

# 光纤光栅反射谱对非均匀应变的展宽响应\*

苑立波

(哈尔滨工程大学物理部, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 光纤布拉格光栅在非均匀应力场作用下, 其纤芯折射率及光栅栅距都将产生非均匀变化。本文给出了光纤光栅与非均匀应变场的相互作用模型, 建立了反射谱对非均匀应变的响应关系, 并给出了线性应力场的实验结果。

**关键词** 光纤, 光纤布格光栅, 应力, 应变, 反射光谱, 响应函数。

## 1 引 言

光纤光栅是通过改变光纤芯区折射率, 产生小的周期性调制而形成的<sup>[1]</sup>。其折射率变化通常仅在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 之间。将光纤置于周期性空间变化的紫外光源下即可在光纤芯中产生这样的折射率变化。用于制做这种光纤光栅的主要技术之一是用两个紫外光束形成的空间干涉斑纹图来照射光纤, 这样就在光纤芯部生成了永久的周期性折射率调制<sup>[2]</sup>。

由于周期的折射率扰动仅会对很窄的一小段光谱产生影响。因此, 如果宽带光波在光栅中传输时, 入射光将在相应的频率上被反射回来, 其余的透射光谱则不受影响。这样, 光纤光栅就起到了光波选择反射镜的作用。对于这类调谐波长反射现象的解释, 首先是由布拉格给出的, 因而这种光纤光栅被称为布拉格光纤光栅。反射条件就称为布拉格条件。在布拉格光栅中, 反射中心波长由下式确定

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

这里  $n_{\text{eff}}$  是光纤芯区的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅栅距周期。通过改变两相干紫外光束的相对角度<sup>[2]</sup>或选用不同栅距的相位板(Phase Mask)<sup>[3]</sup>即可对栅距  $\Lambda$  加以调整。通过这种方法, 可以调整布拉格光栅的反射波长。改变反射波长的另一种方法是将应变加载在光纤光栅上。如果加载应变是非均匀的, 则可进一步使反射光谱结构发生改变。本文分析了光纤光栅与非均匀应变场之间的相互作用; 给出了光纤光栅反射谱的响应函数; 并给出了光纤光栅在线性应力场作用下的反射光谱实验结果; 最后, 简要说明了其实际应用价值和意义。

## 2 光纤光栅非均匀应变模型

长度为  $L$  的光纤光栅被埋置于基体材料中, 如图 1 所示。设光纤光栅与基体之间界面无

\* 黑龙江省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-07-14; 收到修改稿日期: 1997-11-27

相对滑动, 仅存在沿光纤方向的一维应力场与光纤的相互作用。设基体的非均匀应变场为  $\sigma(x)$ , 由于无相对滑动, 界面的剪力相互作用将使光纤光栅发生相应不均匀变化, 从而引起光纤有效折射率和光栅栅距的非均匀变化, 最终将导致光纤光栅反射光谱结构发生改变。为分析其变化机理, 可把总长为  $L$  的光栅均匀划分成长度为  $l$  的  $N$  段, 即  $L = Nl$ 。当  $N$  足够大时, 可认为每小段  $l$  内的应变是均匀的。于是对于第  $m$  小段, 有

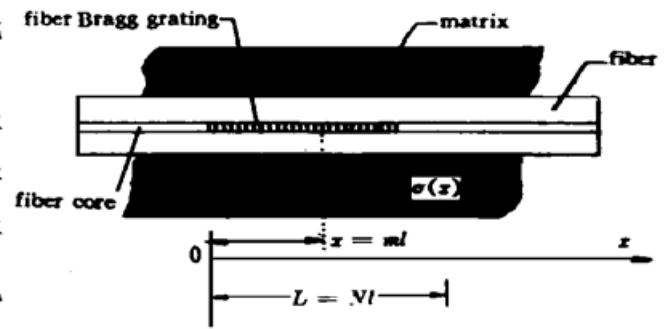


Fig. 1 Coordinate system of fiber Bragg grating along the fiber core axis

$$\lambda_B^m = 2n_{\text{eff}}^m \Lambda^m \quad (2)$$

式中  $\lambda_B^m$ 、 $n_{\text{eff}}^m$  及  $\Lambda^m$  分别为第  $m$  小段光栅的布拉格反射中心波长、有效折射率和光栅栅距。在应变  $\epsilon(x)$  作用下长度为  $l$  的第  $m$  段光纤光栅, 其布拉格反射中心波长的偏移由下式给出

$$\Delta\lambda_B^m = 2(\Delta n_{\text{eff}}^m \Lambda^m + n_{\text{eff}}^m \Delta\Lambda^m) \quad (3)$$

在第  $m$  段光纤光栅的  $l$  小段内, 光纤的纵向应变为

$$\epsilon(x) = \epsilon(ml) = \Delta l^m / l \quad (4)$$

且存在关系式

$$\Delta\Lambda^m / \Lambda^m = \Delta l^m / l^m \quad (5)$$

于是

$$\Delta\Lambda^m = \Lambda^m \epsilon(ml) \quad (6)$$

而光纤光栅纵向折射率变化由下式给出<sup>[4]</sup>

$$\Delta n_{\text{eff}}^m = - (1/2) (n_{\text{eff}}^m)^3 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \epsilon(ml) \quad (7)$$

式中  $p_{11}$ 、 $p_{12}$  为光弹系数,  $\nu$  为纤芯材料的泊松(Poisson)比。

将(6)式、(7)式代入(3)式, 得

$$\Delta\lambda_B^m = 2\Lambda^m \{ n_{\text{eff}}^m - (1/2) (n_{\text{eff}}^m)^3 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \} \epsilon(ml) \quad (8)$$

当  $N$  足够大时, (8) 式可看成是连续的, 可去掉上角标  $m$ , 则(8)式可进一步写为

$$\Delta\lambda_B(x) = 2\Lambda \{ n_{\text{eff}} - (1/2) (n_{\text{eff}})^3 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \} \epsilon(x) \quad (9)$$

该式给出了光纤光栅应变对布拉格光纤光栅反射中心波长位移的依赖关系。于是光纤光栅反射波长可进一步写为

$$\lambda_B(x) = \lambda_B + \Delta\lambda_B(x) = 2\Lambda n_{\text{eff}} + 2\Lambda n_{\text{eff}} \{ 1 - (1/2) (n_{\text{eff}})^2 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \} \epsilon(x) = \lambda_B [1 + C_\lambda \epsilon(x)] \quad (10)$$

$$\text{式中} \quad C_\lambda = 1 - (1/2) (n_{\text{eff}})^2 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \quad (11)$$

为反射波长的应变相关系数。

### 3 光纤光栅反射谱对应变的响应函数

当宽带光源(如发光二极管)所发出的光经过光纤光栅时, 在布拉格反射波长处将会有一光谱分布很窄的光被反射回来。该光谱分布可近似地用如下的高斯(Gaussian)函数描写<sup>[5]</sup>

$$I_B(\lambda) = I_{B0} R \exp \{ - [(\lambda - \lambda_B) / \Delta\lambda]^2 \} \quad (12)$$

式中  $I_{B0}$  为波长  $\lambda_B$  处的入射光谱强度,  $R$  为布拉格反射波长处的光栅最大反射率,  $\Delta\lambda$  为该窄

带反射光谱的半宽度。

对处于非均匀应变状态下的光纤光栅，考虑到其反射谱将在布拉格反射中心波长附近较大范围内变化，因而入射光谱强度  $I_{B0}$  和光栅反射率  $R$  均不能视为常数，于是在  $x$  附近的一小段光纤光栅的反射谱可写为

$$I_B(\lambda, x) = I_0(\lambda)R(x) \exp \left( - \{[\lambda - \lambda_B(x)]/\Delta\lambda\}^2 \right) \tag{13}$$

式中  $I_0(\lambda)$  为入射光谱强度函数，对于发光二极管光源，其发射光谱可由下式给出<sup>[6]</sup>

$$I_0(\lambda) = I_0 \exp \{ - 2(\pi\lambda_0/\zeta\Delta\lambda_s)^2 [(\lambda_0/\lambda) - 1]^2 \} \tag{14}$$

式中  $I_0$  为光源光谱峰值  $\lambda_0$  处的光强值， $\Delta\lambda_s$  为光源光谱的半宽度， $\zeta$  为发光二极管光源本身的光谱系数。(13) 式中的  $R(x)$  为对应于  $x$  附近长度为  $l^m$  的一小段光纤光栅在反射波长  $\lambda_B(x)$  处的反射率，由下式给出<sup>[2]</sup>

$$R(x) = \tanh^2 \Omega(x) \tag{15}$$

其中  $\Omega(x)$  为

$$\Omega(x) = \pi n_{\text{eff}} \eta(V) (\Delta n/n_{\text{eff}}) (l^m/\lambda) \tag{16}$$

式中  $\Delta n/n_{\text{eff}} \approx 3 \times 10^{-5}$  为相对折射率变化， $\eta(V) \approx 1 - 1/V^2$ ，其中  $V \geq 2.4$  为光纤芯中基模对应的积分值。而  $l^m$  在分布应变  $\epsilon(x)$  的作用下可写为

$$l^m = (L/N)[1 + \epsilon(x)] \tag{17}$$

式中  $L$  为光纤光栅总长度， $N$  是分割区间数。于是得到总的反射光谱响应函数为

$$I(\lambda) = \int_0^L I_0(\lambda) \tanh^2 \Omega(x) \exp \left\{ - \left[ \frac{\lambda - \lambda_B(x)}{\Delta\lambda} \right]^2 \right\} dx \tag{18}$$

表1给出了典型的1550 nm 附近的发光二极管光源光谱参数和布拉格光纤光栅的反射光谱参数。图2给出了几种不同的应变分布状态下所对应的光纤光栅光谱响应曲线。

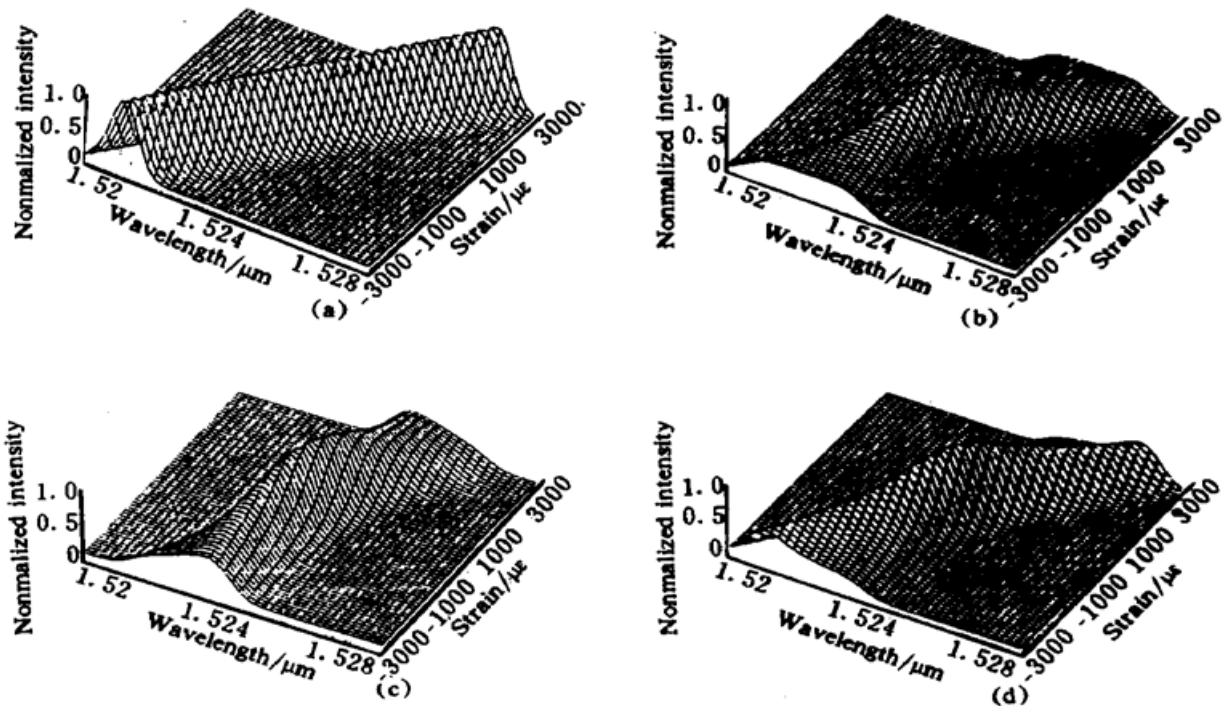


Fig. 2 Fiber optic Bragg grating reflectance spectrum broaden characteristic with the different condition of strain distribution. Where  $x$  from 0 to 1, wavelength from 1.52  $\mu\text{m}$  to 1.528  $\mu\text{m}$  and parameter  $\epsilon_0$  from  $-3000 \mu\epsilon$  to  $3000 \mu\epsilon$ . The reflectance spectrum characteristic for the strain distribution, (a)  $\epsilon(x) = \epsilon_0$ , (b)  $\epsilon(x) = \epsilon_0(1 - x)$ , (c)  $\epsilon(x) = \epsilon_0(1 - \sqrt{x})$ , (d)  $\epsilon(x) = \epsilon_0(1 - x^2)$

Table 1. Typical LED light source and Bragg grating spectrum parameters

quantity	symbol	value	unit
peak wavelength of LED source spectrum (Drive current $I = 50$ mA)	$\lambda_0$	1533.46	nm
half-width of LED source spectrum (Drive current $I = 50$ mA)	$\Delta\lambda_s$	80.42	nm
spectrum parameters of LED source (Drive current $I = 50$ mA)	$\zeta$	2.649	-
reflectance spectrum center wavelength of Bragg grating	$\lambda_B$	1524.45	nm
half-width of Bragg reflectance spectrum	$\Delta\lambda$	0.56	nm
length of Bragg grating	$L$	6000	$\mu\text{m}$
reflectivity of Bragg grating	$R$	91	%
effective refractive index of Bragg grating	$n_{\text{eff}}$	1.468	-
Bragg grating period	$\Lambda$	519	nm
photoelastic constant of fiber core (at 1550 nm)	$p_{11}$	0.113	-
photoelastic constant of fiber core (at 1550 nm)	$p_{12}$	0.252	-
Poisson ratio of silica material	$\nu$	0.17	-

### 4 实验结果

为了测试非均匀应变对光纤光栅反射谱的响应, 采用如图3所示的装置, 进行了测试。

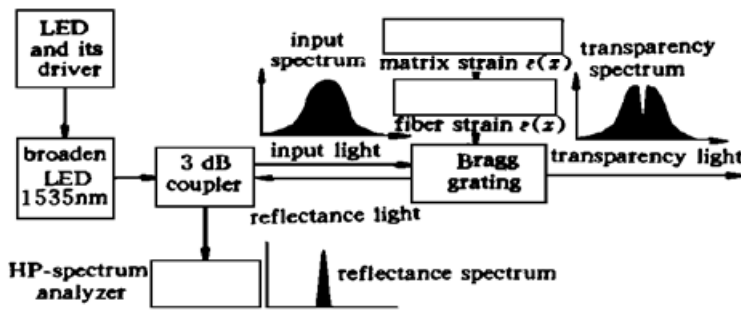


Fig. 3 Block diagram of experimental system

射光谱; 在布拉格反射波长  $\lambda_B$  附近很窄的一小部分则被反射回来, 形成反射光谱, 为光谱仪所接收。

光纤光栅是由美国海军实验室用 Corning 公司的低双折射光纤制做的。光栅长度为 6.0 mm, 中心反射波长为 1524.45 nm, 半宽0.56 nm。实验中, 将光纤光栅用环氧粘贴在钢制应变试件上, 试件形状是类锥体的, 使其在拉伸或压缩时应变为线性分布。试件的另一侧粘贴电阻应变片, 用电阻应变仪来标定并监测应变分布及其状态。利用该试件进行了拉伸和压缩实验。光纤光栅反射谱由 HP-70951A 型光谱分析仪给出, 其测量范围为 600 nm~ 1700 nm, 分辨率为 0.01 nm。

加在光纤光栅上的应变为线性分布。图 4 给出了在拉伸和压缩两种情况下光纤光栅光谱展宽

由中心波长为 1535 nm、半宽为 80.42 nm 的发光二极管发出的光经过一个 3 dB 耦合器后, 到达布拉格光纤光栅。该光栅将输入光谱分为两部分: 一部分穿过光栅, 形成透

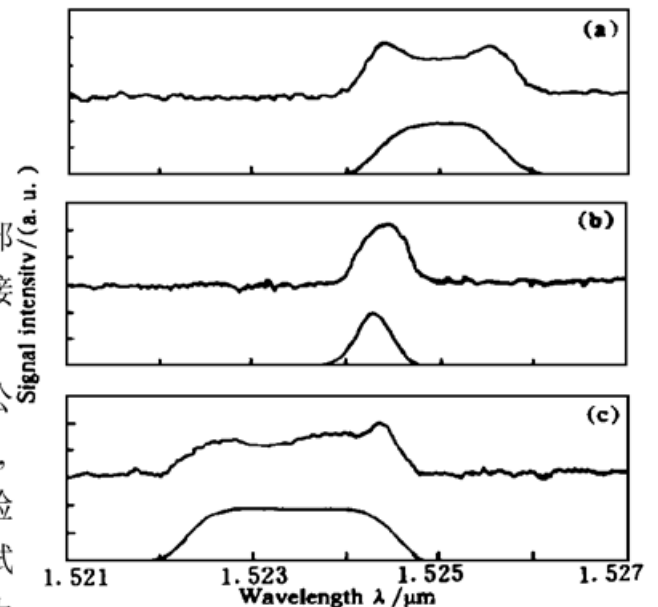


Fig. 4 The reflectance spectrum broaden characteristic of fiber optic Bragg grating applied linear strain field. The top curves are the measured reflectance spectrum curves and the bottom curves are the theoretical curves from equation (18). Strain distribution (a)  $\epsilon(x) = 1500(1 - x)$ , (b)  $\epsilon(x) = 0$ , (c)  $\epsilon(x) = -2500(1 - x)$

的测试结果。利用实验所给出的参数及反射光谱响应函数,同时给出了相应的理论对照曲线。由图4可以看到,试验反射光谱与理论曲线有一定的差别,这可能是由于光纤光栅与试件之间粘贴不均匀造成的。

**结 论** 本文分析了光纤光栅反射谱对加在其上的非线性应变的响应特性,结果表明,对于不同的非均匀应力场 $\sigma(x)$ ,将产生相应的具有不同光谱结构的反射光谱。这就提供了一种改变光纤光栅反射光谱特性的方法。该方法亦可用于局部非均匀应变的测试。

利用这种非均匀应变加载方法,可以制做波长与带宽可调的光学滤波器。改变应变加载方式,就可以方便地改变滤波器的带宽。这种方法也可以用来制做啁啾布拉格反射器,用作远程光通信的色散补偿。此外,还可用这种方法产生所需的特殊光谱结构,用于修平光纤放大器的增益谱。该方法还可望在光纤智能传感器与智能结构中获得应用。通过对反射光谱结构分析,可以获得几毫米范围内的结构局域非均匀应变或应变梯度的信息。由于光纤光栅尺寸极小(光纤直径仅125 $\mu\text{m}$ ,光栅长度一般为几毫米),采用埋入的方法,可用于复合材料或智能结构内部局域非均匀应变的监测,例如,断裂力学中在研究裂纹尖端场的情况下就有这样的要求。

### 参 考 文 献

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*, Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~ 649
- [2] G. Meltz, M. M. Morey, W. H. Glenn, Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~ 825
- [3] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*, Bragg grating fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~ 1037
- [4] C. D. Butter, G. B. Hocker, Fiber optics strain gauge. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(18): 2867~ 2869
- [5] Serge M. Melle, Liu Kexing, M. Raymond Measures, Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(19): 3601~ 3609
- [6] Yuan Libo, F. Ansari, White light interferometric fiber optic distribution strain sensing system. *Sensors and Actuators (A)*, 1997, **63**(3): 177~ 181

## Response of Fiber Bragg Grating Reflective Spectrum Expanding to Uneven Distribution Strain

Yuan Libo

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(Received 14 July 1997; revised 27 November 1997)

**Abstract** When a fiber Bragg grating is subject to an uneven strain, both of the fiber core index and the grating pitch will experience an uneven variation and therefore the resonant wavelength will vary along the grating. The interaction model between fiber Bragg grating and uneven strain field is established, and the relationship of the fiber Bragg grating reflective spectrum response to the uneven strain is deduced. The results of interaction experiments between linear distribution strain field and fiber Bragg grating are given.

**Key words** fiber optic, fiber Bragg grating, stress, strain, reflective spectrum, response function.