

高折射率芯 Bragg 光纤的色散特性研究

任国斌^{1,2)†} 王 智¹⁾ 娄淑琴¹⁾ 简水生¹⁾

¹⁾ 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

²⁾ 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2003 年 8 月 27 日收到, 2003 年 10 月 21 日收到修改稿)

应用超格子模型分析了高折射率芯 Bragg 光纤的色散特性, 讨论了 Bragg 光纤的色散的比例性质以及光纤的芯径、包层周期、填充率与波导色散的关系, 并利用这些关系举例实现了 Bragg 光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 附近的宽带色散平坦.

关键词: Bragg 光纤, 模式, 色散, 波导色散

PACC: 4280M, 4270Q, 4225B

1. 引 言

现代光通信技术的飞速发展对传统的光纤技术提出了更高的要求, 促使人们不断地创新改造原有的设计及工艺手段, 以突破现有二氧化硅光纤的基本限制. 最近, 两种基于光子带隙这一基本概念的新型光纤: 光子晶体光纤(PCF)^[1]和 Bragg 光纤^[2]业已问世, 并得到了迅速发展. 由于具备传统光纤所无法得到的新颖传输特性, 对它们的理论及试验研究引起了广泛关注. PCF 与 Bragg 光纤的区别在于: 对于 PCF, 其包层横截面内存在二维周期性结构, 光纤芯层由周期性结构中的缺陷形成, 光纤的模式由光子带隙的束缚沿纵向传输; Bragg 光纤的包层是径向折射率高低周期性分布的介电结构, 也可以看作是多层介质镜, 光纤的芯层一般由较大的空心部分形成, 光纤的模式由 Bragg 反射束缚在芯层中.

Bragg 光纤的特殊导模机理使我们可以设计其结构, 获得传统光纤所得不到的传输特性^[2,3]: 特殊设计的 Bragg 光纤能支持类似同轴电缆中 TEM 模基模传输, 基模场分布圆周方向均匀, 传输过程中偏振态不发生变化; 可在很宽波长范围内单模工作; 通过结构设计可使零色散波长位于单模范围, 光传输过程中保持脉冲形状不变; 弯曲半径小到波长量

级时仍保持良好的导光能力.

高折射率芯 Bragg 光纤是最近才提出的新型结构, 其芯层由高折射率材料构成^[4], 这种光纤显示了在 $1.55\mu\text{m}$ 附近具有超平坦色散的特性. 但高折射率芯 Bragg 光纤的色散特性与结构参量的关系还未见报道. 本文应用超格子模型对 Bragg 光纤的色散特性进行了详细讨论, 分析了光纤结构参量与波导色散的关系.

2. Bragg 光纤的模式

将分析 PCF 的超格子方法^[5-7]应用于对 Bragg 光纤的研究. 把整个 Bragg 光纤的横向折射率分布作为一个超元胞(supercell), 沿 x, y 两个方向形成四方形的超格子周期结构, 对其作 Fourier 变换, 得到 Fourier 变换系数. 由于光纤结构对称性的存在, 将 Bragg 光纤的折射率分布展开为余弦函数, 系数可由 Fourier 展开系数变换得到.

选取 Hermite-Gaussian 函数将模式电场展开, 将模式电场的表达式代入矢量波动方程, 可得到横向模式电场 $e_x(x, y), e_y(x, y)$ 的本征方程. 通过在给定的波长求解本征方程, 得到各阶模式的特征值及相应的特征向量, 进而求得相应的传播常数与模场分布.

† E-mail: guobin_ren@yahoo.com.cn

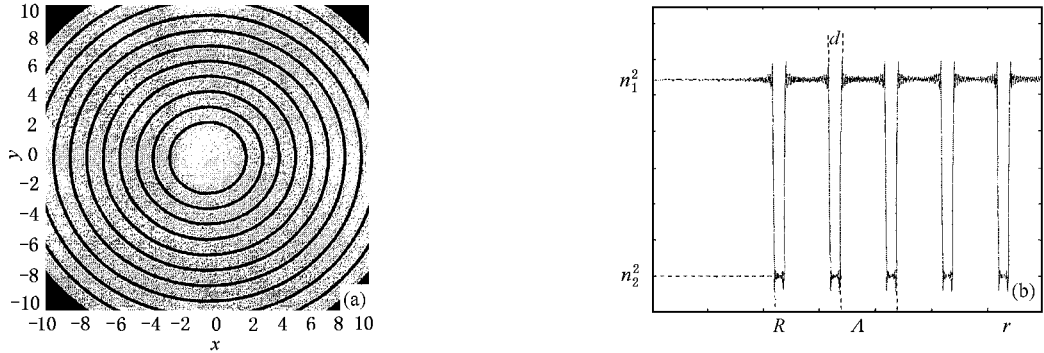


图 1 Bragg 光纤折射率分布示意图 (a)为顶视图 (b)为截面图

高折射率芯 Bragg 光纤的包层由两种折射率不同的材料在径向周期性排列构成多层介质结构,其芯子由高折射率材料构成.图 1 是高折射率芯 Bragg 光纤的数值模拟结果 (a)为 Bragg 光纤折射率分布的顶视图 (b)为截面图.构成 Bragg 光纤的两种材料的折射率分别为 n_1, n_2 , 光纤的包层为一维光子晶体,周期为 Λ ,低折射率部分的厚度为 d ,光纤芯层的半径为 R ,如图中的标注.

讨论中选取高低折射率材料分别为石英和空气两种材料,即 $n_1 = n_{SiO_2}, n_2 = n_{air}, n_{SiO_2}$ 和 n_{air} 分别为石英和空气两种材料的折射率.但本文的结论同样适用于其他的折射率配置,实际上为了支撑光纤的结构可以用其他的低折射率材料代替空气.

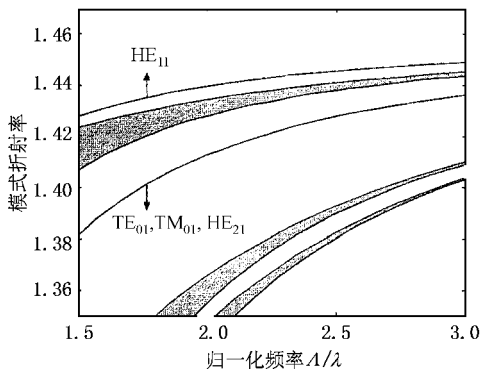


图 2 Bragg 光纤的光子能带结构与模式

Bragg 光纤的包层由多层介质结构组成,可看作一维光子晶体,这样包层就存在光子禁带,光纤就可以通过带隙导光.此外由于 Bragg 光纤的芯子由高折射率材料 SiO_2 组成,与光子晶体光纤类似,Bragg

光纤也可以通过全反射导光.为了分析光纤中的带隙,应用平面波法计算得到的 Bragg 光纤的能带结构,图 2 中的光子能带结构为 TE 模、TM 模的能带结构的叠加.结构参量选取为:光纤芯径 $R = 1.2\mu m$,一维光子晶体周期为 $\Lambda = 1.5\mu m$,低折射率部分(空气)的厚度为 $a = 0.3\mu m$.图中横坐标为归一化频率 Λ/λ (λ 为真空波长),纵坐标为模式折射率 n_{eff} ($n_{eff} = \beta/k_0, k_0$ 为真空波矢量).图 2 中的阴影部分为光子导带,空白区域为光子禁带,即处在此范围内的光(特定的 $\beta-\omega$ 对)不能在横向传播.因此在光子禁带区域就有可能存在 Bragg 光纤的导模.

应用全矢量超格子模型,分析了 Bragg 光纤中的模式.图 2 中显示了 Bragg 光纤中的模式在光子禁带中的位置.光纤中的 HE_{11} 模位于第一导带之上,实际上这个区域对应光纤的全反射区域,也可以看作是光子禁带^[8].光纤的二次模,即 $HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}$ 模,位于 Bragg 光纤包层的光子禁带之内,光由光子禁带的限制不能在光纤的横向传播,从而形成导模.对于传统的阶跃光纤来讲,光纤的导模的模式折射率只能在全反射区,光场靠全反射来限制在芯子中;而对于高折射率芯的 Bragg 光纤,模式的束缚有两种原因,一是全反射(HE_{11} 模),二是包层光子带隙的存在(二次模).图 3 (a)为波长为 $0.633\mu m$ 时, HE_{11} 模的模场强度分布,由于包层中低折射率材料的存在,使光纤的芯子和包层折射率差较大,模场被很好地限制在芯子内.图 3 (b)为 TM_{01} 模的模场分布,模场呈圆对称分布,在模场的中心位置出现了极小值,这是典型的二次模的特征.由于 HE_{21}, TE_{01} 模的模场与 TM_{01} 模类似,就不再给出.

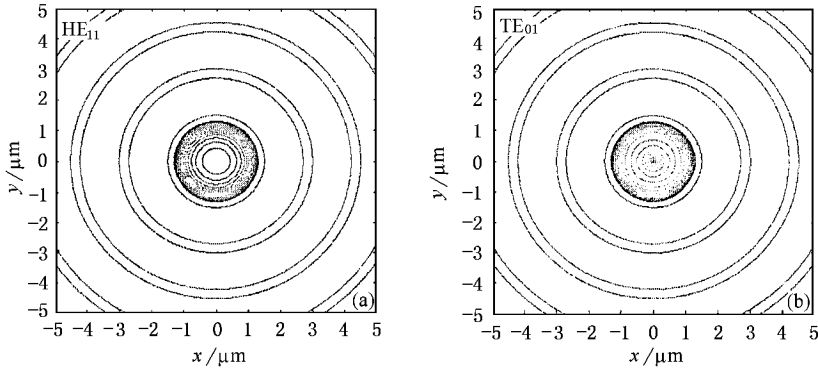


图3 Bragg 光纤中的 HE₁₁ 模 (a)、TE₀₁ 模 (b) 的模场分布, 折射率同时表示在图中, 等高线间距为 2dB, 波长为 0.633μm



3. Bragg 光纤的色散特性

由于高折射率芯 Bragg 光纤中引入了较大的折射率对比及多层介质结构的存在, 使得它与阶跃光纤相比具有许多新颖的传输特性. 下面讨论高折射率芯 Bragg 光纤基模的色散特性.

光纤的色散系数定义为

$$D = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \approx D_w(\lambda) + D_m(\lambda), \quad (1)$$

其中 c 为真空中的光速, λ 为波长. n_{eff} 为光纤中模式的有效折射率. 光纤色散起源于两个因素: 一是模式的传播常数 β 对波长的依赖, 即使没有材料色散 $n_m(\lambda)$ 的影响, 总色散 D 也不会为零, 称之为波导色散. 另一个因素是模式的传播常数 β 通过 $n_m(\lambda)$ 对波长的隐性依赖, 称之为材料色散. $D_w = D|_{n_m(\lambda)=\text{const}}$ 为波导色散; D_m 为材料色散, 可以应用 Sellmeier 公式计算得到. 对于不同结构参量的 Bragg 光纤由纯石英材料制成, 材料色散是相同的, 我们只需要讨论波导色散 D_w .

3.1. 比例性质

如图 1 所示, 高折射率芯 Bragg 光纤的结构参量为: 光纤芯径 R , 包层介电结构的周期 Λ , 低折射率材料的厚度 d . 因此光纤的波导色散可以写成: $D_w(\lambda; R, \Lambda, d/\Lambda)$ 其中 d/Λ 为光纤包层的填充因子. 由 Maxwell 方程的比例 (scaling properties) 性质出发, 应用于 (1) 式, 可以导出

$$D_w = (\lambda; MR, M\Lambda, d/\Lambda) \\ = \frac{1}{M} D_w \left(\frac{\lambda}{M}; R, \Lambda, d/\Lambda \right). \quad (2)$$

当光纤的整体尺度放大一个比例系数 M 时, 波导色散减小到原来的 $1/M$, 相应的波长移到 λM . 比例性质在设计光纤色散时非常有用. 我们可以计算一个参考值, 即 $M=1$ (固定 d/Λ), 其他的尺度缩放 M 的波导色散可由 (2) 式解析地得到.

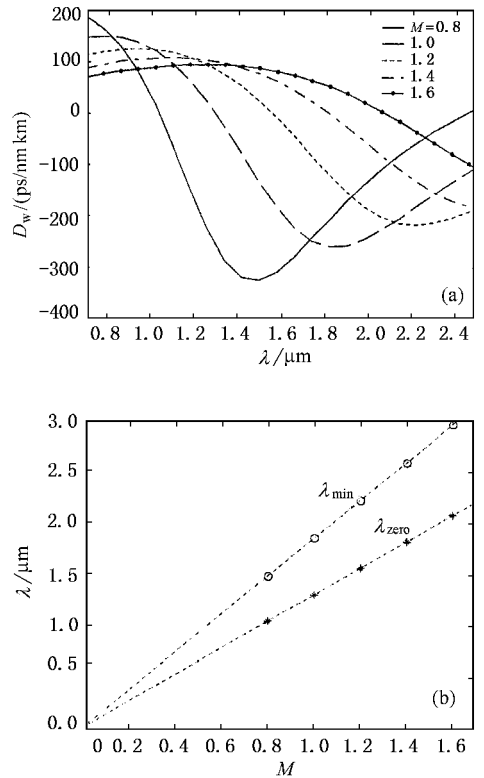


图4 (a) Bragg 光纤的波导色散与比例系数 M 的关系, (b) 零色散点和色散极小点处的波长与 M 的关系

图 4 (a) 为 Bragg 光纤的波导色散与比例系数 M 的关系, $M=1$ 时的参考结构参量为: $R=1\mu\text{m}$, $\Lambda=1\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.3$. 形象地讲, 随着 M 的增大, 波导色散被沿波长方向拉伸, 同时幅度减小. 通过计算曲线

零色散及极小色散波长的位置得到图 4(b), 零色散点和色散极小点处的波长与 M 呈线性关系, 且经过原点. 这一点可以从 (2) 式得到解释, 也从另一角度验证了数值方法的精度.

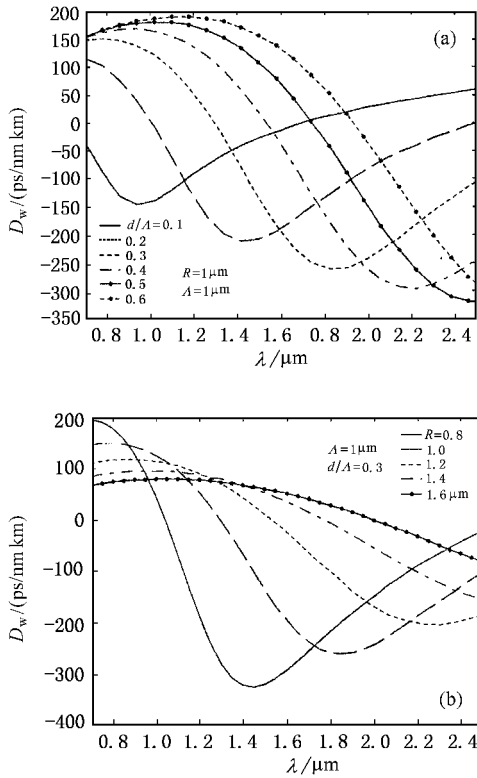


图 5 (a) 波导色散与填充率 d/Λ 的关系 (b) 波导色散与芯径 R 的关系

3.2. 波导色散与芯径 R 填充率 d/Λ 的关系

图 5(a) 给出了波导色散与填充率 d/Λ 的关系 (固定 $R = 1\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$). 可以看到, 随 d/Λ 的增大, 波导色散的幅度增大同时曲线向长波方向移动, 不同曲线的负斜率部分 (下降部分) 近似平行, 并随 f 的增大, 下降部分延长, 并向右平移. 图 5(b) 是波导色散与芯径 R 的关系 (固定 $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.3$). 曲线下降部分近似为线性, 随芯径的增大其斜率的绝对值减小, 同时色散的幅度减小.

值得注意的是, 图 4(a) 与图 5(b) 非常相似. 两图中相同的线型对应相同的芯径 R 和填充率 d/Λ , 但包层介电结构的周期 Λ 不同. 可以用等效折射率方法对这种相似性作简单的解释: 当一个材料的折射率几何分布特征可以和光的波长相比拟或小于光的波长的时候, 可以用一个等效 (平均) 的均匀介质替代这个介质. 考虑一种具有折射率 (n_1, n_2) 分布

的介质材料, 其中 n_2 介质的几何填充因子为 f , 则等效的折射率 n_e 通常满足下列关系^[9]:

$$n_e = f \cdot n_1 + (1 - f) \cdot n_2. \quad (3)$$

对于 Bragg 光纤, 包层的几何填充因子 f 只与填充率 d/Λ 有关, 而与其尺度的大小无关. 因此包层等效的折射率 n_e 只是 d/Λ 的函数, 与介电结构的周期 Λ 无关. 等效之后的光纤成为图 6 所示的阶跃光纤, 因此, 可以认为布拉格光纤的波导色散由结构参数 R 和 n_e 决定, 即 $D_w(\lambda; R, \Lambda, d/\Lambda) = D_w(\lambda; R, n_e)$. 对图 4(a) 所示的光纤整体尺度放大 M 倍的波导色散, 有

$$D_w(\lambda; MR, M\Lambda, d/\Lambda) \approx D_w(\lambda; MR, n_e), \quad (4)$$

而对图 5(b) 中光纤芯层放大 M 倍的波导色散

$$D_w(\lambda; MR, \Lambda, d/\Lambda) \approx D_w(\lambda; MR, n_e). \quad (5)$$

(4)(5) 两式说明在等效折射率的近似下, 光纤整体尺度放大 M 倍与光纤芯层放大 M 倍时的波导色散相同.

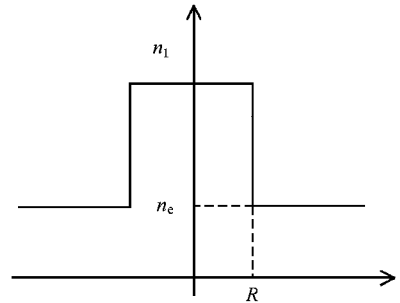


图 6 等效光纤折射率分布示意图

4. 色散平坦 Bragg 光纤的设计

有了光纤结构参量与波导色散的关系, 就可以根据需要来设计 Bragg 光纤, 实现特殊的色散特性. 下面以 $1.55\mu\text{m}$ 波长窗口的色散平坦 Bragg 光纤的设计为例说明.

对于本文的 Bragg 光纤, 材料色散均相同, 波导色散决定了光纤的总色散. 图 7(a) 为色散平坦 Bragg 光纤的色散曲线, 结构参量为: $R = 2.16\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.095$. 图中给出了光纤波导色散 D_w , 材料色散的负值 $-D_m$, 总色散 D 就可以由这两条曲线的差得到. 我们注意到, $-D_m$ 曲线在长波长范围内是一条光滑的曲线, 在我们感兴趣的波长范围内, 可以认为曲线是线性的. 设计色散平坦 Bragg 光纤

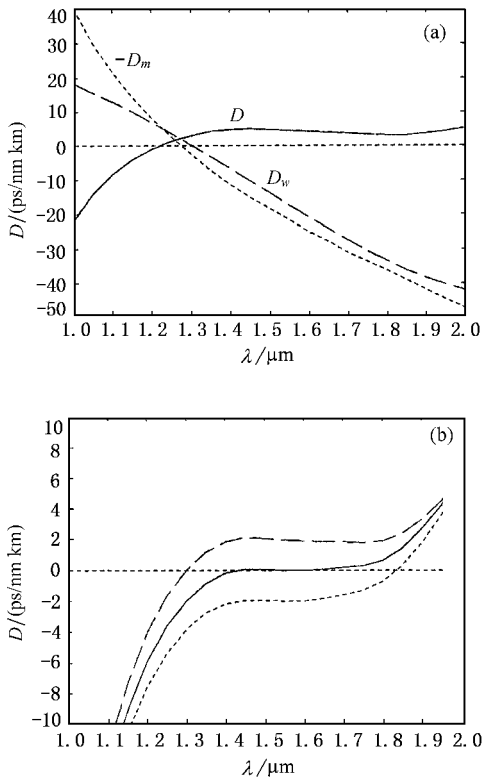


图7 (a) Bragg 光纤的波导色散, 材料色散和总色散, (b) $1.55\mu\text{m}$ 附近的色散平坦 Bragg 光纤的色散特性, 对应的结构参量分别为: 长划线, $R = 2.18\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.088$; 实线, $R = 2.175\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.0846$; 点线, $R = 2.16\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.0825$

的关键是如何控制波导色散 D_w 曲线的下降部分 (在感兴趣的波长范围内) 的斜率. 如前面的讨论, 见图 4(a) 图 5(b), 变化光纤的整体尺度和芯径大小都可以控制的 D_w 曲线斜率. 当选择合适的光纤尺度或芯径, 就可以使 D_w , $-D_m$ 曲线在某个波长范围内平行, 这样就得到了色散平坦特性.

当填充率 d/Λ 变化时, 由图 5(a), 波导色散向上或向下平移, D_w 曲线的下降部分的斜率不变, 这就导致 D_w , $-D_m$ 曲线之间的间距变化, 可以得到色散值为正, 负或零的色散平坦 Bragg 光纤. 图 7(b) 为色散值为正, 负或零的色散平坦 Bragg 光纤, 对应的结构参量分别为: 长划线, $R = 2.18\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.088$; 实线, $R = 2.175\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.0846$; 点线, $R = 2.16\mu\text{m}$, $\Lambda = 1\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.0825$. 值得注意的是, 这种光纤设计可以获得约 300nm 的极宽的色散平坦窗口.

此外对于光纤结构参量的设计还可以实现对色散系数的特殊要求, 如 $0.8\mu\text{m}$ 附近的双零色散^[4], 这一特殊的色散特性对于 800nm 附近的光孤子产生和传输具有重要意义. 利用光纤结构参量与波导色散的关系, 高折射率芯 Bragg 光纤可以通过设计结构实现灵活的色散特性.

5. 结 论

本文应用超格子模型分析了高折射率芯 Bragg 光纤的色散特性. 高折射率芯 Bragg 光纤中存在两种导模机理: 全反射导模和光子带隙导模. 光纤包层中的光子带隙的存在拓宽了模式存在的范围, 多层介质结构的存在使 Bragg 光纤呈现出新颖的传输特性. 详细讨论了 Bragg 光纤色散的比例性质以及光纤的芯径、包层周期、填充率与波导色散的关系. 利用这些关系设计了 $1.55\mu\text{m}$ 附近的色散平坦 Bragg 光纤, 同时获得了极宽的色散平坦窗口. 分析结果表明通过结构参量的设计, 高折射率芯 Bragg 光纤可以实现对色散系数的特殊要求.

[1] Knight J C et al 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547

[2] Ibanescu M et al 2000 *Science* **289** 415

[3] Hart S D et al 2002 *Science* **296** 510

[4] Monsoriu J A, Silvestre E et al 2003 *Opt. Exp.* **11** 1400

[5] Zhi W et al 2003 *Opt. Exp.* **11** 980

[6] Ren G B et al 2003 *Opt. Exp.* **11** 1310

[7] Ren G B et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 484 (in Chinese). [任国斌等 2004 物理学报 **53** 484]

[8] Ferrando A et al 2000 *Opt. Lett.* **25** 1328

[9] Alexander Argyros et al 2001 *Opt. Exp.* **9** 813

Dispersion properties of high-index-core Bragg fibers

Ren Guo-Bin^{1,2)†} Wang Zhi¹⁾ Lou Shu-Qin¹⁾ Jian Shui-Sheng¹⁾

¹⁾(*Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 ,China*)

²⁾(*Physics and Technology College , Hebei University , Baoding 071002 , China*)

(Received 27 August 2003 ; revised manuscript received 21 October 2003)

Abstract

The dispersion properties of high-index core Bragg fibers are investigated by superlattice model. We have analyzed the scaling properties of waveguide dispersion , discussed the dependence of waveguide dispersion on fiber structure parameters : the core radius , radial periodicity and filling ratio of the cladding , and designed an example structure of Bragg fiber for broadband flattened dispersion at $1.55\mu\text{m}$.

Keywords : Bragg fibers , mode , dispersion , waveguide dispersion

PACC : 4280M , 4270Q , 4225B

[†]E-mail : guobin_ren@yahoo.com.cn