

文章编号:1001-5078(2007)05-0465-03

# 新型螺旋型内包层双包层光纤吸收效率分析

何 伟, 王子华

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘 要:**提出一种新型的内包层横截面边界为螺旋曲线的双包层光纤结构,并给出一种分析双包层光纤吸收效率的新方法;它以射线法为基础,采用概率理论计算出光纤内部传播的光线每次被内包层边界反射后能够被纤芯直接吸收的概率,并以此概率来衡量内包层横截面形状对光纤吸收效率的影响。最后用这种方法对螺旋型双包层光纤进行分析,得出它比一般缺陷型双包层光纤优异的结论。

**关键词:**双包层光纤;吸收效率;螺旋型内包层;射线法;概率理论

**中图分类号:**TN253

**文献标识码:**A

## The Absorption Efficiency Analysis of Helix Double-clad Fiber

HE Wei, WANG Zi-hua

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A novel double-clad fiber (DCF) which has a helix cross section structure of inner cladding and a new method to analyze the absorption efficiency of DCF are brought forward. The theory of probability and the ray method are used to calculate the direct absorption probability of ray which was reflected by the boundary of inner cladding. The probability is used to evaluate the influence of the cross section shape of inner cladding toward the absorption efficiency of DCF. Finally the helix double-clad fiber is discussed by using this method, and the conclusion is that it is better than other truncated inner cladding DCFs.

**Key words:** double-clad fiber; absorption efficiency; helix inner cladding; ray method; theory of probability

### 1 引 言

双包层光纤<sup>[1]</sup>比常规单模光纤增加了一个内包层,从而突破了常规单模光纤激光器对输出功率的限制。双包层光纤中内包层的横截面积和数值孔径均远大于掺杂了稀土元素的单模纤芯,由于内包层包绕在单模纤芯的外围,通过优化设计内包层结构,可以将泵浦光高效地转换为单模激光<sup>[2-5]</sup>。如果双包层光纤的内包层横截面是圆对称情况,其内部传播的光线有严格的运动轨迹,可以判断,当单模掺杂纤芯落在某一光线的两焦散面区域时,此光线才能经过纤芯被吸收,当纤芯处在某一光线的焦散面外时,光线不会被吸收,所以圆对称双包层光纤的吸收效率是很低的。为了提高光纤的吸收效率,出

现了很多相对于圆对称内包层而言有缺陷的内包层结构,如矩形、六边形、星形、梅花形、D形<sup>[5-6]</sup>等。当内包层存在缺陷后,光线的两个焦散面也就不存在了。光线在其中的行进路线找不出任何规律,在传输足够长的距离后,它将到达内包层横截面上的任何一点,最终所有光线因多次经过纤芯后会被全部吸收,所以其吸收效率始终是100%,但是光纤在单位长度内的吸收效率是有差别的。

**基金项目:**国家自然科学基金(60277025);上海市重点学科建设项目(T0102)资助。

**作者简介:**何 伟(1981-),男,硕士,现从事光通信理论方面的研究。E-mail:hewei8176@hotmail.com

**收稿日期:**2006-09-14

由于缺陷双包层光纤与圆对称双包层光纤在结构上的差异,一般计算圆对称双包层光纤吸收效率的方法是不能用来分析缺陷双包层光纤的。光线在缺陷内包层内的传播没有任何规律可寻并且是随机出现的,要精确地计算出单位长度内的吸收效率是很困难的。本文用概率理论方法分析缺陷双包层光纤吸收效率便是基于以上原因提出的。不同类型的缺陷双包层光纤单位长度内的吸收效率是有差异的,本文提出的螺旋型双包层光纤便是通过理论分析得出的一种较理想的缺陷型双包层光纤。

## 2 螺旋形内包层横截面结构

如图1所示,本文所研究的螺旋型内包层横截面结构是由上下各为一段等同的等角螺旋线合并而成的,左右结合处各有一段长度为 $P$ 的线段相连接。与等角螺旋线相切的虚线圆半径为 $R$ ,纤芯在螺旋型内包层的中心,其半径为 $r_0$ 。等角螺旋线极坐标下的曲线方程是 $\rho = a \cdot e^{k \cdot \varphi}$  ( $a, k$  为常数),其中 $k = \tan \theta$ ,  $\varphi$  是极角。将起点坐标 $(R - P, 0)$ 和终点坐标 $(R, \pi)$ 代入便可求出 $a$ 和 $k$ 的大小。螺旋曲线的一个重要特点是:螺旋曲线边界上任意一点 $M_i$ 所对应的法线和极径的夹角大小恒等于 $\theta$ ,而 $\theta$ 的大小反映了螺旋绕的紧密程度。

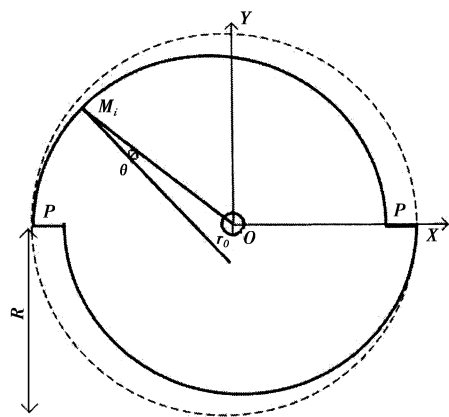


图1 螺旋型双包层光纤内包层横截面示意图

## 3 概率理论分析双包层光纤的吸收效率

缺陷内包层双包层光纤内光线的传播是杂乱无章没有任何规律可寻的,因此要精确地计算出单位距离内的吸收效率是不可能的。导致不同类型缺陷双包层光纤单位内吸收效率差异的主要原因在于它们不同的内包层横截面形状,而光线每次被不同形状横截面的内包层边界反射后,能够被纤芯直接吸收的概率也不相同。若能计算出此概率的大小,便可用它来衡量内包层横截面形状对于光纤吸收效

率的影响。

以图2所示的矩形横截面(虚线部分是横截面关于某边的对称)为例。假设所有光线都是从内包层边界反射出来的,那么在所有射向边界上点 $M_i$ 的光线中,只有来自边界上 $AB$ 段和 $CD(=C'D')$ 段反射出来的光线被 $M_i$ 反射后可以直接被纤芯吸收(从 $AB$ 段反射出来射向 $M_i$ 的光线未到达反射点之前就已经被纤芯吸收)。那么 $AB$ 段和 $CD$ 段长度之和与边界周长和 $M_i$ 点所在边长之差的比值就是任意一条射向 $M_i$ 的光线反射后能够被纤芯直接吸收的概率,即点 $M_i$ 对于吸收效率的贡献值。若计算出横截面边界上所有反射点对于吸收效率的贡献值,再根据全概率公式就可求出任意一条光线每次被内包层边界反射后能够被纤芯直接吸收的概率,它可以用来衡量横截面形状对于光纤吸收效率的影响。

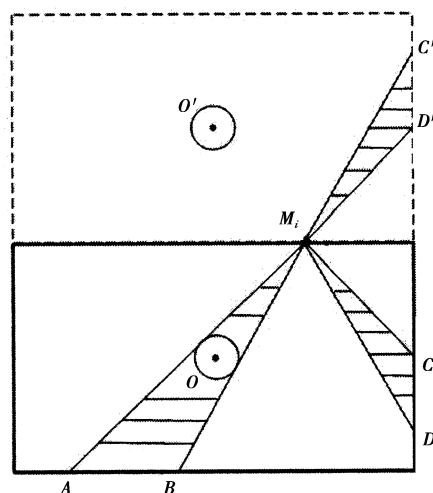


图2 被 $M_i$ 点反射后可以直接被纤芯吸收的光线部分

设 $P(L)$ 代表任意一条光线每次被内包层边界反射后能够被纤芯直接吸收的概率; $P(L|M_i)$ 代表任意一条光线每次被点 $M_i$ 反射后能够被纤芯直接吸收的概率。由全概率公式可以得到:

$$P(L) = \sum_{i=1}^n P(L|M_i)P(M_i) \quad (1)$$

其中, $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是边界上的反射点。设相邻反射点之间的距离为 $\Delta l$ ,横截面周长为 $L$ ,因光线照射到边界上任意点的概率相同,则 $P(M_i) = \Delta l / L$ 。代入到公式(1)中并令 $\Delta l \rightarrow 0$ ,就得到:

$$P(L) = \left[ \oint_L P(L|M_i) dl \right] / L \quad (2)$$

其中,积分路径是横截面整个边界。

$P(L)$ 是任意光线每次被内包层边界反射后能

够被纤芯直接吸收的概率,其值越大,这种横截面形状的内包层边界越容易使被反射后的光线直接被纤芯吸收,光纤的吸收性能也就越理想。

#### 4 概率理论法分析螺旋型双包层光纤

首先用概率法分析圆对称内包层双包层光纤。设圆对称内包层双包层光纤内包层横截面面积为1,纤芯直径为0.1。利用公式(2),可直接计算出 $P(L) = 5.7\%$ ,这个值很小,这是由于圆周上任意反射点所对应的 $CD$ 段不存在造成的。现在相同条件下(横截面面积和纤芯直径相同)来分析螺旋型双包层光纤。如图3所示,由于螺旋线的结构特点,在保证 $\theta \geq \arcsin(r_0/R)$ 的条件下,横截面边界上任意点的法线都不会经过纤芯,保证所有反射点对应的 $CD$ 段和 $AB$ 段不会产生重合而使 $P(L|M_i)$ 变得很小。当 $\theta = \arcsin(r_0/R)$ 时, $AB$ 和 $CD$ 段的长度近似相等。且由于形状接近圆形,边界上所有反射点对应的 $AB$ 和 $CD$ 段长度也近似相等,再利用公式(2)便可求出螺旋型内包层 $P(L)$ 值的大小近似等于其所对应圆对称内包层 $P(L)$ 值的两倍,约为11.4%,吸收性能提高了近1倍。

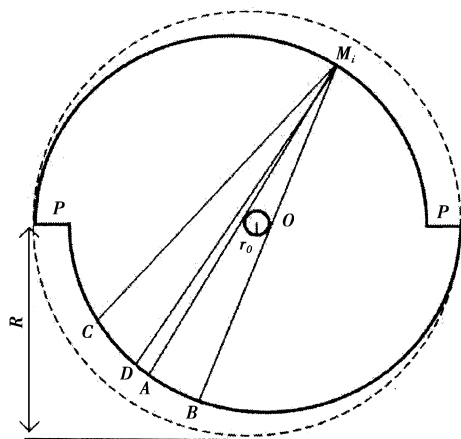


图3 被点 $M_i$ 反射后可以被纤芯直接吸收的光线部分

#### 5 螺旋型结构与其他类型缺陷结构比较

有文献<sup>[7]</sup>通过试验对几种不同类型的缺陷内包层双包层光纤(圆形、半D形、切断半D形、矩形、切断矩形、梅花形等)进行分析比较:梅花形和矩形横截面形状的内包层结构拥有较高的吸收效率。其中矩形双包层光纤的吸收效率代表缺陷型双包层光纤的一般水平。我们利用解析几何以及计算机软件(MATLAB)对矩形内包层双包层光纤(设光纤横截面的面积为1,纤芯直径为0.1)进行计算,求出它的 $P(L)$ 值约为10.3%。也就是说,在相同条件下,螺

旋型内包层比矩形内包层的吸收性能要提高10%左右。

螺旋型近似于圆型的形状使得它横截面边界上所有反射点的 $P(L|M_i)$ 值都近似相等,即光线被内包层边界上任意点反射后能够被纤芯直接吸收的概率都是相同的,也就是说,所有光线最终以等概的形式被纤芯直接吸收。这样,吸收效率在光线整个传播过程中的保持就能够比其他类型的缺陷双包层光纤稳定,使得不同单位距离内吸收效率的差别保持在很小的范围内。

#### 6 结论

新型螺旋型内包层双包层光纤属于缺陷型内包层双包层光纤中的一种。通过本文提出的概率理论方法对其进行分析得出结论:螺旋型双包层光纤在缺陷型双包层光纤中拥有较高的吸收效率,不同单位距离内吸收效率的差别可以保持在很小的范围内,可以保证光线较稳定的被纤芯吸收,且形状接近于圆形易于制作,是一种理想的内包层横截面结构。

#### 参考文献:

- [1] E Snitzer, H Po, F Hskimi, et al. Double-clad, offset core Nd fiber laser [A]. Optical Fiber Sensors, 1998, 1, OSA Technical Digest Series [C]. Washington DC: Optical Society of America, 1988: PD5.
- [2] V Dominic, S MacCormack, R Waarts, et al. 110W fibre laser [J]. Electronics Letters, 1999, 35(14): 1158 - 1160.
- [3] P Leproux, S Fevrier, V Doya, et al. Modeling and optimization of double-clad fiber amplifiers using chaotic propagation of the pump [J]. Optica Fiber Technology, 2001, 7(4): 324 - 339.
- [4] S Bedo, W Luthy, H P Weber. The effective absorption coefficient in double-clad fibres [J]. Optics Communications, 1993, 99: 331 - 335.
- [5] A Liu, K Ueda. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers [J]. Optics Communications, 1996, 132: 511 - 518.
- [6] M H Muendel. Optical inner cladding shapes for double-clad fiber lases [A]. 1996 Conference on Lasers and Electro-Optics, Technical Digest [C]. Washington DC: Optical Society of America, 1996, 209.
- [7] P Leproux, S Fevrier, V Doya, et al. Modeling and optimization of double-clad fiber amplifiers using chaotic propagation of the pump [J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(4): 324 - 339.