

文章编号: 0253-2239(2005)08-1025-5

# 单轴晶体包层啁啾光纤光栅中电光效应和 弹光效应的理论研究\*

吕丁成 张晓萍\*\*

(兰州大学信息工程学院, 兰州 730000)

**摘要:** 提出了以单轴晶体材料为包层,光轴平行于光栅主轴( $z$ 轴)的新型啁啾光纤光栅模型,应用耦合模理论和传输矩阵方法在理论上分析了该类光纤光栅中的电光效应和弹光效应,理论研究发现在包层施加沿光栅轴向的电场和应变场可以改变布拉格波长和反射谱。得到了3种不同单轴晶体为包层时布拉格波长 $\lambda_B$ 和反射光谱随外加电场和应变场变化的曲线。研究结果表明当轴向外加电场从 $1 \times 10^7$  V/m变化到 $8 \times 10^7$  V/m时 $\lambda_B$ 减小0.12 nm,当外加应变场从0变化到0.04时, $\lambda_B$ 减小0.45 nm。

**关键词:** 导波与光纤光学; 啁啾光纤光栅; 耦合模理论; 单轴晶体材料

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## Theoretical Study on Electrooptic Effect and Elasto-Optic Effect in Chirped Fiber Grating with Uniaxial Crystal Cladding

Lü Dingcheng Zhang Xiaoping

(School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract:** A new type of chirped fiber grating with cladding made of uniaxial crystal material whose optical axis is parallel to the axis of grating, i. e.,  $z$ -axis, is proposed. Electrooptic effect and elasto-optic effect in this kind of fiber gratings are theoretically analyzed based on coupled-mode theory and transfer matrix. It was found that Bragg wavelength  $\lambda_B$  and the reflective spectra of the chirped grating can be changed by the electric field and the strain applied to the fiber grating cladding along  $z$ -axis. The curves of Bragg wavelength  $\lambda_B$  as a function of an external electric field or the strain are obtained respectively for three kinds of uniaxial crystals as the grating cladding. The calculated results indicate that when the axial electric field applied to the grating cladding varies from  $1 \times 10^7$  V/m to  $8 \times 10^7$  V/m,  $\lambda_B$  has the decrease of 0.12 nm, and when the applied strain varies from 0 to 0.04,  $\lambda_B$  has the decrease of 0.45 nm.

**Key words:** guided wave and fiber optics; chirped fiber grating; coupled-mode theory; uniaxial crystal materials

### 1 引 言

光纤光栅是光纤通信领域的关键器件之一,近年来出现了大量的基于光栅的光信号处理设备应用于脉冲压缩、波分复用(WDM)网络中作为通道滤波器、锁定半导体激光器的工作频率、光纤传感器等<sup>[1~6]</sup>。以往对啁啾光纤光栅的研究主要集中在光栅的长度、周期、半径、折射率分布、切趾、啁啾等参量对光栅特性的影响分析上。最近,已有文献提出

了一种单轴晶体为包层的均匀布拉格光栅<sup>[7]</sup>,研究结果表明主轴折射率比参量 $K_d$ 对光栅特性有显著影响。Stevenson<sup>[8]</sup>和 Cozens<sup>[9]</sup>等研究了单轴各向异性材料为纤芯的光纤传输和截止特性;文献[10]提出了单轴各向异性材料为内包层的双包层W型光纤,研究结果表明该类双包层光纤比普通双包层光纤有更大的零色散点调节范围;文献[11]对由单轴各向异性材料为包层构成的光纤保偏器进行了一

\* 国家自然科学基金(60377039)和新世纪优秀人才支持计划资助课题。

作者简介: 吕丁成(1972~),男,浙江杭州人,兰州大学信息科学与工程学院博士研究生,主要从事光纤光栅在光通信和光传感领域内的应用研究。E-mail: ludc@mail.hz.zj.cn

\*\* 通信联系人。E-mail: yqdengz@public.lz.gs.cn

收稿日期: 2004-06-28;收到修改稿日期: 2005-02-02

定的实验研究。本文提出了单轴晶体材料为包层、其光轴平行于光栅主轴( $z$ 轴)的新型啁啾光纤光栅模型,在理论上分析了发生在这种新型光纤光栅中的电光效应和弹光效应。

## 2 理论分析

### 2.1 理想正规规模本征方程

纤芯折射率为  $n_0$ 、半径为  $a$  的无周期性微扰的均匀光纤,包层为单轴各向异性材料,当选取主轴与  $Z$  坐标重合时,三个主轴折射率分别为  $n_x, n_y, n_z$ ,且满足  $n_x = n_y \neq n_z$ 。由波动方程和边界条件求得理想正规规模特征方程为<sup>[7]</sup>

$$F \left[ \frac{n_0^2}{n_t^2 K_{cl}} \frac{J'_m(U)}{U J_m(U)} + \frac{K'_m(K_{cl}W)}{W K_m(K_{cl}W)} \right] = \frac{m^2 Q}{K_{cl}} \left( \frac{n_0^2}{n_t^2 U^2} + \frac{1}{W^2} \right), \quad (1)$$

其中  $n_t = n_x = n_y$  且  $n_0 > n_t$ 。当时  $\beta^2 < k^2 n_0^2$ ,各参量按如下定义:

$$\begin{aligned} F &= \frac{J'_m(U)}{U J_m(U)} + \frac{K'_m(W)}{W K_m(W)}, & Q &= \frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2}, \\ U &= a \sqrt{k_0^2 n_0^2 - \beta^2}, & \Delta &= \frac{n_0 - n_t}{n_0}, \\ W &= a \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_t^2}, & K_{cl} &= n_z/n_t, \end{aligned}$$

其中  $K_{cl}$  为主轴折射率比,  $k_0$  为真空中传播常量,  $\beta$  为传播常量,  $n_t = n_x = n_y$  为包层横向折射率,且  $n_0 > n_t$ ,  $U$  为横向归一化相位常量,  $W$  为横向归一化衰减常量,  $V$  为归一化频率。  $J_m$  和  $K_m$  分别为贝塞尔第一类整数阶贝塞尔函数和变型第二类整数阶贝塞尔函数。

### 2.2 光栅特性参量

啁啾光纤光栅的纤芯有效折射率变化规律为<sup>[12]</sup>

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + \nu \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (2)$$

其中  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  是一个光栅周期内的“直流”折射率变化,取值  $8.0 \times 10^{-4}$ ,  $\nu$  为调制深度,取值为 1,  $\Lambda$  为光栅周期,且  $\Lambda = L/N$ ,  $N$  为总的周期数,  $L$  为光栅长,  $\phi(z)$  代表啁啾。

选取柯西函数为切趾函数<sup>[4]</sup>

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \frac{1 - (2z/L)^2}{1 - (2Cz/L)^2}, \quad (3)$$

其中  $C = 0.5$ 。传输矩阵法是分析非均匀光栅特性的有效方法<sup>[12,13]</sup>。将包层为单轴各向异性晶体的啁啾光纤光栅分成  $M$  段,把每小段看成是均匀光栅,应用耦合模理论得到第  $i$  段的传输矩阵  $F_i$  为

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

上式中  $i$  分别取  $1, 2, 3, \dots, M$ ,各参量定义如下:

$$\begin{cases} \gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}, \\ \hat{\sigma} = \hat{\sigma} + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \\ \hat{\sigma} = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right), \\ \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} = \frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_B^2} \frac{d\lambda_B}{dz}, \\ \lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda = 2n_{\text{eff}} \frac{L}{N}, \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\lambda_B$  为布拉格波长,  $d\lambda_B/dz$  为啁啾系数,  $n_{\text{eff}}$  为纤芯有效折射率,  $\Delta z$  为第  $i$  段均匀光栅的长度,系数  $\hat{\sigma}$  和  $k$  为第  $i$  段均匀光栅中的本地耦合系数<sup>[12]</sup>:

$$\sigma = 2n_0 \hat{K} \overline{\delta n_{\text{eff}}}, \quad k = n_0 \nu \hat{K} \overline{\delta n_{\text{eff}}},$$

$\hat{K}$  为正、反向传输的基模  $\text{HE}_{11}$  间的耦合系数,根据包层为单轴各向异性晶体的均匀光纤中场表达式<sup>[7]</sup>

和耦合模理论可求出其表达式为

$$\hat{K} = \frac{k_0^2 \beta (Q^2 - F^2)}{2(\beta^2 Q^2 - k_0^2 n_0^2 F^2)}, \quad (6)$$

得到了每一段均匀光栅的传输矩阵,经过  $M$  段传输后输入和输出场幅之间的关系为

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix},$$

$$F = F_M \cdot F_{M-1} \cdots F_i \cdots F_1, \quad (7)$$

上式中  $F$  为总的传输矩阵,  $R_M$  和  $S_M$  分别代表经过  $M$  段传输后的入射、反射波场幅,  $R_0 = R(L/2) = 1$  和  $S_0 = S(L/2) = 0$  分别代表初始端的入射、反射波场幅。在得到总的传输矩阵  $F$  和初始场幅后,由(7)式可以计算出在终端  $-L/2$  处的入射波和反射波场幅  $R(-L/2), S(-L/2)$ ,从而可以得到反射系数  $\rho$  和反射率  $r$ :

$$\rho = S_M/R_M = S(-L/2)/R(-L/2), \quad (8)$$

$$r = |\rho|^2, \quad (9)$$

### 2.3 单轴晶体包层材料的电光效应和弹光效应

对于任意电光晶体,其折射率椭球方程系数的增量矩阵系数  $\Delta B_i$ , 电光张量系数  $\gamma_{ij}$ , 外加电场  $E(E_x, E_y, E_z)$  三者之间的关系可表为<sup>[14]</sup>

$$\Delta B_i = \sum_{j=1}^3 \gamma_{ij} E_j, \quad (i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, 3)$$

由此,对于三方晶系  $3m$  点群单轴晶体,折射率椭球方程系数的增量矩阵  $\Delta B_i$ , 电光张量  $\gamma_{ij}$  和外加电场  $E_j$  三者之间的关系可表为

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

对于四方晶系  $42m$  点群晶体,折射率椭球方程系数的增量矩阵  $\Delta B_i$ , 弹光系数矩阵  $P_{ij}$ , 应变矩阵  $S_i$  三者之间的关系可表为

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{13} & 0 & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{31} & P_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

当沿光轴(对应  $Z$  轴)方向对  $3m$  点群晶体施加电场  $E_3$ 、对  $\bar{4}2m$  点群晶体施加均匀应变场  $S_3$ , 其介电主轴系中新的折射率椭球方程分别为

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{n_t^2} + \gamma_{13} E_3\right)(x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_z^2} + \gamma_{33} E_3\right)z^2 = 1, \\ \left(\frac{1}{n_t^2} + P_{13} S_3\right)(x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_z^2} + P_{33} S_3\right)z^2 = 1, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{n_t^2} + \gamma_{13} E_3\right)(x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_z^2} + \gamma_{33} E_3\right)z^2 = 1, \\ \left(\frac{1}{n_t^2} + P_{13} S_3\right)(x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_z^2} + P_{33} S_3\right)z^2 = 1, \end{cases} \quad (13)$$

由(12)式、(13)式可知,在上述条件下施加电场和应变场后单轴晶体仍为单轴晶体,且其折射率主轴和光轴( $z$ 轴)均不改变。利用  $\Delta(1/n^2) \approx -2\Delta n/n^3$ , 可以求出施加电场后新主轴折射率分别为

$$\begin{cases} n'_t = n_t - n_t^3 \gamma_{13} E_3 / 2, \\ n'_z = n_z - n_z^3 \gamma_{33} E_3 / 2, \end{cases} \quad (14)$$

施加应变场后新主轴折射率分别为

$$\begin{cases} n'_t = n_t - n_t^3 P_{13} S_3 / 2, \\ n'_z = n_z - n_z^3 P_{33} S_3 / 2, \end{cases} \quad (15)$$

定义施加电场和应变场后的主轴折射率比  $N_{cl}$  和相对折射率差  $\Delta_{cl}$  分别为

$$N_{cl} = \frac{n'_z}{n'_t} = \frac{n_z - n_z^3 m_{33} X / 2}{n_t - n_t^3 m_{13} X / 2}, \quad (16)$$

$$\Delta_{cl} = \frac{n_0 - n'_t}{n_0} = \frac{n_0 - n_t + n_t^3 m_{13} X / 2}{n_0}, \quad (17)$$

$m_{13}$  代表  $\gamma_{13}$ 、 $P_{13}$ ,  $m_{33}$  代表  $\gamma_{33}$ 、 $P_{33}$ ,  $X$  代表外场  $E_3$ 、 $S_3$ 。

参量  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  随着外场改变而发生变化,而在 2.1 节中的参量  $K_{cl}$  和  $\Delta$  是常量,当无外场作用时( $X = 0$ ),  $N_{cl} = K_{cl}$ ,  $\Delta_{cl} = \Delta$ 。通常  $m_{13}$ 、 $m_{33}$  均大于 0, 由(17)式可知,  $\Delta_{cl}$  随外界场  $X$  的增大而增大; 对

(16)式的右式对  $X$  进行求导可知,当  $K_{cl} < \sqrt{m_{13}/m_{33}}$  时,  $N_{cl}$  随外界场的增大而增大,反之,则单调减小。 $K_{cl} = n_z/n_t$  为单轴晶体包层材料本身的主轴折射率比<sup>[7]</sup>。

由(16)、(17)式可知参量  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  不仅与晶体本身性质有关,而且和外加电场与应变场的大小密切相关。沿单轴晶体为包层的啁啾光纤光栅的轴线方向施加电场和应变场后,  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  发生变化,从而导致对应的理想正规特征方程(1)式和耦合系数  $\hat{K}$  及(6)式发生变化,最终使啁啾光纤光栅布拉格波长和反射光谱发生改变。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 $N_{cl}$ 和 $\Delta_{cl}$ 对布拉格波长 $\lambda_B$ 的影响分析

给定光栅结构参量  $L = 1.06 \text{ cm}$ 、 $N = 5.07 \times 10^4$ 、 $a = 5 \text{ }\mu\text{m}$  和  $n_0 = 1.54$ , 当沿光栅的轴向施加外加电场和应变场,通过(1)式、(5)式和(14)式~(17)式可以得到布拉格波长  $\lambda_B$  随参量  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  的变化规律如图 1 所示。可以看出  $\lambda_B$  随着参量  $N_{cl}$  的增加而增加、随

着  $\Delta_{cl}$  的增加而减小。从图 1 看出,  $\Delta_{cl}$  在 0.018 ~ 0.026 之间变化时, 布拉格波长  $\lambda_B$  可以减小约 0.4 nm, 而此时由  $N_{cl}$  引起的变化小于 0.1 nm, 说明在外界场作用下, 参量  $\Delta_{cl}$  是引起  $\lambda_B$  变化的主要参量。

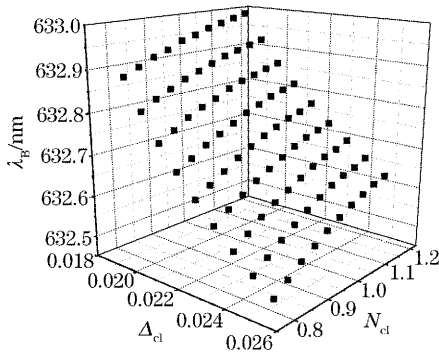


图 1 布拉格波长随  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  的变化

Fig. 1 Variation of Bragg wavelength with  $N_{cl}$  and  $\Delta_{cl}$

### 3.2 电光效应对布拉格波长 $\lambda_B$ 和反射谱的影响分析

选取三方晶系  $3m$  点群常用的单轴晶体  $\text{LiNbO}_3$  ( $K_{cl} < 1$ ) 和  $\text{LiTaO}_3$  ( $K_{cl} > 1$ ) 作为啁啾光栅的包层材料, 在  $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$  时,  $\text{LiNbO}_3$  的主轴折射率  $n_x, n_z$  分别为 2.29、2.20, 电光系数为

$$\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \quad \gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V};$$

$\text{LiTaO}_3$  的主轴折射率  $n_x, n_z$  分别为 2.176、2.180, 电光系数为

$$\gamma_{13} = 7.5 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \quad \gamma_{33} = 30.3 \times 10^{-12} \text{ m/V}.$$

给定参量  $d\lambda_B/dz = -0.05 \text{ nm/cm}$ ,  $a = 3 \mu\text{m}$ , 在光栅包层沿光轴方向 ( $Z$  轴) 施加电场, 得到两种单轴晶体材料作为包层时的  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  的变化如图 2 所示。  $\text{LiNbO}_3$  为包层材料时, 设定  $\Lambda = 0.138 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.33$ ;  $\text{LiTaO}_3$  为包层材料, 设定  $\Lambda = 0.145 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.21$ 。由图 2 看出, 当  $K_{cl} > \sqrt{m_{13}/m_{33}}$ ,  $N_{cl}$  单调减小, 与 2.3 节中的结论一致。图 3 为布拉格波长  $\lambda_B$  随外加电场  $E_3$  的变化曲线。  $\text{LiNbO}_3$  为包层材

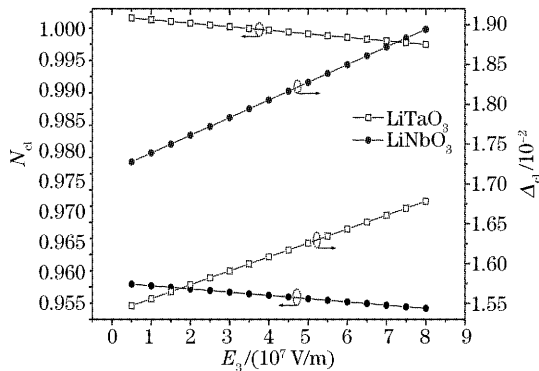


图 2  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  随外加电场强度的变化

Fig. 2  $N_{cl}$  and  $\Delta_{cl}$  vary with applied electric field intensity

料时, 设定  $\Lambda = 0.138 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.33$ ;  $\text{LiTaO}_3$  为包层材料时, 设定  $\Lambda = 0.145 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.21$ 。  $\lambda_B$  随外加电场的增大而线性减小, 当  $E_3$  从  $1 \times 10^7 \text{ V/m}$  增大到  $8 \times 10^7 \text{ V/m}$ ,  $\lambda_B$  减小约 0.12 nm。

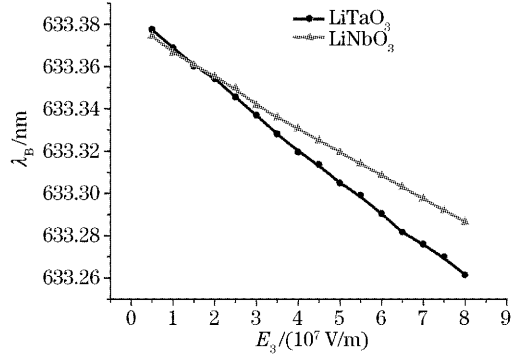


图 3 电场对布拉格波长的影响

Fig. 3 Effect of electric field on Bragg wavelength

图 4 为外加电场  $E_3$  对反射谱的影响。  $\text{LiNbO}_3$  为包层材料时, 设定  $\Lambda = 0.138 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.33$ ;  $\text{LiTaO}_3$  为包层材料, 设定  $\Lambda = 0.145 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.21$ 。由于  $\lambda_B$  随  $E_3$  的增大而减小, 当沿光栅轴向的正方向施加外加电场, 反射谱移到了无外加电场时反射谱的左边。进一步的研究表明当反向电场作用于光栅时, 反射谱移到了未加电场时的右边。当未加电场 ( $E_3 = 0, N_{cl} = K_{cl} = 1$ ) 时得到的反射率曲线和相关文献报道是一致的<sup>[12]</sup>。

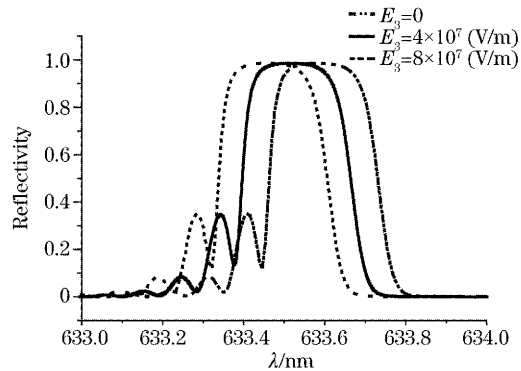


图 4 反射光谱随参量  $E_3$  的变化

Fig. 4 Calculated reflective spectrum

### 3.3 弹光效应对布拉格波长 $\lambda_B$ 和反射谱的影响分析

选取四方晶系  $\bar{4}2m$  点群常用的单轴晶体磷酸二氢钾 (KDP) ( $K_{cl} < 1$ ) 作为啁啾光栅的包层材料, 在  $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$  时, KDP 的主轴折射率  $n_x, n_z$  分别为 1.51、1.47, 电光系数  $P_{13}, P_{33}$  分别为 0.174、0.122。给定参量  $L = 1.06 \text{ cm}$ ,  $N = 5.07 \times 10^4$ ,  $a = 5 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 1.54$ ,  $d\lambda_B/dz = -0.01 \text{ nm/cm}$ , 在光栅包层沿光轴方向 ( $z$  轴) 施加均匀应变场, 得到 KDP 单轴晶

体为包层材料的  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  的变化如图 5 所示。 $K_{cl} < \sqrt{m_{13}/m_{33}}$ ,  $N_{cl}$  单调增加。图 6 为布拉格波长  $\lambda_B$  随外加应变场  $S_3$  的变化曲线。当  $S_3$  从 0 增大到 0.04,  $\lambda_B$  减小约 0.45 nm。图 7 为在 3 种不同强度应变下的反射率曲线, 随着应变场的增大,  $\lambda_B$  减小, 曲线左移; 应变场减小,  $\lambda_B$  增大, 曲线右移。

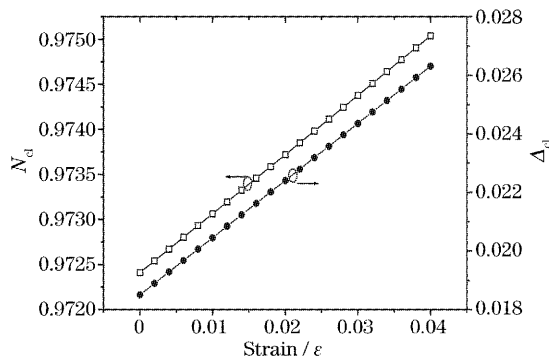


图 5  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  随应变的变化

Fig. 5  $N_{cl}$  and  $\Delta_{cl}$  vary with strain

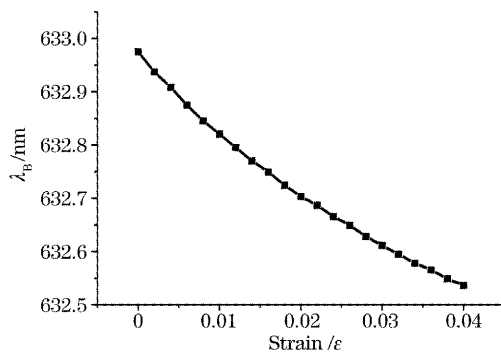


图 6 应变对布拉格波长的影响

Fig. 6 Effect of strain on Bragg wavelength

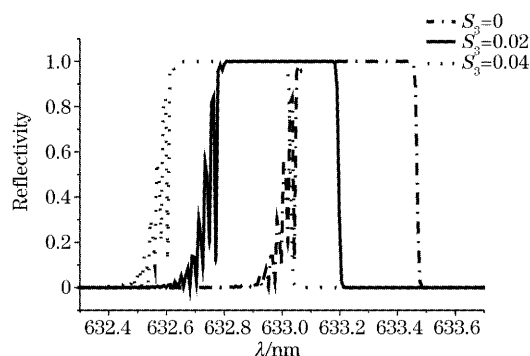


图 7 反射光谱随参量  $S_3$  的变化

Fig. 7 Calculated reflective spectrum taking  $S_3$  as a parameter

## 4 结 论

提出了一种单轴晶体为包层的啁啾光纤光栅模

型, 分析了发生在这种光纤光栅中的电光效应和弹光效应, 理论研究发现在包层施加沿光栅轴向分布的外加电场和应变场可以改变布拉格波长。引入了两个新的参量  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$ , 研究了布拉格波长随参量  $N_{cl}$  和  $\Delta_{cl}$  的变化规律, 发现  $\Delta_{cl}$  变化是引起布拉格波长  $\lambda_B$  变化的主要因素。当外加电场在  $1 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7$  V/m 范围变化时,  $\lambda_B$  可以变化约 0.12 nm; 当应变场在  $0 \sim 0.04$  范围变化时,  $\lambda_B$  可以变化约 0.45 nm。本文的理论研究分析为设计制造新型的电压、压力可调谐光滤波器和高电压、压力传感器提供了思路和理论依据。相关实验工作正在考虑中。

## 参 考 文 献

- Gao Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 997~1000 (in Chinese)
- 高 侃, 周赢武, 林 峰 等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 997~1000
- Chi Ronghua, Lu Kecheng, Chen Shengping *et al.*. Research on lasing wavelength of fiber grating laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1315~1319 (in Chinese)
- 迟荣华, 吕可诚, 陈胜平等. 光纤光栅激光器激光波长的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1315~1319
- Pei Li, Jian Shuisheng, Yan Fengping *et al.*. The dispersion compensation of optical fiber Bragg grating on the long-distance G. 652 fiber transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 220~224 (in Chinese)
- 裴 丽, 简水生, 延风平等. 普通单模光纤传输系统的光纤光栅色散补偿研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 220~224
- Daniel Pastor, José Capmany, Diego Ortega *et al.*. Design of apodized linearly chirped fiber gratings for dispersion compensation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11): 2581~2588
- F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault *et al.*. An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4): 388~390
- Lu Qing, Zhan Yage, Xiang Shiqing. Two-values question in signal detecting of strain sensor based on fiber Bragg gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 988~992 (in Chinese)
- 陆 青, 詹亚歌, 向世清. 光纤光栅应力传感器信号检测中双值问题的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 988~992
- Xiaoping Zhang, Shanglin Hou. Study of characteristics of fiber Bragg grating with uniaxial crystal material cladding[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **219**(4): 193~198
- J. L. Stevenson, R. B. Dyott. Optical fibre waveguide with a single-crystal core[J]. *Electron. Lett.*, 1974, **10**(22): 449~450
- J. Cozens. Propagation in cylindrical fibres with anisotropic crystal cores[J]. *Electron. Lett.*, 1976, **12**(16): 413~415
- Zhang Xiaoping, Tan Zhihong. Analysis of characteristics of doubly clad fibers influenced by birefringent single crystal cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 927~932 (in Chinese)
- 张晓萍, 谭志红. 各向异性内包层对双包层光纤特性影响的分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 927~932
- M. Wakaki, Y. Komachi, H. Machida. Fiber-optic polarizer using birefringent crystal as a cladding[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2591~2594
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- M. Yamada, K. Sakuda. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(16): 3474~3478
- Amnon Yariv. *Introduction to Optical Electronics* [M]. Holt: Rinchart and Winston, 1976