



三层芯结构在单模大模场面积低弯曲损耗光纤中的应用和分析

郑斯文 刘亚卓 罗晓玲 王丽辉 张娜 张晶晶 金传洋 徐丙立 屈强 陈玲

Application and analysis of three-layer-core structure in single-mode large-mode-area fiber with low bending loss

Zheng Si-Wen Liu Ya-Zhuo Luo Xiao-Ling Wang Li-Hui Zhang Na Zhang Jing-Jing Jin Chuan-Yang
Xu Bing-Li Qu Qiang Chen Ling

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224214 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210410

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210410>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析

Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores

物理学报. 2017, 66(2): 024210 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024210>

单模热致超大模场掺镱光纤放大器的数值研究

Modeling the single-mode thermally guiding very-large-mode-area Yb-doped fiber amplifier

物理学报. 2017, 66(6): 064201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064201>

基于飞秒激光直写的单向单模耦合微腔

Coupled microcavities with unidirectional single mode via femtosecond laser direct-writing

物理学报. 2018, 67(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172395>

基于酒精与磁流体填充的单模-空芯-单模光纤结构温度磁场双参数传感器

A modal interferometer based on single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber structure filled with alcohol and magnetic fluid for simultaneously measuring magnetic field and temperature

物理学报. 2017, 66(7): 070601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070601>

三阶分布反馈太赫兹量子级联激光器的远场分布特性

Far-field analysis of third-order distributed feedback terahertz quantum cascade lasers

物理学报. 2017, 66(9): 099501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.099501>

一种具有低串扰低非线性的双沟槽环绕型十三芯五模光纤

Double-trench assisted thirteen-core five-mode fibers with low crosstalk and low non-linearity

物理学报. 2021, 70(10): 104208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201825>

三层芯结构在单模大模场面积低弯曲损耗光纤中的应用和分析

郑斯文[†] 刘亚卓 罗晓玲 王丽辉 张娜 张晶晶
金传洋 徐丙立 屈强 陈玲

(陆军装甲兵学院, 北京 100072)

(2021年3月3日收到; 2021年6月21日收到修改稿)

研究并分析了一种采用三层芯结构的单模大模场面积低弯曲损耗光纤. 纤芯由纤芯高折射率层、包层低折射率层和下陷低折射率层三层结构构成. 系统地分析了三层芯光纤 (three-layer-core fiber, TLF) 中不同结构参数对基模模场面积及弯曲损耗的影响. 研究表明, 通过调整三层芯的结构参数, 在不牺牲截止波长的前提下, 这种 TLF 可以实现在增大基模有效面积 (A_{eff}) 的同时, 将弯曲损耗降到更低. 通过调整纤芯中三层芯的结构参量, A_{eff} 可以达到 100—330 μm^2 甚至更高. 此外, 在相同模场面积 A_{eff} 下, 三层芯光纤的弯曲损耗可以比普通阶跃型光纤 (SIF) 要低 2—4 个数量级. 分析表明这种大有效面积、低弯曲损耗三层芯单模光纤在宽带大容量传输、及大功率光纤激光器和放大器中具有重要的潜在应用价值.

关键词: 三层芯, 单模, 大模场面积, 弯曲损耗

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.70.20210410

1 引言

随着目前高功率大容量光纤通信传输系统的高速发展, 光纤传输容量的需求越来越受到广泛关注, 因此如何在光纤中实现单模运转、基模大模场面积 (A_{eff}) 逐渐成为研究重点^[1-3]. 针对此, 目前已提出了不少光纤结构^[4-6]. 但存在的主要问题是制造难度较大, 究其原因主要是低数值孔径 NA 的实现、管棒堆积拉丝技术、光子晶体光纤的六角密排结构特点.

然而 A_{eff} 和弯曲性能之间存在此消彼长的关系^[7], 光纤中产生的弯曲损耗, 使得基模 A_{eff} 的增大受到限制. 低数值孔径 NA 的要求不可避免地影响弯曲性能和单模截止波长^[8]. 因此, 如何在保持单模、大 A_{eff} 的同时, 提高弯曲性能是目前研究中

亟待解决的问题. 然而, 目前大多数关于大模场面积光纤的研究中, 在增大有效面积的同时, 并未降低其弯曲损耗. 另外一些研究的重点是如何降低弯曲损耗^[9-11]. 然而, 他们更注重的是在模场直径 (MFD) 与标准单模光纤 SMF (SSMF) 相匹配的情况下, 如何进一步提高其弯曲性能, 对于如何增大其模场面积并未研究.

基于此, 本文提出可以采用三层芯结构, 来实现在保持单模、大模场面积 A_{eff} 的同时, 提高其弯曲性能. 三层芯光纤 (three-layer-core fiber, TLF) 结构的纤芯部分由三层组成, 包括纤芯折射率层、包层折射率层和下陷折射率层. 近年来曾对类似的结构进行了广泛的研究^[12-14], 然而很少有报道研究纤芯中三层芯的结构参量对光纤的光学性能的影响, 以及如何调整不同结构参量以实现在增大模场面积 A_{eff} 的同时保持更低的弯曲损耗^[15]. 文

[†] 通信作者. E-mail: zhengsiwen010@163.com

献 [15] 中只分析了部分参数 d_1 和 d_2 对模场面积 A_{eff} 和弯曲损耗的影响, 且关于参数纤芯中包层低折层的厚度 d_1 对弯曲损耗的变化分析并不全面, 此外并未固定二阶模的截止波长 λ_C . 针对此, 本文系统地研究了三层芯结构参数对 TLF 光学特性的影响. 详细分析了三层芯不同结构参数对截止波长 λ_C 、有效 A_{eff} 和弯曲性能的影响. 研究发现, 随着包层低折层的厚度的增大, 弯曲损耗存在极小值. 结果表明, 在单模截止波长 λ_C 保持不变的情况下, 三层芯光纤结构可以在增大有效 A_{eff} 的同时, 降低弯曲损耗. 这种光纤具有结构简单、制造方便、成本低等优点, 可适用于大功率光纤放大器和激光器、密集波分复用 DWDM 系统中, 可有效满足快速增长的数据通信需求, 特别是大数据、云计算、人工智能和其他创新技术的需求.

2 三层芯光纤结构设计和参数设置

TLF 的横截面结构及折射率分布如图 1 所示. 纤芯由内到外依次由纤芯高折射率层、包层低折射率层和下陷低折射率层三层结构构成. 图中的中心黑色区域代表纤芯高折射率层, 中间白色区域代表包层低折射率层, 外围灰色区域代表下陷低折射率层. 实际制造的光纤纤芯高折层可以由铟离子及铝离子的掺杂来实现, 而下陷低折层可以通过掺氟来实现. 包层低折率层为纯石英结构, 其折射率为 $n_{\text{clad}} = 1.444$. 假定纤芯高折率层的半径为 a , 纤芯高折层和包层之间的折射率差为 $\Delta_1 = n_1 - n_{\text{clad}}$, 其中 n_1 是纤芯高折层的折射率. 下陷低折层宽度为 c , 包层低折层的厚度为 b , 包层与下陷低折层之间的折射率差为 $\Delta_2 = n_{\text{clad}} - n_2$, 其中 n_2 为下

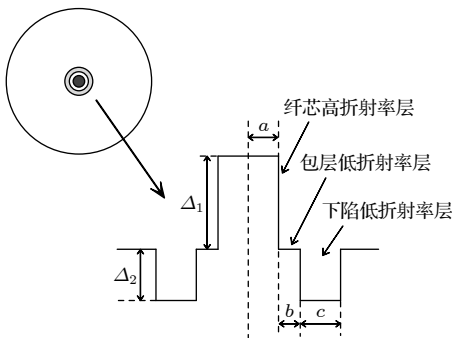


图 1 TLF 的横截面结构及折射率分布图

Fig. 1. Cross section schematic and refractive index profile of TLF structure.

陷低折层的折射率. 包层直径为 $d_{\text{clad}} = 125 \mu\text{m}$, 包层折射率为 $n_{\text{clad}} = 1.444$. 除非另有说明, 否则本文将单模工作波长 λ 固定在 $1.55 \mu\text{m}$. 为了确保单模工作在 $1.55 \mu\text{m}$, 二阶模的截止波长 λ_C 固定在 $1.3 \mu\text{m}$. 系统地分析了包层低折层和下陷低折层参数对 TLF 特性的影响, 为大模场面积和低弯曲损耗的光纤设计提供了参考.

3 不同层结构参数对三层芯光纤性能的影响

在 TLF 中, 传输各模式的电场强度 \mathbf{E} 满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla \times (n^{-2} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y) \times e^{-j\beta z}$, n 是光纤中的横截面折射率大小, k_0 是真空中波数, β 是传播常数, $\beta = (2\pi/\lambda) \times n_{\text{eff}}$. 这里采用传输矩阵法进行求解 [16,17], 通过 (1) 式可以求出其特征向量和特征值, 即不同模式的电场强度 \mathbf{E} 及传播常数 β . 通过给定 TLF 的结构参量: 纤芯高折层的半径 a , 纤芯高折层和包层之间的折射率差 Δ_1 , 包层低折层的厚度 b , 下陷低折层宽度 c , 包层与下陷低折层之间的折射率差 Δ_2 , 就能唯一确定 TLF 的折射率大小, 从而确定某一特定波长 λ 下不同模式的电场分布 \mathbf{E} 及传播常数 β .

在传统光纤中, 导模的模式折射率 n_{eff} 必须满足: $n_{\text{clad}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{core}}$, 其中 n_{clad} 和 n_{core} 分别为包层和芯层的折射率, 模式折射率低于 n_{clad} 的模式不能在该光纤中传导, 由此可以判断其截止特性 [18,19]. 理论截止波长为单模光纤中只有基模传输的最短波长, 通常定义为: 模式有效折射率 n_{eff} 随波长变化过程中等于包层折射率 n_{clad} 时对应的波长值即为该模式的截止波长. 因此, 令二阶模的模式有效折射率 $n_{\text{eff}} = n_{\text{clad}}$, 即可反推出二阶模的截止波长 λ_C . 本文给出了 TLF 中纤芯不同层结构参量对截止波长 λ_C 的影响. 假设纤芯高折层半径 $a = 6 \mu\text{m}$, 纤芯高折层和包层的折射率差 $\Delta_1 = 0.003$, 图 2 给出了截止波长 λ_C 随纤芯不同层结构参数 c , b 和 Δ_2 的变化关系. 其中图 2(a)—2(c) 中的结构参数分别固定为: $b = 3 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $c = 6 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$. 如图 2(a) 中所示, 随着 c 的增大, 截止波长 λ_C 呈指数单调递减, 当 c 大于 $4 \mu\text{m}$ 时, λ_C 逐渐趋于一常数不再发生

显著变化. 由图 2(b) 和图 2(c) 分别可以看出, λ_C 随 b 的增大而逐渐增大, 随 Δ_2 的增大而逐渐减小. 因此, 通过改变 TLF 中纤芯不同层结构参数可以达到不同截止波长 λ_C 的要求.

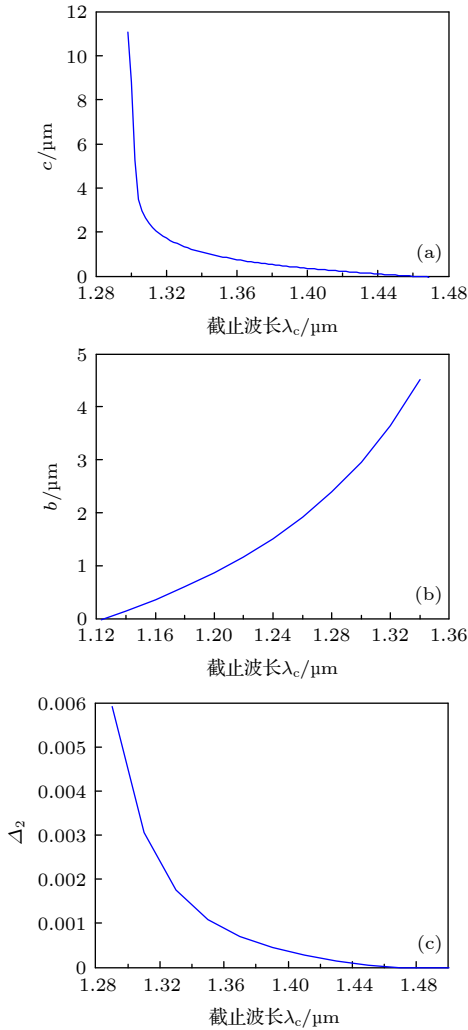


图 2 截止波长 λ_C 随不同层结构参数 (a) c 、(b) b 和 (c) Δ_2 的变化关系

Fig. 2. Cutoff wavelength λ_C as a function of the layer parameters: (a) c ; (b) b ; (c) Δ_2 .

为了能更加完整和全面地反映满足截止波长条件下的参数区间, 本文给出了 TLF 纤芯中的任意两个不同结构参量对截止波长 λ_C 的影响. 图 3 分别给出了截止波长 λ_C 随纤芯不同层结构参数 b 和 c , b 和 Δ_2 , Δ_2 和 c 的三维变化图. 其中图 3(a)—图 3(c) 中的结构参数分别固定为: $\Delta_2 = 0.004$, $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$. 如图中所示, 纤芯不同层结构参量 c , b 和 Δ_2 对截止波长 λ_C 的影响与图 2 中的分析结果一致, 故可以反映出截止波长 λ_C 随纤芯不同层结构参数的变化关系.

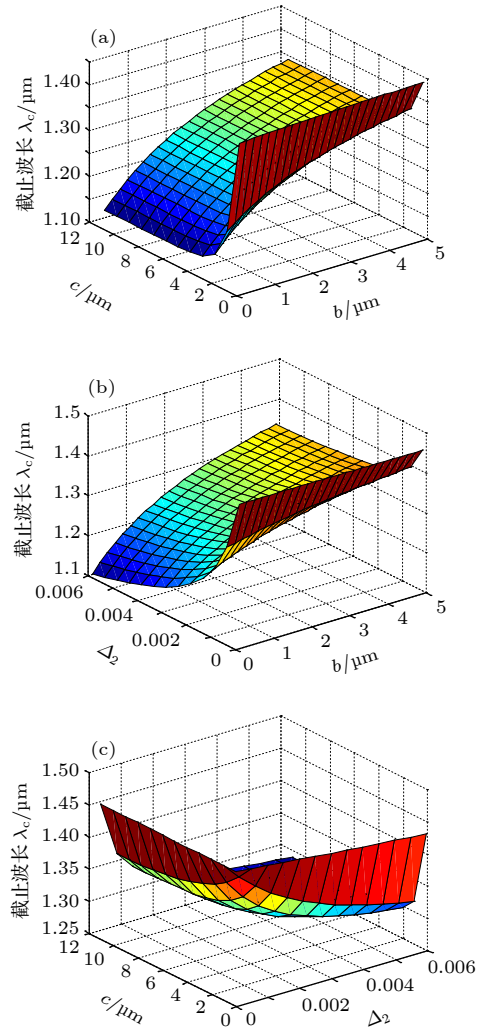


图 3 截止波长 λ_C 随不同层结构参数 (a) b 和 c 、(b) b 和 Δ_2 、(c) Δ_2 和 c 的变化关系

Fig. 3. Cutoff wavelength λ_C as a function of the layer parameters: (a) b and c , (b) b and Δ_2 , (c) Δ_2 and c .

假设固定截止波长 $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$, 通过改变 TLF 中纤芯不同层结构参数可以实现较大的纤芯高折层半径 a . 光纤分为有源光纤和无源光纤, 对于有源光纤如稀土掺杂光纤, 增大 a 有利于稀土离子的吸收, 从而提高光纤的增益性能. 对于无源光纤, 增大 a 有利于模场有效面积 A_{eff} 的增大, 从而增强光纤的传输性能. 图 4 给出了纤芯高折层半径 a 随纤芯不同层结构参数 c , b 和 Δ_2 的变化关系. 其中图 4(a), 图 4(b), 图 4(c) 中的结构参数分别固定为: $b = 1 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $c = 6 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 1 \mu\text{m}$. 如图 4(a) 所示, 当 $\Delta_1 = 0.0025$ 时, 随着 c 从 0 增大到 $6.5 \mu\text{m}$, a 可以从 $5.8 \mu\text{m}$ 增大到 $7.2 \mu\text{m}$. 图 4(b) 和 4(c) 分别显示, a 随 b 的增大而减小, 随 Δ_2 的增大而增大.

而在阶跃型单模光纤中, 当工作波长 λ 和截止波长 λ_C 均固定时, 纤芯半径与 Δ_1 成反比. 通常情况下, 在普通阶跃型光纤中, 由于制造工艺的限制, 纤芯折射率 Δ_1 不能过小, 即数值孔径 NA 不能低于 0.06, 否则基模的弯曲损耗将呈指数形式递增, 光纤对弯曲效应将变得十分敏感, 因而普通阶跃型光纤的纤芯半径 a 存在最大极限值. 而这种 TLF 则可以避免这些问题, TLF 中的下陷低折层可以增强对基模模场的限制能力, 防止模场扩散到包层中, 基模将被很好地限制在纤芯中. 因此, TLF 可以突破 NA 的极限值, 在增大纤芯半径的同时保持单模运转.

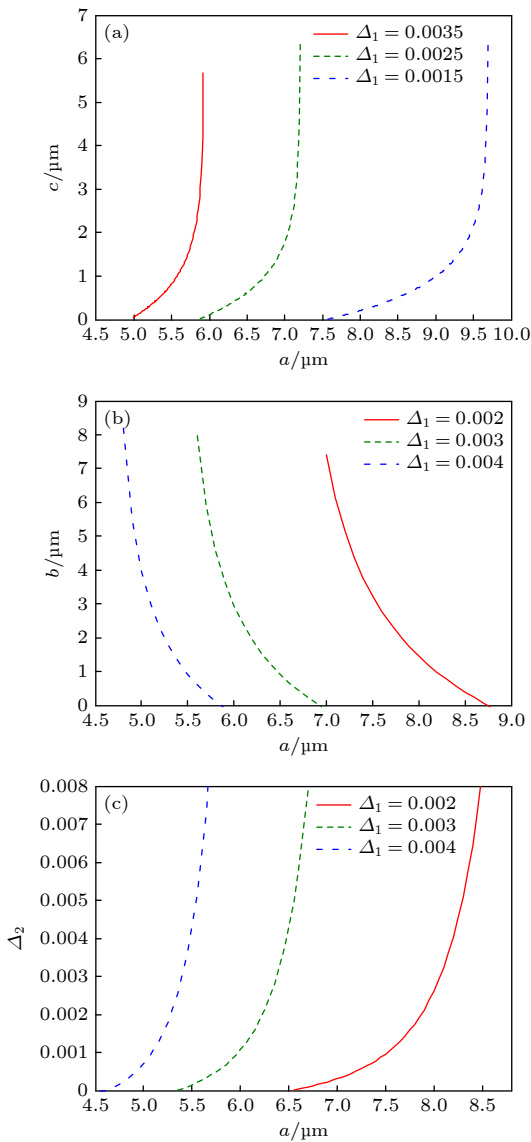


图 4 纤芯高折层半径 a 随不同层结构参数 (a) c 、(b) b 和 (c) Δ_2 的变化曲线

Fig. 4. Relationship between core radius a and (a) c , (b) b , and (c) Δ_2 .

在实现高功率大容量光纤通信中, 保持大传输容量的同时减小非线性效应是必不可少的, 因而增大光纤模场面积 A_{eff} 十分重要. 这种 TLF 结构的基模模场分布并不是近高斯型的, 因而采用 Petermann I 定义的公式来计算其模场有效面积 A_{eff} ^[16,20–22]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \int_0^\infty E^2 r^3 dr}{\int_0^\infty E^2 r dr} = \frac{2\pi \iint_{\Omega} E^2 (x^2 + y^2) dx dy}{\iint_{\Omega} E^2 dx dy}, \quad (2)$$

其中, E 为基模电场分布. 假设固定截止波长 $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$, 图 5 给出了基模有效面积 A_{eff} 随纤芯不同层结构参数 c , b 和 Δ_2 的变化关系. 其中 a 由截止波长 λ_C 来确定, 即通过改变 a 以达到 $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$ 的要求. 由图 5 可以看出, 随着 Δ_1 的减小 A_{eff} 逐渐增大, 可以达到约 $220 \mu\text{m}^2$. A_{eff} 随着 c 和 Δ_2 的增大而减小, 随着 b 的增大而增大. 因此实际制作中若想要大的 A_{eff} , 则需选择小的 c 、小的 Δ_2 以及大的 b 值. 可以看出, 通过调整三层芯的结构参数, 在不牺牲截止波长 λ_C 的前提下, 这种三层芯光纤结构可以增大 A_{eff} .

其物理意义可以表述如下: 由于纤芯周围的下陷低折层的限制, 使得光纤基模模场不易泄漏到光纤包层区域, 光纤基模模场被很好地限制在了纤芯内部, 从而使得光纤基模的 A_{eff} 就越小. 通过改变下陷层参数大小, 可以调节模场束缚的程度. c 和 Δ_2 越大说明纤芯中的最外层——下陷低折层越大, 下陷低折层对基模场的限制能力就越强, 因而 A_{eff} 就越小. b 越大说明纤芯高折层离纤芯的最外层——下陷低折层就越远, 下陷低折层对纤芯的影响就越小, 因而 A_{eff} 就越大.

为了避免陷入局部极值, 本文给出了多维参数对应的 A_{eff} 的变化曲线, 即纤芯中的任意两个不同结构参量对 A_{eff} 的影响. 纤芯高折层和包层的折射率差 $\Delta_1 = 0.003$. 图 6 分别给出了基模有效面积 A_{eff} 随纤芯不同层结构参数 b 和 c , b 和 Δ_2 , Δ_2 和 c 的三维变化图. 其中图 6(a)—6(c) 中的结构参数分别固定为: $\Delta_2 = 0.004$, $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$. 如图中所示, 模场面积 A_{eff} 随纤芯结构参量 c , b 和 Δ_2 的变化趋势与文中图 5 的分析结果一致, 故可以反映出 A_{eff} 随纤芯不同层结构参数的变化关系.

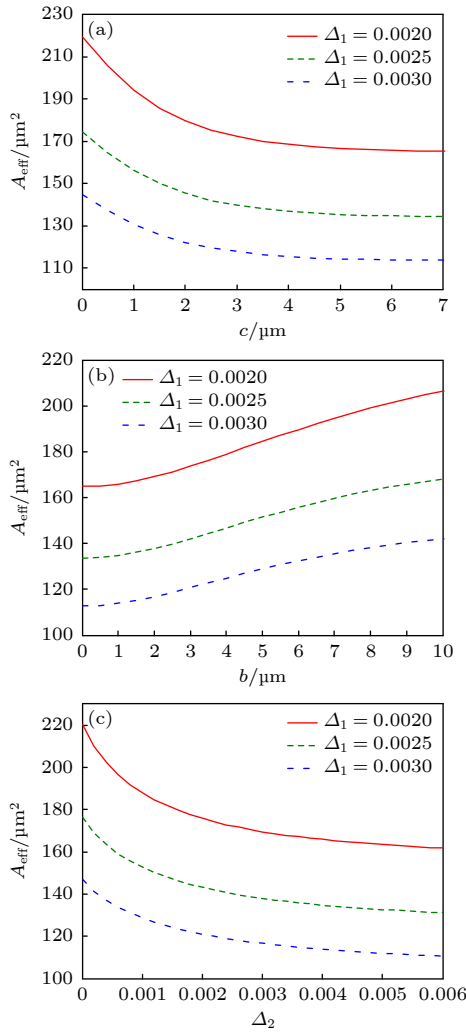


图 5 A_{eff} 随不同层结构参数 (a) c 、(b) b 和 (c) Δ_2 的变化曲线

Fig. 5. Relationship between A_{eff} and (a) c , (b) b , and (c) Δ_2 .

基模有效面积 A_{eff} 和弯曲性能之间存在此消彼长的关系, 光纤中产生的弯曲损耗, 使得 A_{eff} 的增大受到限制. 在不牺牲截止波长 λ_C 的前提下, 这种三层芯光纤结构可以在相同模场面积 A_{eff} 下, 降低光纤的弯曲损耗. 光纤弯曲时, 由于形变造成的几何结构及折射率差 Δ 发生变化, 从而使得传输性能受到影响. 假设光纤沿 $+x$ 方向发生弯曲, 可以等效为折射率沿弯曲方向呈倾斜分布的平直光纤, 弯曲半径越小, 倾斜斜率越大. 光纤横截面的等效折射率表示为^[23]

$$n_0(x, y) = n(x, y) \sqrt{1 + 2x/R}, \quad (3)$$

其中, $n_0(x, y)$ 是弯曲光纤的等效折射率大小, $n(x, y)$ 是平直光纤的折射率大小, x 为弯曲方向, R 为弯曲半径. 计算结果基于有限元方法, 通过全矢量麦克斯韦方程组, 采用商业软件 Comsol

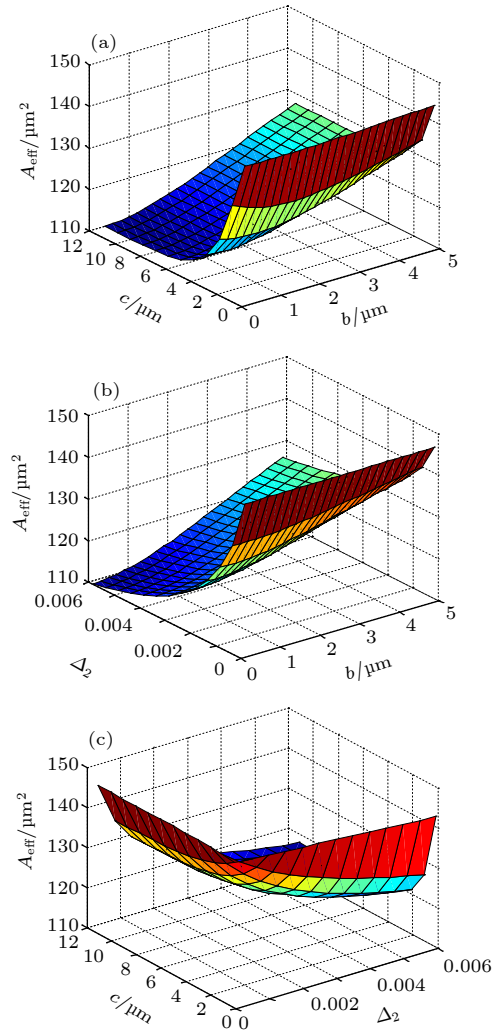


图 6 A_{eff} 随不同层结构参数 (a) b 和 c 、(b) b 和 Δ_2 和 (c) Δ_2 和 c 的变化关系

Fig. 6. Relationship between A_{eff} and (a) b and c , (b) b and Δ_2 , and (c) Δ_2 and c .

Multiphysics 计算得出. 除光纤结构外, 在光纤边界处采用圆形完美匹配层边界条件 (PML) 来模拟模型中无限域的效果, 因而模式的传播常数 β 成为一个复数, 实部是模式折射率, 虚部是与限制损耗有关的量. 光纤中某一模式的限制损耗 α_B 由 β 的虚部计算得出:

$$\alpha_B = 20 \lg(e) \text{Im}(\beta) \approx 8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}). \quad (4)$$

利用等效折射率模型^[9,24]及(3)式和(4)式, 当为平直光纤时, 计算结果为限制损耗. 当光纤发生弯曲时, 计算结果为弯曲损耗^[9,24].

假设固定截止波长 $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$, 图 7 给出了纤芯不同层结构参数 c , b 和 Δ_2 下, 弯曲损耗随不同弯曲半径 R 的变化关系. 其中 a 由 λ_C 来确定,

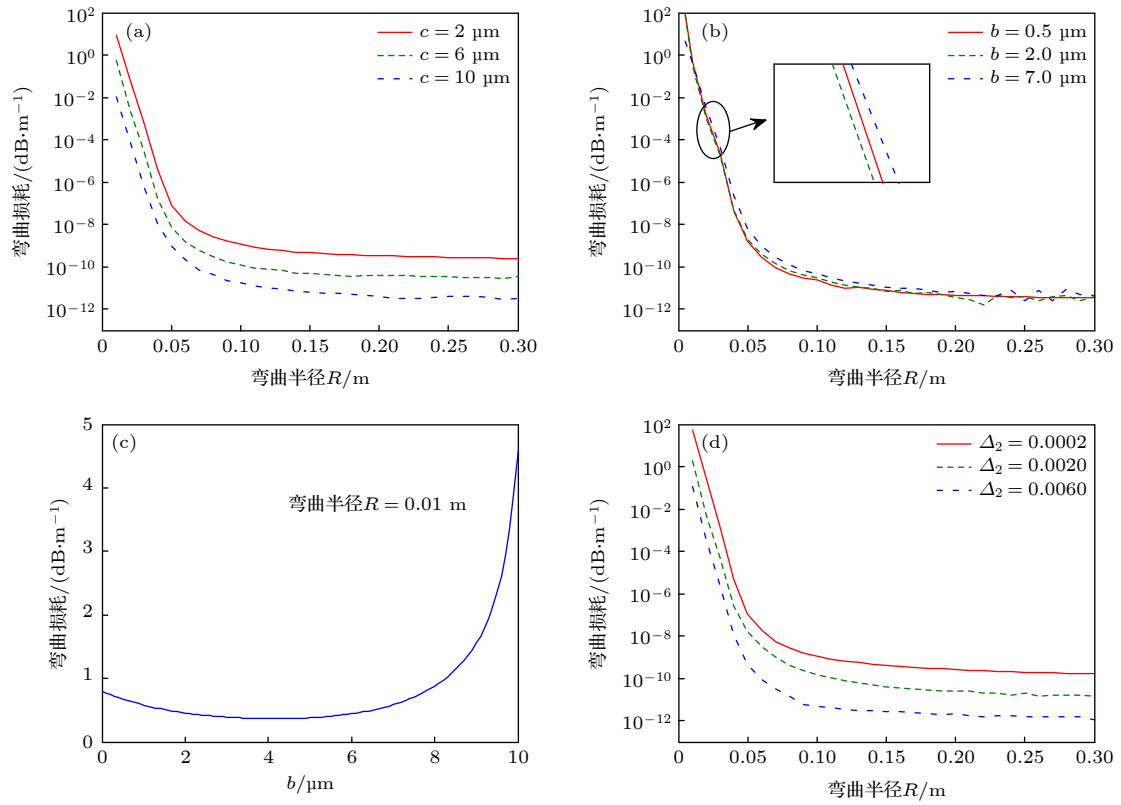


图 7 不同层结构参数 (a) c 、(b) b 和 (d) Δ_2 下弯曲损耗随弯曲半径 R 的变化曲线; (c) 弯曲半径 $R = 0.01$ m 时弯曲损耗随 b 的变化曲线

Fig. 7. Relationship between the bending loss and (a) c , (b) b , and (d) Δ_2 at various R ; (c) relationship between the bending loss and b at $R = 0.01$ m.

通过改变 a 以达到 $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$ 的要求. 光纤中的弹光修正因子 $R_{\text{eff}}/R = 1.28$, 这里 R_{eff} 是有效弯曲半径^[25]. 工作波长固定为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 其中图 7(a)—7(d) 中的结构参数分别固定为: $\Delta_1 = 0.003$, $b = 1 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $\Delta_1 = 0.003$, $c = 6 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $\Delta_1 = 0.003$, $c = 6 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; $\Delta_1 = 0.003$, $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 1 \mu\text{m}$. 从图 7 可以看出, 随着弯曲半径 R 的增大, 弯曲损耗呈指数方式逐渐降低, 之后不再变化. 如图 7(a) 和 (d) 所示, 弯曲损耗随着 c 、 Δ_2 的增大而减小. 图 7(b) 中显示, 随着 b 的增大, 弯曲损耗先减小后增大. 这一点从图 7(c) 中也可以清楚地看出, 随着 b 的增大, 弯曲损耗首先减小, 当 b 超过 $4 \mu\text{m}$ 时, 弯曲损耗逐渐增大. 值得注意的是, 弯曲损耗存在极小值, 此时的 b 即为设计低弯曲损耗的最佳值. 因此在实际制作中, 为了提高弯曲性能, 可以选择尽量大的 c 、大的 Δ_2 以及靠近最佳值的 b 值.

其物理意义可以表述如下: 当弯曲光纤中某处包层的折射率超过模式的等效折射率时, 该处模式的电场边缘处会引发功率泄漏, 从而导致弯曲损

耗^[26,27]. 由于纤芯最外层折射率较低, 可以抑制电场边缘的有效折射率的增大, 因而这种光纤的弯曲损耗可以保持在一个较低的水平. c 、 Δ_2 越大说明纤芯中的最外层——下陷低折层越大, 下陷低折层抑制电场边缘有效折射率的效果就越明显, 因而弯曲损耗就越低.

参数 b 对弯曲损耗的影响要从两个方面来讲: 一方面, 随着 b 的增大, 纤芯中间的包层低折层逐渐增大, 导致纤芯的等效折射率变大, 使得光功率较多的分布于纤芯中, 因而弯曲损耗变小; 另一方面, 随着 b 的增大, 纤芯高折层离下陷低折层就越远, 下陷低折层抑制电场边缘有效折射率的效果就越弱, 因而弯曲损耗就变大. 这两种效应给弯曲损耗带来的影响是相反的, 因而要结合起来辩证地看影响结果. 当 b 较小时, 下陷低折层离纤芯高折层距离较近, 此时对整个纤芯的等效折射率影响较大, 因而主要表现为弯曲损耗变小; 当 b 较大时, 下陷低折层离纤芯高折层距离较远, 此时对纤芯的等效折射率影响较小, 而主要表现为抑制电场边缘有效折射率的效果, 因而主要表现为弯曲损耗变大.

图 8 给出了在弯曲半径 R 为 0.01 m 时, TLF 光纤结构的 A_{eff} 与弯曲损耗之间的变化关系. 为了验证弯曲性能是否得到改善, 图中同样给出了传统普通阶跃型光纤 SIF 的变化关系. 这里纤芯高折层和包层的折射率差 Δ_1 由不同 A_{eff} 的变化确定, 纤芯高折层半径 a 由截止波长 $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$ 的大小来确定. 工作波长固定为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 其他结构参数固定如下: TLF1: $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; TLF2: $c = 7 \mu\text{m}$, $b = 4 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$. 从图 8 可以看出, 在相同 A_{eff} 下, TLF 的弯曲损耗要比 SIF 低 2—4 个数量级. 如图中所示, 在 $R = 0.01 \text{ m}$ 、基模 A_{eff} 约为 $180 \mu\text{m}^2$ 时, SIF 的弯曲损耗高达 320 dB/m, 而 TLF1 的三层芯光纤结构的弯曲损耗很低, 约为 2.05 dB/m, 而 TLF2 的弯曲损耗可以低至 0.34 dB/m. 研究证明, 通过调整 TLF 中纤芯的不同层结构参数, 弯曲性能可以进一步得到改善. 综上所述, 由于下陷低折射率层的存在, TLF 光纤结构可以有效改善弯曲性能和/或增大 A_{eff} . 研究表明, 在不牺牲截止波长 λ_C 的前提下, TLF 光纤可以在增大基模有效面积 A_{eff} 的同时, 将弯曲损耗降到更低.

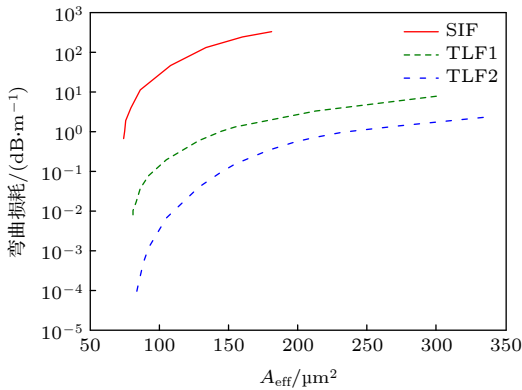


图 8 TLF 和 SIF 光纤结构的基模弯曲损耗随 A_{eff} 的变化曲线
Fig. 8. Bending loss as a function of A_{eff} for TLFs compared to step-index fiber.

图 9 给出了不同弯曲半径 R 下, TLF 弯曲损耗及 A_{eff} 的变化曲线. 光纤结构参量固定为: $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$, $c = 7 \mu\text{m}$, $b = 4 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$. 工作波长 λ 固定为 $1.55 \mu\text{m}$. 为进行对比, 图中同样给出了相同 A_{eff} 下的传统普通阶跃型光纤 SIF 的变化关系. 从图 9 可以看出, 随着弯曲半径 R 的增大, 弯曲损耗和 A_{eff} 以指数方式逐步降低. 在相同的 R 下, TLF 的弯曲损耗要比 SIF 低的多. 当 $R = 0.02 \text{ m}$

时, SIF 的弯曲损耗高达约为 3930.375 dB/m, 而 TLF 的弯曲损耗约为 0.43 dB/m. 当 R 增大到 0.14 m 时, SIF 的弯曲损耗约为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$, 而 TLF 的弯曲损耗低至 $3.7 \times 10^{-6} \text{ dB/m}$. 当 $R > 0.2 \text{ m}$ 时, 弯曲损耗基本不再变化. 总体上 TLF 的弯曲损耗比 SIF 要低 2—4 个数量级.

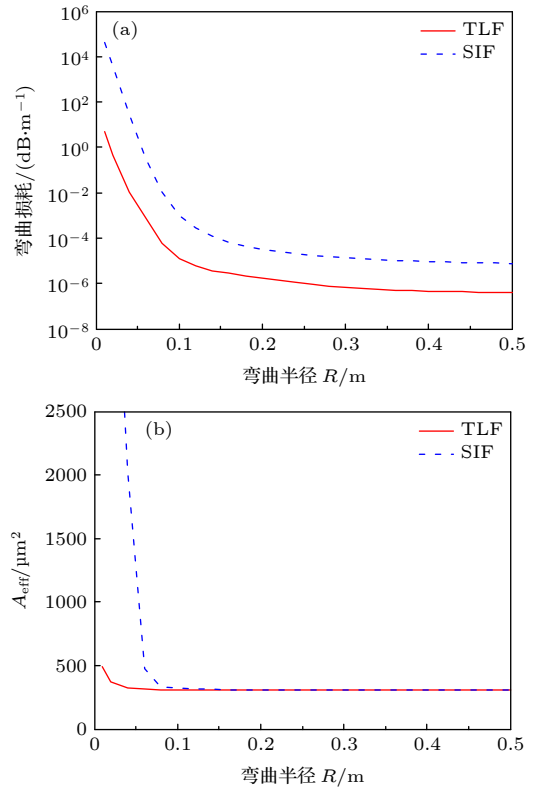


图 9 不同弯曲半径 R 下 (a) 弯曲损耗、(b) A_{eff} 的变化曲线
Fig. 9. Relationship between (a) bending loss, (b) effective area A_{eff} and bending radius. R .

从图 9(b) 可以看出, 当弯曲半径 $R > 0.2 \text{ m}$ 时, TLF 的 A_{eff} 与 SIF 基本一致. 但当 R 较小时, 如 $R < 0.2 \text{ m}$ 时, SIF 的 A_{eff} 模场形变量要比 TLF 大的多. 当 $R = 0.02 \text{ m}$ 时, SIF 的 A_{eff} 增大至 $4302.63 \mu\text{m}^2$, 比平直状态增大了约 $3996.44 \mu\text{m}^2$, 由此可以看出 SIF 的模场变形和增大问题更为严重. 而当 $R = 0.02 \text{ m}$ 时, TLF 的 A_{eff} 约为 $371.32 \mu\text{m}^2$, 比平直状态增大了约 $65.17 \mu\text{m}^2$, 二者处于同一数量级水平. 说明 TLF 的模场形变量比 SIF 有着明显的降低, 可以满足大与低弯曲损耗的实际应用需求.

为了讨论 TLF 结构的限制损耗特性, 这里固定光纤结构参数为: TLF1: $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$, $a = 10.36 \mu\text{m}$, $\Delta_1 = 0.0011$, $c = 7 \mu\text{m}$, $b = 4 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$; TLF2: $\lambda_C = 1.3 \mu\text{m}$, $a = 8.74 \mu\text{m}$, $\Delta_1 =$

0.00155, $c = 6 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 0.004$. 图 10 给出了不同工作波长 λ 下, TLF 的基模限制损耗的变化关系. 从图 10 可以看出, 随着 λ 的不断增大, 基模的限制损耗逐渐增大. 在 $1.2 \mu\text{m} < \lambda < 1.65 \mu\text{m}$ 时, 基模的限制损耗总体上低于 10^{-5} dB/m 水平. 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, TLF1 的限制损耗约为 $2.81 \times 10^{-7} \text{ dB/m}$, 而 TLF2 的限制损耗约为 $3.14 \times 10^{-8} \text{ dB/m}$. 综上所述, 这种单模、大、低弯曲损耗三层芯光纤在大容量、高功率光纤通信系统中具有潜在的实际应用价值.

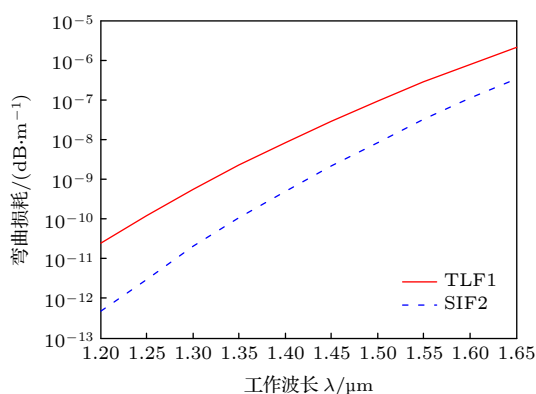


图 10 TLF 基模的限制损耗随波长的变化曲线

Fig. 10. Transmission loss of fundamental mode for TLFs.

4 结 论

本文系统的研究并分析了如何采用三层芯结构光纤, 来实现在保持单模、大 A_{eff} 的同时, 提高其弯曲性能. 分析了不同层结构参数对 TLF 性能的影响, 为大和低弯曲损耗光纤的设计提供了指导意义. 详细分析了纤芯不同层结构参数对截止波长、和弯曲性能的影响. 通过调整纤芯中三层芯的结构参量, A_{eff} 可以达到 $100\text{--}330 \mu\text{m}^2$ 甚至更高. 此外, TLF 光纤结构可以有效改善弯曲性能, 在相同的 A_{eff} 下, TLF 的弯曲损耗比 SIF 要低 2—4 个数量级. 研究表明, 在不牺牲截止波长的前提下, TLF 光纤可以实现在增大基模有效面积 A_{eff} 的同时, 将弯曲损耗降到更低. 这种光纤制作简单, 可以采用传统的 MCVD 法. 分析表明这种单模、大、低弯曲损耗三层芯光纤在宽带大容量传输、及大功率光纤激光器和放大器中具有重要的潜在应用价值.

参考文献

- [1] Cai J, Cai Y, Davidson C, Lucero A, Zhang H, Foursa D, Sinkin O, Patterson W, Pilipetskii A, Mohs G, Bergano N 2011 *National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)* Los Angeles, California, March 6, 2011 pPDPB4
- [2] Sano A, Masuda H, Kobayashi T, Fujiwara M, Horikoshi K, Yoshida E, Miyamoto Y, Matsui M, Mizoguchi M, Yamazaki H, Sakamaki Y, Ishii H 2010 *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* San Diego, California, March 21, 2010 pPDPB7
- [3] Qian D, Huang M, Ip E, Huang Y, Shao Y, Hu J, Wang T 2011 *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* Los Angeles, California, March 6, 2011 pPDPB5
- [4] Dong L, Wu T W, McKay H A, Fu L, Li J, Winful H G 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 1
- [5] Dussardier B, Rastogi V, Kumar A, Monnom G 2011 *Appl. Opt.* **50** 19
- [6] Jain D, Baskiotis C, Sahu J K 2013 *Opt. Express* **21** 2
- [7] Fini J M 2006 *Opt. Express* **14** 1
- [8] Lees G P, Taverner D, Richardson D J, Dong L, Newson T P 1997 *Electron. Lett.* **33** 5
- [9] Li M J, Tandon P, Bickham S R, McDermott M A, Desorcie R B, Nolan D A, Johnson J J, Lewis K A, Englebert J J 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 3
- [10] Watekar P R, Ju S, Han W T 2009 *Opt. Express* **17** 12
- [11] Watekar P R, Ju S, Han W T 2011 *Appl. Opt.* **50** 25
- [12] Takenaga K, Arakawa Y, Sasaki Y, Tanigawa S, Matsuo S, Saitoh K, Koshihara M 2011 *Opt. Express* **19** 26
- [13] Saitoh K, Koshihara M, Takenaga K, Matsuo S 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 21
- [14] Simovic A, Savovic S, Drljaca B, Djordjevic A 2014 *Opt. Laser Technol.* **57**
- [15] Kumar A, Rastogi V 2011 *Applied Optics* **50** 25
- [16] Wu C Q 2015 *Theoretical Basis of Optical Waveguide* (2nd Ed.) (Beijing: Tsinghua University Press) (in Chinese) [吴重庆 2005 光波导理论第二版(北京: 清华大学出版社)]
- [17] Lin Z 2014 *P. h. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [林桢 2014 博士学位论文(北京: 北京交通大学)]
- [18] Fang H, Lou S Q, Ren G B, Guo T Y, Jian S S 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 493 (in Chinese) [方宏, 娄淑琴, 任国斌, 郭铁英, 简水生 2006 中国激光 **33** 493]
- [19] Birks T A, Knight J C, St P, Russell J 1997 *Opt. Lett.* **22** 13
- [20] Petermann K 1977 *Opt. and Quant Electron.* **9** 2
- [21] Petermann K 1983 *Electron. Lett.* **19** 18
- [22] Li C S, Li L Y, Yang S X, Gan L, Song Z T, Li X S 2013 *Mearments Standard* **2** 72 (in Chinese) [李春生, 李琳莹, 杨世信, 甘露, 宋志伦, 李雪松 2013 现代传输 **2** 72]
- [23] Baggett J C, Monro T M, Furusawa K, Finazzi V, Richardson D J 2003 *Optics Commun.* **227** 4
- [24] Dutt A, Mahapatra S, Varshney S K 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 6
- [25] Ulrich R, Rashleigh S C, Eickhoff W 1980 *Opt. Lett.* **5** 6
- [26] Jeunhomme L B 1989 *Single-Mode Fiber Optics* 2nd ed. (New York: Marcel Dekker)
- [27] Matsuo S, Ikeda M, Kutami H, Himeno K 2005 *IEICE Trans. Electron.* **E88-C5**

Application and analysis of three-layer-core structure in single-mode large-mode-area fiber with low bending loss

Zheng Si-Wen[†] Liu Ya-Zhuo Luo Xiao-Ling Wang Li-Hui Zhang Na
Zhang Jing-Jing Jin Chuan-Yang Xu Bing-Li Qu Qiang Chen Ling

(*Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China*)

(Received 3 March 2021; revised manuscript received 21 June 2021)

Abstract

A three-layer-core single-mode large-mode-area fiber with low bending loss is investigated in this paper. The three-layer structure in the core which is comprised of core-index layer, cladding-index layer and depression-index layer, can achieve large-effective-area A_{eff} while maintaining low-bending-loss without deteriorating cutoff behaviors. The large-mode-area of 100–330 μm^2 can be achieved in the fiber. The effective area A_{eff} can be further enlarged by adjusting the layer parameters. Furthermore, the bending property can be improved in this three-layer-core structure. The bending loss can decrease by 2–4 orders of magnitude compared with the bending loss of the conventional step-index fiber with the same A_{eff} . These characteristics of three-layer-core fiber suggest that it can be used in large-mode-area wide-bandwidth high-capacity transmission, or high-power optical fiber laser and amplifier in the optical communications, which can be conducive to studying the basic physical layer structure of big data storage, reading, calculation and transmission applications and so on.

Keywords: three-layer-core, single mode operation, large mode area, bending loss

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.70.20210410

[†] Corresponding author. E-mail: zhengsiwen010@163.com