

电力电子的集成综述

Overview of Power Electronics Integration Technology

张卫平，李志，孙哲峰，雷禹周

北方工业大学绿色电源 北京 100041

摘要：本文阐述了集成技术对于电力电子技术发展的重要意义以及电力电子集成的分类和概念，总结了当前电力电子集成技术的研究内容和最新进展情况。

关键词：电力电子，集成技术，封装互连，EMC设计，模块热管理

中图分类号：TN6

文献标识码：A

文章编号：1606-7517(2015)02-4-113

1 引言

电力电子技术的发展改变了人们利用电能的方式和观念。但是，直到今天，电力电子产品主要特点仍然是不同的负载对应着不同的电路结构、控制技术，而且以手工生产方式为主。这种生产方式存在着诸多问题，如非标准件多，制造劳动强度大，设计周期长，成本高，产品可靠性低等，使电力电子制造商面临许多困难和问题。为了解决这些问题，并进一步显著改善电力电子系统的性能，工业界向学术界提出了强烈要求，希望研究新的理论和技术，改变生产方式。受信息电子系统集成技术的影响和启发，前两任 IEEE 电力电子学会主席，弗吉尼亚大学教授 Fred C. Lee 在 1996 年提出了电力电子系统集成的概念，其核心思想是，用集成技术使电力电子系统中的各种功能电路模块化或集成化，形成标准模块，用这些标准模块构成不同用途的电力电子应用系统。

2 电力电子集成的分类和集成概念

电力电子集成分为两种：一种是电力电子电路集成技术；一种是电力电子模块集成技术。电力电子电路集成技术研究的内容主要涉及适用于集成模块内的具有通用性标准化的主电路、控制电路、驱动电路、保护电路、电源电路及磁性元件技术。研究的目标是提高电路性能，降低损耗，以尽可能单一的电路方案适应尽可能广泛的应用。主电路方面的研究有用于 AC-DC 或 DC-AC 变换的软开关电路、用于 DC-DC 变换的移相全桥型电路和半桥型谐振电路和

主电路拓扑结构研究等。驱动电路方面有可以降低有关噪声的有源驱动技术等。控制电路方面有基于 DSP 和 EPLD 的可重复编程数字控制电路等。通信接口方面有基于现场总线技术和光纤的接口技术等。磁技术方面主要是对集成磁件和电容、电感、变压器等混合集成进行研究。

所谓电力电子模块集成技术，就是将目前电力电子装置中的功率器件、驱动电路、控制电路和保护电路封装到一个集成模块内部，成为一个功能相对完整的、具有一定通用性的元件。一般包含以下几种集成形式：

(1) 一种是单片集成：将所要集成的所有元器件都采用统一的加工工艺和技术，集成在同一片硅片。目前由于制造工艺、高压和低压的隔离、电磁隔离和散热等技术的不成熟，所以单片集成技术仅适用于小功率电力电子电路的集成。单片集成有可能成为电力电子集成技术的未来发展方向。

(2) 一种是混合集成，采用封装的技术手段，将分别包含功率器件、驱动、保护和控制电路的多个硅片封入同一模块中，形成具有部分或完整功能且相对独立的单元。这种集成方法可以较好地解决不同工艺的电路之间的组合和高压隔离等问题，具有较高的集成度，也可以比较有效地减小体积和重量，但目前还存在分布参数、电磁兼容、传热等具有较高难度的技术问题，并且尚不能有效地降低成本，达到较高的可靠性，因此目前仍以中等功率应用为主，并正在向大功率发展，混合集成将是目前电力电子集成技术的主要方向。

(3) 另一个是系统集成即人们可以根据电力电子系统集成理论和设计规则，利用上述这些子系统方便地集成和扩展为最终用户所需要的要实现上述目标^[1]。

3 主要研究内容及现状

3.1 模块的封装和互连技术

目前，集成主要采用混合集成方式，因此，封装技术就成为电力电子集成研究的关键。

(1) MCM 封装技术：MCM 是由一种由两个或者两个以上的裸芯片或者芯片尺寸封装的 IC 组装在一个基板上的模块，模块组成一个电子系统或子系统。MCM 分三种基本类型，一种是 MCM-L（采用片状多层基板的）；一种是 MCM-C（是采用多层陶瓷基板的）；另一种是 MCM-D（是采用薄膜技术的）。这三种封装形式根据封装的对象不同和封装器件的应用环境不同各有自己的优缺点，在此不再细说了。MCM 封装有很多优点，例如提高 PCB 板的利用率、增强 IC 的可靠性、增强系统的 EMC、优化 PCB 板的设计和降低投资风险等^[2]。

(2) 倒装芯片技术：倒装芯片技术是一种将晶片直接与基板相互连接的先进的封装技术。在封装过程中，芯片以面朝下的方式让芯片上的结合点透过金属导体与基板的结合点相互连接的封装技术。和传统的引线键合技术相比，使用倒装芯片技术后，引脚可以放在晶粒正下方的任何地方，而不是只能排列在其四周，这样就能使得引线电感变小、串扰变弱、信号传输时间缩短，从而提高电性能；同时，由于倒装芯片技术可以将导电晶体直接覆盖在晶粒上，从而能够大幅缩小晶粒的尺寸，实现芯片尺寸封装 CSP。

(3) 嵌入式封装：首先在陶瓷框架上刻蚀出空洞。功率芯片被埋设在陶瓷框架的空洞内，之后，在其上部利用丝网漏印、光刻等技术分别涂覆介质薄膜以及金属膜并使之图形化，最后，集成模块的驱动、控制、保护元件以表贴或膜式元件的形式粘附在最上层。嵌入式封装结构的最大优点是可以大为缩小模块的体积，继而提高模块的功率密度。

(4) 新型的互连方式：传统电力电子器件采用的互连工艺主要有键台与压接两种方式；其中压接方式的缺陷主要体现在对管芯、压块、底板等零件平整度要求很高，否则不仅使模块的接触热阻增大而且会损伤芯片，严重时使芯片碎裂。引线键合技术本身存在诸多技术缺陷表现在：如

并联的多根铝丝电流分配不均匀、有较大的局部寄生电感、较大的高频电磁应力等，以至影响键合寿命。目前，国际上已提出多种技术方案，根据其互连方式大体可以划分为两类，以焊接技术为基础的互连工艺和以沉积金属膜（薄膜或厚膜）为基础的互连工艺^[3]。以焊接技术为基础的互连工艺普遍采用叠层型三维封装结构，即把多个裸芯片或多芯片模块沿 z 轴层层叠装、互连，组成三维封装结构。层叠三维封装的优点是工艺相对简单，成本相对较低，关键解决各层间的垂直互连问题。目前焊接互连有焊料凸点互连和金属柱互连平行板结构。焊料凸点互连：该技术利用焊料凸点代替引线构成芯片电极的引出端并常与倒装芯片技术结合，以进一步缩短引线间距。焊料凸点互连的优点在于省略了芯片和基板之间的引线，起电连接作用的焊点路径短、接触面积大、寄生电感、电容小，封装密度高；金属柱互连平行板结构：在硅片的正反两面上下各有一层互相平行的陶瓷覆铜板 DCB 板上都预先刻蚀有相应的电路，硅片的底面直接焊接在 DCB 板上，而硅片正面的电极是通过直接键合的金属柱引出，与上 DCB 板构成电气连接，即借助金属柱完成了硅片之间及上下 DCB 板之间的互连。

以沉积金属膜为基础的互连工艺多采用埋置型三维封装结构，即在各类基板或介质中埋置裸芯片，顶层再贴装表贴元件及芯片来实现三维封装结构。其最大优点是能大大减少焊点，缩短引线间距，进而减小寄生参数。以沉积金属膜为基础的互连工艺有：薄膜覆盖技术和嵌入式封装等。

3.2 磁集成的最新研究

近几年，随着电力电子技术高频磁技术的不断发展，磁集成技术已经发展成为电力电子技术的一个分支。所谓磁集成技术，就是将变换器中两个或多个分立磁件 (Discrete Magnetics DM) 绕制在一副磁芯上，从结构上集中在一起。在电力电子中，磁集成技术主要应用于开关电源和 UPS 逆变器中，有以下优点：(1) 减少开关电源中器件的数量；(2) 使集成磁件的最大工作磁密小于各分立磁件的磁密和，以减小磁件磁芯的截面积，从而减小磁件磁芯的体积和重量；(3) 使集成磁件磁芯磁通的脉动量减小，从而使磁件的铁损耗减小，提高开关电源的效率和功率密度；(4) 改善开关电源的性能，如减小开关电源输入和输出电流的纹波，提高开关电源的瞬态响应速度等。主要有四种磁件集成方式：直流磁通与交流磁通叠加——主要用于高频场合的电感

与变压器的集成。交流磁通在公共磁柱的交错并联或互相抵消——用于绕组有相位差的电感与电感的集成、交变磁通相对方向固定的电感与变压器的集成。直流磁通与直流磁通互相削减——这种集成方式有利于磁件体积的减小。绕组产生的交流磁通正向耦合——用于绕组电压相对方向固定的磁件集成^[4]。

3.3 集成中的EMC设计

电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility , EMC) 是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰的能力。EMC 包括两个方面——电磁敏感度 (EMS) 和电磁干扰 (EMI)。

(1) 产生机理 :按噪声干扰源来分，二极管的反向恢复电流产生的干扰，高频整流回路中的整流二极管正向导通时有较大的正向电流流过，在其受反偏电压而转向截止时，由于 PN 结中有较多的载流子积累，因而在载流子消失之前的一段时间里，电流会反向流动，致使载流子消失的反向恢复电流急剧减少而发生很大的电流变化。开关管产生的谐波干扰，功率开关管在导通时流过较大的 U 脉冲电流。例如正激型、推挽型和桥式变换器的输入电流波形在阻性负载时近似为矩形波，其中含有丰富的高次谐波分量。当采用零电流、零电压开关时，这种谐波干扰将会很小。另外，功率开关管在截止期间，高频变压器绕组漏感引起的电流突变，也会产生尖峰干扰。交流输入回路产生的干扰，无工频变压器的开关电源输入端整流管在反向恢复期间会引起高频衰减振荡产生干扰。开关电源产生的尖峰干扰和谐波干扰能量，通过开关电源的输入输出线传播出去而形成的干扰称之为传导干扰；而谐波和寄生振荡的能量，通过输入输出线传播时，都会在空间产生电场和磁场。这种通过电磁辐射产生的干扰称为辐射干扰。

其他原因，元器件的寄生参数，开关电源的原理图设计不够完美，印刷线路板 (PCB) 走线通常采用手工布置，具有很大的随意性，PCB 的近场干扰大，并且印刷板上器件的安装、放置，以及方位的不合理都会造成 EMI 干扰。

(2) 抑制 EMI 的措施 :除了屏蔽、接地等常用的 EMI 抑制技术以外，针对开关电源的特点，一些新技术，如：软开关技术，开关频率调制技术、功率管优化驱动技术、EMI 滤波器设计技术和共模干扰有源抑制技术等均有研究和发展。软开关技术的基本思想是在原有的硬开关电路中增加电感和电容元件，利用电感和电容的谐振，降低开

关过程中的 du/dt 和 di/dt ，使开关器件开通时电压的下降先于电流的上升，或关断时电流的下降先于电压的上升，来消除电压和电流的重叠。在理想情况下，这样不仅減小了开关损耗，还可以大大減小 EMI 电平。此外，软开关电路不同于一般的吸收电路，能够在降低 EMI 影响的同时減小开关损耗。但是简单地认为软开关技术就可以降低 EMI 电平是一种比较片面的认识。这是由于为实现主功率开关器件的软开关电路中引入了辅助谐振单元，其谐振会引入高的 du/dt 和 di/dt ，增加电路的 EMI。因此，比较软开关和硬开关技术的开关电源，其 EMI 应综合衡量考虑。利用开关频率调制技术降低开关电源的 EMI 电平，其基本思想是通过调制开关频率 f_c 的方法把集中在开关频率 f_c 及其谐波 $2f_c$ 、 $3f_c$ 、...上的能量分散到它们周围的频带上，由此降低各个频率点上的 EMI 幅值，以达到低于 EMI 标准规定的限值。优化功率开关管的驱动电路设计是通过缓冲吸收电路，可以延缓功率开关器件的导通 / 关断过程，从而降低开关电源的 EMI 电平，但同时会因为附加的吸收电路损耗，导致电源总效率的下降。另一种降低开关电源的 EMI 电平的方法是选择合适的驱动电路参数，可以在维持电路性能不变的同时降低 EMI 电平。从优化驱动电路设计的角度改善开关电源的 EMI 性能，是近年来发展的一个新方向。共模干扰的有源抑制技术是一种从噪声源采取措施抑制共模干扰的方法。这种方法的基本思路是设法从主回路中取出一个与导致 EMI 干扰的主要开关电压波形完全反相的补偿 EMI 噪声电压，并用它去平衡原开关电压的影响。滤波器设计技术，开关电源产生的 EMI 以传导干扰为主，而传导干扰又分为差模干扰和共模干扰两种：差模干扰是指存在于相线对中线之间的干扰信号，共模干扰则是指各相线和中线对地线之间的干扰信号。通常共模噪声要比差模噪声产生更大的辐射型 EMI。目前抑制传导 EMI 最有效的方法是利用无源滤波技术即 EMI 滤波技术 吸收回路，开关电源产生 EMI 的主要原因是电压和电流的急剧变化，因而需要尽可能地降低电路中电压和电流的变化率。采用吸收电路能够抑制 EMI，其基本原理就是在开关关断时为其提供旁路，吸收积聚在寄生分布参数中的能量，从而抑制干扰的发生。基本吸收电路在一定程度上还会降低效率。故目前，无源无损吸收电路成为解决上述问题的重要发展方向之一。它是一种改变存在于尖峰或上升下降边沿中能量方向的方法，并能使能量回送到输入或输出中。

从而解决了基本吸收电路中的有损储能^[6]。

3.4 模块的热管理问题

目前有效的热管理已成为电力电子集成技术的最为关键的技术之一，传热装置决定整个装置的体积、质量、功率密度和可靠性，因而目前较重视高效和轻便散热方式的研究，如微通道传热、热管冷却和气—液两相冷却等。热管是一种典型依靠自身内部工作液体相变实现传热的传热元件。其工作是完全无源和连续的。由于没有失效的运行部件，所以热管运行是非常可靠的；同时具有很高的导热性、优良的等温性、灵活的环境适用性等特性。热管的传热能力虽然很大，但也不可能无限加大热负荷，事实上，热管的传热存在着一系列的传热极限，限制热管传热的物理现象为毛细力、声速、携带、沸腾、冷冻启动、连续蒸气、蒸汽压力和冷凝等，这些传热极限与热管尺寸、形状、工作介质、吸液芯结构、工作温度等有关。近年来热管式散热器作为成熟的商业产品广泛地应用于电器设备散热、电子器件冷却、半导体元件以及大规模集成电路板的散热。伴随着小型化电子产品的散热需求，热管技术也向着小型化发展：微小型热管可以弯制或压制成各种形状。热电冷却器又称半导体冷却器，是一种具有热电效应的固态冷却装置，原理是热电效应的逆过程：当在有两块不同的金属做成的闭合回路的结间输入电流（直流电流）时，金属间就会保持一个温差。电热冷却器具有结构紧凑、可靠性高、无噪声、无移动部件、可以实现精确的温度控制等优点。缺点是：热电冷却器在变热流密度散热时受到限制；转化效率低，近几年来，由于生产成本的稳步降低，热电冷却装置的市场迅速扩大，逐渐应用于军事、航天、实验仪器以及商业和工业领域的电子产品。微通道换热器是指在基体上用光刻或其它刻蚀法制成截面尺寸仅有几十到上百微米的槽道，换热介质在这些小槽道中流过与换热器基体并通过基体与别的换热介质进行换热。换热器的基体材料可以是金属、玻璃、硅或其它任何合适的材料。优点是：换热系数大，换热效果很好；体积很小，特别适合电子器件的冷却，制造工艺采用电子器件制造工艺，有利于降低成本、批量生产。微喷射换热是指从许多微孔中喷出换热介质到被冷却表面，介质与表面换热系数因强烈扰动而保持在很高的水平上，在一定条件下，这种冷却方式的导热系数比

铜高1000倍。所谓介观制冷器，它厚度不足3mm但却包含了普通制冷装置中的压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀、控制器等所有部件，采用蒸汽压缩制冷循环，这可制成标准制冷模块，用于对任何表面式热源的制冷。热电子发射制冷技术固体受到加热内部电子的动能增大到一定程度时，一部分电子会克服逸出功而逸出，利用热电子发射原理制成的制冷器是全固态制冷器，甚至可以制成薄膜形式的制冷器。对膜薄式热电子发射制冷机已进行了大量的研究，因为它可以直接镀在光电子式微电子器件的表面，制造和使用都极为方便^[5]。

3.5 新器件与新材料

新型电力电子器件会使电力电子技术发生革命性的变化，更大容量、更小通态压降或通态电阻和更好开关性能的新型器件对集成技术也是至关重要的。如日前 Infineon 的 CoolMOS 和 SiC 二极管在集成模块中的应用取得了很好的效果。目前各种新型的封装互连技术对功率管芯提出了新要求，如双面可焊等。随着模块功率密度的提高，对模块的热—机械性能的要求也在提高。就基板材料而言，高导热率、良好的绝缘性、热膨胀系数匹配（与 Si 材料相比）以及较强抗形变能力是选择的标准。目前基于 AlN 的 DBC 板是综合性能较好的一种基板，另外 Al₂O₃ 和 BeO 也被采用，但后者有毒性。为了提高机械性能和热性能，DBC 基板一般焊接在金属铜板上。虽然铜有优异的导热性能，但是和硅以及 AlN 材料的热膨胀系数匹配性不好，会产生较大的热—机械应力，大大降低了模块的可靠性。因而必须研究热匹配性能更好的材料，目前金属基化合物（如 AlSiC）有很好的应用前景。

4 结语

电力电子集成代表着本世纪电力电子发展方向，具有促进电力、能源、工业自动化革命性变革的良好前景，开展电力电子集成研究具有重要的学术和实际应用价值，同时研究的任务是艰巨复杂的，它涉及大电流注入器件的使用、高电压功率器件和低电压控制、传感器的芯片集成、高功率器件和控制器件在同一基板上的连接、良好的导/散热、预案件的布置、寄生参数、无源器件的集成、系统集成的通信技术、电磁兼容技术、稳定性问题等。

参考文献

- [1] Zhao Anwang, Xu yang, XiaoBao wang. State-of-art and Development Trends of Power Electronics Integration Technology. *Power Electronics*, October, 2003.
- [2] 石明达, 吴晓纯. 低成本的MCM和MCM封装技术. *中国集成电路*. 2004, 10.
- [3] 陈文洁, 杨旭, 杨拴科, 王兆安. 电力电子集成模块的封装结构与互连方式的研究现状. *电子应用技术*. 2004, 4.
- [4] 陈乾宏, 阮新波, 严仰光. 开关电源中磁集成技术及其应用. *电工技术学报*. 2004, 3.
- [5] 马永锡, 张红. 电子器件发热与冷却技术. *化工进展*2006.
- [6] 钱照明, 袁义生. 开关电源EMC设计研究现状及发展. *零组件杂志*. 2003, 4

作者简介

李志,男,1980年生,硕士研究生,主要研究方向照明电子电源系统集成。