

均匀光纤 Bragg 光栅局部横向受力特性研究^{*}

蔡璐璐[†] 尹闻闻 吴 飞

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(2007 年 10 月 19 日收到 2008 年 8 月 22 日收到修改稿)

对均匀光纤 Bragg 光栅(FBG)局部横向受力特性进行了理论和实验研究. 采用传输矩阵法分析了 FBG 其中一段横向受力时的反射光谱变化, 并且建立了相应的数学模型. 研究表明, 当 FBG 局部横向受力时, 受压长度对反射光谱无影响, 反射光谱分裂点的波长与横向作用力呈线性正比关系并具有周期性, 分裂点反射率与受力位置的关系为近似双曲正切关系.

关键词: 光纤 Bragg 光栅, 传输矩阵法, 局部横向受力, 分裂点

PACC: 4280F, 0630N

1. 引 言

近年来, 基于光纤 Bragg 光栅(FBG)轴向应变特性的传感器在工程实际应用中实现了位移、温度、应变、压强等多种物理量的感测^[1-4]. 然而, 在工程应变测量中, 不仅需要检测一维应变, 还需要检测平面应变及其变形, 以便综合评价结构体的状况. 因此, FBG 横向受力特性的研究对于新型传感器的开发具有重要的意义^[5-7]. 目前对 FBG 受横向负载作用下的特性研究引起了广大学者的注意. 例如: 文献[8]讨论了 FBG 基于有效折射率变化的横向负载敏感特性, 提出 FBG 受到横向负载作用时反射峰会分裂成两部分. 文献[9]用耦合模的矢量公式法分析了 FBG 的横向受压特性. 文献[10]指出, FBG 局部横向受力时频谱的分裂点波长随受力大小而周期性地移动, 且分裂点位移与受力大小呈线性关系. 推导出线性表达式和反射光谱周期变化的表达式. 本文在文献[10]的基础上, 对 FBG 局部横向受力情况下的反射光谱特性作了进一步的理论分析和实验研究. 研究表明, 当单独考虑 x 偏振方向时, 反射光谱分裂点的反射率与受力位置近似为双曲正切关系.

2. 理论分析

FBG 局部横向受力状况如图 1 所示. 空间均匀

作用力 F 作用于光栅的某一部局位置, 导致该段光栅的波导特性发生改变, 从而使得整个反射光谱发生变化.

当长为 L 的 FBG 某一段受到横向均匀压力时, 可以把整个 FBG 看作三个小的 FBG. 由于受力段 $L_2 \ll L$, 可以认为该段 FBG 的横向受力情况属于平面应变情况, 即 $\epsilon_z = 0$. 所以该段 FBG 各个方向的应力为

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2F}{\pi L_2 D}, \\ \sigma_y &= \frac{-6F}{\pi L_2 D}, \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) = \frac{-4\nu F}{\pi L_2 D}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 D 为光纤的直径, ν 为泊松比. 由于光纤的变形会导致折射率发生变化并产生双折射, 横截面在两个正交方向上的折射率变化可由下式表示:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \end{bmatrix} &= -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \begin{bmatrix} (p_{11} - 2\nu p_{12}) & (1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11} \\ (p_{11} - 2\nu p_{12}) & (1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11} \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y + \sigma_z \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

这里 E 是光纤的杨氏模量, p_{11} 和 p_{12} 是光纤的光弹系数. σ_x , σ_y 和 σ_z 分别是 x , y 和 z 方向上作用于 FBG 的应力分量, x 方向垂直于受力方向, y 方向平行于

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60672015)资助的课题.

[†] E-mail: ysu_fbg@163.com

受力方向, z 方向为 FBG 的轴向.

FBG 局部横向受力模型的建立采用传输矩阵方法. 如图 2 所示, FBG 可分为三部分, 第一部分长为

L_1 , 其传输矩阵为 M_1 , 第二部分(横向受力段 FBG) 长为 L_2 , 其传输矩阵为 M_2 , 第三部分长为 L_3 , 其传输矩阵为 M_3 .

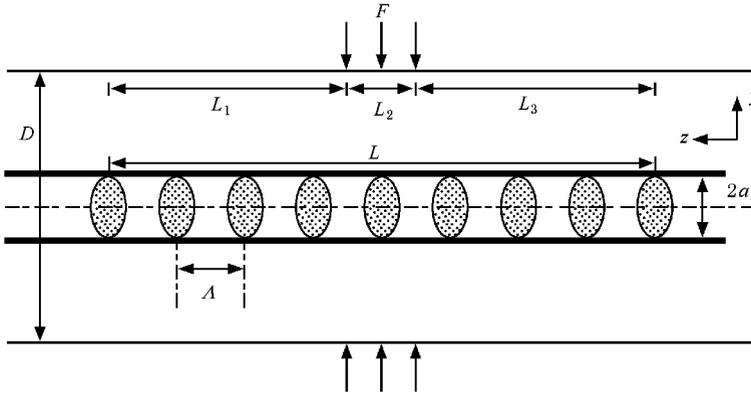


图 1 FBG 局部横向受力示意图

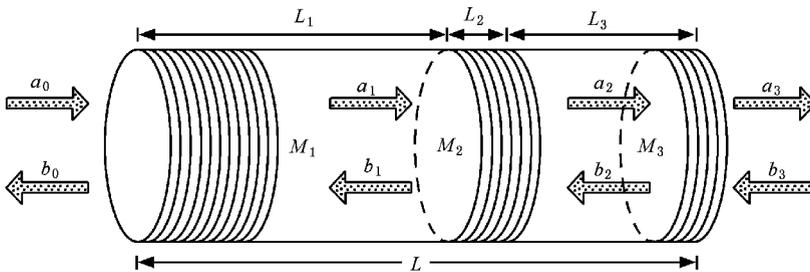


图 2 FBG 局部横向受力计算模型

设输入为 $\begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}$, 则经过第一部分 FBG 的输出为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix},$$

同时 $\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}$ 又是第二部分光栅的输入, 由此类推可以得到整个 FBG 的输出为

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \end{bmatrix} = M_3 M_2 M_1 \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对于 FBG 的特性, 一般研究其反射光谱, 所以

根据其边界特性 $\begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 可得

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} = T_1 T_2 T_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中

$$T_i = M_i^{-1} = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{bmatrix}.$$

这里

$$A_i = \cosh(S_i L_i) - j \frac{\Delta\beta_i}{S_i} \sinh(S_i L_i),$$

$$B_i = -j \frac{k}{S_i} \sinh(S_i L_i),$$

$$S_i = \sqrt{k^2 - \Delta\beta_i^2},$$

其中 k 为耦合系数, L_i 为 FBG 的长度,

$$\Delta\beta_i = \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda},$$

Λ 为光栅栅距. 由 (4) 式可计算 FBG 的反射率

$$R = \left| \frac{b_0}{a_0} \right|^2.$$

当 FBG 局部横向受力时, 第一部分和第三部分 FBG 无变化, 而第二部分 FBG 由于受到横向作用力, 其折射率发生变化, 导致 $\Delta\beta$ 产生两个正交偏振方向的值 $\Delta\beta_x$ 和 $\Delta\beta_y$, 所以第二部分 FBG 的传输矩阵具有两种形式. 由于两个偏振方向的反射光谱变化讨论基本一致, 而且 x 偏振方向的反射光谱变化比 y 方向明显, 所以本文以 x 偏振方向的反射光谱变化为例进行讨论. 对 FBG 局部横向受力时的反射

光谱进行仿真分析,选取中心波长 $\lambda_B = 1530.5 \text{ nm}$, 光栅长度 $L = 10 \text{ mm}$ 峰值反射率 $R_{\max} = 0.9$, 所得结果如图 3 所示.

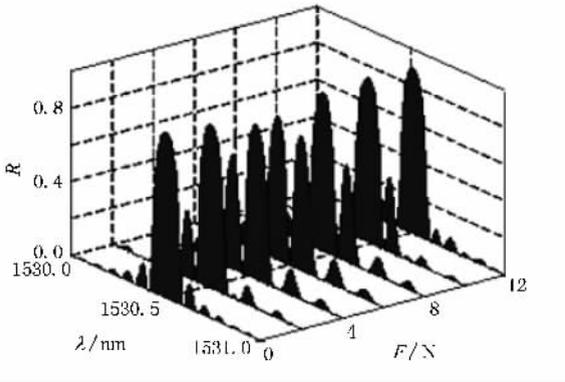


图 3 FBG 局部横向受力反射光谱

从图 3 可以看出,当 FBG 局部横向受力时,其反射光谱不再保持单个谐振峰,而是分裂成为两个谐振峰.随着横向作用力的增加,反射峰的分裂点从短波长处向长波长方向移动.当横向作用力增加到一定值(12 N)时,分裂点又从短波长处出现,其反射光谱与受力较小(2 N)的反射光谱基本一致.分裂点的移动范围基本为 FBG 的全谱带宽,而且移动具有周期性.

由于第二部分 FBG 的长度 $L_2 \ll L$, 所以有如下近似:

$$\begin{aligned} T_2 &= \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ B_2^* & A_2^* \end{bmatrix} \\ &\approx \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\beta_2 L_2) & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\beta_2 L_2) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \exp(-j2\Delta\beta_2 L_2) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \exp(j\Delta\beta_2 L_2), \quad (5) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta\beta_2 &= \frac{2n_{\text{eff}x}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} \\ &\approx \frac{\chi(\Delta n_{\text{eff}})_x \pi}{\lambda}. \end{aligned}$$

设 $\Delta\varphi = 2\Delta\beta_2 L_2$, 则整个 FBG 的传输过程可以表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} &= \exp(j\Delta\varphi/2) \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1^* & A_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ B_3^* & A_3^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6) \end{aligned}$$

因此,反射率 R 可表示为

$$\begin{aligned} R &= \left| \frac{b_0}{a_0} \right|^2 \\ &= \left| \frac{B_1^* A_3 \exp(-j\Delta\varphi) + A_1^* B_3^*}{A_1 A_3 \exp(-j\Delta\varphi) + B_1 B_3^*} \right|^2. \quad (7) \end{aligned}$$

2.1. 横向受压长度对反射光谱的影响

由(7)式可知,横向受力处的 FBG 对整个反射光谱的影响主要是参数 $\Delta\varphi$ 的作用. $\Delta\varphi$ 的表达式为

$$\Delta\varphi = 2\Delta\beta_2 L_2 = \frac{4(\Delta n_{\text{eff}})_x \pi L_2}{\lambda}, \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} (\Delta n_{\text{eff}})_x &= -\frac{n_{\text{eff}}^3 F}{\pi E L_2 D} \{ p_{11} - 2\nu p_{12} \\ &\quad - [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11} (3+2\nu)] \}. \end{aligned}$$

设

$$\begin{aligned} K_0 &= -\frac{n_{\text{eff}}^3 F}{\pi E D} \{ p_{11} - 2\nu p_{12} \\ &\quad - [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11} (3+2\nu)] \} \end{aligned}$$

为一常数(对于全硅光纤杨氏模量 $E = 74.52 \text{ GPa}$, $\nu = 0.17$, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$, 计算得 $K_0 = 6.9188 \times 10^{-8}$), 则可得

$$(\Delta n_{\text{eff}})_x = K_0 \frac{F}{L_2}. \quad (9)$$

将(9)式代入到(8)式可得

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi K_0 F}{\lambda}. \quad (10)$$

由(10)式可知, $\Delta\varphi$ 与受力段光栅的长度 L_2 无关, 即横向受力段 FBG 的长度 L_2 对整个 FBG 的反射光谱无影响.

2.2. 分裂点的周期性

由(7)式可知, 受压 FBG 段传输矩阵中 $\exp(-j\Delta\varphi)$ 项具有周期性, 要保证反射光谱无变化只需满足下式即可:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{4\pi K_0 F}{\lambda} + \Delta\varphi_0 \\ &= 2k\pi + \Delta\varphi_0 \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (11) \end{aligned}$$

式中 $\Delta\varphi_0$ 为初始相位. 由(11)式可知, 当反射光谱变化一周, 即 $k = 1$ 时, 相应的横向作用力的变化可表示为

$$F_{1T} = \frac{\lambda}{2K_0}. \quad (12)$$

由于 λ 变化范围在一个带宽内, 故有 $\lambda \approx \lambda_B$. 所以

(12) 式可写为

$$F_{1T} = \frac{\lambda_B}{2K_0}. \quad (13)$$

将上述仿真参数代入(13)式可得 $F_{1T} = 11.06 \text{ N}$. 图4显示了 $F = 4 \text{ N}$, 15.06 N ($4 + F_{1T}$), 26.124 N ($4 + 2F_{1T}$), 48.242 N ($4 + 4F_{1T}$) 的反射光谱. 由图4可见, 局部横向受力的 FBG 反射光谱具有周期性, 当横向作用力变化 F_{1T} 时, FBG 反射光谱变化一周期.

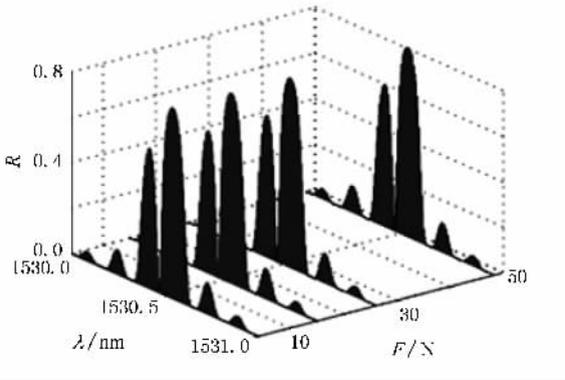


图4 局部横向受力的反射光谱变化周期性比较

2.3. 分裂点与横向作用力的线性关系

设

$$A_i = |A_i| \exp(j\varphi_{A_i}),$$

$$B_i = |B_i| \exp(j\varphi_{B_i}),$$

代入(7)式后展开得到反射率 R 为

$R =$

$$\frac{|A_1|^2 |B_3|^2 + |B_1|^2 |A_3|^2 + 2|A_1 A_3 B_1 B_3| \cos(\Delta\varphi - \varphi_{\text{FBG}})}{|A_1|^2 |A_3|^2 + |B_1|^2 |B_3|^2 + 2|A_1 A_3 B_1 B_3| \cos(\Delta\varphi - \varphi_{\text{FBG}})} \quad (14)$$

这里

$$\varphi_{\text{FBG}} = \varphi_{A_1} + \varphi_{A_3} - \varphi_{B_1} + \varphi_{B_3},$$

其中 φ_{A_1} 和 φ_{A_3} 为 A_1 和 A_3 的相位角, φ_{B_1} 和 φ_{B_3} 为 B_1 和 B_3 的相位角. 由于 B_1 和 B_3 为纯虚数, 则 $\varphi_{B_1} = \varphi_{B_3}$, 所以 $\varphi_{\text{FBG}} = \varphi_{A_1} + \varphi_{A_3}$. 而 φ_{A_1} , φ_{A_3} 与 λ , L_1 和 L_3 有一定的关系, 因此, φ_{FBG} 与光栅的受力位置和 λ 有关. 对 φ_{FBG} 进行仿真分析, 所得结果如图5所示.

由图5可知, FBG 受力位置对 φ_{FBG} 有一定的影响(受力位置越接近 FBG 的中部, 线性度越好), 但是在全谱带宽 ($\Delta\lambda_{\text{FBG}} = \lambda_2 - \lambda_1$) 内, φ_{FBG} 在 $-\pi \sim \pi$ 范围内与波长仍可近似呈线性关系,

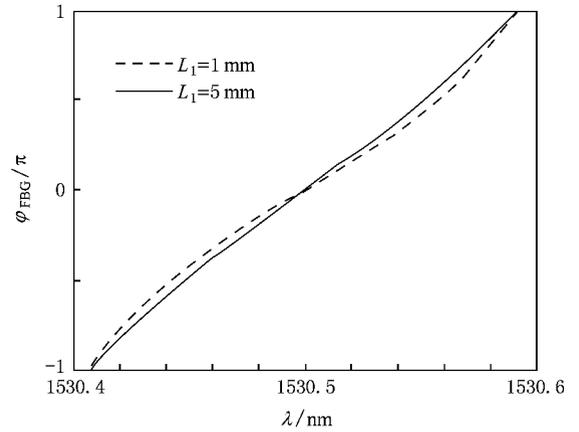


图5 FBG 不同受力位置时 φ_{FBG} 与波长的关系

$$\varphi_{\text{FBG}} = \frac{2\pi}{\Delta\lambda_{\text{FBG}}} (\lambda - \lambda_1) - \pi, \quad (15)$$

式中 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 为 FBG 的全谱带宽, λ_1 为光栅全谱带宽的短波长边界.

由(14)式可知, 分裂点实质上是当横向作用力为 F 时, 反射光谱中的一个极值点 ($\Delta\varphi - \varphi_{\text{FBG}} = \pi$). 考虑一个周期内分裂点移动, 则有

$$\begin{aligned} \Delta\varphi - \varphi_{\text{FBG}} &= 4\pi \frac{K_0 F}{\lambda} - \frac{2\pi}{\Delta\lambda_{\text{FBG}}} (\lambda - \lambda_1) + \pi \\ &= \pi. \end{aligned}$$

因此, 可得到分裂点波长与横向作用力的关系为

$$\lambda = \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}}}{F_{1T}} F + \lambda_1. \quad (16)$$

由(16)式可知, 在全谱带宽内, 分裂点的波长移动在一个周期内与 FBG 的横向作用力 F 呈线性正比关系.

2.4. FBG 受力位置的影响

由(14)式可知, 当 $\Delta\varphi - \varphi_{\text{FBG}} = \pi$ 时, 就得到了分裂点的反射率 R_s 为

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{|A_1|^2 |B_3|^2 + |B_1|^2 |A_3|^2 - 2|A_1 A_3 B_1 B_3|}{|A_1|^2 |A_3|^2 + |B_1|^2 |B_3|^2 - 2|A_1 A_3 B_1 B_3|} \\ &= \frac{(|A_1 B_3| - |B_1 A_3|)^2}{(|A_1 A_3| - |B_1 B_3|)^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

假设

$$|A_i| = \cosh(C_i),$$

$$|B_i| = \sinh(C_i),$$

则(17)式表示为

$$R_s = \tanh^2(C_1 - C_3), \quad (18)$$

式中

$$C_1 = \ln(|A_1| + |B_1|),$$

$$C_3 = \ln(|A_3| + |B_3|).$$

根据(18)式可得分裂点反射率与受力位置(由于受力段 L_2 较小,所以受力点距 FBG 起点的坐标以第一段光栅长度 L_1 作为受力位置坐标)和波长的关系如图 6 所示.

从图 6 可以看出,对于任意波长分裂点的反射率与受力位置都关于 $L/2$ 对称.当分裂点波长越接近中心波长时,反射率与位置的关系就越接近双曲正切.进一步分析发现,对于不同的波长, $\Delta C = C_1 - C_3$ 与受力位置都呈线性关系.图 7 给出了仿真得到波长从 1530.42 到 1530.5 nm 时 ΔC 与 L_1 的关系,由此可见,它们都与受力位置呈线性关系.

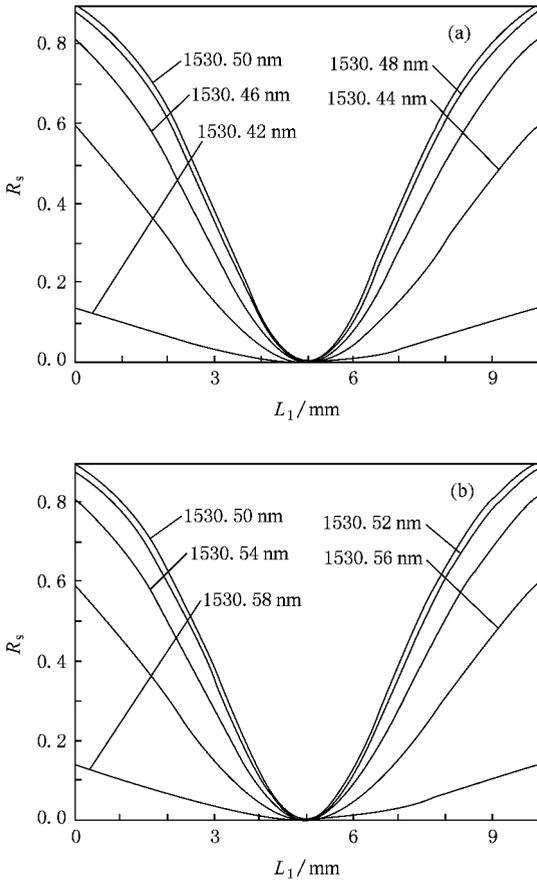


图 6 不同波长时 FBG 分裂点反射率与受力位置的关系 (a) λ 为 1530.42—1530.50 nm (b) λ 为 1530.50—1530.58 nm

对图 7 进行数据拟合可得

$$\Delta C(L_1, \lambda) = \frac{[C_1(L, \lambda) - C_3(L, \lambda)] - [C_1(0, \lambda) - C_3(0, \lambda)]}{L} L_1 + [C_1(0, \lambda) - C_3(0, \lambda)], \quad (19)$$

式中 λ 为任意分裂点波长.

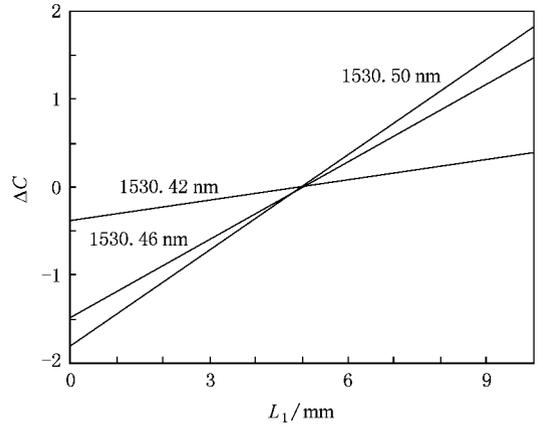


图 7 ΔC 与 FBG 受力位置的关系

由 C_1 和 C_3 的表达式可知 $C_1(0, \lambda) = C_3(L, \lambda) = 0, C_1(L, \lambda) = C_3(0, \lambda)$. 所以(19)式可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta C(L_1, \lambda) &= \frac{2C_1(L, \lambda)}{L} L_1 - C_1(L, \lambda) \\ &= C_1(L, \lambda) \frac{L_1 - L}{L}. \end{aligned} \quad (20)$$

由于 $L_2 \ll L$, 所以有 $C_1(L, \lambda) \approx C(L, \lambda)$. $C(L, \lambda)$ 是初始光栅的特征常数,其值与光栅的总长度和波长相关.如图 8 所示,若以 FBG 中间位置 ($L/2$) 处为坐标原点,则 FBG 局部受力时反射光谱分裂点的反射率与受力位置 z (相对中间位置, $-L/2 \leq z \leq L/2$) 满足如下关系:

$$R_F = \tanh^2\left(\frac{2Cz}{L}\right). \quad (21)$$

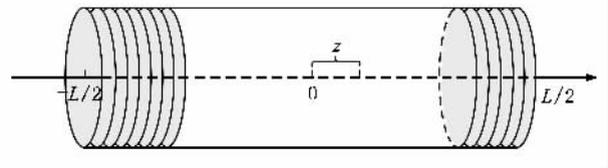


图 8 FBG 受力位置示意图

综上所述,当 FBG 中间受到横向应力作用时反射光谱产生分裂,分裂点波长与光栅所受压力呈线性关系,而且在一个光栅带宽内分裂点移动具有周期性.同时,分裂点的反射率与光栅受力位置呈双曲正切关系.

3. 实验研究

FBG 局部横向受力装置如图 9 所示,FBG 放在

一个带有凹槽的装置中,两端由光纤夹持器固定于实验台方孔的一边,为了使受力平衡,在方孔的另一边再固定一根辅助光纤. FBG 的局部受力通过在其上面垂直放置一根直径为 2 mm 的圆形钢质压力杆,再在压力杆的中间位置下面垂吊一个托盘,在托盘中加入砝码. 这样砝码的重力就会均匀施加在两根光纤上,实验中 FBG 所受的横向作用力为砝码、托盘和压力杆重力和的一半.

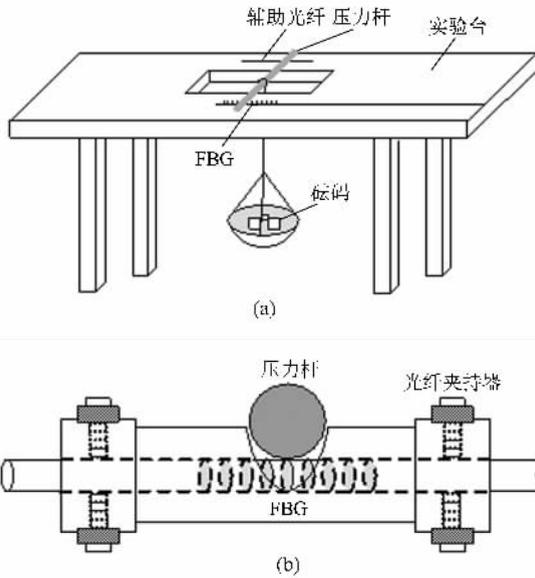


图 9 对 FBG 局部横向加力装置示意图及侧视图 (a) 装置示意图 (b) 侧视图

实验系统如图 10 所示. 由 ASE100 型宽带光源 (波长范围为 1528—1610 nm, 输出功率为 13.5 dBm) 发出的光经过光纤隔离器和偏振控制器输入到环行器端口 1, 通过端口 2 入射到 FBG 中, FBG 反射的光再经过端口 2 由端口 3 入射到 IQS-5250B 型光谱分析仪 (EXFO 公司生产, 最小分辨率为 0.002 nm) 进行光谱分析. 偏振控制器用于实验过程中调节入射光的偏振方向.

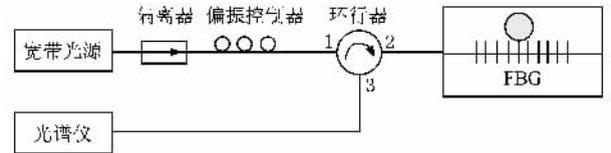


图 10 实验系统示意图

实验首先对分裂点波长与横向受力的线性关系以及反射光谱变化的周期性进行验证. 实验所使用的 FBG 在常温下中心波长为 1549.945 nm, 带宽为 0.18 nm, 长度为 10 mm, 其反射光谱如图 11(a) 所示. 实验对 FBG 中间位置施加横向应力, 中间受力位置长度约为 0.2 mm, 两边 FBG 不受力, FBG 的长度都为 4.9 mm. 实验的横向作用力从 $F = 1$ N 开始, 每隔 1 N 记录一次分裂点波长, 共记录了 22 次, 实验数据列于表 1. 实验所得部分反射光谱如图 11(b)(c) 所示.

表 1 FBG 局部横向受力与分裂点波长的实验值

横向作用力 F/N	分裂点波长 λ/nm	横向作用力 F/N	分裂点波长 λ/nm
1	1549.920	12	1549.918
2	1549.936	13	1549.938
3	1549.957	14	1549.958
4	1549.975	15	1549.971
5	1549.991	16	1549.992
6	1550.009	17	1550.006
7	1550.022	18	1550.026
8	1550.046	19	1550.049
9	1550.064	20	1550.062
10	1550.080	21	1550.079
11	1550.094	22	1550.097

由图 11 可见, 当光栅局部受力时, 反射光谱产生分裂, 且分裂点的波长与作用力呈线性周期变化. 图 11(b) 为 $F = 6$ N 时的反射光谱, 图 11(c) 为 $F = 17$ N 时的反射光谱, 可以看出两者分裂点位置基本相同, 说明光栅分裂点的周期约为 11 N.

根据表 1 的实验数据进行拟合, 拟合结果如图 12 所示. 从图 12 可以看出, 分裂点波长的漂移与局部受力的大小基本呈线性关系, 其分辨率为 0.015 nm/N, 周期为 11.79 N. 这与理论分析所得结果非常符合.

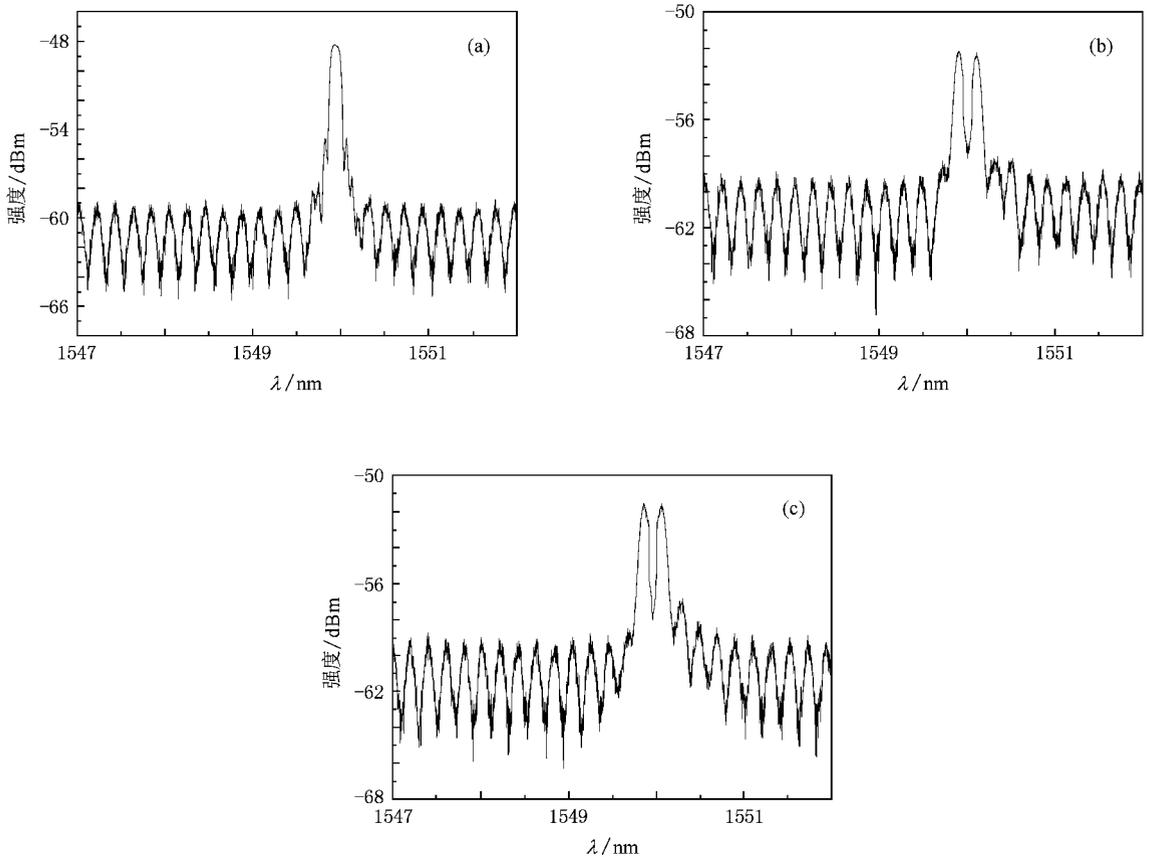


图 11 横向作用力不同时的 FBG 反射光谱 (a) $F=0\text{ N}$ (b) $F=6\text{ N}$ (c) $F=17\text{ N}$

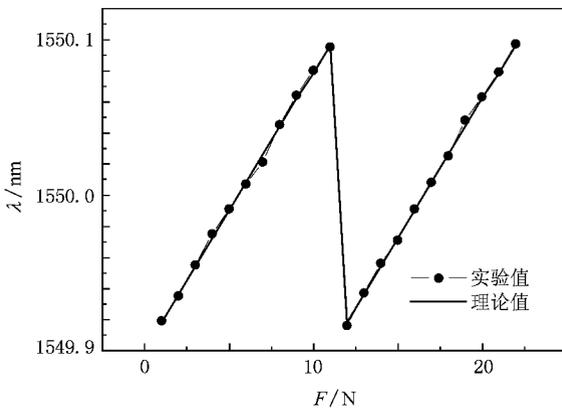


图 12 分裂点波长与 FBG 横向局部受力的实验与理论拟合结果

下面介绍对 FBG 进行不同位置局部横向受力的实验.图 13(a)为实验前的 FBG 反射光谱,其中心波长为 1551.678 nm ,带宽约为 0.2 nm .实验一共进行 4 组,施加载荷分别为 $F=1.5, 5, 10$ 和 20 N .每组实验时,FBG 受力位置从距离左端 1 mm 开始,每隔 0.5 mm 测量一次,直到 9 mm 处停止,共测量 17 次,

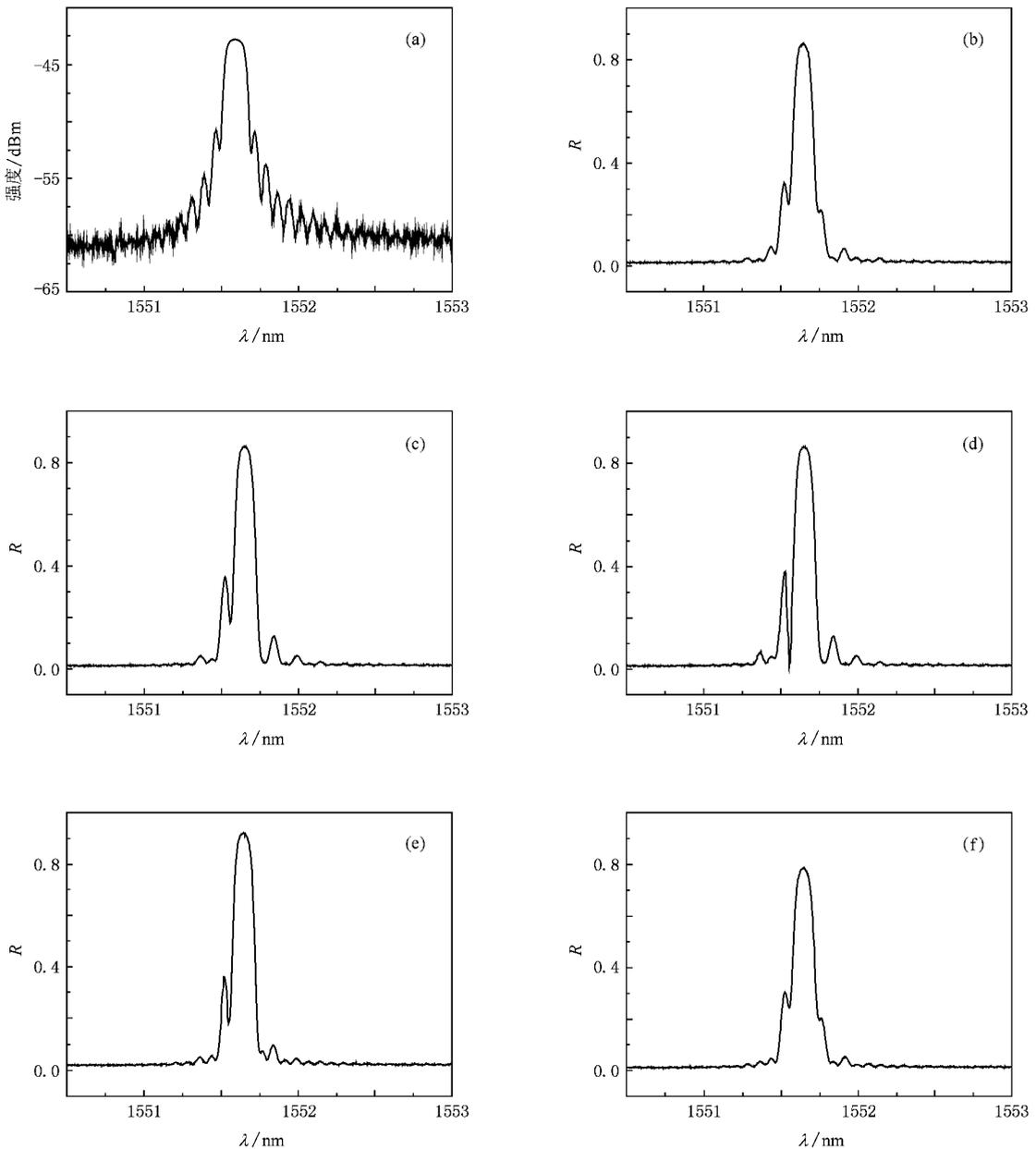
实验数据列于表 2.

上述 4 组实验光谱特性基本相同,图 13 以 $F=1.5\text{ N}$ 为例给出了不同位置处的反射光谱(为了更好地描述,图 13 采用反射率坐标系).从图 13 可以看出,当 FBG 的作用力 $F=1.5\text{ N}$ 保持不变时,分裂点处的波长都为 1551.604 nm .只是由于 FBG 受力位置不同,对分裂点的反射率影响不同.受力位置越接近光栅的中部,分裂点反射率就越低,当受力位置位于整个光栅的中间位置时,分裂点的反射率达到最小值(图 13(d)),并且 FBG 的受力位置无论是在光栅的前半段还是后半段,只要距光栅的中点位置距离相等,分裂点反射率基本相等,如图 13(b)和(f), (c)和(e).

图 14 为横向作用力不同时的分裂点反射率 R_s 与受力位置的关系,实线为理论计算曲线,虚线为实验测量曲线.实验结果表明,FBG 不同位置横向受力的反射光谱特性与仿真结果基本符合.在相同的受力情况下,分裂点波长相同,分裂点的反射率与 FBG 的受力位置近似为双曲正切关系.

表 2 受力位置与分裂点反射率实验值

位置/mm	$R_s(F = 1.5 \text{ N})$	$R_s(F = 5 \text{ N})$	$R_s(F = 10 \text{ N})$	$R_s(F = 20 \text{ N})$
1.0	0.248	0.804	0.240	0.551
1.5	0.212	0.721	0.212	0.472
2.0	0.174	0.650	0.172	0.382
2.5	0.125	0.534	0.119	0.286
3.0	0.085	0.420	0.065	0.166
3.5	0.052	0.288	0.035	0.108
4.0	0.024	0.101	0.015	0.051
4.5	0.019	0.051	0.012	0.026
5.0	0.012	0.018	0.010	0.013
5.5	0.021	0.071	0.017	0.027
6.0	0.023	0.120	0.025	0.061
6.5	0.054	0.279	0.050	0.161
7.0	0.086	0.389	0.072	0.234
7.5	0.138	0.521	0.142	0.324
8.0	0.186	0.680	0.201	0.387
8.5	0.213	0.718	0.241	0.479
9.0	0.254	0.790	0.282	0.582

图 13 $F = 1.5 \text{ N}$ 时 FBG 在不同位置受力的反射光谱 (a)原始光谱 (b)1 mm 处 (c)2 mm 处 (d)3 mm 处 (e)5 mm 处 (f)8 mm 处

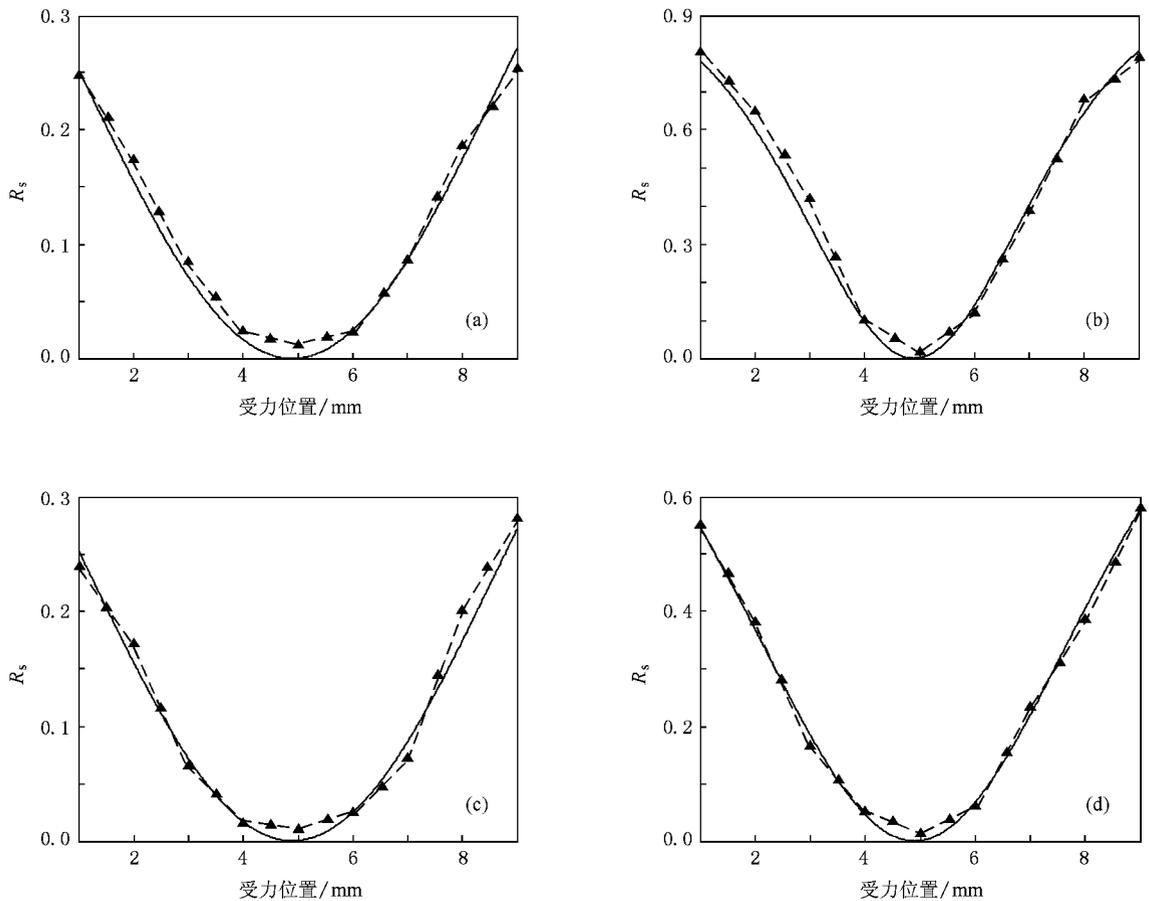


图 14 作用力不同时分裂点反射率与受力位置的关系 (a) $F=1.5\text{ N}$ (b) $F=5\text{ N}$ (c) $F=10\text{ N}$ (d) $F=20\text{ N}$

4. 结 论

本文对均匀 FBG 局部横向受力下的反射光谱特性做了理论和实验研究。研究表明:当 FBG 局部横向受力时,反射光谱分裂点波长与受力大小呈线性正比关系且具有周期性。反射光谱分裂点的

反射率与 FBG 的受力位置近似呈双曲正切的关系。利用 FBG 的这一特性可以与其轴向应变特性相结合,制作三维应变测量传感器,而且可以利用 x 偏振方向和 y 偏振方向的反射光谱差异制成偏振窄带滤波器,同时对 FBG 在复杂应变检测系统中的应用具有重要意义。

- [1] Qiao X G, Jia Z A, Fu H W, Li M, Zhou H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 494 (in Chinese) [乔学光、贾振安、傅海威、李明、周红 2004 物理学报 **53** 494]
- [2] Xue L F, Zhao Q D, Liu J G, Guo T, Huang G L, Liu L H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2804 (in Chinese) [薛力芳、赵启大、刘建国、郭团、黄桂岭、刘丽辉 2006 物理学报 **55** 2804]
- [3] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J, Wang J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5287 (in Chinese) [朱涛、饶云江、莫秋菊、王久玲 2007 物理学报 **56** 5287]
- [4] Pei L, Jian S S, Yan F P, Ning T G, Jian W, Li T J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 615 (in Chinese) [裴丽、简水生、延凤平、宁提

- 纲、简伟、李唐军 2003 物理学报 **52** 615]
- [5] Han Q, Lü K C, Li J F, Li Y G, Chen S P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4253 (in Chinese) [韩群、吕可诚、李家方、李乙钢、陈胜平 2004 物理学报 **53** 4253]
- [6] Guo T, Qiao X G, Jia Z A, Sun A, Chen C Y 2004 *Acta Photon. Sin.* **33** 288 (in Chinese) [郭团、乔学光、贾振安、孙安、陈长勇 2004 光子学报 **33** 288]
- [7] Liang M, Qian J R 2004 *J. Univ. Sci. Techn. China* **34** 50 (in Chinese) [梁明、钱景仁 2004 中国科学技术大学学报 **34** 50]
- [8] Gafsi R, El-Sherif M A 2000 *Opt. Fiber Technol.* **6** 229

[9] Zhang A P , Guan B O , Tao X M , Tam H Y 2002 *Opt. Commun.* **206** 81

1270 (in Chinese) [吴 飞、李立新、李亚萍、李志全 2005 光子·激光 **16** 1270]

[10] Wu F , Li L X , Li Y P , Li Z Q 2005 *J. Optoelectron. Laser* **16**

Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force^{*}

Cai Lu-Lu[†] Yin Wen-Wen Wu Fei

(*College of Electric Engineering , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China*)

(Received 19 October 2007 ; revised manuscript received 22 August 2008)

Abstract

Fiber Bragg grating under local transverse force was studied theoretically and experimentally. Based on the transfer matrix method, the consequential changes in reflected spectrum under local transverse force are analyzed, the corresponding mathematical model is established, and the mathematical expressions are deduced. When fiber Bragg grating is pressed by local transverse force, the reflection spectra are independent of the applied length. The wavelength of split point is periodical and linearly proportional to the applied force. And the reflectivity of split point is approximately hyperbolically tangential versus the applied position.

Keywords : fiber Bragg grating , transfer matrix method , transverse force to a small grating section , split point

PACC : 4280F , 0630N

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60672015).

[†] E-mail : ysu_fbg@163.com