

文章编号: 0253-2239(2001)12-1421-05

大调谐范围的等强度梁光纤光栅波长调节器^{*}

秦子雄¹⁾²⁾ 曾庆科¹⁾²⁾ 项 阳¹⁾ 冯德军¹⁾ 袁树忠¹⁾ 开桂云¹⁾

刘志国¹⁾ 董孝义¹⁾

(1), 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(2), 广西师范大学物理系, 桂林 541004

摘要: 利用等强度梁原理, 实现了光栅中心波长双向无啁啾调谐, 调谐量可达 12.52 nm。实验结果与理论分析一致。装置构形简单, 成本低, 易于定标和操作, 已在自制的可调谐激光器、传感网络中的寻址器以及分插复用器中获得诸多应用。

关键词: 光纤光栅; 等强度梁; 无啁啾调谐

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

自从发现单模光纤中光敏性并制造出了光纤光栅以来, 制造技术不断改进和发展, 现已可制造各种参数的光纤光栅。由于光纤光栅与光纤的相容性、无源、相对易于制造和各种参数易于调整, 已经获得了广泛的应用——从波长的定义和信号的路由到噪声的减少及光谱的滤波^[1]。光纤光栅中心波长的大范围调谐是极为迫切需要的。例如, 在波长分插复用器中, 为了在掺铒光纤放大器增益带宽内尽可能上下载更多的不同频道的信号^[2], 这就要求光栅中心波长的调节范围尽可能地在其弹性范围内增大, 以便尽可能多地覆盖掺铒光纤放大器的增益区或通过几个上下载光栅达到此目标。本文提出的原理和实际实现的方法, 不仅适用于分插复用器, 而且对光纤光栅色散补偿器、掺铒光纤放大器的增益平衡器、可调谐激光器以及传感领域都具有重要的意义。

目前, 光纤光栅中心波长的调谐方法主要有两种——温度和应力的方法。其它如利用压强、声波等方法都不成熟或调谐范围很小。由于光纤光栅波长的温度漂移系数很小($\sim 1.2 \times 10^{-2}$ nm/°C, $\lambda = 1550$ nm), 直接用温度的方法来大范围调谐光纤光栅中心波长是不可行的。光纤在应力下的良好性质($\sim 1.2 \times 10^{-2}$ nm/ μe , $\lambda = 1550$ nm), 使得人们可以

将各种外界的变化转换为光纤的应力变化而达到波长调谐的目的, 例如利用温度^[3]、磁场^[4]、压电陶瓷^[5,6]、机械应力^[7]的方法。在文献[3]中, Cruz 等人利用具有大的热膨胀系数的高分子材料作为光纤光栅的衬底, 在 0 °C ~ 100 °C 的范围内获得了 15 nm 光栅中心波长的调谐范围。Cruz 等人在文献[4]中, 报道了利用在磁场(10³ mT)中磁致伸缩材料的伸长获得光栅中心波长 1.1 nm 的移动。文献[6]利用压电陶瓷的伸长分别获得光栅中心波长 1.2 nm(1.2 nm/100 V)和 2.4 nm(2.4 nm/100 V)的移动。文献[6,7]分别利用压电陶瓷和机械的方法, 使光栅处于压缩状态, 但不弯曲, 分别取得了较大的光栅中心波长移动: 15 nm 和 32 nm。但两实验中均涉及复杂、昂贵的仪器。文献[8]主要涉及波长的稳定, 文献[9]报道了 5.02 nm 的调谐范围, 文献[10]中的无啁啾调谐可达 5 nm ~ 6 nm。在文献[11]中, 光栅中心波长的调谐可达 3 nm ~ 4 nm。温度调谐的方法本质上是慢的, 系统达到热平衡需要一定时间(秒的数量级或更大), 从文献[5,6]中可看出, 利用压电陶瓷使光栅伸长或压缩, 要获得大的波长调谐范围, 需要高电压, 而压缩的方法^[6,7]将涉及复杂昂贵的仪器。国内的无啁啾调谐量还不够大, 国外正在考虑各种无啁啾调谐方法以期获得更大的调谐范围。而且除文献[10]的方法之外, 中心波长的调谐都是单向调谐(使光栅拉伸或压缩)。本文将提出一种双向大范围、无啁啾调谐的简易方法。由于其原理简明、构形简单, 可望在实际中获得广泛的应用。

^{*} 国家高科技“863”计划基金(863-307-15)、天津自然科学基金(003600811)、中国博士后科学基金、华为基金资助课题。

收稿日期: 2000-11-09; 收到修改稿日期: 2001-03-05

2 实用化的等强度梁原理

利用棱柱形悬臂梁^[10,12]易于获得较大的光栅中心波长调谐,然而由于此类悬臂梁轴向应力沿梁轴向的变化是线性的,波长调谐过程本质上是啁啾的。在通信系统中,迫切需要光栅的无啁啾调谐,以避免由于光栅中心波长调谐所引起的系统恶化。

众所周知^[13],梁受横向载荷作用时,各个截面产生不同的弯矩。为了使各个截面的弯曲应力相同,则应随着弯矩的大小相应地改变截面尺寸,以保持相同强度的梁,这种梁称为等强度梁。在工程上,这样不但可节约材料,而且可减轻梁的重量。

2.1 自由端受集中载荷作用的矩形截面悬臂梁

如图 1 所示宽度为 b 、厚度为 h 的矩形截面梁,其截面模量为 $S = bh^2/6$,距自由端为 Z 的任意截面的弯矩为 $M = PZ$,设材料的拉伸和压缩强度相同,则任意截面的最大弯曲应力(在梁的表面上)为

$$\sigma = PZ/S = 6PZ/(bh^2). \quad (1)$$

如令上式的 σ 为常量,则为等强度梁。这可以通过变化 b 或 h 来实现,也可以同时变化 b 和 h 获得。当 h 变化时,一方面难于加工;另一方面重要的是,在梁的表面上,将会出现剪应力。

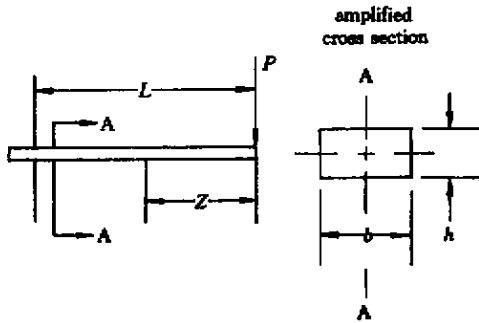


Fig.1 The rectangular cross sections of a cantilever

从我们的实际应用出发,只考虑宽度变化所形成的等强度梁(如图 2 所示)。在此种情况下,在梁的下表面上的轴向应变为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = -\frac{6P}{Eh^2} \frac{L}{b_2 - b_1} \frac{Z}{Lb_1 \kappa(b_2 - b_1) + Z} = -\frac{hV_{\max}}{2CL^2} \frac{Z}{Lb_1 \kappa(b_2 - b_1) + Z}, \quad (2)$$

$$V_{\max} = \frac{12P}{Eh^2} \frac{L^3 C}{b_2 - b_1}, \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{b_2 + b_1}{b_2 - b_1} - \frac{2b_1}{b_2 - b_1} + \left(\frac{b_1}{b_2 - b_1} \right)^2 \ln \frac{b_2}{b_1}, \quad (4)$$

式中 E 为梁的杨氏模量; C 是一常数,与 b_2 和 b_1 之

比($N = b_2/b_1$)有关; V_{\max} 是等强度梁自由端的挠度,可通过面积矩法计算获得。显然,当 $b_1 = 0$ 时,梁是严格意义上的等强度梁。然而,从实际应用的角度考虑, b_1 必须有一定的大小,从而具有一定的受力强度。只要 $N = b_2/b_1$ 较大,等强度梁近似成立。

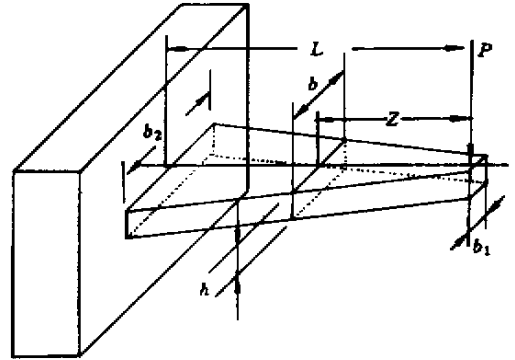


Fig.2 A cantilever of uniform strength loaded at the free end, with a constant height

2.2 受集中载荷作用的矩形截面简支梁

如图 3 所示,集中载荷 P 作用于距支点 A 为 l_1 的 C 点时,在 A 点右侧距离为 Z ($Z \leq l_1$) 的截面上的弯矩为 $M = R_1 Z = [(L - l_1)/L]PZ$ 。这和长度为 l_1 的悬臂梁自由端受集中载荷 R_1 作用时任意截面的弯矩相同,故可用考虑等强度悬臂梁时的方法, CB 之间也同样考虑,并在 C 点将它们结合在一起。

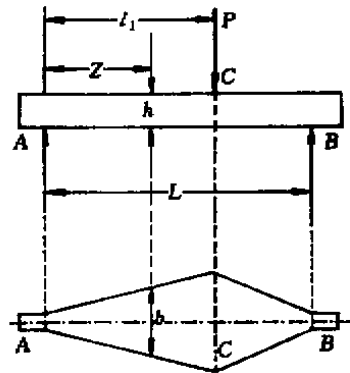


Fig.3 A simple supported beam of uniform strength with constant height and a concentrated load

3 实验结果及分析

3.1 等强度梁应力分布实验

光栅在等强度梁上的分布示于图 4。梁的参数为: $h = 8.00 \text{ mm}$, $L = 141.00 \text{ mm}$, $b_2 = 20.10 \text{ mm}$, $b_1 = 3.40 \text{ mm}$ 。光栅分三组放置,分别粘接于梁的表面上,离梁自由端的距离分别为 $Z = 114.00 \text{ mm}$ 、 104.00 mm 和 84.00 mm 。前两组光栅之间沿梁表

面横向的距离为 3 mm,第三组光栅距对称线的横向距离也为 3 mm。以此实验来验证等强度梁中各处应变的均匀性。

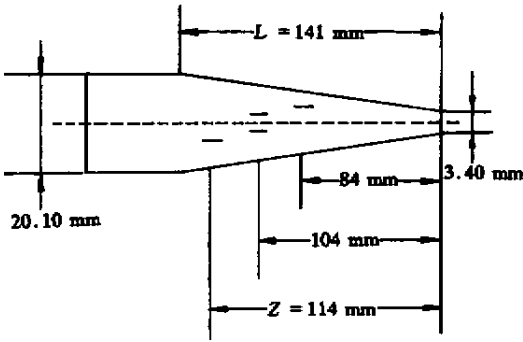


Fig. 4 The distribution diagram of gratings

在载荷作用下,光栅中心波长移动,从(2)式可知:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - \mu)\epsilon = -K(1 - \mu) \frac{hV_{\max}}{2CL^2} \frac{Z}{Lb_1(Kb_2 - b_1) + Z} \quad (5)$$

上式中 μ 为光纤的光弹系数,约为 0.22。实验中,对应于不同光栅中心波长 λ ,可以测量出对应于不同挠度 V_{\max} 的中心波长移动,如表 1 所示。对于不同的 Z 的 $\Delta\lambda/\lambda$ 可作成图 5 来表示。图中实验点由 $\Delta\lambda/\lambda$ 确定,理论曲线由(5)式右边表示。

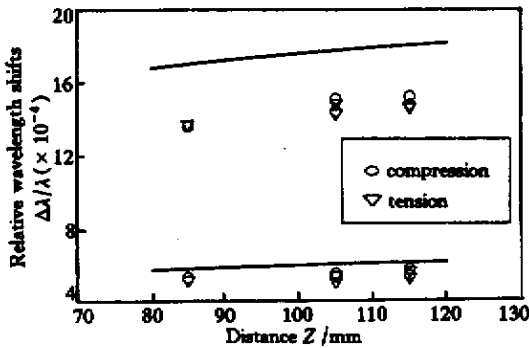


Fig. 5 The relative wavelength shifts of gratings for different deflections of a beam of uniform strength

表 1 对应于不同挠度的光栅中心波长移动,表中(a)(b)分别表示光栅的拉伸和压缩。

实验中,光栅在不同挠度下,中心波长理论移动量与实验值之间有着明显的差异。这可能是由于光纤、粘接剂以及梁并非同一种材料,其间连接不为刚性连接之故。但实验数据变化趋势与理论值所预测趋势一致,这才是真正重要的。实际使用时,引入一描述光纤光栅、粘接剂及梁之间的非刚性连接程度

的修正系数即可。从而,如图 4 所示的等强度梁的理论分析与实验基本一致。表 1 中同一光栅的某些中心波长有微小差异,这是由于光栅对温度的变化。实验时,故意安排同时或不同时间对光栅进行测量,以测试光栅波长调谐器的稳定性能。实验中,不同光栅反射谱的 3 dB 带宽基本上无变化(数量级在 10^{-2} nm)。

Table 1. The central wavelength shift of gratings for different deflections. (a) Tention; (b) Compression

	(a)		(b)	
V_{\max}/mm	-1.70	-5.00	1.70	5.00
$\Delta\lambda_1/\text{nm}$	0.88	2.30	-0.90	-2.38
λ_1/nm	1557.68	1557.52	1557.68	1557.46
$\Delta\lambda_2/\text{nm}$	0.82	2.28	-0.84	-2.30
λ_2/nm	1553.38	1553.38	1553.38	1553.38
$\Delta\lambda_3/\text{nm}$	0.84	2.32	-0.86	-2.36
λ_3/nm	1558.30	1558.30	1558.30	1558.30
$\Delta\lambda_4/\text{nm}$	0.78	2.22	-0.82	-2.24
λ_4/nm	1548.24	1548.46	1548.24	1548.36
$\Delta\lambda_5/\text{nm}$	0.80	2.14	-0.82	-2.12
λ_5/nm	1552.14	1552.14	1552.08	1552.08

3.2 大调谐范围的等强度梁

为获得更大调谐范围的等强度梁,从(5)式可知,应使梁的长度 L 变小。为了保持光栅中心波长的无啁啾调谐,理论和实验都要求 $N = b_2/b_1$ 较大。实验中, $b_2 = 29.90$ mm, $b_1 = 2.20$ mm, $L = 74.00$ mm, $h = 8.30$ mm,光栅粘接于梁的对称线上, $Z = 60.00$ mm。图 6 表示的是在不同挠度 V_{\max} 下, $\lambda_0 = 1551.82$ nm 光栅的中心波长移动。图 7 和图 8 分别表示在不同挠度 V_{\max} 下,光栅中心波长和光栅反射光谱的 3 dB 带宽的变化。

图 6 表明,光栅中心波长可以双向(拉伸和压缩)调谐,波长调谐量可达 $\Delta\lambda_0 = 12.52$ nm。进一步的梁的材料和粘接剂的适当选择,可望获得更大的波长调谐范围。理论分析表明,图 2 所示的等强度梁获得更大波长双向调谐(例如 $\Delta\lambda > 35$ nm),理论上唯一的限制是光纤光栅的拉伸强度。但考虑到光纤压缩强度是拉伸时的 23 倍,这一限制,对于 35 nm 的波长调谐,当波长调谐方法采用压缩方法时,光纤光栅强度将不受限制。图 7 表明,光栅中心波长与挠度 V_{\max} 之间基本上是线性的,有利于仪器的定标和操作。图 7 中, y 表示波长, x 表示挠度, R 表示拟合度。可看出直线斜率为 1.12 nm/mm,即每毫米挠度变化引起 1.12 nm 的光栅中心波长

变化。对于不同结构的等强度梁有着与图 7 类似的直线,但斜率将会不同。从而对于不同波长调谐范围的要求,有着采用不同长度梁的优选性。

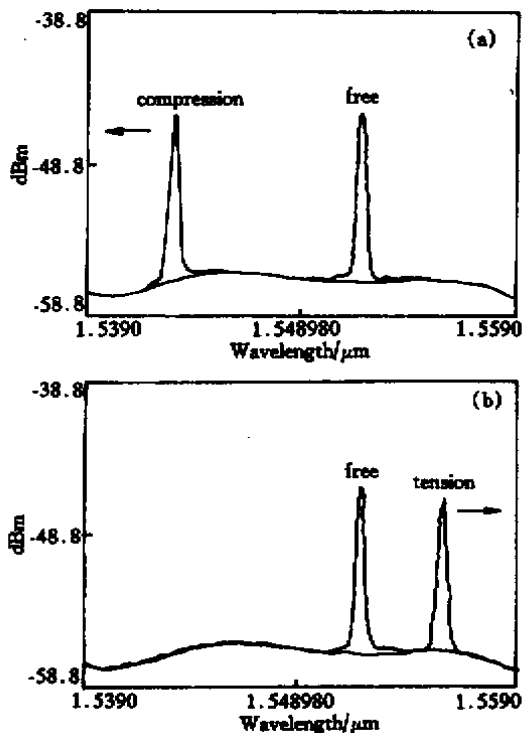


Fig. 6 The relative wavelength shifts of a grating for different deflections of a beam of uniform strength. (a) Compression: $V_{\max} = 7.5 \text{ mm}$, $\Delta\lambda = 8.72 \text{ nm}$; (b) tension: $V_{\max} = -3.3 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 3.8 \text{ nm}$

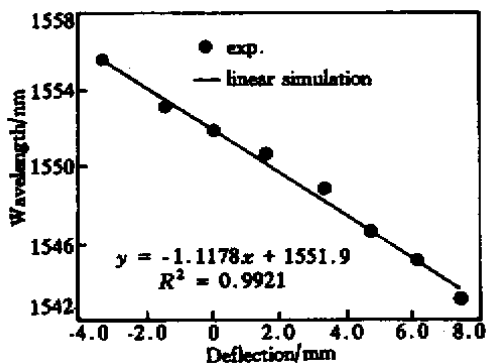


Fig. 7 The relation between the grating center wavelength and the deflection of the beam of uniform strength

图 8 中 y' 表示 3 dB 带宽, x 表示挠度。图中反映了光栅反射谱 3 dB 带宽并无大的变化。大致趋势是随着等强度梁挠度的增加, 3 dB 带宽也稍稍增加, 数量级在 10^{-2} nm 。我们也对图 3 所示的等强度梁进行了实验, 所获得的结果基本与理论一致, 不再赘述。以上所描述的两种类型的等强度梁已经在我们实验室自制的可调谐激光器、传感网络中的寻址器和分插复用器^[14, 15, 2]中获得了成功的应用。

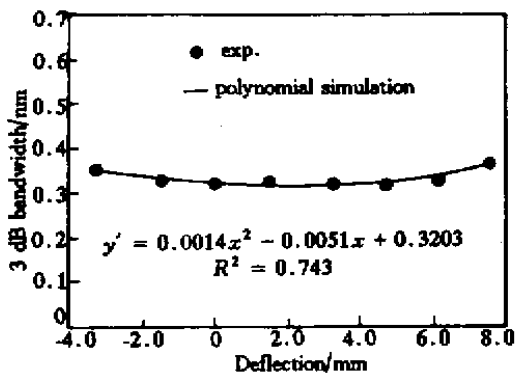


Fig. 8 3 dB bandwidth of the grating reflection spectra versus the deflection of the beam of uniform strength

结论 利用等强度梁原理, 实现光栅中心波长双向无啁啾调谐, 调谐量可达 12.52 nm。装置构形简单, 成本费用低, 易于定标和操作, 已经在我们实验室自制的可调谐激光器、传感网络中的寻址器和分插复用器中获得了成功的应用。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(8):1263~1276
- [2] 秦子雄, 曾庆科, 冯德军等. 光网络中光纤光栅构成的波长分插复用器理论及进展. *物理学进展*, 2000, 20(2):182~197
- [3] Cruz J L, Dong L, Reekie L. Improved thermal sensitivity of fibre Bragg gratings using a polymer overlayer. *Electron. Lett.*, 1996, 32(4):385~386
- [4] 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
- [5] Kim S Y, Lee S B, Kwon S W et al.. Channel-switching active add/drop multiplexer with tunable gratings. *Electron. Lett.*, 1998, 34(1):104~105
- [6] Iocco A, Limberger H G, Salathe R P. Bragg grating fast tunable filter. *Electron. Lett.*, 1997, 33(25):2147~2148
- [7] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(23):1979~1981
- [8] 蒋英, 庞翠珠, 陈根祥等. 光纤光栅布拉格波长随温度和应力的变化特性及其补偿. *光通信技术*, 1999, 23(3):213~216
- [9] 郭威, 刘凯, 黄永清等. 光纤光栅布拉格波长调谐特性的研究. *光通信技术*, 1999, 24(3):217~219
- [10] 刘志国, 张艺兵, 开桂云等. 新型光纤光栅线性调谐方法. *光学学报*, 1998, 18(12):1731~1734
- [11] 秦子雄, 杜卫冲, 曾庆科等. 使用色散可调啁啾光纤光栅在常规单模光纤中实现超过 100 km, 10 Gb/s 的传输. *中国科学(A)*, 1999, 29(7):662~666
- [12] 余有龙, 刘志国, 董孝义等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐. *光学学报*, 1999, 19(5):621~625

- [13] Gere J M , Timoshenko S P. *Mechanics of Materials* . New York :Chapman and Hall , 1991 , Chapter 4
- [14] 葛春风 , 赵东晖 , 刘志国 等 . 可调谐环形腔光纤光栅激光器 . 光学学报 , 1999 , 19 (6) : 762 ~ 765
- [15] 刘志国 , 张艺兵 , 王 江 等 . 可编程波长选择与扫描全光纤行波环形腔激光器 . 中国激光 , 1999 , A26 (9) : 777 ~ 780

Grating Wavelength Shifter with a Broad-Range Tunability by Using a Beam of Uniform Strength

Qin Zixiong¹⁾²⁾ Zeng Qingke¹⁾²⁾ Xiang Yang¹⁾ Feng Dejun¹⁾ Yuan Shuzhong¹⁾
Kai Guiyun¹⁾ Liu Zhiguo¹⁾ Dong Xiaoyi¹⁾

(1) , *Institute of Modern Optics , Nankai University , Tianjin 300071*)

(2) , *Physics Department , Guangxi Normal University , Guilin 541004*)

(Received 9 November 2000 ; revised 5 March 2001)

Abstract : By using a beam of uniform strength , bi-directional chirp-free tuning of center wavelengths of the fiber grating is realized , and the tuning range up to 12.52 nm is obtained. The experimental results accord well with the theoretical analyses. The beam of uniform strength is simple in configuration , low cost and is easy to be operated. It has been used in our homemade tunable fiber lasers , sensors and add/drop multiplexers etc. .

Key words : fiber Bragg grating ; beam of uniform strength ; chirp-free broad tuning