

可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器

张海亮^{1,2} 唐 明^{1,2} 谢意维^{1,2} 廖恢齐¹ 邱 拓¹ 付松年^{1,2} 刘 端³ 沈 平^{1,2} 刘德明^{1,2}

¹ 华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074
² 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074
³ 湖北工业大学机械工程学院, 武汉 湖北 430068

摘要 研究了一种基于线性啁啾光纤布拉格光栅(LCFBG)和热光相移技术的可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器,透射峰数目、带宽、中心波长及波长间隔独立可调。由于热光效应,对 LCFBG 局部区域进行加热便可在加热处引入相移,使 LCFBG 透射禁带上产生透射峰。采用可编程的热打印头作为数字化加热单元,精确加热光纤光栅的特定位置,通过控制加热区域的数目和加热区域的间隔来分别确定透射波长的数目和透射波长的间隔;通过改变 LCFBG 被加热区域的宽度,实现可变带宽滤波。此可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器的透射峰带宽调谐范围为 0.07~1.55 nm,透射峰中心波长调谐范围为 1547.44~1558.64 nm,两透射峰间距最小为 0.95 nm。

关键词 光纤光学;可编程滤波器;热光相移;热打印头

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0706011

Programmable Bandwidth-Tunable and Wavelength-Variable Fiber Grating Filter

Zhang Hailiang^{1,2} Tang Ming^{1,2} Xie Yiwei^{1,2} Liao Huiqi¹ Qiu Tuo¹
Fu Songnian^{1,2} Liu Duan³ Shen Ping^{1,2} Liu Deming^{1,2}

¹ National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

³ School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract A programmable bandwidth-tunable and wavelength-variable fiber grating filter based on a linearly chirped fiber Bragg grating (LCFBG) and thermal-optical phase shift technique is proposed. The number of transmission peaks, filter bandwidth, central wavelength and wavelength spacing can be adjusted independently. Due to the thermo-optical effect, a phase shift can be induced along the LCFBG by heating a small portion of the LCFBG, then a transmission peak can be obtained within the stop band. The specific location of fiber grating is accurately heated by using a thermal printer head as a digital heating unit. The number of the transmission peaks and the wavelength spacing can be set by changing the number and the spacing of the heating points, respectively. And the peak's bandwidth can be tuned by changing the width of the heating region. Tunable bandwidth of transmission peak between 0.07 nm and 1.55 nm, central wavelength of transmission peak ranging from 1547.16 nm to 1558.64 nm and the minimum wavelength spacing of 0.95 nm can be achieved using this filter.

Key words fiber optics; programmable filter; thermal-optical phase shift; thermal printer head

OCIS codes 060.2330; 060.2340; 050.2770; 060.3735

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-03-23

基金项目: 国家 863 计划(SS2012AA010407)、国家自然科学基金(61107087)

作者简介: 张海亮(1988—),男,硕士研究生,主要从事可编程光纤光栅滤波器及其应用方面的研究。

E-mail: zhhluster@hust.edu.cn

导师简介: 唐 明(1979—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信系统、光纤光学、非线性光学、光纤激光器和放大器以及太赫兹波科学与技术等方面的研究。E-mail: tangming@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

1 引言

随着光通信系统的快速发展,更加灵活、高效地利用通信光谱资源变得越来越重要,这就要求光滤波器能够实现波长、带宽及波长间隔独立可调^[1],目前流行的灵活栅格技术就可以满足此类要求^[2-3]。随着灵活栅格技术的推广及应用,目前市场上已经有非常成熟的基于硅基液晶(LCoS)这种灵活栅格技术的光滤波器器件,如 Finisar 公司 WaveShaper。但此类光滤波器不是全光纤结构,因而和通信光纤匹配时插入损耗较大,且价格昂贵。而基于线性啁啾布拉格光纤光栅(LCFBG)这种灵活栅格技术的光滤波器也能得到很好的滤波性能,且是全光纤结构,和通信光纤匹配好,插入损耗小,价格相对便宜。因此,基于 LCFBG 的可编程光滤波器有着良好的市场前景。

LCFBG 是一种很重要的光纤光栅,其具有很宽的透射禁带,通过插入 π 相移,可以在此透射禁带中打开一个透射窗口,实现透射型带通滤波。关于 LCFBG 滤波方案的报道已经有很多种,例如利用拉伸、热光效应等在其透射禁带处插入 π 相移,实现滤波^[4],最常用的是利用热光效应。已经报道的基于 LCFBG 和热光效应相结合的方案来实现滤波的技术,通常是利用电阻丝对啁啾光纤布拉格光栅进行加热达到滤波效果^[5-7]。这种方法必须机械地改变电阻丝的位置来得到不同的透射波长,以及改变电阻丝的数量来实现多波长滤波。这种利用电阻丝加热的技术,响应速度慢,波长定位重复性差,易受环境因素干扰,不够简便灵活。另外,目前已有通过热打印头对光纤光栅进行加热的报道^[8-9],但是还没有对加热宽度与透射带宽之间的关系进行研究,也没有实现透射峰数目、带宽、中心波长及波长间隔独立调谐的滤波。

用热打印头对 LCFBG 加热来达到滤波效果有很多优点,如响应速度快、波长重复定位性好和控制电路简单等。本文利用程控热打印头对 LCFBG 局部区域加热的方法,设计出了透射峰带宽、透射峰中心波长、波长间隔及波长数量相对独立可调的可编程光纤光栅滤波器。

2 滤波器原理及结构设计

2.1 热打印头介绍

本文所用热打印头型号为 FTP-628,其加热阵列长度为 48 mm,加热阵列由 384 个间距为 0.125 mm

的加热单元排列组成。可见,加热单元空间密度非常高,而每个加热单元可以独立加热,进而可以精确地对 LCFBG 特定位置的区域进行加热,即加热定位性很好。加热单元采用薄膜工艺制造,开关响应时间小于 2 ms,表明加热迅速。由于热打印头价格便宜,且是全数字化控制,其加热单元的开关时间和加热强度均可编程控制,所以利用 LCFBG 和热打印头便可设计出低成本、高速切换、高效率的可编程光纤光栅滤波器。

2.2 滤波原理

LCFBG 是折射率调制幅度不变、周期沿光栅轴向线性变化的光栅,其周期变化公式为

$$\Lambda(z) = \Lambda_0(1 - mz), \quad (1)$$

式中 $m = \frac{F\Lambda_0}{\pi L^2}$, L 为光栅长度, F 为啁啾参数, F 代表整个光栅的周期改变量, Λ_0 为光栅中点周期, z 为沿光栅轴向坐标,坐标原点为光栅中心^[10]。

在 LCFBG 中,布拉格反射波长公式为

$$\lambda_B(z) = 2n_{\text{eff}}\Lambda(z), \quad (2)$$

式中 $\lambda_B(z)$ 为光栅轴向位置 z 处对应的布拉格波长。由(1)式和(2)式可知,在 LCFBG 的不同位置有不同的布拉格波长,且 LCFBG 的布拉格波长随着光栅轴向线性变化。

对光纤光栅加热时,被加热的微小区域的光栅周期和折射率会受到影响,光栅周期改变量和折射率改变量与温度变化分别有如下关系:

$$\Delta n_{\text{eff}} = \beta \Delta T n_{\text{eff}}, \quad (3)$$

$$\Delta \Lambda = \alpha \Delta T \Lambda(z), \quad (4)$$

式中 β 为热光系数, α 为热膨胀系数, ΔT 为温度改变量。对于二氧化硅光纤, β 约为 $8.6 \times 10^{-6} (\text{C})^{-1}$, α 约为 $0.55 \times 10^{-6} (\text{C})^{-1}$ 。由于热膨胀系数 α 比热光系数 β 小很多,光纤光栅因加热膨胀导致的周期变化忽略不计,这里只考虑加热对折射率的影响^[11-12]。

LCFBG 被加热的微小区域的折射率改变,使得通过该加热区域的光波产生一个相对相移量,这将导致 LCFBG 的线性啁啾特性被打破,该相对相移量有如下公式:

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi \Delta z}{\lambda_B(z)} \Delta n_{\text{eff}}, \quad (5)$$

式中 Δz 是 LCFBG 被加热的轴向宽度,由(3)式和(5)式可得 $\Delta \Phi = \frac{2\pi \Delta z}{\lambda_B(z)} \beta \Delta T n_{\text{eff}}$ 。如果加热温度足够高,使得相对相移量 $\Delta \Phi$ 为 π 时,与加热位置对应的布拉格波长便可最大限度地透过 LCFBG,即在透射禁带上就产生一个透射率最高的透射峰^[7];而改变

加热宽度 Δz 可以使更多波长透过光栅,即可改变透射峰带宽。

由于 LCFBG 的布拉格波长随着光栅轴向线性变化,想要特定的透射峰波长只需在 LCFBG 轴向相应位置处插入 π 相移即可。LCFBG 被加热的微小区域的位置和数量分别决定了透射峰的波长和数量,当同时对 LCFBG 多个微小区域进行加热时,可以实现多波长滤波^[5]。

2.3 滤波器结构设计

图 1 是基于 LCFBG 和热打印头的可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器示意图。如图 1(a) 所示,一段约 7.5 cm 的 LCFBG 与热打印头的加热元件阵列紧密贴合,确保热打印头可以给 LCFBG 稳定加热。加热阵列由间距为 0.125 mm 的加热单元排列组成,每个加热单元可以独立加热,这可以确

保加热位置的精度。图 1(b) 是整个滤波器系统图,图中 BLS 为宽带光源,OSA 为光谱仪。由于热扩散会导致 LCFBG 未被加热的区域升温,进而影响滤波器性能,为了减小热扩散的影响,将热打印头和 LCFBG 紧贴于一个热沉之上。控制电路通过热打印头的电源接口和数据接口对热打印头进行可编程控制。通过程序控制打印头的每个加热单元开启或关闭,加热单元开启时,即对 LCFBG 的相应位置进行加热,当通过加热插入 π 相移时,在 LCFBG 透射禁带中产生最理想的透射峰。通过程序控制连续不同数目的加热单元加热,即可对 LCFBG 不同宽度的区域进行加热,产生不同带宽的透射峰;控制热打印头对 LCFBG 不同位置的区域进行加热,即可得到不同中心波长的透射峰;而对不同位置的多个区域同时加热,即可实现多波长滤波。

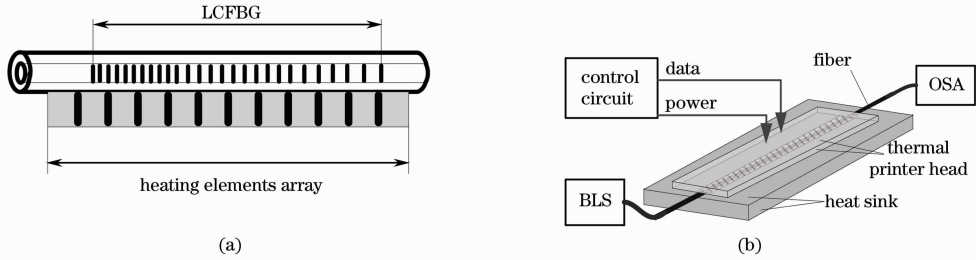


图 1 基于 LCFBG 和热打印头的光纤光栅滤波器。(a)原理图; (b)系统示意图

Fig. 1 Fiber grating filter based on LCFBG and a thermal printer head. (a) Schematic diagram; (b) system diagram

3 实验及结果

3.1 实验条件

本实验所用 LCFBG 长度约为 7.5 cm。使用的宽带光源为实验室自制光源,此自制光源采用 980 nm 半导体激光器对 3 m 长的掺铒光纤进行抽运,抽运功率为 100 mW,产生的光谱在 1542~1567 nm 范围内的光谱不平坦度约为 2.8 dB。当使用此光源,没有对 LCFBG 加热时,测得 LCFBG 的透射光谱如图 2 所示,透射禁带范围大约是 1546.5~1564.5 nm,宽度约为 18 nm,隔离度约为 28 dB。

3.2 单波长滤波

当对 LCFBG 的一个微小区域进行加热时,可以在透射禁带中产生一个透射峰。图 3 为只加热 LCFBG 一个微小区域的原理图, L_1 为加热宽度。

当加热宽度 L_1 为 0.750 mm,即连续 6 个加热单元加热时,透射禁带中便产生了一个透射峰,图 4 即为此实验结果,此时产生的透射峰 3 dB 带宽最小,约为 0.07 nm,透射峰消光比约为 25 dB。在相同加热强度的条件下,如果连续加热的加热单元数目少于 6

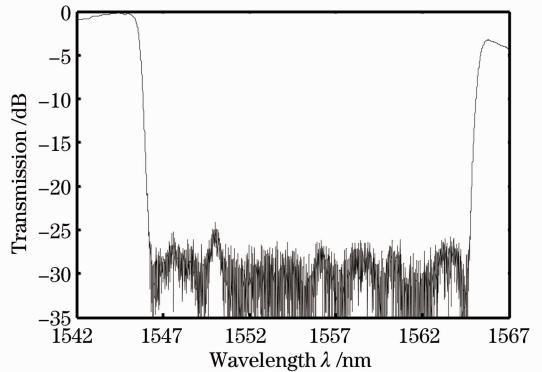


图 2 未加热时 LCFBG 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of LCFBG without heating

个,会导致加热温度不够高,光纤光栅折射率改变不够大,加热区域相对相移量达不到 π ,因此透射峰幅度会减小^[13];而当连续加热的加热单元多于 6 个时,由于加热宽度增加,会导致透射峰宽度变大。

热打印头的加热单元是采用薄膜工艺制造,开关响应时间小于 2 ms,加热非常迅速。经测量,产生透射峰的响应时间小于 2 s。

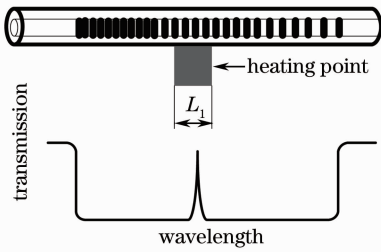


图 3 对 LCFBG 加热一个区域的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of heating one local point of the LCFBG

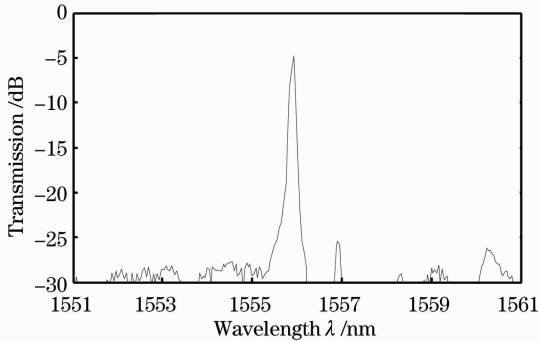


图 4 加热宽度 0.750 mm 时的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum for heater width of 0.750 mm

当加热宽度为 0.750 mm 时,对 LCFBG 同一位置持续加热,每隔 5 min 读取光纤光栅透射谱的数据,在 25 min 观察时间内,读取 5 次数据,透射峰中心波长漂移小于 0.02 nm,透射峰幅度变化小于 0.5 dB。结果如图 5 所示,说明滤波器稳定性较好。

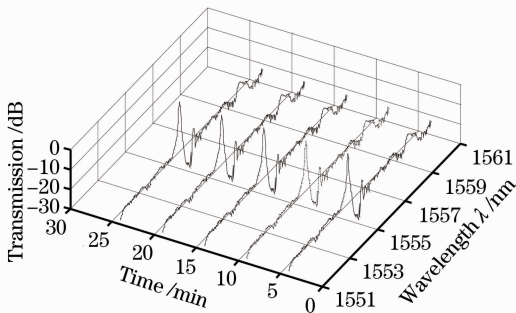


图 5 每隔 5 min 测量的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra measured every 5 min

由于 LCFBG 的布拉格波长随着光栅轴向线性变化,对 LCFBG 不同位置加热,便可得到不同波长的透射峰。沿着 LCFBG 轴向分别加热 58 个等宽度的微小区域,加热宽度 L_1 为 0.750 mm。58 个取样点中的每个取样点都测量 3 次,然后取平均值,得到的 58 个值经 Origin 直线拟合后,得出直线方程为

$$y = -0.3212x + 1560.5199, \quad (6)$$

此直线方程的拟合度为 0.99983,直线斜率和截距的标准误差分别为 5.54283×10^{-4} 和 0.01423。其中 x 的单位是 mm,表示被加热的区域沿着 LCFBG 的轴向位置, y 的单位为 nm,表示透射峰中心波长。实验结果如图 6 所示,该实验结果反映了透射峰中心波长和 LCFBG 被加热位置的对应关系。根据(6)式,可以通过程序控制热打印头对 LCFBG 的特定位置加热而得到想要的波长。本实验中加热 58 个微小区域得到的透射峰中心波长范围为 1547.44 ~ 1558.64 nm,调谐宽度为 11.20 nm。而 LCFBG 透射禁带范围大约是 1546.5 ~ 1564.5 nm,理论上透射峰中心波长调谐宽度可以为 18 nm。但是,该热打印头加热阵列长度不足以加热整段 LCFBG,因此,中心波长调谐宽度无法达到 18 nm。此滤波器透射峰中心波长调谐宽度受 LCFBG 透射禁带宽度和热打印头加热阵列长度限制。如果要增加透射波长调谐宽度,必须换用具有更长加热阵列的热打印头和具有更宽透射禁带的 LCFBG。

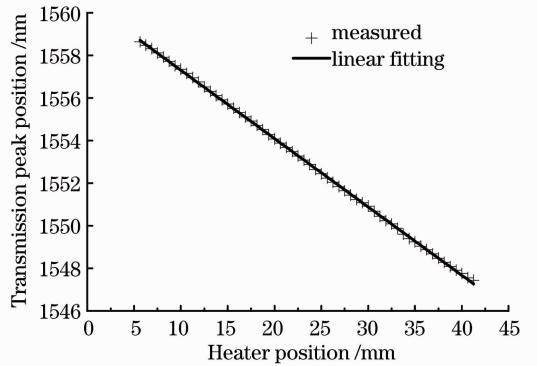


图 6 透射峰中心波长与加热点位置对应关系

Fig. 6 Relationship between the transmission peak position and heater position

3.3 调谐带宽

3.2 节已经提到,改变加热宽度,可以改变透射峰带宽。图 7 为在相同的加热强度条件下,对 LCFBG 同一位置的微小区域加热,不同加热宽度对应的透射峰光谱。加热宽度分别为 0.750,1.500,2.250,3.000 mm,透射峰带宽分别约为 0.07,0.21,0.36,0.62 nm。从图 7 中看出,随着加热宽度增加,透射峰逐渐变宽。这是因为 LCFBG 轴向每点都有对应的布拉格波长,如果某点处的线性啁啾特性被打破,相应的布拉格波长就可以透过 LCFBG,随着加热宽度增加,LCFBG 线性啁啾特性被打破的区域宽度就相应增加,于是便有更多波长

的光可以透过 LCFBG,即透射峰随之变宽。

继续增加加热宽度,当加热宽度分别为 3.750, 4.500,5.250 mm 时,透射峰带宽都约为 0.62 nm。对 LCFBG 一个区域单独加热时,透射峰带宽与加热宽度之间的关系如图 8 所示。从图 8 中可看出,加热宽度增加,透射峰带宽也随之增加,但是,当加热宽度大于 3.000 mm 时,透射峰带宽无法继续增加。

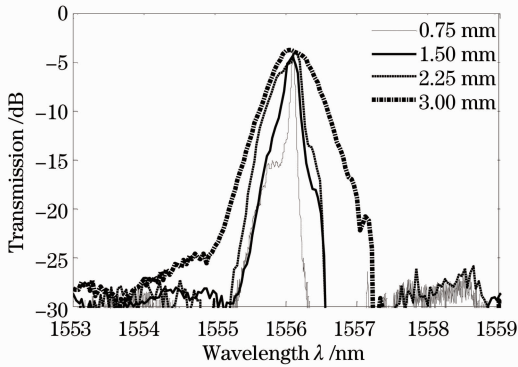


图 7 相同加热强度时,不同加热宽度对应的透射峰光谱
Fig.7 Transmission spectra for different heater widths with the same applied heating intensity

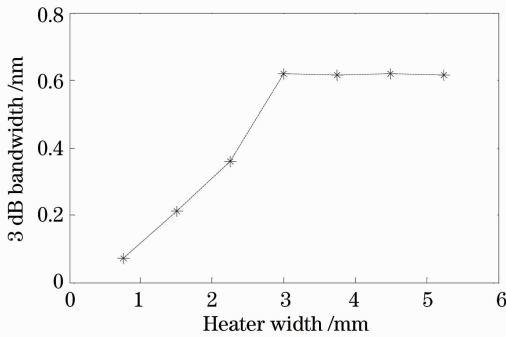


图 8 透射峰带宽与加热宽度的关系
Fig.8 Relationship between 3 dB bandwidth and heater width

为了达到更大带宽的滤波效果,对 LCFBG 相邻两个微小区域同时进行加热,当两个被加热的区域相距足够近时,产生的两个透射峰理论上可以合并在一起,这样便可增加透射峰带宽。图 9 为对 LCFBG 相邻两个区域同时加热的原理图,两个被加热区域宽度分别为 L_1 和 L_2 ,间距为 ΔL ,当 ΔL 足够小时,理论上两个透射峰可以合并为一个更宽的透射峰。

同时加热两个相邻区域,第一个加热宽度 L_1 为 3.000 mm,第二个加热宽度 L_2 为 0.750 mm,间距 ΔL 为 0.500 mm。此时的透射峰 3 dB 带宽达到 1.55 nm,比单独加热一个局部时的最大透射峰带

宽 0.62 nm 明显变宽很多,结果如图 10 所示。当 ΔL 继续增大时,透射峰分逐渐裂成两个透射峰。虽然透射峰带宽增加了许多,但是透射峰幅度却减小了,大约只有 20 dB,这主要是因为实验装置散热效果不是很完美,由于热扩散的影响,导致 LCFBG 未被加热的部位温度也升高,致使被加热的区域与其左右相比温度突变不足,因而在加热处引入的相对相移量不足 π ,所以透射峰的幅度随之减小。

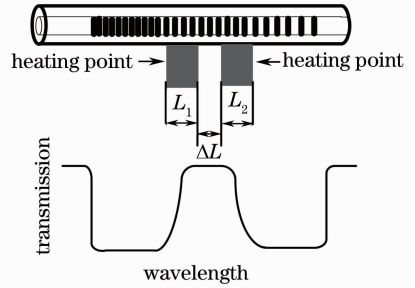


图 9 对 LCFBG 两个相邻区域同时加热的原理图
Fig.9 Schematic diagram of heating two adjacent local points of LCFBG at the same time

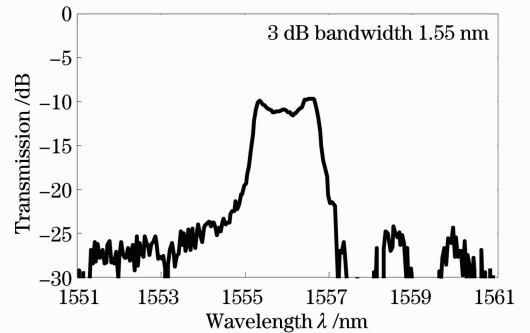


图 10 同时加热两个相邻区域时的透射峰光谱
Fig.10 Transmission spectrum for heating two adjacent regions at the same time

3.4 多波长滤波

由(6)式可知透射峰中心波长和被加热区域位置的对应关系,因此可以同时 LCFBG 加热两个或多个区域,实现双波长或多波长滤波。当同时加热两个区域,两加热区域间隔 ΔL 为 2.25 mm, L_1 和 L_2 都为 0.750 mm 时,两透射峰中心波长间隔约为 0.95 nm,实验结果如图 11 所示。如果两加热区域间距继续减小,两透射峰会相互干扰并逐渐合在一起;如果两加热区域间距继续增大,则波长间隔将大于 0.95 nm。两透射峰中心波长间隔与相应的两个相移点间距(即两个被加热区域中心的间距)有着简单的线性关系^[14]。通过程序控制被加热的区域的数目和间距,便可实现多波长及不同波长间隔的滤波。

由(6)式可以得到

$$\Delta y = -0.3212\Delta x, \quad (7)$$

式中 Δy 表示两透射峰中心波长间隔, Δx 表示两个被加热区域中心的间距。若两个被加热区域宽度都为 0.750 mm, 两者间距为 2.250 mm, 则此时 Δx 为 3.000 mm, 代入(7)式可以算出 $\Delta y = 0.9636$ nm。计算出的波长间隔和实际测量的波长间隔 0.95 nm 比较接近, 存在的偏差主要是由于目前实验装置的散热效果不佳, 热扩散导致被加热区域位置没有达到理想精度。

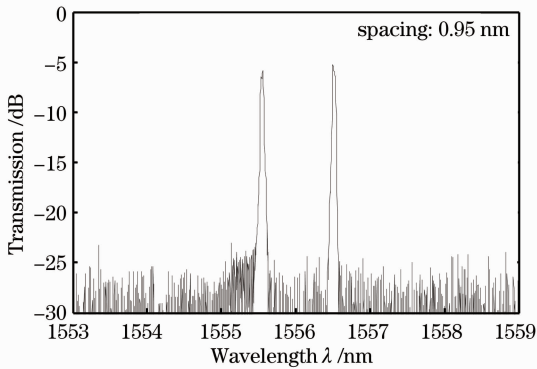


图 11 同时产生两个透射峰

Fig. 11 Two transmission peaks opened at the same time

3.5 带宽波长同时可调

为了实现不同透射带宽和不同波长间隔的多波长滤波效果, 同时对 LCFBG 三个区域加热, 三个加热区域的宽度分别为 3.000, 0.750, 0.750 mm。第一个加热区域与第二个加热区域间距为 8.000 mm, 第二个加热区域与第三个加热区域间距为 2.250 mm。产生的三个透射峰带宽分别约为 0.62, 0.07, 0.07 nm; 中心波长分别为 1552.04, 1555.55, 1556.50 nm, 实验结果如图 12 所示。通过程序控制这三个加热区域

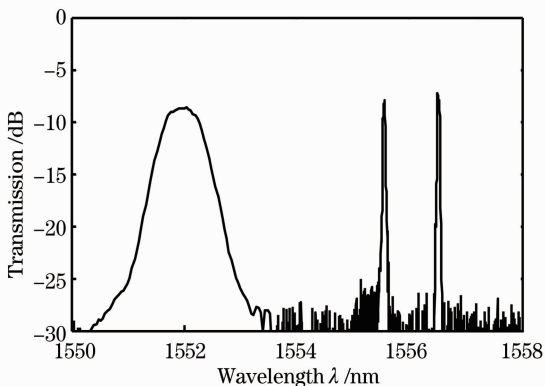


图 12 不同带宽、不同波长间隔的滤波

Fig. 12 Filtering of different bandwidths and different wavelength spacings

的位置变化, 三个透射峰中心波长随之发生改变, 透射峰间距亦可以随之改变。需要说明的是, 如果此三个加热区域的间距比以上值小, 三个透射峰之间会相互干扰。进一步改善实验装置的散热效果来降低热扩散的影响, 可以继续减小加热区域的间距而又避免各透射峰相互干扰, 进而减小透射峰的波长间隔。另外, 若减小第一个加热区域的加热宽度, 则可以缩小第一个透射峰的透射峰带宽, 还可以控制热打印头对 LCFBG 更多的区域同时加热, 实现更多通道的滤波。

对比图 4、图 11 和图 12 可知, 本滤波器可以根据需求实现不同数目透射峰的滤波。对比图 7 和图 12 可知, 本滤波器可以实现对透射峰带宽、透射峰数目、波长间隔的同时调谐。

4 结 论

本实验利用程控热打印头对 LCFBG 局部区域加热的方法, 设计出了透射峰中心波长、波长间隔、透射峰带宽及波长数量相对独立可调的可编程光纤光栅滤波器。相对于其他加热方式, 此种加热方法更灵活, 波长定位重复性能更好。该滤波器透射峰中心波长范围为 1547.44 ~ 1558.64 nm, 调谐宽度达 11.20 nm; 两透射峰中心波长间距最小为 0.95 nm; 透射峰 3 dB 带宽调谐范围为 0.07 ~ 1.55 nm。透射峰最大消光比约为 25 dB。可以根据需要, 实现透射带宽、透射波长、透射波长数量及波长间隔相对独立调谐的滤波。

进一步改善 LCFBG、热打印头和热沉之间的接触, 可以降低因热扩散引起的负面影响, 进而可以获得更好的滤波效果。另外, 本实验只是对热打印头所有加热单元的开启或关闭进行了统一控制, 还未实现对每个加热单元进行独立控制。如果能对每个加热单元进行独立控制, 可以给 LCFBG 提供更理想的温度场分布, 进而可以进一步提高此滤波器的性能。

参 考 文 献

- 1 Ngo N Q, Liu D, Tjin S C. Thermally switchable and discretely tunable comb filter with a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 2994-2996.
- 2 Raffaelli C, Savi M. Dynamic flexible grid optical networks: a traffic perspective [C]. *ICTON*, 2012. Tu. A1.3.
- 3 Sinefeld David, Marom Dan M. Flexible grid multi-line fiber ring laser with an intracavity filter using a phase LCoS modulator [C]. *OFC/NFOEC Technical Digest*, 2012. OW1C.6.
- 4 Chen X, Xian L, Ogusu K, *et al.*. Phase-shift induced in a high-channel-count fiber Bragg grating and its application to

- multiwavelength fiber ring laser [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(8): 498–500.
- 5 Liu D, Ngo N Q, Tjin S C. A reconfigurable multiwavelength fiber laser with switchable wavelength channels and tunable wavelength spacing [J]. Opt Commun, 2008, 281(18): 4715–4718.
- 6 Li S Y, Ngo N Q, Tjin S C. Thermally tunable narrow-bandpass filter based on a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. Opt Lett, 2004, 29(1): 29–31.
- 7 Ngo N Q, Li S Y, Binh N. A phase-shifted linearly chirped fiber Bragg grating with tunable bandwidth [J]. Opt Commun, 2006, 260(2): 438–441.
- 8 Sanjay Gupta, Toru Mizunami, Teruo Shimomura. Computer control of fiber Bragg grating spectral characteristics using a thermal head [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15 (10): 1925–1928.
- 9 Petermann I, Helmfrid S, Gunnarsson O, *et al.*. Tunable and programmable optical bandpass filter [J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2007, 9(11): 1057–1061.
- 10 Kang Yun. Investigations of Characteristics and Applications of Chirped and Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. 30–32.
- 康 赞. 啁啾相移光纤光栅的光谱特性分析及其应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 30–32.
- 11 Yi Honggang, Gong Xianfeng, Wang Changsong. Research on high-sensitivity fiber grating temperature sensors [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(8): 10–14.
- 衣红钢, 巩宪锋, 王长松. 高灵敏度光纤光栅温度传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(8): 10–14.
- 12 Sandgren S, Sahlgren B, Asseh A, *et al.*. Characterisation of Bragg gratings in fibers with the heat-scan technique [J]. Electron Lett, 1995, 31(8): 665–666.
- 13 Cai Lulu, Wu Fei, Wang Yutian. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2070–2075.
- 蔡璐璐, 吴 飞, 王玉田. 相移光纤光栅的反射谱特性分析[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2070–2075.
- 14 Chen Jinlin, Sun Junqiang, Xia Li, *et al.*. A phase-shifted chirped fiber Bragg grating with dual-wavelength transmission [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(7): 1776–1779.
- 陈金林, 孙军强, 夏 利, 等. 双波长啁啾相移光纤光栅[J]. 光子学报, 2009, 38(7): 1776–1779.

栏目编辑: 王晓琰