

文章编号: 0253-2239(2004)07-907-5

一种温度不敏感型阵列波导光栅的研究*

朱大庆 许振鄂

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 研究了一种新型温度不敏感型阵列波导光栅(AWG)。该新型温度不敏感型阵列波导光栅的波导采用混合材料的波导结构,该混合材料波导通过在石英波导芯层上旋涂聚合物材料的上包层,达到改变波导温度特性的目的,使得阵列波导光栅的温度敏感性降低。通过理论分析和有限差分方法研究了其中两种结构:三层混合材料波导构成的阵列波导光栅和四层混合材料波导构成的阵列波导光栅,计算了该新型温度不敏感型阵列波导光栅的温度特性。结果表明,在一定的设计下,温度变化 0~50 ℃时,这两种温度不敏感型阵列波导光栅的最大波长漂移量小于 0.03 nm,不到无温度控制时常规阵列波导光栅最大波长漂移量的 4%。

关键词: 集成光学; 波导; 阵列波导光栅; 温度不敏感; 无热效应

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Study on a Temperature-Insensitive Arrayed Waveguide Grating

Zhu Daqing Xu Zhen'e

(The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 28 January 2003; revised 15 September 2003)

Abstract: A new type of temperature-insensitive arrayed waveguide grating (AWG) was studied. Hybrid material waveguide structure in which polymer material was spun on the silica core was adapted in this temperature-insensitive arrayed waveguide grating to change the characteristic of the waveguide and then reduce the sensitivity of the arrayed waveguide grating. Two kinds of structure that were the three-layer structure and the four-layer structure were studied by theoretical and finite difference methods. The temperature characteristics of this arrayed waveguide grating were calculated. The simulation results showed that when temperature change was 0~50 ℃, the maximum wavelength shift of the temperature-insensitive arrayed waveguide grating was less than 0.03 nm, which was less than 4% of that of the ordinary arrayed waveguide grating.

Key words: integrated optics; waveguide; arrayed waveguide grating; temperature-insensitive; athermal effect

1 引 言

阵列波导光栅因其众多优点,在光通信中有着广泛的应用前景。但传统的常规阵列波导光栅器件因其温度敏感性,需加热器或佩尔捷(Peltier)冷却器控制温度来稳定中心波长,成为广泛应用阵列波

导光栅器件的主要障碍。因此温度不敏感阵列波导光栅器件得到广泛重视。

设计温度不敏感阵列波导光栅主要采用补偿法,使得温度变化时,光波通过波导阵列后没有相位变化或经历的相位变化相同。如在波导阵列中插入与原波导材料温度特性不同的材料或^[1]在波导阵列中插入一段与原波导材料温度特性相反的材料^[2,3]、全聚合物阵列波导光栅器件^[4]、在基片底部贴上双金属片^[5]等。Kokubun 等^[2,6]提出了一种混合材料的结

* 华中科技大学 2001 年校基金资助课题。

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

收稿日期:2003-01-28;收到修改稿日期:2003-09-15

构,在石英的下包层和平面芯层上采用聚合物材料的上包层,得出了在一定温度范围内有效折射率随温度的变化 dn_c/dT 为负的平面波导和三维结构,这些结构可以应用在许多需要无热效应的器件中。

本文研究了两种新的混合材料波导结构,其思路是将常用的阵列波导光栅的上包层改为聚合物材料,在特定的设计下能够使采用这两种波导结构制作的阵列波导光栅的波长随温度的漂移系数大大减小,从而得到温度不敏感阵列波导光栅。

2 混合材料波导结构无热效应阵列波导光栅原理

满足相位条件的阵列波导光栅中心波长为 $\lambda_c = n_c \Delta L / m^{[7]}$, 其中 λ_c 为阵列波导光栅的中心波长, n_c 为波长为 λ_c 时阵列波导的有效折射率, ΔL 为阵列中任相邻两波导之间的长度差, m 为阵列波导光栅器件的衍射级数。 $n_c \Delta L$ 称为波导阵列的光程差。阵列波导光栅中心波长随温度的变化系数为

$$\frac{d\lambda_c}{dT} = \frac{\lambda_c}{n_c} \left(\frac{dn_c}{dT} + n_c \alpha_T \right), \quad (1)$$

其中 $\alpha_T = \frac{d\Delta L}{\Delta L} \frac{1}{dT}$ 为材料的线膨胀系数,一般情况下通常用衬底的线膨胀系数。

由于一般材料的线膨胀系数均为正数,从(1)式可知,当波导的有效折射率随温度的变化系数 dn_c/dT 为负数时,就可以减少阵列波导光栅中心波长随温度的变化系数,降低阵列波导光栅对温度的敏感程度。当有 dn_c/dT 使得(1)式右边为零,则阵列波导光栅的中心波长不随温度变化。图1为矩形波导的有效折射率与上包层材料折射率之间的关系。由图可知,采用热光系数为负的聚合物材料做上包层,能得到 dn_c/dT 为负的波导结构。

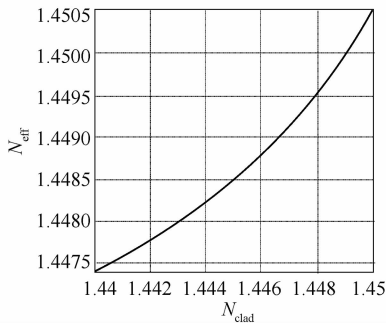


Fig. 1 Relationship between the effective index and the cladding index of the waveguide

3 三层混合材料波导的无热效应阵列波导光栅

3.1 结构

该混合材料波导的结构示意图见图2,与通常的石英波导相比,只有其上包层是由聚合物材料旋涂而成,其它的各层与通常的石英波导相同。本文采用有限差分方法进行数值计算,来计算这种三维混合材料波导的有效折射率 n_c 及其随温度的变化系数 dn_c/dT 。

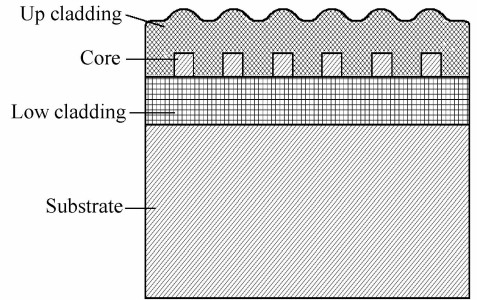


Fig. 2 Schematic diagram for 3-layer structure of hybrid material waveguide

这种基于石英波导的温度不敏感阵列波导光栅的制作工艺与常规的石英波导阵列波导光栅基本相同,只是上包层采用在形成的波导结构上旋涂聚合物材料。由于旋涂的聚合物材料相对较软,不易在芯层中产生应力。因此该方法得到的阵列波导光栅器件在应力和应力相关双折射方面比传统的阵列波导光栅优越。其工艺过程不需进行多次刻蚀或深刻蚀,工艺成熟、简单;此外,在达到无热效应要求的同时,阵列波导光栅的其它性能(串扰、损耗等)没有降低。

3.2 设计例

参照图2,本例中采用石英衬底,厚500 μm ;下包层为15 μm 厚的石英,折射率为 $n_1 = 1.445$;波导层采用折射率为1.454的石英,波导宽5 μm ,高6 μm ;石英的 $dn_1/dT = 1.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;为了补偿温度引起的中心波长漂移,上包层采用折射率为 $n_p = 1.44$ 的聚合物材料,其 $dn_p/dT = -1.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,上包层厚度为15 μm 。计算所用的中心波长为1550 nm。大多数光子器件是制作在硅衬底上的,硅的线膨胀系数为 $\alpha_T = 2.33 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,计算热膨胀时应采用衬底的线膨胀系数。

3.3 数值模拟结果与分析讨论

图3同时显示了通过式(1)计算得到的无温度控制时常规基于 Silica/Silicon 的阵列波导光栅和波导阵列用三层混合材料波导的阵列波导光栅中心波长

随温度的漂移,即 $\Delta\lambda$ 。可看出,常规阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 是线性的,在 $\Delta T=50\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\Delta\lambda=0.78\text{ nm}$ 。对于三层混合材料制作的阵列波导光栅,其 $\Delta\lambda$ 是非线性变化的,在 ΔT 为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内,最大 $\Delta\lambda$ 小于 0.03 nm ,不到常规阵列波导光栅的 4% 。由于在实际应用中,环境温度的变化范围一般不超过 $50\text{ }^\circ\text{C}$,因此可仅研究在 T 为 $0\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时的情况。在实际的设计中,可以根据具体情况应用温度比实际应用温度低时的材料参量进行设计。例如,如果设计工作温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,可以用 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时材料的参量进行设计。

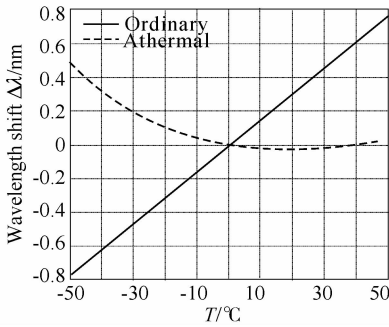


Fig. 3 $\Delta\lambda$ of ordinary and 3-layer structure

三层混合材料波导的阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 与聚合物上包层折射率 n_p 的关系见图 4。图 4 显示,随着 n_p 增加,阵列波导光栅中心波长的漂移倾向于向短波段方向进行; n_p 有一个最佳值使得,温度变化 $\Delta T=50\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,最大波长漂移量最小,本例中,该最佳 $n_p=1.440$,此时最大波长漂移量小于 0.03 nm 。

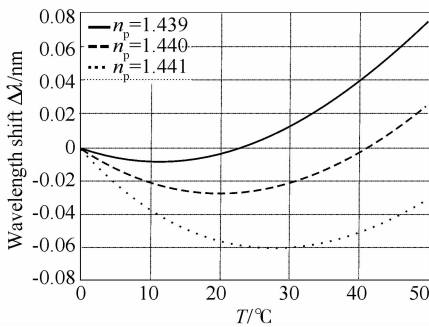


Fig. 4 Relationship between $\Delta\lambda$ and n_p of a 3-layer structure $\Delta\lambda$ with $n_1=1.445$

三层混合材料波导的阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 与聚合物下包层折射率 n_1 的关系见图 4~图 6。由这三幅图可以看出,对应三种下包层折射率 1.440 、 1.445 和 1.450 ,最佳的聚合物上包层折射率分别约为 1.4395 、 1.440 和略大于 1.441 ,在温度变化范围为 $0\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时的最大波长漂移分别为 0.026 nm 、小于 0.03 nm 和小于 0.04 nm 。从这可以得出,较小的下包层折射率可以得到较小的最大波长漂移。此外,

从图 4~图 6 中 $n_p=1.440$ 的曲线可以看出,下包层折射率 n_1 增加,波长漂移倾向于向长波段进行,这与上包层折射率的增加是相反的。

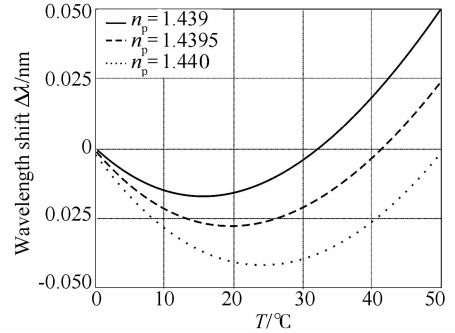


Fig. 5 Relationship between $\Delta\lambda$ and n_p of a 3-layer structure AWG with $n_1=1.440$

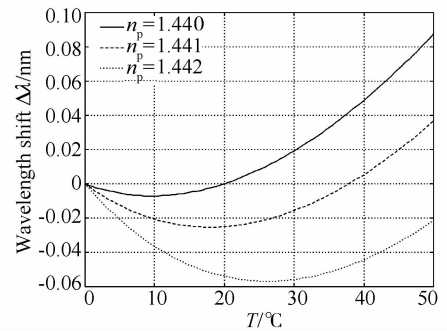


Fig. 6 Relationship between $\Delta\lambda$ and n_p of a 3-layer structure AWG with $n_1=1.450$

三层混合材料波导的阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 与波导尺寸的关系见图 7 和图 8。这两图中的曲线都是在各自的参量下(宽度或高度)的最佳曲线,具有不同的上包层折射率 n_p 。由图可以看出,较小的波导宽度有较平坦的波长漂移曲线,从而也容易得到较小的最大波长漂移值。而在不同的波导高度下,所能达到的最小的波长漂移几乎相同。

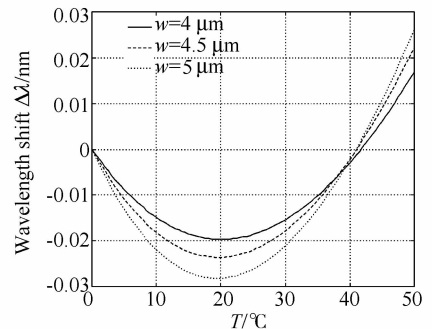


Fig. 7 Relationship between $\Delta\lambda$ and the width of waveguide W

由上面的结果和分析可知,利用三层混合材料波导制作阵列波导光栅,可以大大降低阵列波导光

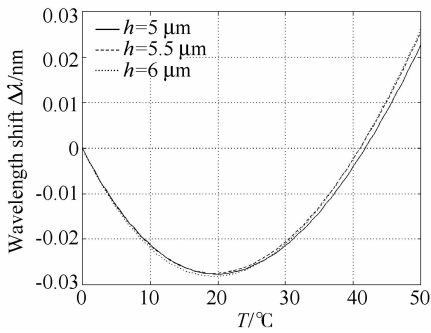


Fig. 8 Relationship between $\Delta\lambda$ and the height of waveguide h

栅器件对温度的敏感程度。在本节的设计例中,波导宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 时,用三层混合材料波导构成的阵列波导光栅,在 ΔT 为 $50\ ^\circ\text{C}$ 时,最大的波长随温度的漂移量只有 $0.026\ \text{nm}$,只有相同参量的常规阵列波导光栅的 $1/30$ 。一般可根据需要通过调整上下包层的折射率或波导宽度来得到最佳的设计参量。但在实际的设计过程中,由于下包层和芯层的折射率差和波导尺寸往往因为其它性能的要求而事先选定,因此,通常应该通过调节聚合物材料的上包层的折射率来获得最佳设计。

4 四层混合材料波导的无热效应阵列波导光栅

上面研究了三层混合材料波导的微热效应阵列波导光栅,一般是通过调节聚合物上包层的折射率来获得波长漂移量最小的最佳设计。虽然聚合物种类繁多,折射率分布比较广,但有可能不能找到性能能够全部满足要求的聚合物材料。为了增加调节参量,在上述三层混合材料的基础上,本文还研究了利用四层混合材料波导制作的小热效应阵列波导光栅的温度特性。

四层混合材料波导的结构示意图见图9。与三层结构相比,四层结构在波导芯层和聚合物上包层之间加了一层很薄的缓冲层(Buffer layer)。该缓

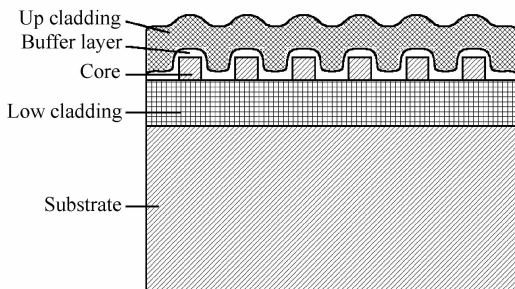


Fig. 9 Schematic diagram for 4-layer structure

冲层的 dn_b/dT 可为正。在该结构中可通过调节缓冲层的厚度得到最佳设计。由于在实际制作过程中缓冲层的厚度精确可调,因此四层结构增加了设计和制作的灵活性。由于在制作过程中波导芯层和下包层的折射率一般都事先确定,加上本方法与常规阵列波导光栅相比,只是上包层材料不同,本节只研究四层混合材料波导阵列波导光栅的波长漂移特性与上包层折射率和缓冲层厚度之间的关系。

四层混合材料波导阵列波导光栅的波长漂移特性与上包层折射率的关系见图10和图11。可看出,调节上包层折射率 n_p 依然能得到不同的波长漂移曲线,即仍可以通过调节上包层折射率来优化设计参量。此外,还可看出,缓冲层厚度小时,阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 对 n_p 的变化敏感些,在缓冲层厚度 $h_b=0.30\ \mu\text{m}$ 和 $h_b=0.28\ \mu\text{m}$ 时,最佳 n_p 值差别不是很大,都是略小于 1.440 ;但所能得到的最小波长漂移有较大的不同, $h_b=0.3\ \mu\text{m}$ 时最大波长漂移为约 $0.033\ \text{nm}$,而 $h_b=0.28\ \mu\text{m}$ 时最大波长漂移约 $0.04\ \text{nm}$ 。

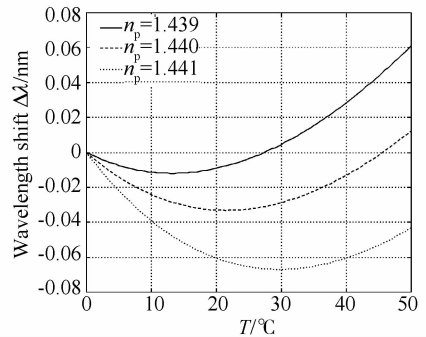


Fig. 10 Curves of $\Delta\lambda$ for different n_p for 4-layer structure AWG with $h_b=0.3\ \mu\text{m}$

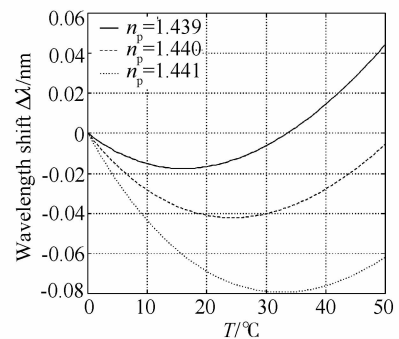


Fig. 11 Curves of $\Delta\lambda$ for different n_p for 4-layer structure AWG with $h_b=0.28\ \mu\text{m}$

其他设计参量相同时,不同的缓冲层厚度对阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 的影响见图12。该图显示,调节缓冲层厚度能有效地改变阵列波导光栅的 $\Delta\lambda$ 特性。图

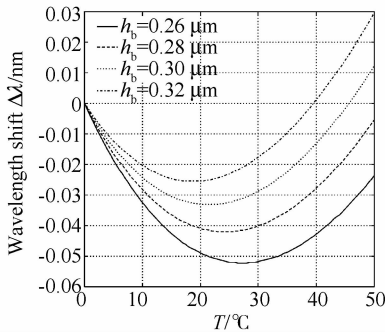


Fig. 12 Curves of $\Delta\lambda$ for different h_b

12 的最佳结果为缓冲层厚度 $h_b = 0.32 \mu\text{m}$, 此时, 在 $0 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内, 最大波长漂移量小于 0.03 nm , 不到无温度控制时常规阵列波导光栅在相同温度变化范围内最大波长漂移量的 4% 。

从上面可看出, 四层混合材料的波导结构所构成的阵列波导光栅的热效应性能不亚于三层混合材料的波导结构所构成的阵列波导光栅, 而其调节参量较多, 且调节缓冲层厚度比调节聚合物上包层的折射率要更加方便和实用。因此, 四层混合材料的波导结构更适用于用来制作微热效应的阵列波导光栅。与三层混合材料的波导结构相比较, 四层混合材料的波导结构的缺点是需要生长缓冲层, 增加了工艺过程和时间, 从而成本较高。

总结 本文研究了两种新型微热效应阵列波导光栅—三层混合材料波导构成的阵列波导光栅和四层混合材料波导构成的阵列波导光栅, 即在特定设计下, 通过在折射率随温度变化系数为正的石英波导芯层上旋涂折射率随温度变化系数为负的聚合物材料, 得到波导的有效折射率随温度的变化系数为负, 从而达到补偿因长度随温度变化而引起的光程变化, 得到在一定的温度范围内热不敏感的阵列波导光栅; 并

通过有限差分方法计算了这两种微热效应阵列波导光栅的温度特性。结果表明, 在一定的设计下, 温度变化范围为 $0 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 这两种微热效应阵列波导光栅的最大波长漂移量小于 0.03 nm , 不到无温度控制的常规阵列波导光栅最大波长漂移量的 4% , 效果明显。

这两种微热效应阵列波导光栅与其它文献已报道的微热效应阵列波导光栅相比, 其特点是制作工艺与常规阵列波导光栅的制作工艺基本一样, 不需要进行深刻蚀或特别复杂的设计与制作, 具有工艺简单、对阵列波导光栅其它性能没有影响的优点, 具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Tanobe H, Kondo Y, Kadota Y *et al.*. Temperature insensitive arrayed waveguide gratings on InP substrates. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(2):235~237
- 2 Kokubun Y, Takizawa M, Taga S. Three-dimensional athermal waveguides for temperature independent lightwave devices. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(15):1223~1224
- 3 Inoue Y, Kaneko A, Hanawa F *et al.*. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer. *ECOC'97*. 33~36
- 4 Yao H H, Zawadzki C, Keil N. Athermal all-polymer arrayed waveguide grating multiplexer. *OFC'2002*. 12~14
- 5 Ooba N, Hibino Y, Inoue Y *et al.*. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating multiplexer using bimetal plate temperature compensator. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(21): 1800~1801
- 6 Kokubun Y. Athermal waveguides and temperature insensitive lightwave devices. *Laser and Electro-Optics*, 1999. *CLEO/Pacific Rim '99. The Pacific Rim on*, 1999, **4**: 1143~1144
- 7 Meint K, Smit, Cor Van Dam. Phasar-based WDM-devices: principles, design and applications, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, **2**(2): 236~250