

基于变截面梁的光纤光栅线性无啁啾调谐

陈 超 赵建林* 李继锋

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 西安 710072)

摘 要 从理论上分析了利用变截面(等强度)弹性梁实现光纤光栅波长线性、无啁啾调谐的基本原理,给出了实现无啁啾波长调谐的弹性梁截面满足条件及其设计方案,并讨论了矩形等截面和变截面悬臂梁调谐方案的特点. 理论分析与实验结果均表明,通过对变截面梁侧向施加载荷,可以实现光纤光栅中心波长的线性无啁啾调谐,且系统结构简单、易于设计.

关键词 光纤光栅;调谐技术;弹性梁;啁啾

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

随着光纤光栅制作工艺的不断完善和发展,光纤光栅以其固有的特性在光纤通信、光纤传感等领域得到了广泛的应用. 根据不同的折射率调制及光谱特性,光纤光栅可以制作成滤波器、色散补偿器、解复用器以及光纤激光器的选频器等性能优良的无源器件. 一般情况下,光纤光栅应用于上述器件时均预先设定波长,这使得其应用的灵活性受到很大限制. 如果采用可调谐光纤光栅就可以较好地解决这一问题. 例如:在滤波器中,通过调谐光纤光栅可以选择滤出不同波长的光信号;在色散补偿器中,通过调谐可以补偿不同波长的色散量;在光纤激光器中,通过调谐可以使激光器输出不同波长的激光等等. 目前调谐光纤光栅的方法主要有压电陶瓷调谐^[1]、热调谐^[2]、电磁调谐^[3,4]、弹性梁调谐^[5~7]等. 压电陶瓷调谐属于非线性调谐;电磁调谐结构较复杂;要实现大调谐范围时,热调谐的实现与控制也极为复杂,难以满足实际要求;而基于弹性梁的调谐方式结构简单,易于调控,适合实际应用. 但采用等截面梁调谐时会引起光纤光栅产生啁啾现象. 文献^[6]曾报导了一种均质、等厚、等腰三角形悬臂梁可用于光纤光栅的线性无啁啾调谐,但没有给出用一般变截面弹性梁实现光纤光栅无啁啾调谐的原理,并且采用等腰三角形悬臂梁不利于在梁的自由端施加载荷. 本文讨论一般变截面(等强度)弹性梁实现无啁啾线性调谐的原理,给出实现无啁啾线性调谐时弹性梁截面设计应满足的条件及其设计方案,并从理论和实验两方面对矩形等截面和变截面悬臂梁调谐方案进行比较分析.

1 基于弹性梁的光纤光栅中心波长调谐原理

在恒温条件下,光纤光栅均匀轴向应变引起的中心波长变化为^[9]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left\{ -\frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12})\mu - P_{12}] - 1 \right\} |\epsilon_z| \quad (1)$$

对于纯熔融石英,其弹光系数 $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$,泊松比 $\mu = 0.17$,折射率 $n = 1.456$,则式(1)可简化为 $\Delta\lambda/\lambda = 0.78\epsilon$. 若对光纤光栅施以线性或非线形应变,则可实现对其反射中心波长的线性或非线形调谐. 因此可以将光纤光栅粘贴在弹性好的衬底材料上,通过对弹性梁施加横向应力(使弹性梁侧向弯曲产生微小形变)实现对光纤光栅中心波长的线性调谐.

1.1 等截面梁

根据材料力学原理,对于横截面为纵向对称结构的弹性梁(在纯弯曲假设情况下),距离中性轴为 y 处的纵向纤维的应变表达式为: $\epsilon = M_y/EI$. M 为该横截面上的弯矩, EI 为梁的抗弯刚度, E 为弹性模量, I 为横截面对中性轴的惯性矩.

图1简支梁结构中,弹性梁为矩形等截面结构,长度为 L ,横截面高度为 h ,宽度为 b . 光纤光栅粘贴在距离 A 点 x ($0 \leq x \leq L/2$)处的梁上表面(距离中性轴 $h/2$ 高度处),在中点 O 施加一载荷 P ,距离 A

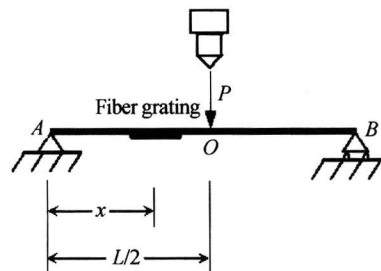


图1 简支梁调谐机构
Fig. 1 Schematic diagram of simplified beam tuning wavelength of fiber grating

* Tel: 029-88495724 Email: jlzha@nwpu.edu.cn
收稿日期: 2005-02-10

点 x 处的弯矩可表示为: $M(x) = Px/2$, 在 O 点产生的挠度可表示为: $f_s = -PL^3/48EI$. 由式可知, 载荷 P 在 O 点引起的位移 f_s 与梁的抗弯刚度有关, 即与梁的材料性质和形状有关. 此外, 施加载荷 P 与使 O 点位移 f_s 所引起的整个梁上产生的弯矩分布相同. 于是, 距离 A 点 x 处的应变表达式为

$$\epsilon(x)|_{\text{位移}} = \frac{-12f_s h x I_0}{L^3 I_x}, \epsilon(x)|_{\text{应力}} = \frac{Pxh}{4EI_x} \quad (2)$$

式中 I_0 为 O 点的惯性矩(常量), I_x 为考察点的惯性矩. 若采用等截面梁, I_x 是一常量; 若采用变截面梁, 则 I_x 为 x 的函数. 因光纤光栅很短, 在小挠度情况下, 在此范围内梁的各点曲率半径变化很小, 故光纤光栅长度方向上的应变可看作是均匀的. 由式(1)和式(2)可得位移和应力引起的波长调谐量分别为

$$\begin{aligned} \delta\lambda(x)|_{\text{位移}} &= \frac{-9.36f_s h x I_0}{L^3 I_x} \lambda, \\ \delta\lambda(x)|_{\text{应力}} &= \frac{0.19Pxh}{EI_x} \lambda \end{aligned} \quad (3)$$

图2 悬臂梁调谐装置中, 弹性梁的横截面形状、

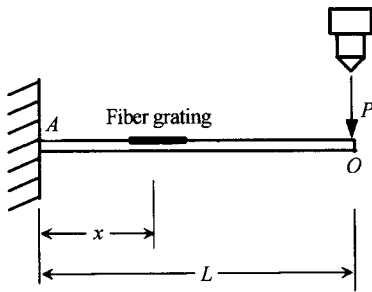


图2 悬臂梁调谐机构
Fig. 2 Structure schematic diagram of cantilever beam tuning wavelength of fiber grating

尺寸与图1相同, 光纤光栅粘贴在距离 A 点 x ($0 \leq x \leq L$) 处的梁上表面(距离中性轴 $h/2$ 高度处), 若在自由端 O 点施加一载荷 P , 距离 A 点 x 处的弯矩为: $M(x) = -P(L-x)$, 在 O 点产生的挠度可表示为: $f_c = -PL^3/3EI$. 距离 A 点 x 处的应变表达式分别为

$$\begin{aligned} \epsilon(x)|_{\text{位移}} &= \frac{3f_c h (L-x) I_0}{2L^3 I_x}, \\ \epsilon(x)|_{\text{应力}} &= \frac{-P(L-x)h}{2EI_x} \end{aligned} \quad (4)$$

同上假设, 在小挠度情况下, 对于悬臂梁结构, 位移和应力与波长调谐量的关系可近似表示为

$$\begin{aligned} \delta\lambda(x)|_{\text{位移}} &= \frac{1.17f_c h (L-x) I_0}{L^3 I_x} \lambda, \\ \delta\lambda(x)|_{\text{应力}} &= \frac{-0.39P(L-x)h}{EI_x} \lambda \end{aligned} \quad (5)$$

式中 I_0 为 O 点的惯性矩(常量), I_x 为考察点的惯性矩.

由式(3)和式(5)可知, 若在 O 点处施加一变化的压力或者位移, 在 x 处均能得到与之呈线性变化的应变.

1.2 变截面梁

由于实际光纤光栅具有一定长度, 在其长度方向上由弹性梁弯曲所施加的应变大小也是不均匀的, 故调谐时会引起光纤光栅的啁啾. 对波长调谐而言, 除了需要获得较大的波长调谐范围之外, 还需考虑调谐过程的啁啾度以及中心波长的稳定性等因素. 由应变表达式可知, 应变不均匀是因为载荷引起的弯矩与 x 有关, 导致等截面梁正应力也随 x 变化. 若要使调谐过程中不引起光纤光栅啁啾, 在设计弹性梁结构时应选取等强度梁. 这样可以保证在外力作用时, 弹性梁纵向方向上的正应力相等, 从而可以减弱波长调谐的啁啾度.

采用矩形截面梁时, 距离 A 点 x 处的惯性矩 $I_x = b(x)h(x)^3/12$, 应变 $\epsilon = 12M(x)y/Eb(x)h(x)^3$.

若要避免调谐引起啁啾现象的产生, 则必须使光纤光栅栅格间变化程度相同, 即在施加载荷时, 梁上沿 x 方向距离中性轴 y 处的应变应该均匀变化. 因此, 当矩形梁的横截面尺寸满足条件 $b(x)h(x)^3 \propto M(x)$ 时, 应变沿 x 方向变化是均匀的, 则此梁为等强度梁. 由此条件可知, 对于等强度梁, x 分别为 0 (简支梁)或者 L (悬臂梁)时, 其截面宽度或者截面高度等于零, 但在实际应用中不能满足剪切强度要求, 且不利于在悬臂梁自由端施加载荷, 因而需要按照剪切强度条件^[9]分别改进简支梁两端和悬臂梁自由端的宽度或者高度. 改进后的变宽度和变高度的等强度矩形简支梁可以设计成图3或图4结构, 图中 b_{\min} 和 h_{\min} 分别为根据剪应力强度条件计算得到

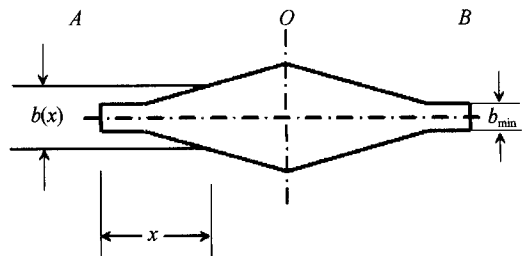


图3 变宽度简支梁
Fig. 3 Variational width simple beam

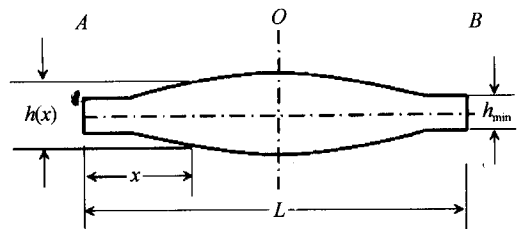


图4 变高度简支梁
Fig. 4 Variational height simple beam

的最小截面宽度和高度. 相应的等强度悬臂梁结构即为简支梁的一半.

简支梁和悬臂梁上应变分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \begin{cases} \frac{24f_s b_0 x y}{L^3 b(x)} & (\text{变宽度}) \\ \frac{24f_s h_0^3 x y}{L^3 h(x)^3} & (\text{变高度}) \end{cases} \\ \epsilon_c &= \begin{cases} \frac{3f_c b_{\min}(L-x)y}{L^3 b(x)} & (\text{变宽度}) \\ \frac{3f_c h_{\min}^3(L-x)y}{L^3 h(x)^3} & (\text{变高度}) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 b_0, h_0 分别为简支梁上载荷作用点的宽度和高度.

故对于宽度变化的等强度梁(等高度), 其宽度应满足

$$b(x) = \begin{cases} kb_0 x & (\text{简支梁}) \\ kb_{\min}(L-x) & (\text{悬臂梁}) \end{cases} \quad (7)$$

对于高度变化的等强度梁(等宽度), 其高度应满足

$$h(x) = \begin{cases} kh_0 x^{1/3} & (\text{简支梁}) \\ kh_{\min}(L-x)^{1/3} & (\text{悬臂梁}) \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、(8)中的 k 值为实数, 与悬臂梁形状有关, 可根据实际需要波长调谐量以及调谐灵敏度选择不同的 k 值. 对于变宽度的等强度梁, 若要实现无啁啾调谐, 光纤光栅可贴在梁的上下表面($y=h/2$)或者侧面($0 < y < h/2$)均可, 但必须与纵向对称面平行; 对于变高度的等强度梁, 因为上下表面非平面, 此时光纤光栅只能贴在梁的侧面上与中性轴平行的位置($0 < y < h/2$)才能实现无啁啾调谐. 因此, 变宽度梁具有粘贴位置相对灵活的特点, 在工程中应用较多.

2 模拟分析

假设梁的长度 $L=100$ mm, 厚度 $h=10$ mm, 光纤光栅的中心波长 λ 为 1550 nm, 施加载荷能得到的最小可控制位移量为 0.01 mm.

图 5 和图 6 分别表示采用等矩形截面简支梁调

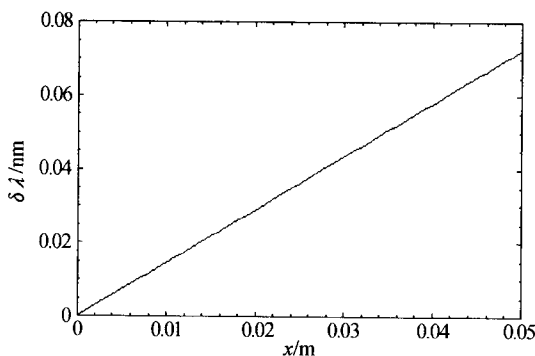


图 5 简支梁调谐灵敏度与光栅位置的关系
Fig. 5 The tuning sensitivity of simple beam vs the position of fiber grating

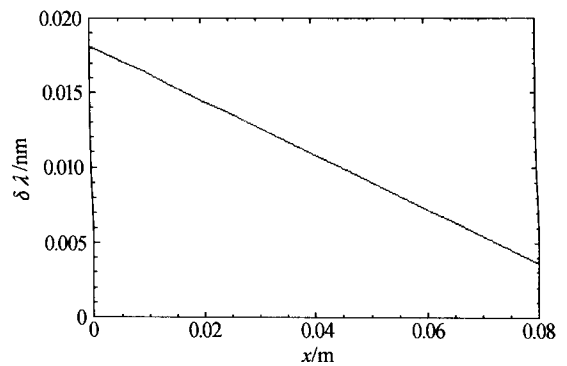


图 6 悬臂梁调谐灵敏度与光栅位置的关系
Fig. 6 The tuning sensitivity of cantilever beam vs the position of fiber grating

谐和悬臂梁调谐时调谐灵敏度与位置的关系. 由图 5 可知, 对于采用简支梁调谐, 若要实现较大的波长调谐量, 光纤光栅应贴在离固定端(A 点)较远处; 若要高的波长调谐灵敏度, 光纤光栅应贴在离中点(O 点)较远处. 由图 6 可知, 对于采用悬臂梁调谐, 若要实现较大的波长调谐量, 光纤光栅应贴在离固定端(A 点)较近处; 若要实现高的波长调谐灵敏度, 光纤光栅则应贴在离自由端(O 点)较近处. 此外, 同样条件下, 悬臂梁比简支梁调谐灵敏度高; 简支梁比悬臂梁调谐幅度大.

按图 2, 将光纤光栅贴在矩形等截面悬臂梁上表面离 A 点 40 mm 处, 此时其波长调谐灵敏度为 0.011 nm, 施加载荷使 O 点分别产生位移 1 mm、2 mm、5 mm、8 mm. 利用传输矩阵法计算可以得出如图 7 的反射光谱图. 可以看出, 随着挠度增大, 中心波长发生了漂移, 且与外加载荷成线性关系. 在小挠度情况下, 光纤光栅啁啾不明显, 因此在小调谐范围内, 等截面梁也可近似作准无啁啾调谐. 但在较大位移下, 调谐过程中引起的光纤光栅啁啾使反射谱带宽展宽, 反射功率峰值下降. 图 8 为同样条件下, 采用梁宽度 $b(x)=2b_{\min}(1-x/L)$ 的悬臂梁调谐得到的反射光谱图. 从图中可以看出, 变截面梁

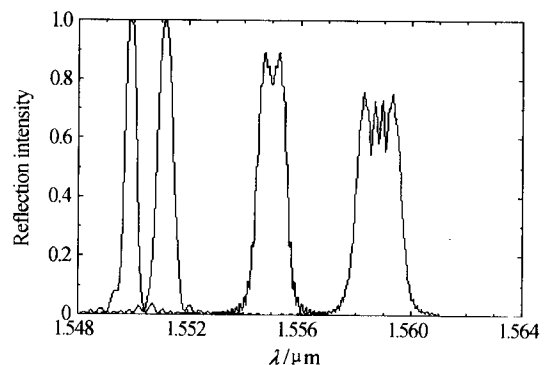


图 7 等截面悬臂梁调谐时的反射谱
Fig. 7 The reflective spectra of fiber grating using identical section cantilever beam with $f_0=1$ mm, 2 mm, 5 mm, 8 mm, respectively

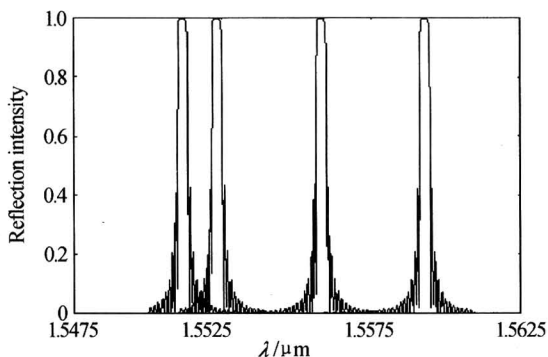


图 8 变截面悬臂梁调谐时的反射谱
Fig. 8 The reflective spectra of fiber grating using cantilever beam with $b(x)=2b_{\min}(1-x/L)$, when $f_0=1$ mm, 2 mm, 5 mm, 8 mm, respectively

调谐没有引起光纤光栅的啁啾。因此若要在较大调谐范围内实现无啁啾调谐,应尽量采用变截面等强度梁。

3 实验验证

根据前面的理论分析,悬臂梁结构实质为简支梁的一半,二者调谐原理相同。利用图 9 调谐机构在悬臂梁自由端施加载荷,其中加力螺杆为一螺旋测微器,其在自由端可施加的最小可控制位移量为 0.01 mm。实验中所用悬臂梁均由有机玻璃制成,其中等截面梁长度 $L=120$ mm,宽度 $b=20$ mm,厚度 $h=3$ mm;变截面梁结构如图 10,其长度 $L=120$ mm,固定端宽度为 $b_{\max}=25$ mm,自由端宽度为 $b_{\min}=5$ mm, $h=8$ mm。用高性能丙烯酸酯结构胶粘剂将光纤光

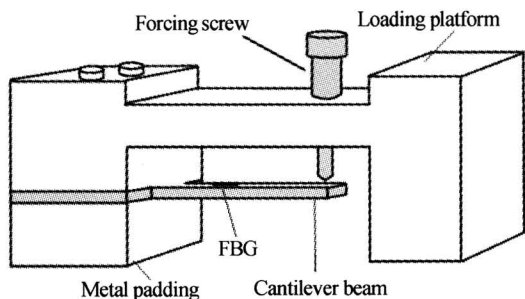


图 9 悬臂梁载荷施加平台
Fig. 9 Loading platform which imposing pressure on cantilever beam

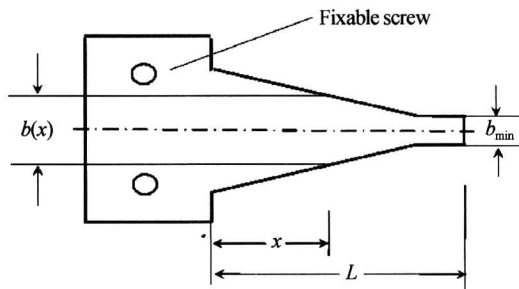


图 10 实验中采用的变宽度悬臂梁
Fig. 10 Variational width cantilever beam used in the experiment

栅粘贴在距梁自由端 80 mm 处,宽带光源发出的宽带光谱经 3 dB 耦合器进入光纤光栅,经光纤光栅反射回来再经过 3 dB 耦合器接入分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪(AQ6317C)进行频谱检测。

等截面梁与变截面梁上粘贴的光纤光栅中心波长分别为 1549.190 nm 和 1560.245 nm,3 dB 带宽分别为 0.273 nm 和 0.177 nm,中心波长随自由端挠度变化的实验曲线如图 11,图中方形点对应等截面梁的测量结果,三角形点对应变截面梁的测量结果,实线为拟合结果。等截面梁拟合的直线方程为 $\lambda=0.259f+1549.000$,即挠度灵敏度实验值为 0.259 nm/mm,线性拟和度为 99.9%。由式(5)可以计算出波长与挠度的理论关系式为 $\lambda=0.252f+1549.000$,即挠度灵敏度理论值为 0.252 nm/mm,将两者比较,可以发现实验值与理论值吻合得很好。变截面梁实际测得的挠度灵敏度实验值为 0.242 nm/mm,同理,由式(5)可以求得变截面梁的挠度灵敏度理论值为 0.230 nm/mm。由此可知,变截面梁挠度调谐的灵敏度实验值和理论值也很接近。以上分析表明,二者中心波长与自由端挠度均呈现良好的线性关系。实验中,通过在自由端施加载荷可以使光纤光栅波长调谐范围达到 2 nm,但超过一定范围可能损坏悬臂梁。由于有机玻璃的弹性模量较小,要在相同挠度下产生大的应变,即要获得大的波长调谐范围,必须增加其厚度或者贴在距离固定端较近处。图 12 为两种悬臂梁调谐过程中带宽随挠度变化的实验曲线(正方形对应等截面梁,三角形对应变截面梁,实线为拟合结果),由图可以看出,采用变截面梁时,在调谐过程中带宽基本没有变化,即没有引起光纤光栅的啁啾;而采用等截面梁时,带宽随外加载荷递增。实验发现,当等截面梁上粘贴的光纤光栅中心波长变化范围从 0 到 0.5 nm 时,反射带宽变化小于 0.01 nm,与光谱仪的分辨率相当。说明在小的调谐范围内,采用等截面悬臂梁的调谐过程

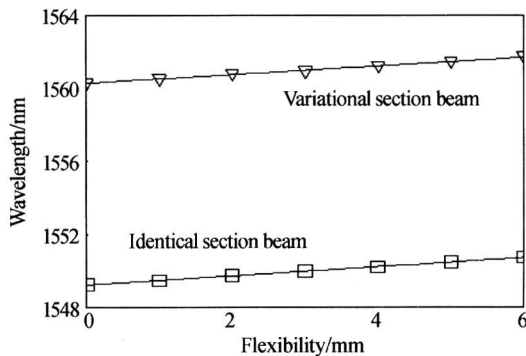


图 11 波长随挠度变化的实验曲线
Fig. 11 Experimental results of the relationship between wavelength and the tuning flexibility

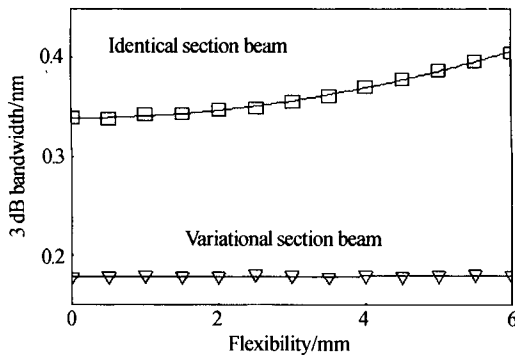


图 12 带宽随挠度变化的实验曲线

Fig. 12 Experimental results of the relationship between the 3 dB bandwidth and the tuning flexibility

可以近似看成是无啁啾的,但当调谐范围大于 0.5 nm 时,带宽明显变宽.重复实验发现,相同条件下,同一挠度对应的测量波长及带宽值变化小于光谱仪的分辨率,说明变截面悬臂梁结构重复性很好.因此,采用等截面梁结构调谐时,在小挠度情况下,光纤光栅啁啾不明显,但在较大调谐范围下,调谐过程中引起的光纤光栅啁啾将使反射谱带宽展宽,反射功率峰值下降.

4 结论

本文从理论上分析了利用变截面弹性梁实现光纤光栅波长线性和无啁啾调谐的基本原理,并详细分析了等截面与变截面悬臂梁调谐技术的特点,给出了无啁啾波长调谐的弹性梁截面满足条件及其设计方案,并利用自行设计的调谐装置进行了实验验证,实验结果与理论分析一致.在全光分/插复用器(OADM)系统中,光纤光栅反射谱的带宽增加会引起信道间的串扰,使传输信号失真.在传感器中作为可调谐滤波器时,带宽增加也会直接影响测量结果的准确性.因此无论是在光通信领域还是在传感领域,线性无啁啾调谐技术都有着重要的意义.基于变截面梁的光纤光栅波长调谐技术,因其结构简单、易于设计和实现且准无啁啾、复用性好等优点,在工程实际应用中将发挥重要的作用.

参考文献

- 1 谢芳,张书练,李岩,等. 光纤光栅传感器的波长检测系统及其理论分析. 光学学报, 2002, 2(6): 726~730
Xie F, Zhang S L, Li Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(6): 726~730
- 2 Lauzon J, Thibault S, Martin J, et al. Implementation and characterization of fiber bragg gratings linearly chirped by temperature gradient. *Opt Lett*, 1994, 19(23): 2027~2029
- 3 Cruz J L, Diez A, Andres M V, et al. Fiber bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields. *Electron Lett*, 1997, 33(3): 235~236
- 4 赵岭,蔡海文,李琳,等. 光纤光栅电磁调谐技术的研究. 中国激光, 2002, 29(4): 313~316
Zhao L, Cai H W, Li L, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(4): 313~316
- 5 Qin Zixiong, Zeng Qingke, Yang Xiang, et al. Bidirectional grating wavelength shifter with a broad-range tunability by using a beam of uniform strength. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(4): 326~328
- 6 余有龙,刘志国,董孝义,等. 用于光纤光栅线形调谐的悬臂梁结构优化. 光子学报, 1998, 27(8): 714~718
Yu Y L, Liu Z G, Dong X Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(8): 714~718
- 7 柳春郁,余有龙,张昕明,等. 基于悬臂梁调谐技术的光纤光栅无源振动监测. 光子学报, 2003, 32(9): 1067~1069
Liu C Y, Yu Y L, Zhang X M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1067~1069
- 8 廖延彪. 光纤光学. 北京: 清华大学出版社, 2000. 197~204
Liao Y B. *Fiber Optics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 197~204
- 9 刘鸿文. 材料力学(上册). 北京: 高等教育出版社, 1992. 196~199
Liu H W. *Mechanics of Materials*. Beijing: Higher Education Press, 1992. 196~199

Linear Tuning of Fiber Grating Wavelength Based on Variational Section Beam Without chirp Effect

Chen Chao, Zhao Jianlin, Li Jifeng

*Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*

Received date: 2005-02-16

Abstract The basic linear tuning principle of fiber grating wavelength without chirp effect using variational section beam with uniform intensity is theoretically analyzed in this paper. Three kinds of basic design scheme of variational section beam and the condition that the elastic beam section as tuning device of the wavelength of fiber grating without chirp effect must satisfy are presented. The characteristics of the tuning technologies using cantilever beam based on identical section and variational section are discussed. It is shown that by bring lateral load to bear on simple beam and cantilever beam a linear tuning of fiber gating wavelength without chirp effect can be realized, and the setup is simple in structure and easy to design.

Keywords Fiber grating; Tuning technologies; Elastic beam; Chirp effect



Chen Chao was born in 1980, in Chongqing. He received the B. S. degree in 2002 from School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University. He is presently pursuing the M. S degree of Optics Engineering in the Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, in the same University. His research interests are tunable fiber grating devices and fiber grating sensors.