

文章编号:1004-4213(2011)12-1780-5

## 低热应力热稳定曲线型阵列波导光栅复用器

王文敏<sup>1,2</sup>, 刘文<sup>1</sup>, 宋琼辉<sup>2</sup>

(1 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

**摘 要:**相对方形阵列波导光栅波分复用器芯片而言,采用曲线切割的复用器芯片可以成倍地增加单个晶圆上的复用器产出率,但是曲线切割复用器的中心波长更容易受到热应力的影响,该热应力是由于封装盒与耦合到复用器芯片上的带状光纤之间的线膨胀系数差异所引起的.本文实验分析了封装热应力对复用器中心波长的影响,结果表明,封装热应力与复用器中心波长之间的变化成线性关系.即使采用比较软的硅橡胶将复用器上的带状光纤固定到封装盒上,对于热稳定封装的曲线复用器而言,当环境温度在 $-20\sim 65^{\circ}\text{C}$ 之间变化时,其中心波长也会有 46 pm 的变化.通过在热稳定复用器封装用的加热片上贴一片高硼硅玻璃,同时将带状光纤用硅橡胶固定到高硼硅玻璃上的方法,既保证了带状光纤相对封装盒固定,又减小了它们之间线膨胀系数不一致导致的热应力.实验结果表明,在 $-20$  到  $65^{\circ}\text{C}$  温度范围内,这种复用器模块的中心波长高低温变化典型值小于 5 pm,而且光纤所受的应力典型值小于 0.029 MPa.

**关键词:**集成光学;阵列波导光栅(AWG);热应力;带状光纤

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114012.1780

### 0 引言

自从 1988 年 Smit<sup>[1]</sup> 提出阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG) 概念以来,经过 20 多年的发展,基于 AWG 的波分复用器已经广泛应用于波分复用系统中.因为基于平面光波导 (Planar Lightwave Circuit, PLC) 工艺的 AWG 具有体积小、可批量生产、性能可靠等优点,在通道数大于 32 通道的波分复用/解复用器件市场上,已经逐步取代了原介质薄膜滤波片的市场地位.随着 AWG 的大量使用,对低成本 AWG 器件的要求也越来越高.为了适应低成本的需求,曲线切割的 AWG<sup>[2]</sup> 逐步替代了原方形的 AWG 芯片——从相同尺寸晶圆上切出的曲线 AWG 的数量要比方形 AWG 的数量高出一倍多.除了低成本要求外,对器件的可靠性要求也越来越高.在各种影响 AWG 器件的可靠性因素中,封装热应力是一个一直困扰设计与制造者的重要因素:通常情况下,为了保证封装盒内 AWG 芯片的可靠性,AWG 芯片都要通过不同的方式与封装盒固定到一起,而为了减少外界的力量通过光纤传到封装盒内的 AWG 芯片上,要求

将光纤固定到封装盒上.一般使用的封装盒大多为塑料或金属,它们的线膨胀系数远大于光纤的线膨胀系数,这样当环境温度变化时,盒内的光纤就会受到热应力,这种应力会通过光纤传递到光纤阵列与 AWG 芯片的耦合端面上以及 AWG 芯片上,从而对 AWG 的指标与性能产生影响. AWG 输入端的光纤为一根光纤,可以通过在封装盒内将其盘绕后再固定到封装盒上的方法消除这种热应力.但是 AWG 输出端的光纤为带状光纤,难以在封装盒内进行盘绕.这样,封装盒上固定带状光纤的固定点与 AWG 芯片之间的带状光纤由于与封装盒之间有较大的线膨胀系数的差异,当环境温度发生变化时,这段带状光纤就会受到应力.对于曲线型 AWG 而言,这种热应力至少有两种危害:1) 施加在带状光纤上的应力可以直接传递到光纤阵列与 AWG 之间的耦合端面上,造成耦合端面上的紫外胶受到应力,这对 AWG 耦合端面胶的长期可靠性是有危害的;2) 带状光纤上受到的应力传递到 AWG 芯片上,而曲线 AWG 容易受到径向应力而导致其传输光谱的中心波长发生漂移<sup>[3]</sup>.最简单的解决方法是将封装盒换成与光纤线膨胀系数相当的材料,但是这会明显增

基金项目:国家科技支撑计划(No. 2009BAH49B02)资助

第一作者:王文敏(1975—),男,高工,博士研究生,主要研究方向为阵列波导光栅波分复用器设计与制造. Email: wenmin.wang@accelink.com

导师(责任作者):刘文(1960—),男,教授,主要研究方向为集成光电子器件. Email: liuwen@wri.com.cn

收稿日期:2011-06-15;修回日期:2011-08-17

加器件的整体成本而没有实用价值. Zhang<sup>[4]</sup>等人提出的一种在封装盒与带状光纤保护胶头之间加入弹性垫圈的方法可以明显降低这种热应力,但是代价是长期使得光纤处于一种张应力状态,这种应力仍然有引起 AWG 器件中心波长漂移的可能性. 而美国专利 US20080080806 则提出在曲线型 AWG 芯片输入/输出端面之间的部分贴上一个与 AWG 芯片线膨胀系数相同的横梁用来抑制由于带状光纤上的热应力导致的 AWG 中心波长的漂移,但是该方法不能减少热应力导致的耦合端面上的应力. 目前国内虽然有很多关于 AWG 芯片设计或工艺的文章<sup>[5-10]</sup>,但是很少有对曲线切割 AWG 封装应力研究的文章.

本文在分析了曲线切割 AWG 中心波长随应力变化关系的基础上,提出了一种新型封装方案,该方案具有成本低、能同时降低热应力以及该热应力对 AWG 中心波长的影响.

## 1 热稳定曲线型 AWG 带状光纤应力及其对 AWG 波长的影响分析

### 1.1 热稳定 AWG 封装的带状光纤热应力

虽然无需加热片的无热 AWG 技术近 10 年来得到了飞速发展,但是热稳定型的 AWG 因其制造工艺简单、性能可靠、成本相对较低的特点一直占有主要的市场份额,特别是在国内,几乎所有系统安装的都是热稳定 AWG. 不论热稳定 AWG 封装类型有多少,其基本原理都是一样的:通过加热片将 AWG 芯片加热到一个高于工作时最高的环境温度下使得 AWG 中心波长为需要的波长(如 ITU-T 波长),同时通过热敏电阻与温度控制电路保证该温度的稳定,也就是说必须将 AWG 芯片贴到加热片上. 另外,为了保证 AWG 芯片不会受外部力量损坏,一般要求将封装盒内的带状光纤固定到封装盒上. 假设整个封装在室温(25 °C)时完成,认为此时带状光纤所受应力为 0,同时假设带状光纤与封装盒之间的固定是刚性的. 那么带状光纤所受到的热应力为<sup>[4]</sup>

$$\sigma_t = (\alpha_c - \alpha_r) \times \Delta T \times E_l \quad (1)$$

式中  $\alpha_c = 23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 是封装盒的线膨胀系数,  $\Delta T$  是环境温度的变化,  $E_l$  是带状光纤的弹性模量,  $\alpha_r$  是带状光纤的线膨胀系数. 其中  $\alpha_c$  与  $E_l$  可用式(2)~(3)进行推算<sup>[4]</sup>

$$\alpha_r = \frac{E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} \quad (2)$$

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

式中体积分率  $V_f$ 、 $V_m$  分别为 15% 与 85%, 光纤的

弹性模量  $E_f$  与带状纤包覆层的弹性模量  $E_m$  分别为 73 GPa 与 2.9 GPa, 光纤的线膨胀系数  $\alpha_f$  与包覆层的线膨胀系数  $\alpha_m$  分别为  $0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  以及  $70 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . 对于热稳定封装 AWG, 其加热片的温度一般设定在 65~85 °C 之间的一个温度点上, 一般要求能工作在 -15~65 °C 之间的环境温度下. 根据测试, 在这些条件下盒内带状光纤以及对应的封装盒温度在 -10~70 °C 之间. 根据式(1)~(3), 可以计算得到因环境温度的变化, 带状光纤的最大应力可达 5.87 MPa(对于一个 40 通道的 AWG 而言, 约等于在带状光纤上垂直悬挂一个 2.26 Kg 的重物), 这些应力会通过光纤施加到耦合端面上, 从而对器件的稳定性有不利的影响.

所以不能将带状光纤刚性地(比如用较硬的胶固定等)固定到封装盒体上. 另外, 根据 Zhang 等人<sup>[11]</sup>另外一个研究, 如果使用较硬的胶将 AWG 芯片贴到加热片上会因为加热片与 AWG 芯片之间的线膨胀系数差造成对 AWG 芯片较大的应力.

根据这些原因, 为了减小 AWG 芯片所受的热应力, 需要采用较软的胶将 AWG 芯片固定到加热片上, 同时需要采用较软的胶将带状光纤固定到封装盒上. 本文在研究热稳定曲线型 AWG 封装热应力时, 采用如下方案:

1) 使用室温硫化硅橡胶(郑州华宇 HY591)将芯片的四周固定到加热片上, 芯片与加热片接触的表面之间填充导热硅脂;

2) AWG 输入端光纤在封装盒内盘绕半圈后再固定到封装盒上.

这样利用硅橡胶比较软的特性, 可以减小因 AWG 芯片(硅片)与加热片(氧化铝陶瓷)之间的线膨胀系数差异导致的热应力. 但是这种方案有一个缺点: 使用硅橡胶将曲线型的 AWG 芯片贴到陶瓷加热片上, 则当带状纤受到应力时, 这种应力传到 AWG 芯片上后比较容易导致 AWG 芯片变形, 从而使得 AWG 中心波长发生漂移, 造成器件指标变差.

### 1.2 曲线切割 AWG 带状纤应力与 AWG 中心波长漂移关系实验分析

为了研究封装的 AWG 受带状光纤应力影响导致的波长漂移特性与应力特性, 设计了如图 1 所示的测试装置. 如图 1, AWG 芯片固定在加热片上, AWG 上的带状光纤竖直自由下垂, 在带状光纤上加上负荷用以调节带状光纤对 AWG 芯片的拉力. 通过温度控制电路以及加热片对 AWG 芯片进行加热, 将 AWG 芯片温度控制在  $80 \pm 0.1 ^\circ\text{C}$ , 以保证 AWG 的中心波长不会随外界环境温度(约 25 °C)

的变化而变化( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的温度变化引起的 AWG 中心波长变化为 $\pm 1.18\text{ pm}$ ). 实验测得的带状光纤负荷与 AWG 中心波长之间的关系如图 2.

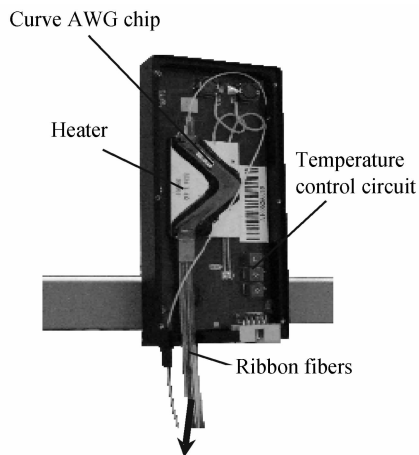


图 1 测试曲线型热稳定 AWG 封装波长漂移与热应力变化之间关系的装置

Fig. 1 Setup for investigation of the relationship between the stress and the center wavelength of curve-shape AWG

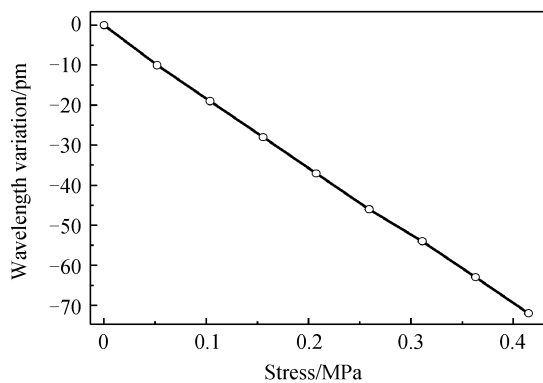


图 2 曲线型热稳定 AWG 封装波长漂移与应力变化之间关系的测试结果

Fig. 2 Measured relationship between the stress applied on the bonding surface and the variation of AWG center wavelength

从图 2 可以看出,随着外加应力(这里是张应力)的增加,AWG 中心波长往短波方向移动.其原因是,当在带状光纤上施加张应力时,曲线切割的 AWG 芯片的阵列波导部分会向拉力方向张开.在阵列波导区域会出现往芯片弓背方向(即阵列波导变长的方向)压缩,而往弓内方向(即阵列波导变短的方向)拉伸,导致相邻阵列波导长度差随着张应力的增加而减小.这样,AWG 的中心波长会减小.反之,如果 AWG 芯片受到压应力,那么 AWG 的中心波长会增加.根据图 2 可以拟合出波长变化  $\Delta\lambda$  与外加应力  $\sigma$  之间的关系为

$$\Delta\lambda = (-171.96 \text{ pm/MPa})\sigma \quad (4)$$

从式(4)可以看出,非常小的应力就可以导致 AWG 中心波长发生较大的漂移.另外,根据式(4),

也可以利用易于测得的 AWG 中心波长变化来反推其带状光纤所受的热应力.本文使用式(4)用来分析曲线切割 AWG 封装的热应力.

### 1.3 常规封装热稳定曲线切割 AWG 热应力效应

由分析可知,对于实际的封装,最好在封装时使用较软的胶将带状光纤固定到封装盒上,从而降低带状光纤所受的应力.为了研究这种实际条件下的应力以及应力导致的波长漂移,在常规封装条件下(同方形 AWG 的封装),采用室温硫化硅橡胶(HY591)将带状光纤固定到封装盒上,以便尽可能减小热应力.

根据常规封装制作了一个热稳定曲线切割 AWG 模块并测试了其热应力.实验中,将加热片温度恒定控制在  $80 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ,测试了环境温度在  $-20 \sim 65^\circ\text{C}$  之间时的器件中心波长的变化.样品 AWG 是一个曲线切割的 40 通道 100 GHz 间隔的器件,试验中监控了其第 1、20、40 三个输出通道光谱的中心波长.其测试结果如图 3,其中方形、圆形、三角形的数据是第 1、20、40 三个输出通道的中心波长相对  $25^\circ\text{C}$  时的中心波长值的变化.从图 3 中可以看出:封装在环境温度  $-20^\circ\text{C}$  与  $65^\circ\text{C}$  之间 AWG 中心波长差异达 46 pm(相对  $25^\circ\text{C}$ ,波长变化为 18 pm 到  $-27\text{ pm}$  之间).根据式(4)可以计算最大应力为 0.16 MPa,相对 1.1 节计算的应力小了一个量级,这是采用较软的硅橡胶固定带状光纤的缘故.但是,  $-27\text{ pm}$  的波长变化对于 100 GHz AWG 而言已经比较大——AWG 芯片各个输出通道的波长间隔并不能准确地为 100 GHz,那么当其中一个输出通道的中心波长调到 ITU-T 波长时,其它通道会与 ITU-T 波长有一定的偏移.如果封装导致的波长温度相关漂移很大,则要求芯片各个通道的一致性很高,这降低了 AWG 芯片的成品率,提高了成本.

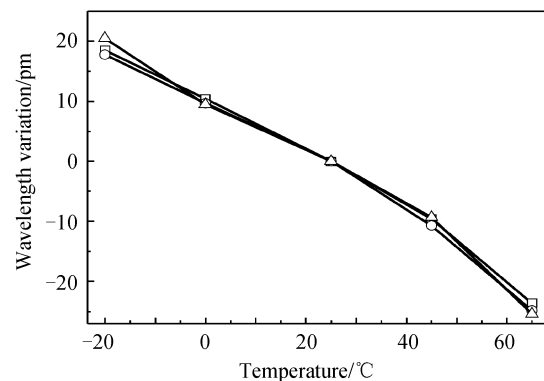


图 3 带状光纤用硅橡胶固定到封装盒上时曲线切割 AWG 中心波长随环境温度变化而变化的测试结果

Fig. 3 Measured AWG wavelength variations when the ribbon fibers are adhered to the packaging box with soft silicon rubber

对于 50 GHz 间隔的 AWG 而言,  $-27 \text{ pm}$  的波长变化是不能使用的. 故需要进一步降低热应力, 从而降低波长漂移.

由分析与实验可知, 采用硅橡胶将带状光纤固定到封装盒上可以降低带状光纤的应力, 但是这种方法无法解决 AWG 的中心波长随环境温度变化的问题.

## 2 超低应力热稳定曲线 AWG 封装

由分析可知: 1) 封装盒与带状光纤之间的线膨胀系数差是引起 AWG 封装中带状光纤产生热应力的根本原因; 2) 使用硅橡胶固定带状光纤可以降低热应力. 根据这个原理, 设计了一个超低应力有热 AWG 封装结构, 如图 4: 在加热片底部贴一块低线膨胀系数的高硼硅玻璃条, 用硅橡胶将带状光纤固定到玻璃条上. 这样由于加热片是固定在封装盒上的, 则带状光纤就相对封装盒固定. 由于高硼硅玻璃条线膨胀系数较低 ( $3.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), 可以降低其与带状光纤之间的线膨胀系数差引起 AWG 封装中的热应力.

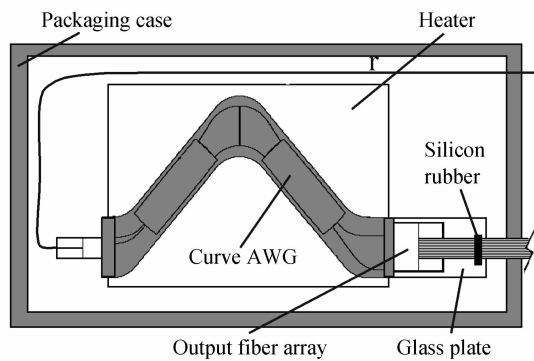


图 4 低热应力的热稳定曲线切割 AWG 封装结构  
Fig. 4 Scheme of the low thermal stress thermally stabled curve-shape AWG packaging

根据这个原理, 制作了一个 100 GHz 间隔 40 通道的热稳定曲线 AWG 模块, 并测试了其中心波长与外界环境温度的变化关系. AWG 模块设定温度为  $80 \pm 0.1 ^\circ\text{C}$ , 外部环境温度变化范围为  $-20 \sim 65 ^\circ\text{C}$ . 测试结果如图 5, 其中方形、圆形、三角形的数据是第 1、20、40 三个输出通道的中心波长相对  $25 ^\circ\text{C}$  时的中心波长值的变化. 从图 5 可以看出, 在  $-20 \sim 65 ^\circ\text{C}$  的环境温度范围内, AWG 中心波长相对环境温度为  $25 ^\circ\text{C}$  时的中心波长变化小于  $4.2 \text{ pm}$ . 而且从图 6 可以看出, 波长随环境温度的变化曲线已经不是图 3 所示的温度越高波长越短的规律, 这表明这残余的波长变化已经不是带状光纤的热应力导致的, 其产生原因可能为: 系统测试误差 (采用的光谱仪波长短期稳定性在  $5 \text{ pm}$  左右), 或

者是加热片上的温度并不均匀 (存在一定的梯度), 且这种不均匀性随环境温度变化而变化. 根据式 (4), 可以看出即使这个残余的波长变化是带状光纤的热应力引起的, 其应力也非常小, 小于  $0.029 \text{ MPa}$ , 相当于图 1 所示的实验中施加的负载为  $9 \text{ g}$ , 可以忽略不计. 为了检验批量制作时的重复性, 按照图 4 的原理制作了 25 个 AWG 模块, 分别测试了  $-20 \sim 65 ^\circ\text{C}$  的环境温度范围内 AWG 中心波长的变化, 其统计结果如图 6. 图 6 中的 AWG 中心波长差是 AWG 模块在  $65 ^\circ\text{C}$  与  $-20 ^\circ\text{C}$  时测试的波长的差值. 从图 6 中可以看出典型的高低温度中心波长差为  $5 \text{ pm}$ . 96% 的样品高低温度波长差的绝对值小于  $15 \text{ pm}$ , 所有的样品高低温度波长差的绝对值小于  $20 \text{ pm}$ . 且所有样品的高低温度波长差的绝对值符合产品化的要求.

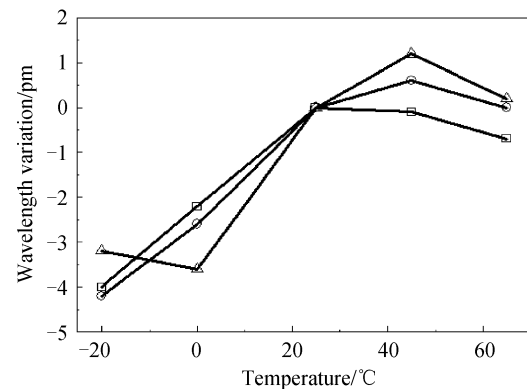


图 5 低热应力的热稳定曲线切割 AWG 模块中心波长随环境温度变化的测试结果

Fig. 5 Measured wavelength variations of low thermal stress thermally stabled curve-shape AWG module

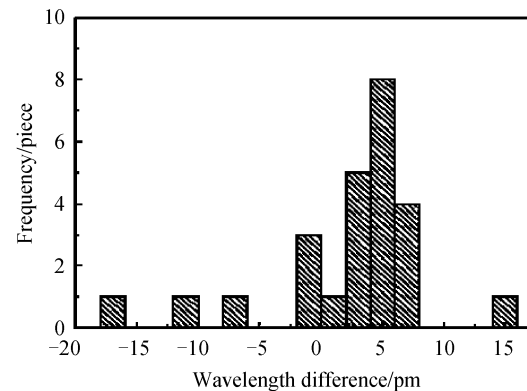


图 6 25 个低应力有热稳定封装的 AWG 模块的中心波长高低温度差值的统计分布

Fig. 6 Statistical distribution chart of the center wavelength differences between high and low ambient temperatures for 25 pieces of low stress thermally stabled AWG modules

## 3 结论

本文分析了封装应力对曲线切割 AWG 的中心波长的影响, 并实验研究了带状纤应力与 AWG 中

心波长之间的关系. 实验结果表明, 封装热应力会导致曲线切割 AWG 中心波长随环境温度的变化而变化, 即使使用硅橡胶将带状光纤固定到封装盒上, 也会导致 AWG 的中心波长在环境温度为  $-20 \sim 65$  °C 范围内有 46 pm 的变化. 为了消除这种热应力, 设计了一种低热应力热稳定曲线切割 AWG 的封装方案: 在加热片底部贴一块低线膨胀系数的高硼硅玻璃条, 用硅橡胶将带状光纤固定到玻璃条上. 实验结果表明, 在  $-20 \sim 65$  °C 的环境温度下, 这种封装的 AWG 中心波长的高 ( $65$  °C) 低 ( $-20$  °C) 温差值的典型值为 5 pm, 同时带状光纤所受的典型应力小于 0.029 MPa.

这种低应力封装技术也可以借鉴到无热 AWG 封装或其它光电子器件的封装.

#### 参考文献

- [1] SMIT M K, DAM C V. PHASAR-based WDM-devices: principles, design and applications[J]. *IEEE J Sel Top Quant Electron*, 1996, **2**(2): 236-250.
- [2] ZHANG Zhi-yi, XIAO Gao-zhi, LIU Jia-ren, *et al.* A cost-effective solution for packaging the arrayed waveguide grating (AWG) photonic components[J]. *IEEE Trans on Components and Packaging Technologies*, 2005, **28**(3): 564-570.
- [3] SOOLE J B D, SCHLAX M, NARAYANAN C, *et al.* Athermalisation of silica arrayed waveguide grating multiplexers[J]. *Electron Lett*, 2003, **39**(16): 1182 - 1184.
- [4] ZHANG Zhi-yi, XIAO Gao-zhi, LIU Jia-ren. A stress-free packaging solution for planar waveguide-based photonic components[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(5): 1082-1084.
- [5] LI De-lu, MA Chun-sheng, WANG Yu-hai, *et al.* Optimum design of polymeric arrayed waveguide grating with Fermi-like cross-section[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 541-546.
- [6] LI De-lu, MA Chun-sheng, QIN Zheng-kun, *et al.* Parameter optimization of athermal arrayed waveguide grating using silica/polymer hybrid materials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 369-472.
- [7] XU Ying-chao, ZHANG Guo-wei, E Shun-lin, *et al.* A new design to reduce insertion loss and crosstalk of AWG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 224-228.
- [8] WANG Wen-min, MA Wei-dong, CHEN Guang, *et al.* Optimum design of AWG router with flattened passband and low loss[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1049-1052.
- [9] CHU Yuan-liang, ZHANG Han-yi. Waveguide structure optimization of arrayed waveguide gratings concatenation in cascaded optical add/drop multiplexers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(4): 196-198.
- [10] LANG Ting-ting, LIN Xu-feng, HE Jian-jun. Fabrication of silica-on-silicon arrayed waveguide gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 213003.
- [11] ZHANG Zhi-yi, XIAO Gao-zhi, LIU Jia-ren, *et al.* Attaching planar waveguide to aluminum using low-stress thermal conductive adhesives [J]. *Fiber and integrated optics*, 2004, **23**(4): 311-326.

## Stress-free Thermally Stabilized Curve-shape Arrayed Waveguide Grating Packaging

WANG Wen-min<sup>1,2</sup>, LIU Wen<sup>1</sup>, SONG Qiong-hui<sup>2</sup>

(1 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 Accelink Technologies Co., Ltd., No. 88, Youkeyuan Road, Hongshan District, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The yield of curve-shape arrayed waveguide grating (AWG) chips is twice of the square-shape ones. However, the center wavelength of curve-shape AWG is easily influenced by the packaging stress, which is introduced by the linear expansion coefficient difference between the packaging box and the ribbon fibers coupled to the AWG chip. The experimental results showed the AWG center wavelength varied with the thermal stress linearly. The variation of the center wavelength for a thermally stabled AWG module was as large as 46 pm, when the ambient temperature varied from  $-20$  °C to  $65$  °C, even the ribbon fibers were bonded to the packaging box with soft silicon rubber. In this paper, a new low stress thermal stabled AWG packaging was introduced. In this package, a borosilicate glass plate was bonded to the ceramic heater, and the ribbon fibers were bonded to it with silicon rubber. For the linear expansion coefficient difference between the borosilicate glass plate and ribbon fiber is very small, the thermal stress of ribbon fiber or AWG chip is very small. Experimental results showed the typical center wavelength variation for thermally stabled AWG modules manufactured with this technique was smaller than 5 pm, and the typical thermal stress was smaller than 0.029 MPa, when the ambient temperature varied from  $-20$  °C to  $65$  °C.

**Key words:** Integrated optics; Arrayed waveguide grating (AWG); Thermal stress; Ribbon fiber