

文章编号: 1001-3806(2004)06-0633-03

## 用边界反射原理计算双包层光纤的吸收效率

徐 晟, 王子华

(上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘要:** 以双包层光纤(DCF)中内外包层分界面上的点作为研究对象,对于分界面上的任意一点运用边界反射原理,确定在内包层截面中,能发出被掺杂纤芯吸收的光线的点源所占有的面积,将此面积与内包层总截面积作一比较,算出这一点对双包层光纤吸收效率的贡献。按该方法计算内外包层分界面上每一点对吸收效率的贡献并取平均,最后可求得双包层光纤的总吸收效率。讨论了双包层光纤的圆对称和偏心两种情况,结果与已有文献中的结论完全一致,但这种方法的计算过程更为简便。

**关键词:** 双包层光纤; 内外包层分界面; 边界反射原理; 吸收效率

**中图分类号:** TN252 **文献标识码:** A

## Calculating the absorption efficiency of double clad fiber based on the theory of boundary reflection

XU Sheng, WANG Zihua

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

**Abstract:** The theory of boundary reflection is used for arbitrary dots in the interface of the first and second cladding of double clad fiber (DCF) to confirm the area where the light source emits the rays that can be absorbed by the RE doped core. Then the absorption efficiency of the dot will be obtained if this area is compared with the whole area of the first cladding. In order to calculate the whole absorption efficiency of DCF, the absorption efficiency of every dot in the interface of the first and second cladding of DCF should be calculated and synthesized. The conclusions of absorption efficiency of circular DCF and offset DCF completely accord with the results calculated by another ray method. However the process of this method is very handy.

**Key words:** double clad fiber; interface of the first and second cladding; theory of boundary reflection; absorption efficiency

### 引 言

全光网因其大容量的优势已经成为现代通信的主要发展方向之一。作为全光网的一个重要器件,光纤放大器的出现使得对信号的放大不再需要进行光电、电光的转换,从而提高了光纤通信的传输效率。常规的光纤放大器是把抽运光直接射入单模光纤的掺杂纤芯,但由于纤芯的直径受到单模条件的限制,所以抽运光照射的截面是很小的,这样就限制了光纤放大器的输出功率。双包层光纤的出现有效

地解决了这一问题,它比常规光纤增加了一个内包层,抽运光是射入半径比单模纤芯大得多的内包层,所以能有效地提高抽运光的照射截面<sup>[1~3]</sup>,从而突破了常规单模光纤放大器对输出功率的限制。双包层光纤在圆对称的情况下,众多模式中只有子午光线才能经过掺杂纤芯被吸收,故吸收效率的提高是有限的;而在偏心的情况下,会有更多的光线被掺杂纤芯吸收。

笔者以文献[4]中的假设为前提,但选取的研究对象与文献[4]的不同,文献[4]中是以内包层中所有的点源为研究对象,而本文中以外包层分界面上的点为研究对象,对之应用边界反射原理,能够更直观、更简便地算得双包层光纤在圆对称和偏心两种情况下的吸收效率,其结论与文献[4]中的计算结果完全一致。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60277025); 上海市重点学科建设资助项目(2001-44)

作者简介: 徐 晟(1980),男,硕士研究生,现从事光波导理论计算方面的研究。

E-mail: xshine@citiz.net

收稿日期: 2003-10-23; 收到修改稿日期: 2003-11-26

## 1 原 理

双包层光纤的横截面如图 1 所示, 其内包层的作用是传输抽运光和限制信号光, 外包层的作用是限制抽运光。在对 DCF 进行分析时, 通常忽略纤芯, 这样 DCF 就变成一条多模光纤, 其纤芯即为 DCF 的内包层, 其包层即为 DCF 的外包层。

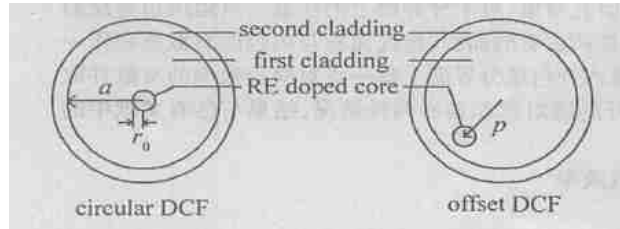


Fig. 1 Cross section of circular and offset DCF

首先对双包层光纤提出一些假设: 双包层光纤中所有光线都是相互独立、没有耦合的, 即光纤截面中纤芯和内包层都是理想圆形的, 没有缺陷, 且其折射率恒定不变; 内包层的尺寸比光波长大多, 这样就能严格运用几何光学的射线法进行分析<sup>[4]</sup>; 当抽运光从激光器注入到双包层光纤后, 光纤内包层截面上的每一点的功率强度是相等的, 取任意一点作为一个点源的话, 其向  $360^\circ$  范围内辐射的功率是均匀的, 这也可以认为内包层中所有由任意点源发出的光线的功率都是相等的。这些假定与文献[4]、文献[5]中的叙述一致。

在对双包层光纤进行分析时, 通常将之看作一条多模光纤。多模光纤中存在子午射线和斜射线两种不同形式的光射线<sup>[6]</sup>, 如图 2 所示。子午射线可

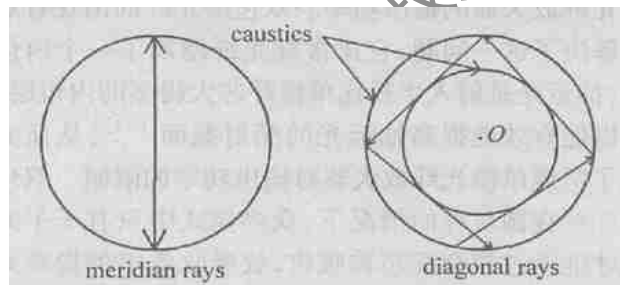


Fig. 2 Rays and caustics in multimode fiber

以覆盖整个光纤截面, 所以不管是圆对称还是偏心的情况, 总能被单模掺杂纤芯吸收; 每条斜射线都有两个焦散面, 当内包层的折射率均匀时, 其外焦散面为内外包层的分界面。若纤芯位于斜射线的内外两焦散面间, 那么经过一段距离的传输后光线就会通过纤芯, 当整条双包层光纤足够长, 光线就会多次经过掺杂纤芯而被完全吸收; 若单模掺杂纤芯所处位置离内包层圆心  $O$  的距离小于光线的内焦散面半径 (即纤芯位于斜射线的内焦散面之内), 则光线在

整个传输过程永远不会经过纤芯, 也就不会被吸收。

在文献[4]中, 对所有点源辐射出的且能被掺杂纤芯吸收的光线功率进行积分, 算出总吸收功率。然后与所有点源辐射功率作一比较, 算得吸收效率。它是以光纤内包层截面上的点源作为基本研究对象的。而作者的想法是以内外包层分界面上的点作为研究对象, 对于上面的任意一点  $M$ , 内包层截面内的每一个点源都会有一条且只有一条光线照射到它上面。在能照射到  $M$  点的所有光线中, 经过纤芯或通过这一点反射后可以在以后的行进过程中经过纤芯 (即两焦散面间包含纤芯) 的光线数量就是  $M$  点对吸收效率的贡献。因为光纤截面上的每一点源的功率是相等的, 而且是  $360^\circ$  辐射的, 从  $M$  点进行考虑, 照射到上面的每一条光线的功率是相等的。所以, 上述能被纤芯吸收的光线数量就转化为能发出被纤芯吸收光线的点源的数量。由于点源在截面内是均匀分布的, 对于  $M$  点而言, 其对吸收效率的贡献就是能发出被纤芯吸收光线的点源所占据内包层截面的面积与整个内包层截面面积的比值。

由于光纤截面是理想圆形的, 内外包层边界上的每一个点对于吸收效率的贡献都是相同的, 对内外包层分界面求积分再取平均, 就可以算出双包层光纤总的吸收效率。其实这一总吸收效率与原先算得  $M$  点的吸收效率是相等的。

## 2 对圆对称 DCF 的分析

对于圆对称 DCF 的情况, 如图 3 所示, 在内外包层分界面上取任意一点  $M$ , 根据上面的分析, 内包

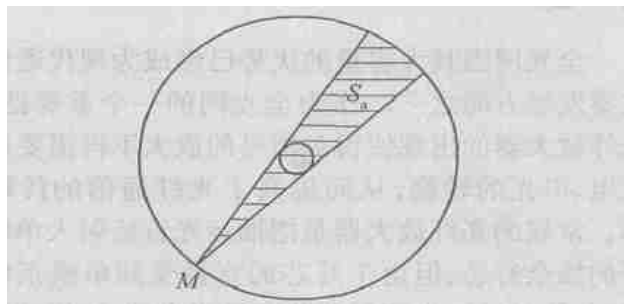


Fig. 3 Area of the light source emitting rays absorbed by core in the section of first cladding of circular DCF through  $M$

层截面上所有点源中, 只有阴影部分  $S_a$  中的点源照射到  $M$  点的光线才能被纤芯吸收。也就是说, 对于  $M$  点, 只有这些光线的两焦散面间包含纤芯, 经过足够长距离的传输后为掺杂纤芯全部吸收。  $S_a$  阴影部分的面积为:

$$S_a = 2r_0 \sqrt{a^2 - r_0^2} + 2a^2 \sin^{-1}(r_0/a) \quad (1)$$

式中,  $a$  为内包层半径,  $r_0$  为纤芯半径。其余内包层

截面上的点源照射到  $M$  点的光线,其两焦散面间都不包含掺杂纤芯,永远不会被纤芯吸收。

将  $S_a$  与双包层光纤内包层横截面积  $S_{all} = \pi a^2$  作一比较,得出  $M$  点的吸收效率为  $S_a / S_{all}$ 。对内外包层分界面求积分再取平均,算得总吸收效率为:

$$\eta = \int_0^{2\pi a} (S_a / S_{all}) dl \Big/ 2\pi a = (S_a / S_{all}) = (2/\pi) [(r_0/a) \sqrt{1 - (r_0/a)^2} + \sin^{-1}(r_0/a)] \quad (2)$$

该式与文献[4]中计算圆对称 DCF 吸收效率的(7)式完全一致。图 4 显示了在圆对称 DCF 中,纤芯半径  $r_0$  分别取  $6\mu\text{m}$ ,  $4\mu\text{m}$ ,  $2\mu\text{m}$  时,用(1)式计算得到的双包层光纤吸收效率随内包层半径变化曲线。

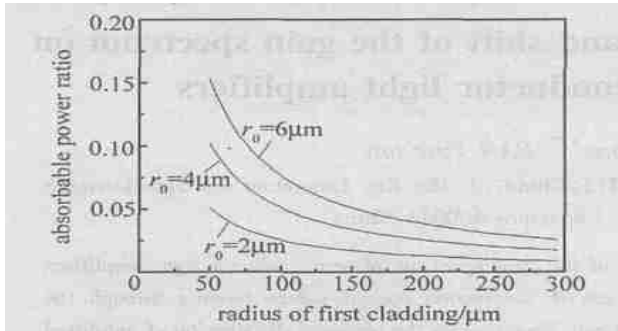


Fig. 4 Curve of absorption efficiency versus radius of first cladding with different radius of core

### 3 对偏心 DCF 的分析

偏心 DCF 的情况与圆对称 DCF 类似。如图 5 所示,对于内外包层分界面上任意一点  $M$ ,内包层截

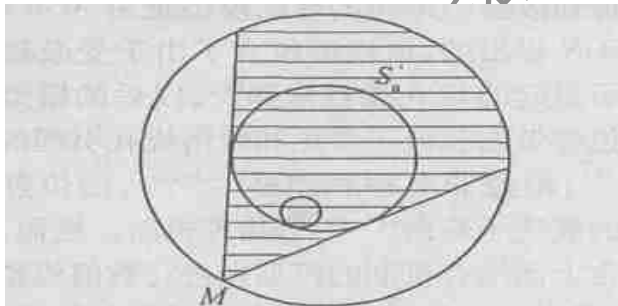


Fig. 5 Area of the light source emitting rays absorbed by core in the section of first cladding of offset DCF through  $M$

面上所有的点源中,只有阴影部分  $S'_a$  中的点源照射到  $M$  点的光线才能被纤芯吸收。即对于  $M$  点,只有这些光线的两焦散面包含纤芯,如果在第 1 次到达  $M$  点或第 1 次经  $M$  反射后没有经过纤芯,在传输足够长的距离后最终会被掺杂纤芯全部吸收<sup>[6]</sup>。 $S'_a$  的阴影部分面积为:

$$S'_a = \frac{2(r_0 + p) \sqrt{a^2 - (r_0 + p)^2} + 2a^2 \sin^{-1}[(r_0 + p)/a]}{\pi} \quad (3)$$

其余内包层截面上的点源照射到  $M$  点的光线,由于

两焦散面不包含纤芯,永远不会被掺杂纤芯吸收。

与圆对称 DCF 类似,最后算得偏心 DCF 总吸收

效率为:

$$\eta = \int_0^{2\pi a} \frac{S'_a}{S_{all}} dl \Big/ 2\pi a = \frac{S'_a}{S_{all}} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{r_0 + p}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{r_0 + p}{a} \right)^2} + \sin^{-1} \left[ \frac{r_0 + p}{a} \right] \right] \quad (4)$$

该式与文献[4]中计算偏心 DCF 吸收效率的(11)式相吻合。图 6 中画出了在偏心 DCF 中,纤芯半径  $r_0$  分别取  $6\mu\text{m}$ ,  $4\mu\text{m}$ ,  $2\mu\text{m}$ 、内包层半径  $a = 300\mu\text{m}$  时,用(4)式计算得到的双包层光纤吸收效率随偏心距离  $p$  变化曲线。

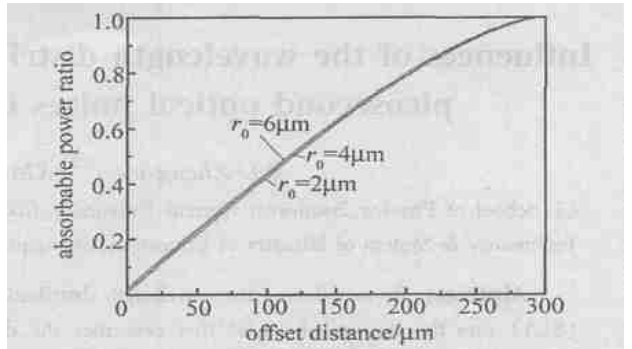


Fig. 6 Curve of absorption efficiency versus offset distance with different radius of core

## 4 结 论

由(1)式和(2)式算得的圆对称和偏心双包层光纤的吸收效率与文献[4]中用(7)式和(11)式算得的这两种情况下的吸收效率完全一致。但与文献[4]中用双重积分进行计算相比,本文中从面积的角度比较直观、明了地反映出吸收效率,很容易被理解,而且在没有公式的情况下非常容易进行吸收效率的推导。但这种方法不能应用于非均匀双包层光纤,也不能应用于内包层边界有缺陷的双包层光纤。

### 参 考 文 献

- [1] ZENTENO L. High power double clad fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(9): 1435~ 1446.
- [2] DOMINIC V, MacCORMACK S, WAARTS R *et al.* 110W fibre laser [J]. Electron Lett, 1999, 35(14): 1158~ 1160.
- [3] BEDO S, LUTHY W, WEBER H P. The effective absorption coefficient in double clad fibres [J]. Opt Commun, 1993, 99: 331~ 335.
- [4] LIU A, UEDA K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double clad fibers [J]. Opt Commun, 1996, 132: 511~ 518.
- [5] DOYA V, LEGRAND O, MORTESSAGNE F. Optimized absorption in a chaotic double clad amplifier [J]. Opt Lett, 2001, 26(10): 872~ 874.
- [6] 吴彝尊, 蒋佩璇, 李 铃 *et al.* 光纤通信基础 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1987. 54~ 55.