓷基板在功率半导体器件;功率控制线路及新式功率结构单元等能得到广泛应用,甚至在航空电子以及宇航功率电子应用上也愈显重要。

参考文献

- 1 中国电子学会生产技术学分会丛书编委会组编. 微电子封装技术. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003: 255~261
- 2 Krishnan S, Garimella S V, Chrysler GM et al Towards a thermal Moore's law. IEEE Transactions on advanced packaging, 2007; 30(3): 462~474
- 3 Shaw M C. High-performance packaging of power electronics MRS Bulletin, 2003; 28(1): 41~50
- 4 Jong E C W, Ferreira J A, Bauer P. Thermal design based on surface temperature mapping IEEE Power Electronics Letters, 2005; 3(4): 125~128
- 5 Hasan A, Sarangi A, Baldwin C S et al High performance package designs for a 1 GHz microprocessor IEEE Transactions on advanced packaging, 2001; 24(4): 470~476
- 6 Nicholas M, Forgan R R D, Poole D M. The Adhesion of Metal/Alumina Interfaces Journal of Materials Science, 1968; 3(1): 9~14
- 7 Nicholas M. The Strength of Metal/Alumina Interfaces Journal of Materials Science, 1968; 3(6): 571~576
- 8 高陇桥. 陶瓷-金属材料实用封接技术. 北京:化学工业出版社, 2005: 70~155
- 9 Sun Y S, Driscoll J C. A new hybrid power technique utilizing a direct copper to ceramic bond IEEE Trans Electro Devices, 1976; 23(8): 961~967
- 10 Burgess J F, Neugebauer C A, Flanagan G et al Hybrid packages by the direct bonded copper process Solid State Technol, 1975; 18(5): 42~44
- 11 Burgess J F, Neugebauer C A, Flanagan G et al The direct bonding of metals to ceramics and application in electronics Electro Component Science and Technology, 1976; 2(4): 233~240
- 12 Dickson J F. Direct Bond Copper Technology: materials, methods, applications Int J. Hybrid Microelectron, 1982; 5(2): 103~109
- 13 Newton P, Strassheim P. Power hybrids developments in packaging technology IEE Review, 1989; 35(4): 149~151
- 14 Iwase N, Tsuge A, Sugiura Y. Development of a high thermal conductive AlN ceramic substrate technology Int J. Hybrid Microelectron, 1984; 7(4): 49~53
- 15 Iwase N, Anzai K, Shinozaki K et al Thick film and direct bond copper forming technologies for aluminum nitride substrate IEEE Trans Compon Hybrids Manuf Technol, 1985; 8(2): 253~258
- 16 Miyashiro F, Iwase N, Tsuge K et al High thermal conductivity aluminum nitride ceramic substrates and packages IEEE Trans Compon Hybrids Manuf Technol, 1990; 13(2): 313~319
- 17 Schulz-Harder J, Exel K. Recent developments of direct bonded copper (DBC) substrates for power modules In: ICEPT 2003, Fifth International Conference on Electronic Packaging Technology Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 491~496
- 18 Schulz-Harder J. Advantages and new development of direct bonded copper substrates Microelectronics Reliability, 2003; 43(3): 359~365
- 19 Schulz-Harder J. Advantages and new development of DBC (Direct Bond Copper) substrates Adv Microelectron, 2005; 32(6): 8~12
- 20 Kim S T, Kim C H, Park J Y et al The direct bonding between copper and MgO-doped Si_3N_4 . J. Mater Sci, 1990; 25(12): 5185~5191
- 21 彭榕, 周和平, 宁晓山等. Al/ Al_2O_3 陶瓷接合基板的制备及性能研究. 无机材料学报, 2002; 17(4): 731~736
- 22 Lindemann A, Strauch G. Properties of direct aluminum bonded substrates for power semiconductor components IEEE Trans Power Electron, 2007; 22(2): 384~391
- 23 Bai J G, Yin J, Zhang Z et al High-temperature operation of SiC power devices by low-temperature sintered silver die-attachment IEEE Transactions on advanced packaging, 2007; 30

(3): 506 ~ 510

24 Kim S T, Kim C H. Interfacial reaction product and its effect on the strength of copper to alumina eutectic bonding. *J. Mater Sci*, 1992; 27: 2 061 ~ 2 066

25 Jacob K J, Alcock C B. Thermodynamics of CuAlO_2 and CuAl_2O_4 and phase equilibria in the system $\text{Cu}_2\text{O} - \text{CuO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1975; 58(5 ~ 6): 192 ~ 195

26 Kara-Slimane A, Juve D, Leblond E et al Joining of AN with metal and alloy. *J. Eur Ceram. Soc.*, 2000; 20: 1 829 ~ 1 836

27 坚增运, 杨根仓, 周尧和. Al与 Al_2O_3 润湿角的计算. *复合材料学报*, 1996; 13(1): 46 ~ 49

28 Ning X S, Nagata C, Sakuraba M et al Process for preparing a ceramic electronic circuit board and process for preparing aluminum or aluminum alloy bonded ceramic material. *US Patent* 5965193, 1999

29 彭榕, 周和平, 宁晓山等. Al/AN 电子陶瓷基板的制备及性能研究. *无机材料学报*, 2002; 17(6): 1 203 ~ 1 208

30 Strauch G Method for manufacturing a power semiconductor device and direct bonded substrate thereof. *US Patent* 6670216B2, 2003

31 Schulz-Harder J, Exel K. Advanced DBC (direct bonded copper) substrates for high power and high voltage electronics. In: *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 230 ~ 231

32 Dupont L, Khatir Z, Lefebvre S et al Effects of metallization thickness of ceramic substrates on the reliability of power assemblies under high temperature cycling. *Microelectronics Reliability*, 2006; 46: 1 766 ~ 1 771

33 董维智. DBC 绝缘导热基板的研制. *电子工艺技术*, 1997; (7): 161 ~ 163

34 罗雁横, 张瑞君. 新型陶瓷/金属化合物基板——直接敷铜板. *电子与封装*, 2005; 5(2): 18 ~ 21

35 方志远, 周和平, 陈虎. Al_2O_3 基板直接敷铜法的敷接机理研究. *无机材料学报*, 2000; 15(4): 641 ~ 645

36 方志远, 陈虎, 周和平. 直接敷铜 Al_2O_3 陶瓷基板的界面产物的研究. *无机材料学报*, 2000; 15(5): 935 ~ 938

37 许昕睿, 庄汉锐, 李文兰等. AN 陶瓷基板敷铜技术的研究. *无机材料学报*, 2003; 18(4): 837 ~ 842

38 Ning H L, Ma J S, Huang F X et al Preoxidation of the Cu layer in direct bonding technology. *Applied Surface Science*, 2003; 211: 250 ~ 258

39 He H, Fu R, Han Y et al A new method for preparation

of direct bonding copper substrate on Al_2O_3 . *Mater Lett*, 2007; 61: 4 131 ~ 4 133

40 Kara-Slimane A, Mbongo B, Treheux, D. Adhesion and reactivity in the copper-alumina system: influence of oxygen and silver. *J. Adh. Sci. Tech.*, 1999; 13: 35 ~ 48

41 Rhee S K Wetting of AN and TiC by liquid Ag and liquid Cu. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1970; 53: 639 ~ 641

42 Carin A, Loehman R E Microstructure at the interface between AN and a Ag - Cu - Ti braze alloy. *J. Mater Res*, 1990; 5: 1 520 ~ 1 529

43 Entezarian M, Drew R A L. Direct bonding of copper to aluminum nitride. *Materials Science and Engineering*, 1996; A212: 206 ~ 212

44 潘文霞, 吴承康. 氮化铝基板与 Cu 和 Al 的结合及其表面改质效果. *金属学报*, 2000; 36(1): 67 ~ 71

45 李志勇, 穆道彬, 马莒生. 提高 Al_2O_3 陶瓷表面化学镀 Cu 层结合力的研究. *材料保护*, 1999; 32(7): 8 ~ 9

46 宁洪龙, 耿志挺, 马莒生. 陶瓷基板化学镀铜预处理的研究. *稀有金属材料与工程*, 2004; 33(3): 321 ~ 323

47 Barlak M, Olesinska W, Piekoszewski J et al In-plantation as a pre-treatment method of AN substrate for direct bonding with copper. *Vacuum*, 2005; 78: 205 ~ 209

48 Olesinska W, Kalinski D, Chmielewski M et al Influence of titanium on the formation of a "barrier" layer during joining an AN ceramic with copper by the CDB technique. *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, 2006; 17: 781 ~ 788

49 Seager C W et al The influence of CuAlO_2 on the strength of eutectically bonded $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ interfaces. *Scripta Materialia*, 2002; 46: 394 ~ 400

50 陈建, 潘复生. 氧化铝膜对铝基复合材料润湿行为的影响. *材料科学与工程*, 1999; 17(2): 85 ~ 90

51 Ip S W, Kucharski M, Toguri J M. Wetting behaviour of aluminium and aluminium alloys on Al_2O_3 and CaO. *J. Mater. Sci. Lett*, 1993; 12: 1 699 ~ 1 702

52 Imai H, Matsuoka S. Direct welding of metals and ceramics by ultrasonic vibration. *JSME Int. J. Ser. A, Solid Mech. Mater. Eng.*, 2006; 49(3): 444 ~ 450

53 Gillet C, Henry D, Schaeffer C et al A new packaging technique for power multichip modules. In: *Thirty-Fourth IAS Annual Meeting* Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 1 765 ~ 1 769

(编辑 吴坚)