

高频 CO₂ 激光脉冲写入超长周期光纤光栅特性研究^{*}

朱 涛^{1)†} 饶云江^{2)‡} 莫秋菊¹⁾ 王久玲¹⁾

1) 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

2) 成都电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610054)

(2005 年 10 月 17 日收到, 2006 年 3 月 3 日收到修改稿)

分析了高频 CO₂ 激光脉冲写入的周期达数毫米的超长周期光纤光栅 (ULPFG) 的模式耦合特性, 并在此基础上, 简单分析了这种折射率变化主要在光纤包层, 且沿光纤横截面呈非对称分布的 ULPFG 所具有的温度、应变、扭曲及环境折射率响应特性, 并在文末做了实验验证, 实验结果表明该 ULPFG 不同谐振峰具有不同的特性响应灵敏度, 这与理论分析符合得较好. 这些独特的光学特性将使得这种光纤光栅在光纤通信和光纤传感中具有应用价值.

关键词: 光纤传感, 光纤光栅, CO₂ 激光, 超长周期光纤光栅

PACC: 4281W, 4281P

1. 引 言

近年来, 周期为数十到数百微米的长周期光纤光栅 (LPFG) 因其易于制作、附加损耗小、无后向反射、与偏振基本无关等特性, 得到了人们极为广泛的重视. 比如利用长周期光纤光栅制作掺铒光纤放大器的增益均衡器^[1,2]、带通或带阻滤波器^[3-5]、偏振损耗补偿器^[6], 以及温度、应变、扭曲传感器^[7-9]等. 在这之前, 人们对周期达几个毫米的超长周期光纤光栅 (ultra-long-period fiber grating, ULPFG) 研究得较少, Shu 等人^[10]报道了用紫外光可以写入 ULPFG 的现象. 这种光栅的折变主要发生在纤芯, 其谐振峰耦合效率较低, 并且它对外界环境参数的变化不太敏感. 这些特点限制了 ULPFG 在传感中的进一步应用. 前不久, 作者报道了用高频 CO₂ 激光脉冲写入的 ULPFG^[11], 光栅折射率改变主要发生在光纤包层, 并且横向折变呈非对称分布, 相比紫外写入法, 这种方法写入的 ULPFG 将具有一些独特的光学特性. 本文详细分析了高频 CO₂ 激光脉冲写入 ULPFG 的模式耦合理论, 并在此基础上, 理论分析了新型 ULPFG 相应谐振峰具有的温度、应变、扭曲、折射率特性, 并对这几种特性进行了实验验证, 实验结果表明新型 ULPFG 不同谐振峰具有不同的温度、应变、

扭曲、折射率灵敏度, 这与理论分析符合得较好. 基于这些独特的光学特性, 给出了新型 ULPFG 几种潜在的应用方法. 可以预见, 这种新型 ULPFG 将在光纤通信与传感中具有广泛的应用前景.

2. 理论分析

ULPFG 各谐振峰由不同阶次闪耀模与纤芯基模同向耦合而成. 基于 LPFG 模式耦合理论、光纤包层和纤芯模式有效折射率的概念, 可以给出高阶闪耀型 ULPFG 的相位匹配条件

$$\lambda_D^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})\Delta/N, \quad (1)$$

式中, $\lambda_D^{N,m}$ 是设计波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 分别为 ULPFG 纤芯基模与第 N 阶闪耀模第 m 次包层模有效折射率. Δ 为光栅周期, N 是闪耀模式. (1) 式表明 $\lambda_D^{N,m}$ 与闪耀模式 N 成反比, 考虑到 ULPFG 的包层有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 非常复杂, 因此设计波长 $\lambda_D^{N,m}$ 与 $N=1$ 时形成的光栅谐振波长的位置及耦合效率都不一样 (如果整个光栅的耦合都是 $N=1$ 的闪耀模式占主要, 这就是我们常用的一般周期光纤光栅).

由于材料色散对 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 的影响几乎一样, 为了简化分析光纤纤芯和包层折射率变化对 ULPFG 各谐振峰的影响, 这里忽略掉材料色散对谐振峰的影响, 从而假定波导色散在对 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 的影响中

^{*} 教育部重点基金(批准号:104210), 重庆市自然科学基金(批准号:8415)和重庆大学研究生创新基金资助的课题.

[†] E-mail: fiberlab@cqu.edu.cn

具有重要作用^[12].于是,从(1)式可以推导出 ULPFG 纤芯和包层有效折射率发生变化之后的谐振峰波长相位匹配条件

$$\lambda_{\text{res}}^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) \frac{\Lambda}{N} \times \left[1 + \frac{(\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) \cdot d\lambda_{\text{D}}^{N,m}/d\Lambda}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})} \right], \quad (2)$$

式中, $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$ 是变化后的谐振波长, $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 分别为纤芯和包层 N 阶闪耀模 m 次包层模有效折射率的变化量.由(2)式可知,对于 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 一个微小的变化, $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$ 将极大地依赖于光栅周期 Λ 和耦合的闪耀阶数 N .另外,紫外写入的 ULPFG 其 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 占主要因素,而用高频 CO_2 激光脉冲写入的 ULPFG 其折变主要发生在包层,所以 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 的变化将极大地影响 ULPFG 的光学特性,这一点就使得新型 ULPFG 在受到外界环境条件比如温度、应变、扭曲、环境折射率等的影响下,其谐振谱将可能具有独特的光学特性.

将(1)式两边对温度 T 求导,并考虑到光纤材料的热膨胀系数和热光效应,则温度对 ULPFG 谐振峰的影响可表示为

$$\frac{d\lambda_{\text{D}}^{N,m}}{dT} = \frac{\alpha}{N} (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) + \frac{\Lambda}{N} (\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}), \quad (3)$$

式中, α 是光纤的热膨胀系数, ξ_{co} 和 ξ_{cl} 分别为光纤纤芯和包层的热光系数.从(3)式可以知道,新型 ULPFG 高阶闪耀模与纤芯基模耦合形成的谐振峰其温度灵敏度低于低阶闪耀模式与基模耦合形成谐振峰的灵敏度.因此,一支 ULPFG 的各个谐振峰就具有不同的温度灵敏度,闪耀阶次越高其耦合形成的谐振峰灵敏度越低.

考虑到光纤材料的弹光效应,并将(1)式两端对应应变求导,可得应变对 ULPFG 谐振峰位置的影响关系

$$\frac{d\lambda_{\text{D}}^{N,m}}{d\varepsilon} = \frac{\Lambda}{N} \cdot \frac{d\lambda_{\text{D}}^{N,m}}{d\Lambda} \left(1 + \frac{\eta_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \eta_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}} \right), \quad (4)$$

式中, η_{co} 和 η_{cl} 分别为光纤纤芯和包层的弹光系数,从(4)式可见, ULPFG 各谐振峰的应力灵敏度与温度灵敏度非常相似,都是高阶闪耀耦合所形成的谐振峰具有较低的灵敏度,并且单支 ULPFG 各谐振峰具有不同的应变灵敏度.

ULPFG 的扭曲过程将会使得光纤产生剪应力

和扭曲应力,其中剪应力对光纤纤芯和包层的影响可以忽略,而扭曲应力将使得 ULPFG 产生圆双折射,扭曲率和圆双折射的关系可近似表示为^[13]

$$\bar{E} = G \bar{R}_T, \quad (5)$$

式中 G 表示弹光系数, \bar{E} 是由扭曲引起的圆双折射矢量, \bar{R}_T 是扭曲矢量(方向为逆时针或顺时针扭曲).圆双折射矢量 \bar{E} 会产生 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$,对于新型 ULPFG,折变主要分布在包层,并且呈现一种不均匀的分布形式,因此 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 将是主要的,并且 \bar{E} 的方向将使得 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 变大或变小.由方程(2)可知,谐振波长将会向长波或短波方向漂移,这就能利用单个 ULPFG 同时确定扭曲率和扭曲方向,此外,由于 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 比低阶闪耀(比如普通周期光纤光栅, $N=1$) 具有更大的变化量,因此,这种方法将会具有更高的扭曲测量灵敏度.

因为 ULPFG 各谐振峰的传输常数与模场分布极易受到外界折射率的影响,将(1)式两端对环境折射率 n_e 求导,并引入包层有效折射率的增量 $dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}$,则可以得到

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_{\text{D}}^{N,m}}{dn_e} &= \frac{d\lambda_{\text{D}}^{N,m}}{dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}}{dn_e} \\ &= -\frac{\Lambda}{N} \frac{dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}(n_{\text{cl}}, n_e)}{dn_e}, \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式表明当环境折射率发生变化时,将导致包层不同模式的有效折射率发生变化,从而使得 ULPFG 谐振波长发生变化.(6)式中 n_{cl} 表示包层平均折射率.从(6)式可见,谐振波长对环境折射率的灵敏度将极大地依赖于 ULPFG 的高阶闪耀模式.各包层模式有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}(n_{\text{cl}}, n_e)$ 会随 n_e 的增大而增大.当 $n_e < n_{\text{cl}}$ 时, $d\lambda_{\text{D}}^{N,m}/dn_e < 0$, $\lambda_{\text{D}}^{N,m}$ 将向短波方向移动,相反, $\lambda_{\text{D}}^{N,m}$ 将向长波方向移动.这里需要强调的是,由于高频 CO_2 激光脉冲写入的 ULPFG 其折射率在光栅横截面呈非对称变化,因此, $n_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}(n_{\text{cl}}, n_e)$ 的推导公式将极为复杂,尽管如此,其 $n_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}(n_{\text{cl}}, n_e)$ 随 n_e 的变化相对于普通周期光纤光栅还是显著得多.

3. 实验结果

图1给出了利用高频 CO_2 激光脉冲在普通通信光纤(康宁 SMF-28)上写出的周期为 3 mm,光栅总长度为 4.5 cm 的 ULPFG 的透射谱,图中 $N\text{LP}_{0m}$ 表示对

应谐振峰是纤芯基模与第 N 阶闪耀模第 m 次包层模耦合而成. 该图表明 ULPG 相对于普通周期的 LPFG 具有更多的谐振峰, 即有更多的包层模式参与了耦合, 并且 ULPG 有些谐振峰还达到了 16 dB 的谐振幅度(在后续的实验中, 通过改进写入条件, 我们得到了 25 dB 的谐振幅度).

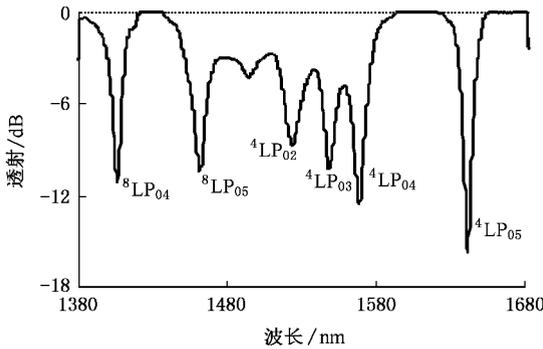


图 1 周期为 3 mm 的 ULPG 透射谱

3.1. 温度特性

利用高灵敏度和高稳定度温度实验箱, 实验研究了图 1 所示 ULPG 两个谐振峰⁴LP₀₅, ⁸LP₀₄的灵敏度, 实验结果如图 2 所示. 由图可见, 在 20℃ 到 100℃ 的温度范围内, ⁴LP₀₅, ⁸LP₀₄具有不同的灵敏度, 但是其线性度都很好, 谐振峰⁴LP₀₅, ⁸LP₀₄的温度灵敏度分别为 0.08 nm/℃ 和 0.04 nm/℃, 这与理论分析(3)式符合得很好, 即模式耦合中闪耀阶数较高的⁸LP₀₄谐振峰比闪耀阶数较低的⁴LP₀₅具有更低的温度灵敏度. 另外, 从图 2 可见, 两个谐振峰幅度随温度的变化很小, 都小于 1 dB, 如果改善高频 CO₂ 激光脉冲的能量稳定度, 其幅度变化会更小.

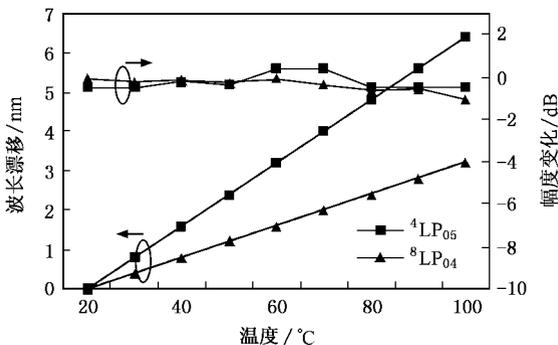


图 2 周期为 3 mm 的 ULPG 的温度响应曲线

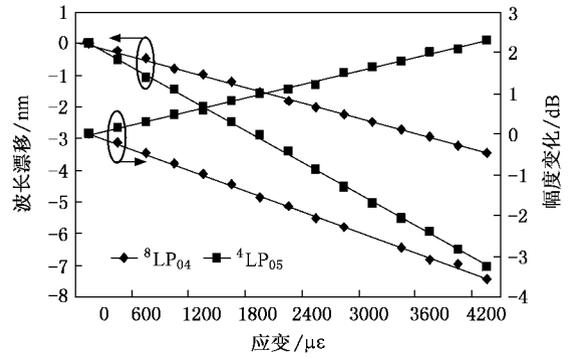


图 3 周期为 3 mm 的 ULPG 的应变响应曲线

3.2. 应变特性

利用微动台我们还实验研究了上述 ULPG 的轴向应变特性, 其实验结果如图 3 所示. 实验中施加在 ULPG 上的应变范围为 0—4000 $\mu\epsilon$, 实验结果表明谐振峰⁴LP₀₅和⁸LP₀₄的波长灵敏度分别为 -0.5 nm/ $\mu\epsilon$ 和 -0.25 nm/ $\mu\epsilon$, 这与(4)式的理论描述相符合. 另外, 这两个谐振峰幅度的灵敏度分别为 0.16 dB/ $\mu\epsilon$ 和 -0.25 dB/ $\mu\epsilon$. 由于新型 ULPG 高阶模的相互耦合性, 根据 LPFG 的耦合理论可知, 不同周期不同谐振峰的幅度灵敏度变化极可能出现极性相反的情况. 如结合 ULPG 的温度特性, 该 ULPG 可实现温度和应变的同时测量.

3.3. 扭曲特性

利用文献 [11] 中的实验装置和计算方法, 我们针对图 1 所示 ULPG 的⁴LP₀₅谐振峰进行了扭曲特性测量, 扭曲光栅长度为 10 cm(中间部分为光栅), 测量范围为 ± 20 rad/m(约 $\pm 120^\circ$ 的扭曲范围). 图 4 为⁴LP₀₅谐振峰谐振波长随扭曲率的变化关系(⁴LP₀₅谐振峰原始中心波长为 1565 nm, 幅度为 -15.5 dB). 图中正扭曲率表示顺时针扭曲 ULPG, 负扭曲率表示逆时针扭曲 ULPG. 从图 4 可以看出, ULPG 的⁴LP₀₅谐振峰在 ± 20 rad/m 范围内, 其中心波长漂移与扭曲率呈较好的线性关系, 灵敏度为 0.25 nm/(rad/m), 是高频 CO₂ 激光脉冲写入法写入的普通 LPFG 扭曲灵敏度 4 倍多. 谐振峰幅度随扭曲率的变化如图 5 所示, 可见随扭曲量的增加(顺时针或逆时针), 谐振峰幅度减小, 这主要是因为扭曲导致的圆双折射改变了输入光的偏振状态, 从而使得纤芯基模与高阶闪耀包层模之间的耦合效率降低的

缘故.

针对 ${}^4\text{LP}_{05}$ 谐振峰做了多次循环实验, 最后发现谐振波长漂移和扭曲率的线性关系重复性很好, 并且没有磁滞现象. 这充分表明利用 ULPG 实现扭曲率的测量具有较好的线性度、较高的灵敏度和较好的重复性.

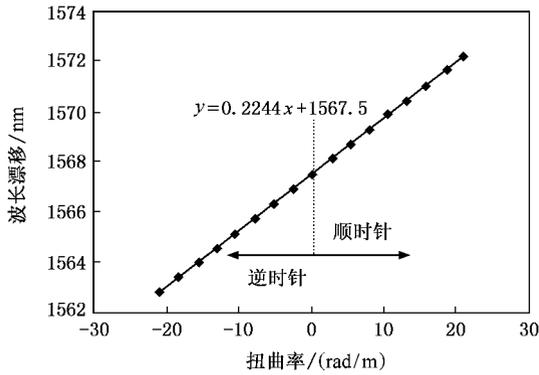


图 4 谐振峰 ${}^4\text{LP}_{05}$ 波长漂移与扭曲率的关系

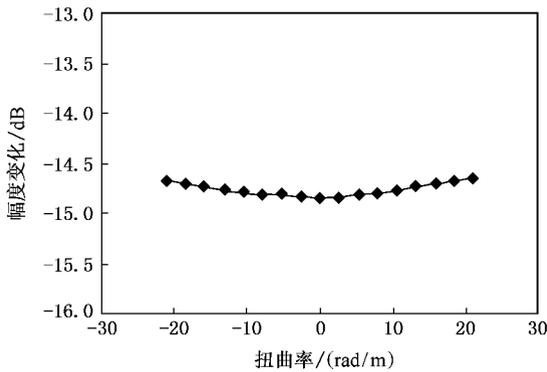


图 5 谐振峰 ${}^4\text{LP}_{05}$ 幅度变化与扭曲率的关系

3.4. 折射率特性

我们在室温状态通过利用不同浓度的工业盐水和糖水来模拟外界环境折射率的变化, 从而来测量 ULPG 对环境折射率的响应. 实验中盐水和糖水对应折射率的范围为 1.32—1.38 和 1.35—1.46, 很显然, 这两者折射率都小于光纤包层的折射率值. 实验中, 将图 1 所示 ULPG 拉直并先后完全放置于盐水和糖水溶液中, 然后开始改变溶液的浓度从而测出 ULPG 谐振峰随盐水和糖水浓度变化的关系, 再根据盐水和糖水的浓度跟折射率之间的对应关系, 得出 ULPG 谐振峰跟外界环境折射率变化的关系. 图 6 和图 7 给出了该 ULPG 的实验结果. 谐振峰 ${}^4\text{LP}_{05}$

的波长漂移与折射率变化呈非线性关系, 在 1.32—1.46 的折射率变化范围内, 其波长漂移量可达 9 nm, 但是其幅度变化却对环境折射率变化不敏感. 相比于谐振峰 ${}^4\text{LP}_{05}$, 图 6 中谐振峰 ${}^8\text{LP}_{04}$ 的波长变化与幅度变化都与外界折射率变化不敏感. 由 (6) 式可见, 因为谐振峰 ${}^8\text{LP}_{04}$ 的闪耀阶次远大于 ${}^4\text{LP}_{05}$, 因此其谐振峰波长漂移很小. 另外, 考虑到环境折射率 n_e 小于光纤包层的折射率 n_{cl} , 因此随着 n_e 的增加, 谐振峰 ${}^4\text{LP}_{05}$ 将向短波方向移动, 这跟前面的理论分析非常符合.

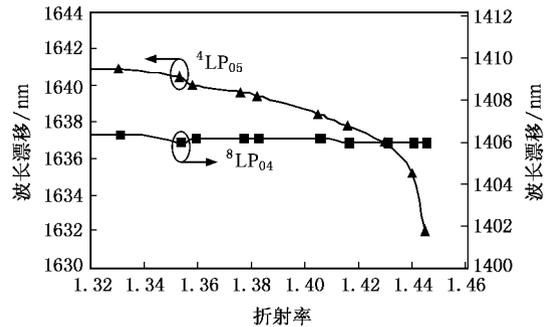


图 6 谐振峰波长漂移与环境折射率变化的关系

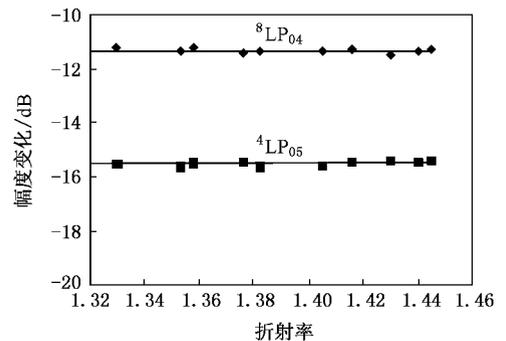


图 7 谐振峰幅度变化与环境折射率变化的关系

4. 应 用

根据上面给出的高频 CO_2 激光脉冲写出的新型 ULPG 各种特性的理论分析和实验结果, 这里给出 ULPG 的一些潜在的应用方法:

1) 可以利用 ULPG 不同谐振峰具有不同的温度和应变灵敏度实现单传感器的温度、应变双参数同时测量.

2) 考虑到高频 CO_2 激光脉冲写出的 LPFG 可用于 800°C 以下的高温测量^[14], 因此该 ULPG 也可以

用于高达 800℃ 的温度和应变同时测量,这在许多重要行业如钢铁冶炼、火力发电等将具有重要应用.

3) 新型 ULPG 的不同谐振峰具有不同的温度和外界折射率特性,特别的,高阶闪耀模与纤芯基模耦合形成的谐振峰具有对外界折射率不太敏感的特性,因此,该 ULPG 可用于温度自补偿的高灵敏度折射率测量.

4) 考虑高频 CO₂ 激光脉冲写出的新型 ULPG 和 LPFG 具有非常相似的折射率变化结构,因此,ULPG 也应具有独特的弯曲、扭曲、横向负荷等特性,那么该 ULPG 将在多参数的同时测量如温度和横向负荷、温度和扭曲等中具有非常重要的潜在应用价值.

5) 基于新型 ULPG 高阶闪耀模式与纤芯基模耦合形成的谐振峰具有不太敏感的温度特性,可以基于此设计温度不敏感型光通信器件,如增益均衡器、ASE 噪声滤波器等.

5. 结 论

本文报道了高频 CO₂ 激光脉冲写入的新型超长周期光纤光栅.理论分析了该 ULPG 的相位匹配条件,在此基础上,分别从理论和实验详细讨论了该 ULPG 的温度、应变、扭曲、折射率特性.理论和实验表明,新型 ULPG 不同闪耀阶次与纤芯基模耦合形成的谐振峰具有不同的温度、应变、扭曲和折射率灵敏度,并且其相应灵敏度的大小极大地依赖于 ULPG 的闪耀阶次.相比于紫外写入的 ULPG,高频 CO₂ 激光脉冲写入的 ULPG 在多参数测量如温度和应变的同时测量、温度和折射率的同时测量等方面具有更大的潜在应用价值,此外,还可以基于 ULPG 设计高温条件下适用的多参数传感器,以及温度不敏感的光通信器件如增益平坦器、ASE 噪声滤波器等.

- [1] Rao Y J , Zhu T , Ran Z L , Wang Y P , Jiang J , Hu A Z 2004 *Optics Communications* **229** 209
- [2] Rao Y J , Hu A Z , Niu Y C 2005 *Optics Communications* **244** 137
- [3] Chan Florence Y M , Chiang K S 2005 *Optics Communications* **244** 233
- [4] Zhang J , Shum P , Li S Y , Ngo N Q , Cheng X P , Ng J H 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1558
- [5] Rao Y J , Zhu T , Ran Z L , Yu B M , Wang Y P 2001 *Proc. SPIE* **4581** 319
- [6] Das M , Ramachandran S , Wang Z , Fleming J , Yan M 2002 ECOC2002 Copenhagen 10.4.5
- [7] Wang Y P , Rao Y J , Ran Z L , Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese)[王义平、饶云江、冉曾令、朱 涛 2003 物理

学报 **52** 1432]

- [8] Rao Y J , Wang Y P , Ran Z L , Zhu T 2003 *J. of Lightwave Technology* **21** 1320
- [9] Wang Y P , Rao Y J 2004 *Electronics Letters* **40** 1101
- [10] Shu X W , Zhang L , Bennion I. 2002 *Optics Communications* **203** 277
- [11] Zhu T , Rao Y J , Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in Chinese)[朱 涛、饶云江、莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]
- [12] Grubsky V , Skorucak A , Starodubov D S , Feinberg J 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 87
- [13] Galtarossa A and Palmieri L 2002 *J. of Lightwave Technology* **20** 1149
- [14] Rao Y J , Li J Y , Zhu T IC020 , *Proc. SPIE* (in press)

Study on characteristics of a CO₂-laser-induced ultra-long-period fiber grating^{*}

Zhu Tao^{1,2)†} Rao Yun-Jiang^{2)‡} Mo Qiu-Ju¹⁾ Wang Jiu-Ling¹⁾

¹ *Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*

² *School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054, China*

(Received 17 October 2005 ; revised manuscript received 3 March 2006)

Abstract

A novel ultra-long-period fiber grating with periods up to several millimeters induced by using CO₂ laser pulses is reported and discussed based on the mode coupling theory. The refractive index change occurs mainly within the cladding area of the fiber and has an unsymmetrical distribution on the cross-section of the ULPFG. The characteristics of temperature, strain, torsion and the effect of the refractive index of environment were investigated in theory and by experiment. The experimental results showed that different resonant peaks of the ULPFG have different sensitivities in the characteristics above mentioned, which offers possible applications in optical communications and sensing.

Keywords : optical fiber sensing, fiber gratings, CO₂ laser pulses, ultra long period fiber grating

PACC : 4281W, 4281P

^{*} Project supported by the Key Projects Program of Education Ministry of China (Grant No. 104210), the Key Projects Program of Natural Science Foundation of Chongqing (Grant No 8415), and Innovative Group Program for Graduates of Chongqing University, China.

[†] E-mail : fiberlab@cqu.edu.cn