

专题报告

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2022.03.012

## 有源光电子器件封装技术及其可靠性研究

樊 剑\*, 吴震星, 陆晓霞, 薛爱杰, 高 军

(中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

**摘 要:** 介绍了有源光电子器件同轴和盒式封装结构、电学和光学零件的装联材料和光纤耦合系统的技术实现方法与可靠性。对比分析了电学零件装联材料和光学零件胶合材料的特性。阐述了光纤耦合系统中的直接耦合和间接耦合的结构特征, 以及间接耦合中的光窗封接技术和直接耦合中的光纤与尾纤导管的三种封接技术和可靠性。此外, 针对有源光电子器件的典型失效模式, 给出了可靠性验证方法。

**关键词:** 有源光电子器件; 封装结构; 光纤耦合; 封接; 可靠性

**中图分类号:** TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)03-0222-08

## Study on Active Optoelectronic Device Packaging Technology and Reliability

FAN Jian, WU Zhenxing, LU Xiaoxia, XUE Aijie, GAO Jun

(The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,  
Nanjing 210016, CHN)

**Abstract:** The technical approaches and reliability of the active optoelectronic devices were studied, including coaxial and box-type package structure, electrical and optical parts attachment materials and fiber coupling system. The characteristics of attachment material for electrical parts and cementing material for optical parts were compared and analyzed. The structural characteristics of direct and indirect coupling in fiber coupling system were described, as well as the optical window sealing technologies in indirect coupling, three sealing methods and reliability of fiber and pigtail ferrule in direct coupling. In addition, several reliability verification methods were presented, aiming at the typical failure modes of active optoelectronic devices.

**Key words:** active optoelectronic device; packaging structure; fiber coupling; sealing; reliability

### 引 言

第一代商用光纤通信系统在1975年研制成功,

经过四十多年的发展, 到目前为止光纤通信已应用于物联网、大数据、云计算、战术通信系统和局部通信系统, 以及飞机、导弹、卫星等军事装备、航天器

**收稿日期:** 2022-03-20

**作者简介:** 樊 剑 (1990—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为光电子器件可靠性; (E-mail: 18795890165@163.com)

吴震星 (1991—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为光电子器件辐照防护; (E-mail: 15996224511@163.com)

陆晓霞 (1987—), 女, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为化合物半导体芯片分析与评价。 (E-mail: 460083273@qq.com)

\* 通讯作者

的信息传递和通信联络<sup>[1-2]</sup>等。光电子器件是光纤通信系统的基础器件,分为有源光电子器件和无源光电子器件<sup>[3-4]</sup>。有源光电子器件是光纤通信系统中实现电光或者光电转换的关键器件,常见的有半导体激光器、光放大器、光调制器、光探测器和发光二极管等。

有源光电子器件虽然结构各异,但它们都具有相同的工艺基础,主要包括半导体材料外延生长、芯片制作、器件封装、测试与可靠性分析等四个基本工艺平台<sup>[5]</sup>。在半导体材料外延生长和芯片制作方面,半导体芯片加工工艺的持续发展推动着技术的不断进步。对于有源光电子器件,前道工艺固然重要,但器件结构设计、封装工艺设计和工艺加工控制等对器件可靠性也有着至关重要的影响。有源光电子器件通常以光波作为信息载体,光纤作为信号传输介质,在其内部需通过稳定可靠的光对准和装联方式实现光电芯片与光纤的高效耦合,从而实现光信号到电信号或者电信号到光信号的转换,且需要更优的结构设计保护质地较脆的光纤,因此其封装结构设计和电子装联比常规的半导体器件要复杂得多。

## 1 封装结构

有源光电子器件封装工艺可以描述为:把光电芯片经过组装和电互连后,与相关功能零件、电路等封入特制的管壳内,并通过光通道与外部的光互连。对于有源光电子器件的封装,业界还没有统一的标准,各厂家使用的封装形式、管壳外形尺寸相差较大,但总体上大致可以分为两大类:同轴封装结构和盒式封装结构<sup>[6]</sup>。

### 1.1 同轴封装结构

同轴封装主要由 TO-Can 和陶瓷插针金属组件构成。其中 TO-Can 一般由带透镜的 TO 帽和带电引线的金属玻璃底座组成,是电光或者光电转换的核心部件,通常采用电阻焊的方式密封连接。TO-Can 内部空间狭小,通常只能粘接激光二极管芯片或者光电探测二极管芯片,还可根据需要集成电容、电阻和跨阻放大器(TIA)等,通过制作在 TO 帽上的玻璃透镜来实现光在管壳内外的传输。

陶瓷插针金属组件与 TO-Can 耦合对准后,采用激光点焊或树脂灌封的方式固定连接。陶瓷插

针金属组件作为光通道的接口,可以是带尾纤和连接器的尾纤型,也可以是带连接器但不带尾纤的插拔型。如图1所示为某型号插拔型同轴封装光探测器及其内部结构图。



图1 插拔型同轴封装结构

Fig.1 Pluggable coaxial package structure

### 1.2 盒式封装结构

光电芯片工作时会产生热量,而 TO-Can 的结构特点决定其散热和控温能力有限<sup>[7]</sup>。若想满足发热量较大的大功率光电子器件的散热要求,盒式封装结构是较为理想的选择,其封装结构外形较大,可根据不同的需求在管壳内部集成结构复杂程度不同的零件,以实现更高的集成度和设计灵活性。盒式封装结构根据外形特征可分为双列直插封装、蝶形封装和射频连接器型封装等,各类的典型结构外形图如图2所示。

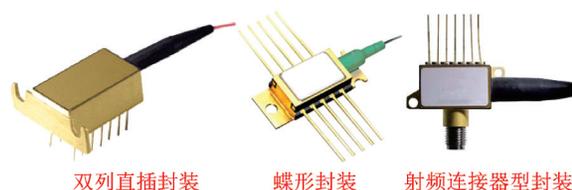


图2 盒式封装典型结构

Fig.2 Typical box-type package structures

#### 1.2.1 封装外壳

盒式封装外壳内部起光电或者电光转换作用的芯片,在工作时通常会产生大量的热,如泵浦激光器中的激光二极管芯片。芯片温度过高会引起器件的性能下降,因此器件的封装外壳为内部芯片和电路提供电气机械功能和环境屏蔽的同时,也起到热传递和散热的作用。

盒式封装外壳一般主体框架材料为可伐合金,外设光接口和电引线。可伐合金的导热性能优势并不是特别突出(热导率为  $16.5 \text{ W/m}\cdot\text{C}$ ),无法满

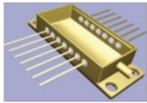
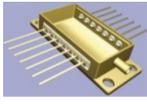
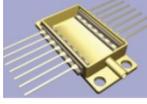
足对散热和温控要求较高的情况,为了实现更好的热传导,管壳基底可以采用导热性更好的钨铜合金(如W-Cu(85/15),热导率为230 W/m·°C)或铜钼铜合金(如Cu-Mu-Cu(1:6:1),热导率为208 W/m·°C)等,但成本更高。

外设的光接口用于接收外界的光信号,再通过器件的光通道与内部光电芯片实现耦合,相关内容

将在第3章光纤耦合系统作详细介绍。电引线可实现电信号在管壳内外的传输,主要有金属引线和同轴连接器两种。金属引线通常用于PCB的通孔插装或者SMT贴装,常规的PCB材料和结构使其信号传输速率低于3~5 GHz,而同轴连接器可实现更高的传输速率,其各自的应用范围和结构图如表1所示。

表 1 盒式封装电信号接口种类

Tab.1 The electrical interfaces of box-type package

外设接口	应用范围		结构图
	玻璃	成本较低,但是传输电信号频率一般小于500~800 MHz	
金属引线	单层陶瓷	传输电信号频率一般小于2 GHz	
	多层陶瓷	传输电信号频率一般小于10 GHz	
同轴连接器	可实现大于3~5 GHz的更高电信号频率的传输		

### 1.2.2 装联结构

对于盒式封装结构,根据不同的性能、可靠性和散热要求,内部装联结构可以简单到只包含一块芯片和光纤。对于可靠性要求高、发热量大和散热要求较高的器件,通常会形成包含芯片、温敏电阻、陶瓷基板、热沉、TEC(Thermo Electric Cooler)制冷器和其它光学零件等的叠装结构<sup>[8-9]</sup>,如图3所示。使用时需要在器件外围布设自动温度控制电路,用于监测温度和控制TEC制冷器,使器件工作在稳定的温度。针对不同的散热要求,可在封装外壳材料选用、热沉结构设计、TEC制冷器选择方面开展有效的热特性分析。内部安装有TEC制冷器的叠装结构虽能有效控制温度,但是耐机械冲击能力较差。

如图4所示为复杂程度不同的器件内部形貌

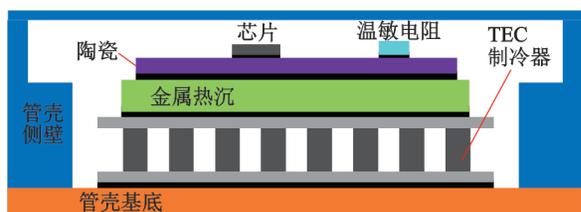
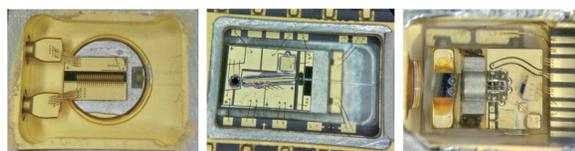


图3 盒式封装内部叠装结构

Fig.3 The internal stacking structure of box-type package

图,其中图4(a)为某型号多模泵浦激光器,内部只包含一款载有激光二极管芯片的陶瓷基板和光纤,结构较为简单;图4(b)为某型号单模泵浦激光器,内部包含TEC制冷器、温敏电阻、陶瓷薄膜电阻、光电探测二极管芯片、温敏电阻和光纤等,为多层叠装结构;图4(c)为某型号电吸收调制激光器,内部包含TEC制冷器、热沉、温敏电阻、陶瓷薄膜电阻、光电探测二极管芯片、玻璃透镜和光隔离器等,为多层叠装结构。



(a) 多模泵浦激光器 (b) 单模泵浦激光器 (c) 电吸收调制激光器

图4 盒式封装器件内部形貌

Fig.4 Internal morphology of box-type package device

## 2 装联材料

### 2.1 电学零件的装联材料

有源光电子器件能够实现光电或者电光转换,

其内部往往既有电学零件也有光学零件,而为了将它们组装在同一个器件管壳内,需要针对性地采用不同的装联材料。有源光电子器件中常用的电学零件装联材料及其应用说明如表2所示。

表2 电学零件装联材料  
Tab.2 Attachment materials of electrical parts

装联材料	应用说明
黏结材料	导电胶 主要用于电学零件的粘接,如芯片、阻容感等
	绝缘胶 主要用于光学零件的粘接,如透镜、光纤、光隔离器等,也可用于电学零件的加固
钎料	硬钎料 焊接温度一般高于450℃,主要用于管壳基底、金属侧壁、陶瓷侧壁、外引线等金属件之间的装配
	软钎料 焊接温度一般低于450℃,主要用于电学零件的粘接,如芯片、阻容感、陶瓷基板、TEC制冷器等,以及光纤、透镜等表面金属化后与金属材料的焊接
低温玻璃焊料	主要用于光纤与管壳、玻璃透镜与管壳的密封焊接,可以和多种材料相结合,且能获得良好的密封效果,关键是不用对透镜或者光纤进行金属化即可实现与金属壳体的密封连接 <sup>[10]</sup>
键合引线	用于电学零件之间或电学零件与管壳之间的电互联,一般有金丝、硅铝丝和铜丝三种材料,按键合形貌可以分为球焊和楔形焊

## 2.2 光学零件的胶合材料

相比其他类型半导体器件,光电子器件中较为特殊的工艺是光学零件的胶合,主要是利用光学级透明胶实现光学零件相互连接。如图5所示为某型号光调制器内部形貌,光纤穿过石英毛细管之后,通过光学级透明胶与调制器芯片直接对准连接。



图5 光学零件的胶合  
Fig.5 Optical parts cementing

光学零件胶合中应用的透明胶黏剂多半属于有机高分子聚合物,从以天然树脂胶为主,逐步向使用合成树脂光学胶过渡,大体分为四个发展阶段:天然冷杉树脂胶→环氧树脂胶→甲醇胶→光学

光敏胶<sup>[12-13]</sup>。光学零件的胶合材料及其使用可靠性如表3所示,其中光学光敏胶是当前比较理想的优质光学胶,应用前景广阔。

表3 光学零件的胶合材料  
Tab.3 Optical parts cementing materials

种类	名称	应用说明
天然树脂胶	天然冷杉树脂胶	易引起脱胶,拆胶清洗容易,高低温度范围:-40℃~40℃,适用于室温环境中使用
	环氧树脂胶	固化时间长,有一定毒性,拆胶困难,高低温度范围:-60℃~60℃,大批量生产受到一定限制
	甲醇胶	固化收缩性大且易变色,拆胶困难,高低温范围:-60℃~60℃,已逐渐停止使用
合成树脂光学胶		紫外线固化,收缩性小,耐老化性好,长期使用后透光率仍然不小于90%,适合大批量生产。不同牌号的
	光学光敏胶	光学光敏胶(如GGJ-1、GGJ-2、GBN-501和GBN-502等)可用于大、中、小光学零件的胶合,其中GBN-501高低温度范围可达-60℃~70℃

## 3 光纤耦合系统

有源光电子器件相对于其他类型半导体器件的特殊之处在于,在满足电学设计要求的同时,需实现光纤与内部芯片之间的耦合,即实现光在光纤与半导体芯片之间的高效耦合。器件的光纤耦合以最小化功率损耗(即最大化耦合效率)为首要目标,以保证信号高质量的传输。

### 3.1 光纤耦合类型

根据有源光电子器件的芯片与光纤之间是否有分立的光学元件,光纤耦合类型可以分为:间接耦合和直接耦合<sup>[14]</sup>。

#### 3.1.1 间接耦合

间接耦合是指在光纤与芯片端面之间通过玻璃透镜的聚焦或准直作用实现光路的对准。为了

提高耦合效率,往往在光路上增加光隔离器,消除反射光对光源的影响。如图6所示为间接耦合器件的内部结构图,内部激光二极管芯片发射空间光,经准直透镜、光隔离器和聚焦透镜后,与陶瓷插针组件中心的裸光纤耦合。常规的透镜类型有球透镜、圆柱透镜、非球面透镜和自聚焦透镜等,主要的作用为光束的准直或者聚焦。在多数有源光电子器件的光纤耦合系统中,经常用单一透镜或者多透镜的组合来提高耦合效率。

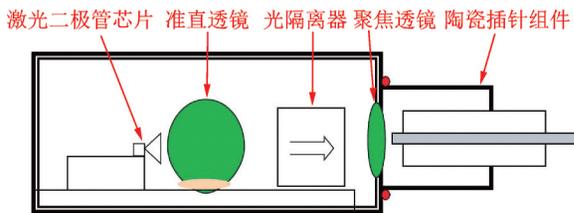


图6 间接耦合结构示意图

Fig.6 Diagram of indirect coupling structure

间接耦合可以分散公差,使光路上的元件有更大的位移空间,但是从光源到光接受面之间距离较长,对器件的封装工艺要求较高,整个光路上元件的微小位移都会引起耦合效率下降,这也是该类器件常见的失效模式。

### 3.1.2 直接耦合

直接耦合是指将光纤与发射光或者接收光的芯片端面直接进行精密对准,如图7所示。在芯片与光纤的直接耦合中,为了获得更高的耦合效率,一般通过改变芯片的截面形状或光纤端面的形状,而芯片截面形状的改变往往会对半导体芯片的材料生长和工艺制作过程带来很大的不便,这就需要从光纤入手,通过改变光纤端面形状,来实现两者之间更高的耦合效率。为了满足更高耦合效率的要求,光纤端面大致经历了如下发展过程:平端光纤→球面光纤→微透镜光纤→尖锥端光纤→锥形光纤<sup>[15]</sup>。

直接耦合具有结构紧凑、制作简单、成本低廉

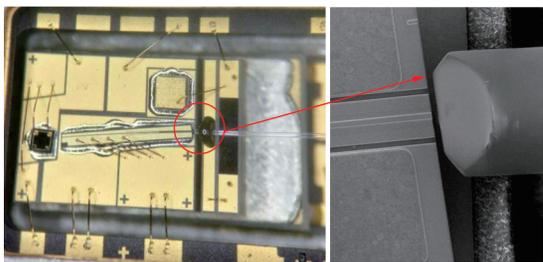


图7 激光二极管与光纤直接耦合

Fig.7 Direct coupling between LD and optical fiber

等优点,但耦合效率相对较低,调整容忍度较小,对加工精度和对准精度要求更高。器件内部光纤的固定方式一般采用激光点焊或者焊料固定,焊接质量不好的情况下,容易引起应力缓慢释放,进而导致光路位移,表征为耦合效率下降。

## 3.2 光窗

### 3.2.1 光窗类型

有源光电子器件的光电芯片往往置于密闭管壳内,以防止敏感光学芯片受到外界光线影响,为了实现光信号在密闭管壳内外的传输,可以在管壳上设计一个导光的玻璃透镜,如图8所示,该玻璃透镜就是光窗<sup>[16]</sup>。

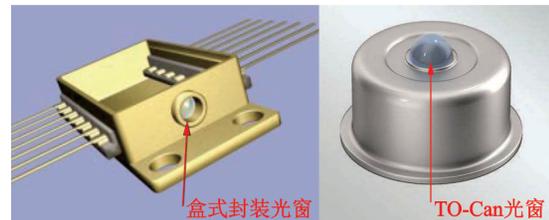


图8 玻璃光窗

Fig.8 Glass optical window

光窗形状包括平面透镜、球面透镜、非球面透镜等,比较常见的是平面透镜和球面透镜。一般使用球面透镜时,对球透镜的焦距都会有较严格的要求,在选择光窗与管壳的封接方法时一般使用对光窗影响较小或者无影响的封接方法;而平面透镜一般对光窗无严格的焦距要求,对封接工艺要求相对较低。

### 3.2.2 光窗封接方法

有源光电子器件常用气密封装的形式提高器件的可靠性,因此光窗的封接方法对有源光电子器件的可靠性起着至关重要的作用。一般来说,按玻璃光窗和金属框之间是否含有中间介质,封接方法可分为两种:间接封接和直接封接<sup>[17-18]</sup>。以同轴封装中的TO帽为例,平面透镜的直接封接和间接封接的剖面示意图如图9所示。

表4给出了光窗直接封接和间接封接的各种方法及各自技术要求和可靠性对比。其中有机封接的方式在长期潮湿、高低温、日照作用下,会因吸湿、开裂和老化而导致可靠性下降,但是与其他封接技术相比,成本较低,因此在民用领域应用较广;对于In封接,由于金属In的熔点低,封接后的光窗使用温度较低<sup>[19]</sup>。

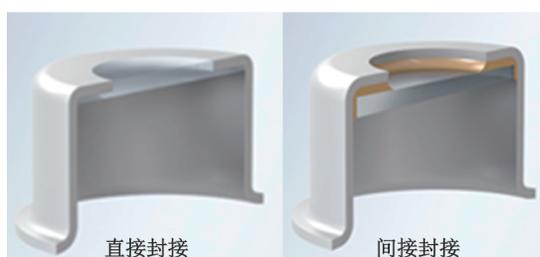


图9 平面透镜的直接封接和间接封接

Fig.9 Direct and indirect sealing of plane lens

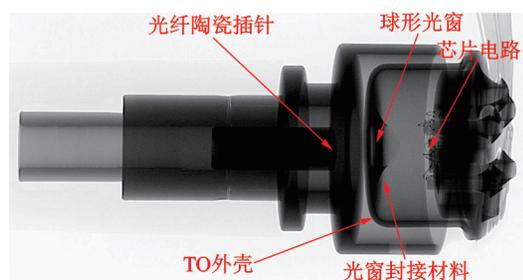


图10 同轴封装的光纤耦合结构

Fig.10 Optical fiber coupling structure of coaxial package

### 3.3 耦合封接

#### 3.3.1 同轴封装的耦合封接

同轴封装中的 TO-Can 是实现电子封装和光纤耦合的关键部分。光纤质地较脆,机械强度低,而 TO-Can 封装结构又有自身的局限性,要想实现直接耦合需要将光纤穿过 TO 帽,而光纤和 TO 帽之间很难实现可靠的连接,所以同轴封装普遍采用间接耦合的方式。

同轴封装为了实现间接耦合,需在 TO 帽上设计并制作光窗,使光纤中的光透过光窗后与内部芯片实现耦合。光窗与 TO 帽的封接方式可根据需要采用表 4 中所述的直接封接或间接封接的方式形成光窗。如图 10 所示为某型号光探测器,陶瓷插针组件中裸光纤发射的空间光,通过 TO 帽上的球型透镜聚焦到内部芯片上。同轴封装中的陶瓷插针组件作为器件外设的光接口,与 TO 帽上的透镜共同构成了器件的光传输通道。

#### 3.3.2 盒式封装的耦合封接

盒式封装的外形相对同轴封装的 TO-Can 外形较大,耦合类型的选择也相对较灵活,所以盒式封装可根据实际需要选择直接耦合或间接耦合。

##### 3.3.2.1 直接耦合封接

为了实现直接耦合,需将光纤穿过器件外壳进入内部,而光纤具有质地较脆,容易断裂(包层为直

径 125 μm 石英玻璃)的特征,为了避免器件尾纤应力破坏其与外壳的封接点,往往器件外壳都会设计有较长的尾纤导管,如图 11 所示,以防止外部尾纤的合理拉拽和晃动破坏封接点,或使内部已经对准和固定的光纤产生位移。

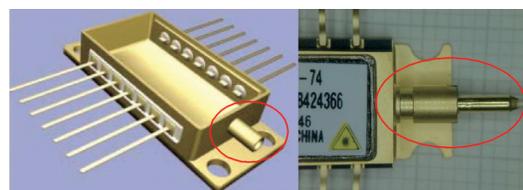


图11 直接耦合盒式封装外壳上的尾纤导管

Fig.11 Ferrule on box-type housing of direct coupling

当前,光纤与尾纤导管之间的封接方式主要有三种:环氧树脂灌封、金属化光纤焊接+环氧树脂灌封和低温玻璃焊接+环氧树脂灌封。

(1)环氧树脂灌封是将尾纤剥去涂覆层后,通过环氧树脂灌封的方式直接与尾纤导管进行封接,如图 12 所示,该方式为非气密封装。

(2)金属化光纤焊接+环氧树脂灌封是将光纤剥去涂覆层,并对裸光纤局部进行表面金属化后,与外壳之间用焊料焊接,最后为了防止尾纤应力破坏焊接点,在尾纤导管中灌封环氧树脂,如图 13 所示。金属化光纤焊接为刚性连接且为气密封装,能

表 4 光电器件光窗封接方法

Tab.4 The optical window sealing methods of optoelectronic device

封接类型	封接方法	封接温度	气密	对光窗的影响	表面处理	可靠性
间接封接	有机封接	低	否	无影响	不需要严格的表面处理	低
	In 封接	低	是	无影响	需要严格的表面处理	较高
	玻璃焊料封接	低	是	无影响	不需要	较高
	合金焊料封接	低	是	无影响	表面金属化	较高
直接封接	高温熔封	高	是	影响大	表面预氧化	高
	压力封接	较高	是	影响较大	严格的表面处理	高
	扩散封接	较高	是	影响较大	不需要	高
	高频封接	高	是	影响较小	不需要	较高

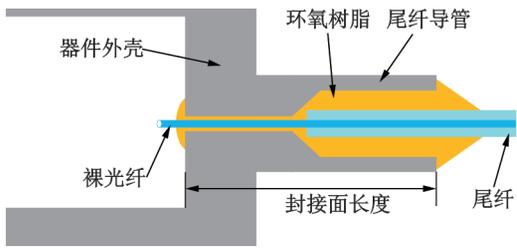


图 12 环氧树脂灌封结构示意图

Fig.12 Diagram of epoxy resin encapsulating structure

满足高可靠器件对气密的要求,穿过尾纤导管进入管壳内部的光纤受尾纤应力的影响小。

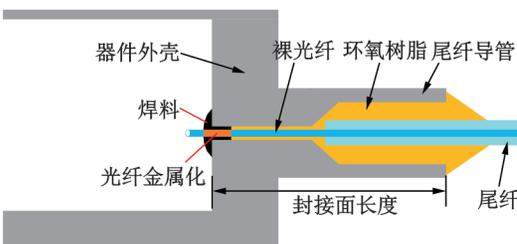


图 13 金属化光纤焊接+环氧树脂灌封结构示意图

Fig.13 Diagram of optical fiber metallization welding & epoxy resin encapsulating structure

(3)低温玻璃焊接+环氧树脂灌封是将光纤剥去涂覆层并清洁后,利用低温玻璃焊料直接将裸光纤与外壳进行焊接,最后为了防止尾纤应力破坏焊接点,在尾纤导管中灌封环氧树脂,如图 14 所示。该方式为刚性连接且为气密封装,同样可满足高可靠器件对气密封装的要求。

盒式封装的直接耦合中,光纤与尾纤导管之间的三种封接方式的优缺点和可靠性如表 5 所示。光纤与尾纤导管封接后,通过光纤将光信号传入管壳内部,共同构成了盒式封装直接耦合的光传输通道。

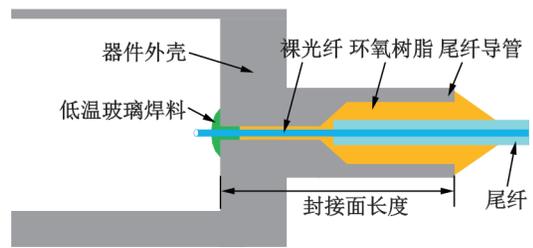


图 14 低温玻璃焊接+环氧树脂灌封结构示意图

Fig.14 Diagram of low temperature glass solder welding & epoxy resin encapsulating structure

3.3.2.2 间接耦合封接

对于盒式封装的间接耦合,由于芯片与光纤之间存在独立的透镜,可将透镜安装在器件管壳上来制作光窗。通过管壳上的光窗来实现光在管壳内外的传输,从而避免了光纤穿过管壳以及与管壳封接的问题。光窗与管壳的封接方式可根据需要采用表 4 中所述的直接封接或间接封接的方式。管壳外接陶瓷插针金属组件与光窗耦合对准之后,即构成了间接耦合的光传输通道,如图 15 所示。

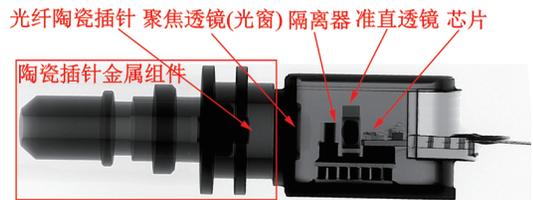


图 15 盒式封装间接耦合结构

Fig.15 Indirect coupling structure of box-type package

间接耦合一般会在管壳内部安装光学零件,如玻璃透镜和光隔离器等,光学零件的对准装配工艺应要求尽可能低的温度,以防止对之前装配的其他光学零件或电学零件产生过应力,或者因热胀冷缩导致位移。光学零件对准装联时的主要材料如第 2

表 5 光纤与尾纤导管之间的三种封接方式对比结果

Tab.5 Comparative results of three sealing methods between optical fiber and ferrule

封接方式	密封	优点	缺点	可靠性
环氧树脂灌封	非气密	工艺实现简单,成本低	无法实现管壳的气密封装,耐极限温度能力差,且当封接面长度较小时,尾纤的外部应力容易传导进内部光纤,引起其微位移从而影响耦合效率	低
金属化光纤焊接+环氧树脂灌封	气密	能耐极限高低温,可供选择的焊接材料使用温度范围较广,工艺选择较灵活 <sup>[19]</sup>	光纤金属化的工艺实现较困难,成本较高 <sup>[20]</sup>	高
低温玻璃焊接+环氧树脂灌封	气密	不需要进行复杂的光纤表面金属化	对裸光纤的表面条件要求比较苛刻,焊接温度相对较高,通常低温玻璃焊料的熔点 $\geq 320^{\circ}\text{C}$ ,焊接过程中要求表面特性一致,且玻璃焊料焊接后耐机械冲击能力较弱 <sup>[21]</sup>	较高

章中所述,当选择装联材料、清洗材料时,应考虑其  
对其他电学和光学零件的潜在污染和危害。

## 4 可靠性验证

### 4.1 失效模式

有源光电子器件是光纤通讯系统中不可或缺  
的关键器件,在高可靠应用领域,同轴封装中的

TO-Can 和盒式封装器件会选择气密性封装方式,  
并在封盖过程中充入惰性气体(一般为高纯氮气或  
氮气和氦气的混合气),来防止水汽、氧气或污染物  
进入管壳内,避免内部零件遭受侵蚀、氧化或腐蚀,  
从而大大提高器件的可靠性。而器件全寿命周期  
中外加的各种应力,如机械应力、电应力、热应力、  
ESD 等的作用,会使器件出现故障,有源光电子器  
件典型的失效模式如表 6 所示。

表 6 有源光电子器件典型失效模式

Tab.6 Typical failure modes of active optoelectronic device

失效模式	失效原因
结构损伤	外引线脱落、光窗破裂、结构(绝缘子、光窗、封边等)漏气、纤芯断裂、光纤位移等
光学性能退化	尾纤位移、光窗裂纹、沾污、光学零件位移、芯片功能退化等
电学性能退化	漏电流增大、暗电流增大或漂移、静电放电、击穿电压下降等
开路	芯片脱落、键合丝压焊点脱落、芯片烧毁、外引线脱落等
短路	内部有金属多余物、过电击穿短路、密封漏气后沾污导致表面钝化失效等

### 4.2 验证方法

针对上述典型失效模式,应对主要由电路设  
计、结构设计、工艺方法和生产工艺控制等决定的  
器件可靠性进行验证,主要通过以下几种手段:破  
坏性物理分析(DPA)、机械完整性试验(MIT)和耐  
久性试验。其中破坏性物理分析是从物理角度破  
坏解剖分析器件的可靠性,针对有源光电子器件应  
开展外部目检、粒子碰撞噪声检测、密封、X射线检  
查、内部气体含量分析(一般要求内部水汽含量低  
于 5 000 ppm)、开帽内部目检、键合强度、芯片剪切  
强度和扫描电子显微镜检查等。

机械完整性试验通过加速产品在典型应用条  
件下承受的瞬时或稳定的热和机械的应力,从而验  
证器件结构特征,如粘接和焊接等连接结构在经受  
机械和温度应力时的承受能力,主要有机械冲击试  
验、振动试验、热冲击试验、引线牢固性和可焊性试  
验等。试验后应进行外观检查和光学电学性能测  
试,对于密封结构器件应开展密封试验以验证结构  
密封性是否完整。

耐久性试验主要验证器件在典型工作环境中  
长期使用的稳定性,可根据需要进行高温加速寿命  
试验、高低温存储试验、温度循环试验、湿热试验和  
耐湿试验等。对于静电敏感的器件应开展静电放  
电试验,以验证器件的静电敏感等级。

## 5 结 论

文章重点介绍了对有源光电子器件可靠性有  
重要影响的封装技术,包括同轴和盒式封装结构、  
电学和光学零件的装联材料、光纤耦合系统,以及  
有源光电子器件的典型失效模式和可靠性验证  
方法。

随着物联网、大数据和云计算的飞速发展,以  
及军事、航空航天等领域的需求不断增长,信息交  
互所需要的数据通信量呈现爆炸式增长,光纤通讯  
技术成为能实现高速信息传输的首选技术,不断的  
升级换代也带动了光模块的不断发展,如光发射模  
块、光接收模块、光转发模块和光收发一体模块,且  
形成了较为规范的封装标准,如 SFF (Small Form  
Factor)、SFP (Small Form Factor Pluggable) 和  
GBIC (Gigabit Interface Converter) 等。有源光电子  
器件是支撑光纤通讯技术和光模块发展的基础器  
件,直接影响整个通讯系统的稳定。

未来,随着光纤通信的数据通信量越来越  
大,为满足高速传输、可靠运行和高集成度的需求,  
有源光电子器件在现有的封装工艺基础上,将逐渐从  
一维向二维、三维发展,对器件封装技术及可靠性  
的要求也会越来越高。 (下转第 240 页)