

文章编号: 0253-2239(2007)10-1725-5

# 阵列波导光栅中心波长温度稳定性的研究

黄华茂<sup>1,2</sup> 刘 文<sup>1,3</sup> 黄德修<sup>1,2</sup>

1 武汉光电国家实验室, 武汉 430074  
2 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074  
3 武汉光迅科技有限责任公司, 武汉 430074

**摘要:** 阵列波导光栅中心波长的温度不稳定性成为限制其应用的主要原因。为了设计温度不敏感阵列波导光栅, 结合弹性多层板热应力理论和应力集中效应给出掩埋波导芯层应力的解析解, 利用等效折射率法计算阵列波导的有效折射率及其温度系数, 考虑波导材料折射率和波导长度随温度的变化得到了硅基二氧化硅阵列波导光栅中心波长的温度系数。并研究了贴有应力板的阵列波导光栅中心波长的温度特性, 结果表明在芯片底部贴有 0.37 mm 厚的铝板时, TE 模和 TM 模中心波长的温度系数分别是 5.9 pm/°C 和 8.0 pm/°C, 下降到传统阵列波导光栅中心波长温度系数的一半。

**关键词:** 导波光学; 阵列波导光栅; 温度稳定性; 应力补偿板

中图分类号: TN814<sup>+</sup>.6 文献标识码: A

## Analytical Solutions for the Temperature Stability of Central Wavelength in Arrayed Waveguide Gratings

Huang Huamao<sup>1,2</sup> Liu Wen<sup>1,3</sup> Huang Dexiu<sup>1,2</sup>

1 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074  
2 School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074  
3 Wuhan Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430074

**Abstract:** The thermal instability is a big problem in arrayed-waveguide gratings (AWG). A general method to study the central wavelength temperature sensitivity is developed with theoretically considering thermo-optic effect, stress-optic effect, thermal expansion and stress-strain relation. By combination of elastic multilayer theory and stress concentration effect, analytical stress solutions in the core layer are obtained. Based on the results of asymmetrical anisotropy planar waveguides, the effective index and its temperature coefficient in buried channel waveguides are calculated by using the effective index method. And then, the solutions are used to estimate temperature sensitivity of AWG central wavelength. The temperature sensitivity controlled by the thermal stresses induced by attaching an aluminum plate is also discussed. The results show that the temperature sensitivity could be optimized after attaching an aluminum plate on the bottom of arrayed waveguides. For the TE mode, the temperature coefficient of central wavelength is reduced to 5.9 pm/°C, and for the TM mode, that is reduced to 8.0 pm/°C.

**Key words:** guided wave optics; arrayed-waveguide grating; temperature stability; thermal stress compensator

## 1 引 言

阵列波导光栅 (Arrayed-waveguide grating, AWG) 已成为密集波分复用 (DWDM) 系统的关键器件<sup>[1]</sup>。传统的硅基二氧化硅阵列波导光栅的材料

折射率和长度都随温度发生变化, 导致中心波长也随温度发生漂移。现在绝大部分阵列波导光栅产品在使用中都需要外加温度补偿器。随着波分复用无源光网络的发展<sup>[2]</sup>, 低成本而且对温度不敏感的阵列波导光栅产品越来越成为光通信器件行业的一

作者简介: 黄华茂(1982—), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 主要从事温度不敏感阵列波导光栅方面的研究。

E-mail: huamao.huang@yahoo.com.cn

导师简介: 黄德修(1937—), 男, 湖南宁乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信与传感方面的研究与教学工作。

E-mail: wnlo2@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-12-22; 收到修改稿日期: 2007-03-19

个研究热点。目前已经提出多种温度不敏感阵列波导光栅的方案<sup>[3~6]</sup>,但都没有对阵列波导光栅本身温度特性作完整的理论研究。为了对阵列波导光栅中心波长温度稳定性的影响因素有更清楚的认识,使器件的初步设计更为方便,本文综合考虑热光效应、光弹效应、热膨胀效应和应力-应变关系,计算了硅基二氧化硅阵列波导光栅中心波长的温度系数,并研究了贴有应力板的阵列波导光栅中心波长的温度特性。

## 2 理论分析

阵列波导光栅的中心波长  $\lambda$  满足方程式

$$\lambda = \frac{n_{\text{eff}} \Delta L}{m}, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为阵列波导的有效折射率,  $\Delta L$  为相邻波导

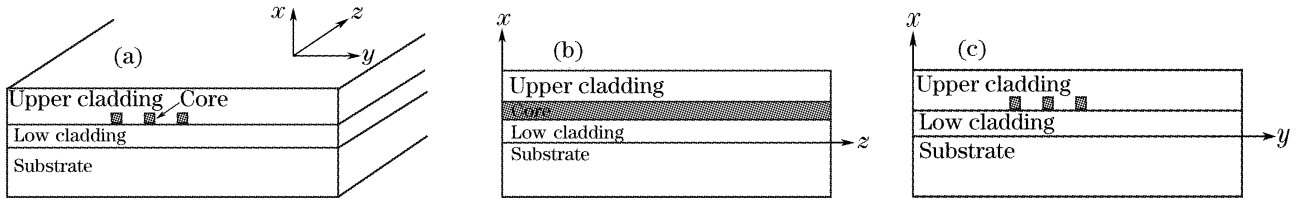


图 1 阵列波导结构示意图。(a) 三维结构, (b)  $xz$  方向的横界面, (c)  $xy$  方向的横界面

Fig. 1 Schematic of arrayed waveguide structure. (a) three-dimensional structure, (b) cross-section in  $xz$  plane, (c) cross-section in  $x-y$  plane

考虑到热光效应和光弹效应, 折射率  $n$  可以表示为<sup>[7]</sup>

$$n = \begin{bmatrix} n_{x0} \\ n_{y0} \\ n_{z0} \end{bmatrix} + B \Delta T \begin{bmatrix} n_{x0} \\ n_{y0} \\ n_{z0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_2 \\ c_2 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_2 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $n_{i0}$  ( $i = x, y, z$ ) 为常温下的折射率,  $B$  为热光系数,  $\Delta T$  为工作温度与常温的温差,  $c_1, c_2$  为光弹系数,  $\sigma_i$  ( $i = x, y, z$ ) 为应力分量。考虑到热膨胀效应和应力-应变关系(广义胡克定律), 应变  $\epsilon$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{x0} \\ \epsilon_{y0} \\ \epsilon_{z0} \end{bmatrix} + \alpha \Delta T + \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_2 \\ s_2 & s_1 & s_2 \\ s_2 & s_2 & s_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\epsilon_{i0}$  ( $i = x, y, z$ ) 为常温下的初始应变,  $\alpha$  为线热膨胀系数,  $s_1, s_2$  为应力-应变系数。对各向同性材料,  $s_1 = 1/E, s_2 = -\nu/E, E, \nu$  分别是材料的杨氏模量和泊松比。

### 2.1 芯层应力解析解

热应力是影响阵列波导光栅中心波长的重要因素, 已有的研究却多是采用有限元法(FEM)的数值模拟<sup>[9~13]</sup>。如图 1 所示, 阵列波导  $xz$  方向的横截面可以看作是 4 层平板系统, 而在阵列波导  $xy$  方

的长度差,  $m$  为衍射级次。将(1)式对温度  $T$  微分得到中心波长的温度系数

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{\lambda}{\Delta L} \frac{d\Delta L}{dT}, \quad (2)$$

阵列波导材料折射率和波导长度都随温度发生变化, 导致中心波长也随温度发生漂移。由于  $\Delta L$  是相邻波导在光传播方向的长度差, 所以波导长度随温度的变化只与传播方向芯层的应变  $\epsilon_z^c$  有关, 则有

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \left( \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{d\epsilon_z^c}{dT} \right). \quad (3)$$

阵列波导光栅的结构如图 1 所示。为了得到解析解, 假设周期排列的每一根波导受力相同。下面综合考虑热光效应、光弹效应、热膨胀效应和应力-应变关系, 对硅基二氧化硅阵列波导光栅中心波长温度稳定性进行系统的理论分析。

向的横截面上, 芯层的尺寸很小, 可以忽略, 所以近似为 3 层平板系统。根据弹性多层板热应力理论<sup>[14]</sup>可以求得阵列波导芯层在  $z$  方向的应变  $\epsilon_z^c$  和上包层在  $y, z$  方向的应变  $\epsilon_y^u, \epsilon_z^u$ 。结合掩埋波导芯层的应力集中效应<sup>[15]</sup>, 并取应力集中系数  $k_{xx} = k_{yy} = 3, k_{xy} = k_{yx} = 1$ , 可以给出芯层应力解析解

$$\begin{cases} \sigma_x^c = \Gamma_1 \left( \Phi - \frac{1}{E'_u} \sigma \right) + \Gamma_2 \left( \Phi + \frac{3}{E'_u} \sigma \right), \\ \sigma_y^c = \Gamma_1 \left( \Phi + \frac{3}{E'_u} \sigma \right) + \Gamma_2 \left( \Phi - \frac{1}{E'_u} \sigma \right), \\ \sigma_z^c = E_c [(\epsilon_z^c - \epsilon_{z0}^c) - \alpha_c \Delta T] + \nu_c (\sigma_x^c + \sigma_y^c), \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\Gamma_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1^2 - \gamma_2^2}, \quad \Gamma_2 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1^2 - \gamma_2^2},$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{E'_c} + \frac{2}{E'_u}, \quad \gamma_2 = \frac{\nu'_c}{E'_c} + \frac{1 - \nu'_u}{E'_u},$$

$$\Phi = (\alpha'_u - \alpha'_c) \Delta T + \nu_c (\epsilon_z^c - \epsilon_{z0}^c) - \nu_u (\epsilon_z^u - \epsilon_{z0}^u),$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad \nu' = \frac{\nu}{1 - \nu},$$

$$\alpha' = (1 + \nu)\alpha, \quad \sigma = \frac{E_u}{1 - \nu_u} (\epsilon_y^u - \alpha_u \Delta T)$$

标注 c、u 分别表示芯层和上包层。

对于传统阵列波导光栅，波导的厚度远小于衬底的厚度，衬底的结构变化起决定性的作用，所以可以采用广义平面近似，即取  $\epsilon_z^c = \epsilon_z^u = \epsilon_y^u = \alpha_s \Delta T$ ，则(6)式退化为文献[15]的(11)式~(13)式。但是对于贴有应力板的无热阵列波导光栅，应力补偿板的厚度和衬底的厚度相当，芯片的翘曲很大，采用弹性多层板热应力理论进行分析是必要的。

### 2.2 有效折射率及其温度系数

文献[7]把上包层、下包层的参量近似相等，得到了各向异性对称平板波导的解。实际上，由于制造工艺的要求，阵列波导上包层和下包层掺杂不同导致了不同的折射率。如图 2 所示，掩埋型阵列波导的等效平板波导模型是非对称的。因此，本文计算了各向异性非对称平板波导的结果。结合边界条件解模式方程，应用齐次线性方程组有非零解则它的系数行列式必为零的这一性质，求得各向异性非对称平板波导有效折射率满足的方程

TE 模：

$$kt = l\pi + \arctan\left(\frac{p}{k}\right) + \arctan\left(\frac{q}{k}\right), \quad (7a)$$

TM 模：

$$kt = l\pi + \arctan\left(\frac{n_z^2}{n_1^2} \frac{p}{k}\right) + \arctan\left(\frac{n_z^2}{n_2^2} \frac{q}{k}\right), \quad (7b)$$

式中

$$k = \begin{cases} k_0 \sqrt{n_y^2 - n_e^2}, & \text{TE 模} \\ k_0 \sqrt{n_x^2 - n_z^2 n_h^2 / n_x^2}, & \text{TM 模} \end{cases}$$

$$p = \begin{cases} k_0 \sqrt{n_e^2 - n_1^2}, & \text{TE 模} \\ k_0 \sqrt{n_z^2 n_h^2 / n_x^2 - n_1^2}, & \text{TM 模} \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} k_0 \sqrt{n_e^2 - n_2^2}, & \text{TE 模} \\ k_0 \sqrt{n_z^2 n_h^2 / n_x^2 - n_2^2}, & \text{TM 模} \end{cases}$$

$n_e$ 、 $n_h$  分别为 TE 模和 TM 模的有效折射率，

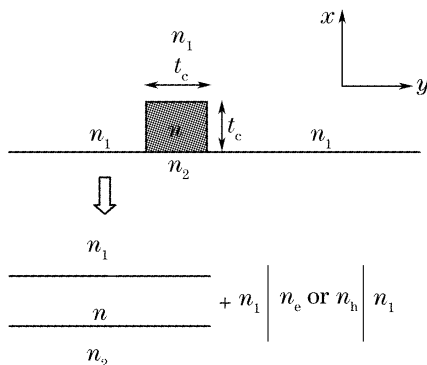


图 2 掩埋型波导有效折射率示意图

Fig. 2 Effective index model of buried channel waveguide

$n = [n_x, n_y, n_z]$  是芯层的折射率， $n_1$ 、 $n_2$  分别为上包层和下包层的折射率， $t$  为芯层的厚度， $k_0 = 2\pi/\lambda$ ， $l$  为模序数。对于阵列波导光栅的掩埋型波导，由(4)式、(6)式求得芯层的折射率  $n = [n_x^c, n_y^c, n_z^c]$ 。

结合(7)式利用等效折射率法可求得 TE 模和 TM 模的有效折射率。将(7)式对温度  $T$  微分，可以得到各向异性非对称平板波导有效折射率的温度系数与芯层折射率的温度系数的关系表达式：

TE 模：

$$\eta_1 n_e \frac{dn_e}{dT} = \eta_2 n_y \frac{dn_y}{dT}, \quad (8a)$$

TM 模：

$$\xi_1 n_h \frac{dn_h}{dT} = \xi_2 n_x \frac{dn_x}{dT} + \xi_3 n_z \frac{dn_z}{dT}, \quad (8b)$$

式中

$$\eta_1 = \eta_2 + \frac{k_0^2}{p} \frac{k}{k^2 + p^2} + \frac{k_0^2}{q} \frac{k}{k^2 + q^2},$$

$$\eta_2 = \frac{k_0^2}{k} \left( t + \frac{p}{k^2 + p^2} + \frac{q}{k^2 + q^2} \right),$$

$$\zeta_1 = t + \zeta_2 \frac{p}{k} + \zeta_3 \frac{q}{k},$$

$$\zeta_2 = \frac{(n_1^2 k)^2}{(n_1^2 k)^2 + (n_z^2 p)^2} \frac{n_z^2}{n_1^2} \frac{1}{k},$$

$$\zeta_3 = \frac{(n_2^2 k)^2}{(n_2^2 k)^2 + (n_z^2 q)^2} \frac{n_z^2}{n_2^2} \frac{1}{k},$$

$$\xi_1 = k_0^2 \frac{n_z^2}{n_x^2} \left( \frac{\zeta_1}{k} + \frac{\zeta_2}{p} + \frac{\zeta_3}{q} \right),$$

$$\xi_2 = k_0^2 \frac{n_z^2 n_h^2}{n_x^4} \left( \frac{\zeta_1}{k} + \frac{\zeta_2}{p} + \frac{\zeta_3}{q} \right),$$

$$\xi_3 = k_0^2 \left[ \left( 1 - \frac{n_h^2}{n_x^2} \right) \frac{\zeta_1}{k} - \frac{n_h^2}{n_x^2} \frac{\zeta_2}{p} - \frac{n_h^2}{n_x^2} \frac{\zeta_3}{q} \right] - 2 \left( \frac{1}{n_1^2} \frac{p}{k} + \frac{1}{n_2^2} \frac{q}{k} \right).$$

对于阵列波导光栅的掩埋型波导，将(4)式、(6)式对温度  $T$  微分并联合求解，可得芯层折射率的温度系数  $dn^c/dT$ ，结合(8)式利用等效折射率法<sup>[16]</sup>可求得 TE 模和 TM 模的有效折射率的温度系数。

### 2.3 中心波长的温度系数

考虑波导材料折射率和波导长度随温度变化，把求得的芯层应力分量代入(3)式的第 2 项，把求得的掩埋型阵列波导有效折射率及其温度系数代入(3)式的第 1 项，可以求得阵列波导光栅中心波长的温度系数  $d\lambda/dT$ 。

根据表 1 的数据<sup>[15,16]</sup>，再取  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ，并假设无初始曲率，则由(3)式可得 TE 模中心波长的温度

系数是 14.1 pm/°C, TM 模中心波长的温度系数是 14.4 pm/°C, 这与实验得到的数据 13 pm/°C<sup>[17]</sup> 吻合。

表 1 计算中采用的参量

Table 1 Material properties used in calculation

	$E$ /GPa	$\alpha$ /( $10^{-6}$ /K)	$\nu$	$t$ / $\mu\text{m}$	$n_0$	$B$ /( $10^{-5}$ /K)	$c_1$ /( $10^{-12}$ /Pa)	$c_2$ /( $10^{-12}$ /Pa)
Substrate	160	2.5	0.32	500				
Low cladding	60	0.5	0.165	20	1.45	1.16		
Core	70	1.2	0.165	6	1.46	1.16	0.65	4.5
Upper cladding	60	0.5	0.165	30	1.45	1.16		

### 3 贴有应力板的阵列波导光栅温度特性研究

如图 3 所示,在阵列波导光栅芯片阵列波导区的底部或顶部粘贴应力板。当温度发生变化时,由于应力板和衬底材料之间热膨胀不同引起的热应力

影响了阵列波导光栅的温度特性。不同材料(杨氏模量  $E$ 、热膨胀系数  $\alpha$ 、泊松比  $\nu$  不同)或不同厚度的应力板引起的热应力是不同的,本文只讨论贴有铝(Al)板的阵列波导光栅的温度特性。

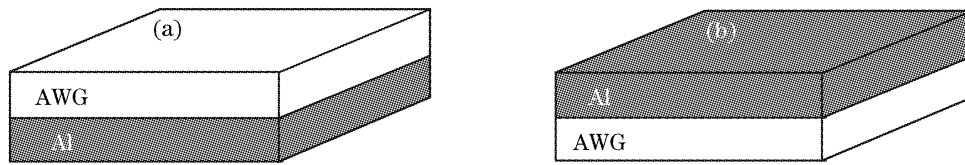


图 3 贴有 Al 板的阵列波导光栅芯片。(a) Al 板在芯片底部, (b) Al 板在芯片顶部

Fig. 3 Arrayed waveguide grating chip attached by an Al plate. (a) Al plate attached on the bottom of arrayed waveguide grating, (b) Al plate attached on the top of arrayed waveguide grating

在阵列波导区粘贴铝板后,阵列波导  $xz$  方向的横截面近似为 5 层平板系统,  $xy$  方向的横截面近似为 4 层平板系统。使用热固化环氧树脂胶粘贴铝板和芯片,设室温是 20 °C,固化温度取 120 °C,阵列波导光栅的参量取表 1 的数据,铝板的杨氏模量是 70 GPa,热膨胀系数是  $24 \times 10^{-6}$  /K,泊松比为 0.33,可得阵列波导光栅中心波长随温度的变化系数与铝板厚度的关系曲线,如图 4 所示。对铝板贴在芯片底部的情况,只要铝板的厚度小于 1.46 mm 就可使阵列波导光栅中心波长的温度敏感性降低,当铝板厚度是 0.37 mm 时,TE 模中心波长的温度系数是 5.9 pm/°C, TM 模中心波长的温度系数是

8.0 pm/°C,下降到传统阵列波导光栅中心波长温度系数的一半;而对铝板贴在芯片顶部的情况,无论铝板的厚度如何,都会使中心波长的温度系数增大。这与实验结果相吻合。这种粘贴应力板的方法能大幅度地调节平行衬底方向的芯层应力  $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ,而对垂直衬底方向的芯层应力  $\sigma_x$  调节很小,所以在降低中心波长温度敏感性的同时会使应力双折射增大。

因为铝板的热膨胀系数远大于衬底的热膨胀系数,且都是正值,在从固化温度下降到室温时,铝板的收缩远大于衬底的收缩,在波导芯层中产生预应力。当铝板的厚度与衬底的厚度相当时,芯片的翘曲很大。对铝板贴在芯片底部的情况,芯片向下弯

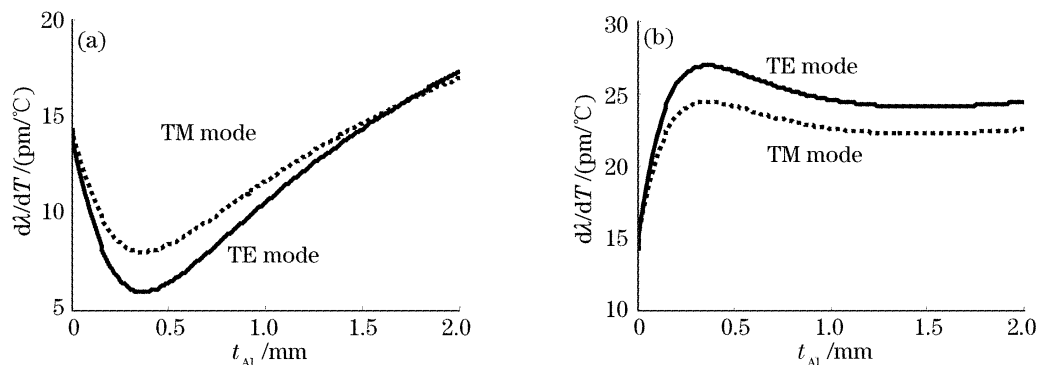


图 4 阵列波导光栅芯片中心波长温度敏感性与铝板厚度的关系。(a) 铝板在芯片底部, (b) 铝板在芯片顶部

Fig. 4 Temperature sensitivity of arrayed waveguide grating chip with different thickness of Al plate. (a) Al plate attached on the bottom of arrayed waveguides grating, (b) Al plate attached on the top of arrayed waveguides

曲成拱形,此时波导芯层远离铝板,在平行衬底方向受到张应力,即  $\sigma_y^c$ 、 $\sigma_z^c$  都是正值;而对铝板贴在芯片顶部的情况,芯片向上弯曲成锅形,此时波导芯层靠近铝板,在平行衬底方向受到压应力,即  $\sigma_y^c$ 、 $\sigma_z^c$  都是负值。当铝板厚度太薄或太厚时,芯片的翘曲较小,不管铝板贴在芯片底部还是顶部,波导芯层受到的都是压应力。

不同的固化温度引起的预应力是不同的,所以阵列波导光栅中心波长的温度敏感性也有差异。如图 5 所示,芯片底部贴有铝板时,固化温度在  $-30 \sim 220$  °C 的范围内,阵列波导光栅中心波长的温度系数  $d\lambda/dT$  的波动约为  $0.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。可见阵列波导光栅中心波长的温度敏感性对应力板的固化温度是不敏感的。

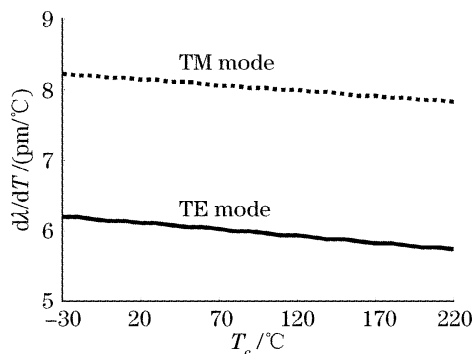


图 5 底部贴有铝板的阵列波导光栅芯片中心波长温度敏感性与固化温度  $T_c$  的关系

Fig. 5 Temperature sensitivity of arrayed waveguide grating chip with an Al plate attached on the bottom of the substrate with different curing temperature

## 4 结 论

对硅基二氧化硅阵列波导光栅中心波长的温度特性进行了理论分析,结果与实验数据吻合,说明该方法是分析阵列波导光栅温度稳定性的有效手段。运用这一方法研究了贴有应力板的阵列波导光栅中心波长的温度特性,在芯片底部贴有  $0.37 \text{ mm}$  厚的铝板时,TE 模和 TM 模中心波长的温度系数分别为  $5.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $8.0 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,给出了应力板补偿型温度不敏感阵列波导光栅的设计方案。这种贴应力板的方法会使应力双折射增大,因此需要使用偏振不敏感的阵列波导光栅芯片。应力板高温固化时引起的预应力会使中心波长发生漂移,但阵列波导光栅中心波长的温度系数对固化温度不敏感。

## 参 考 文 献

1 A. Himeno, K. Kato, T. Miya. Silica-based planar lightwave

circuits[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1998, **4**(6): 913~924

2 S. J. Park, C. H. Lee, K. T. Jeong *et al.*. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(11): 2582~2591

3 S. Kamei, Y. Inoue, A. Kaneko *et al.*. Recent progress on athermal AWG wavelength multiplexer[C]. *Proc. SPIE*, 2005. 60140H-1~60140H-4

4 T. Saito, K. Nara, K. Tanaka *et al.*. 100 GHz-32ch athermal AWG with extremely low temperature dependency of center wavelength[C]. *OFC'2003*, 2003, **1**: 57~59

5 Zhu Daqing, Xu Zhen'e. Study on a temperature-insensitive arrayed waveguide grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 907~911 (in Chinese)

朱大庆,许振鄂. 一种温度不敏感型阵列波导光栅的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 907~911

6 Fu Jian. Study on a temperature-insensitive reflective arrayed waveguide grating[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15** (Suppl.): 48~51 (in Chinese)

符建. 一种具有无源温度补偿的反射型阵列波导光栅的研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(增刊): 48~51

7 M. Huang, X. Yan, Thermal-stress effects on the temperature sensitivity of optical waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(6): 1326~1333

8 Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. *Theoretical Analysis of Thermal Stress and Their Applications* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 69 (in Chinese)

李维特,黄保海,毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 69

9 A. Kilian, J. Kirchhof, B. Kuhlow *et al.*. Birefringence free planar optical waveguide made by flame hydrolysis deposition (FHD) through tailoring of the overcladding[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(2): 193~198

10 Deng Xiaoping, Yang Qinqing, Wang Hongjie *et al.*. Stress analysis of silica optical waveguide on silicon by a finite element method[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2002, **23**(11): 1196~1200 (in Chinese)

邓晓清,杨沁清,王红杰等. 硅基二氧化硅波导的应力和偏振相关性的数值分析[J]. *半导体学报*, 2002, **23**(11): 1196~1200

11 Jin Yongxing, Lü Jun, Lü Xiang. Analysis of relation between thermal expansion coefficient of cladding and stress birefringence of optical waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 572~574 (in Chinese)

金永兴,吕俊,吕翔. 光波导覆层热膨胀系数对应力双折射影响的分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 572~574

12 An Junming, Ban Shiliang, Liang Xixia *et al.*. Numerical analysis for a  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  waveguide stress-birefringence[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2005, **26**(7): 1454~1458 (in Chinese)

安俊明,班士良,梁希侠等.  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  波导应力双折射数值分析[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(7): 1454~1458

13 He Zhongjiao. Analysis of stress birefringence for silica waveguide on silicon and SOI rib waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 201~204 (in Chinese)

何忠蛟. 硅基二氧化硅波导和 SOI 脊型波导应力双折射研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 201~204

14 C. H. Hsueh. Thermal stresses in elastic multilayer systems[J]. *Thin Solid Films*, 2002, **418**(2): 182~188

15 M. Huang. Analytical solutions for thermal stresses in buried channel waveguides[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(11): 1562~1568

16 M. Huang, X. Yan. Analytical solutions to estimate the stress induced polarization shift and the temperature sensitivity of optical waveguides[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(5): 2820~2826

17 N. Ooba, Y. Hibino, Y. Inoue *et al.*. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating multiplexer using bimetal plate temperature compensator[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(21): 1800~1801