

文章编号: 0258-7025(2006)03-0347-04

掺铒光纤的纤芯折射率

傅永军, 简 伟, 郑 凯, 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 在光纤研制过程中掺铒光纤(EDF)的纤芯折射率控制尤为关键。对采用改进型化学气相沉积(MCVD)技术沉积纤芯疏松层,并用溶液浸泡法,采用不同铝离子浓度的氯化铈溶液制作的四种掺铒光纤进行了折射率测试和电子探针微小分析(EPMA)。提出了掺铝将改变原疏松层中的二氧化硅和二氧化锗的比例,铝离子进入疏松层越多,最后得到的掺铒光纤纤芯的二氧化锗的摩尔分数就会越少,用氧化铝生成和二氧化锗挥发两个化学反应式进行了解释。掺铝和掺锗都会提高纤芯的折射率,但由于锗减少引起的折射率降低量大于铝提高引起的折射率提高量,导致掺铝后纤芯的整体折射率下降。

关键词 光通信;掺铒光纤;折射率;电荷守恒

中图分类号 TN 25 **文献标识码** A

Refractive Index Control in Fabrication of Erbium-Doped Fiber

FU Yong-jun, JIAN Wei, ZHENG Kai, JIAN Shui-sheng

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

Abstract It is well known that the fiber core refractive index control in fiber fabrication is important, especially for erbium doped fiber (EDF). The refractive index will affect the cutoff wavelength of EDF, and then will bring much impact on the gain performance of EDF. In this paper, the refractive index was measured and the composition of several EDFs was analyzed by electronic probe microbeam analysis (EPMA). The EDFs were fabricated through modified chemical vapor deposition (MCVD) method combining with solution doping technology. It was found that the aluminum codoping would seriously affect the ratio of silicon to germanium in the core, the more aluminum incorporated into the porous layer, the less germanium would stay in the EDF. It was explained with the two chemistry equations of alumina creation and germanium oxide volatilization. Codoping aluminum and germanium into silicate both would increase the refractive index, but index decreasing brought by the amount of germanium decreasing was larger than the index increasing brought by the amount of aluminum increasing, which led to the refractive index decreasing along with the amount of aluminum increasing.

Key words optical communication; erbium-doped fiber; refractive index; charge conservation

1 引 言

掺铒光纤(EDF)放大器已在光纤通信系统中得到了广泛的应用,而 L 波段掺铒光纤放大器仍是当前的一个研究热点^[1,2]。目前国内掺铒光纤放大器中所需的掺铒光纤基本上是进口的,国内制作的掺铒光纤与国外商用光纤尚有一定差距。掺铒光纤放大器的增益性能主要由玻璃基质、信号光和抽运光与掺杂区的重叠积分因子、光纤背景损耗、截止波

长、数值孔径等^[3~6]因素决定。光纤的截止波长由光纤纤芯数值孔径和纤芯几何尺寸决定,而在包层折射率确定的情况下,光纤纤芯数值孔径完全由纤芯折射率决定。同时,信号光和抽运光与纤芯掺杂区的重叠积分因子也与纤芯折射率密切相关^[7];因此,光纤纤芯折射率的控制对于制作出可重复的高质量掺铒光纤至关重要。

收稿日期:2005-03-14;收到修改稿日期:2005-12-12

基金项目:国家 863 计划(2002AA312190)和北京交通大学科技基金(2005RC034)资助项目。

作者简介:傅永军(1977—),男,浙江诸暨人,北京交通大学光波技术研究所博士研究生,主要从事光纤通信、特种光纤等方面的研究。E-mail:fyj.youth@263.net

2 实验与分析

采用改进型化学气相沉积(MCVD)法结合溶液掺杂技术制作了四根掺铒光纤预制棒,并拉丝得到了四种掺铒光纤,分别命名为 EDF1,EDF2,EDF3,EDF4。在用改进型化学气相沉积法制作纤芯疏松

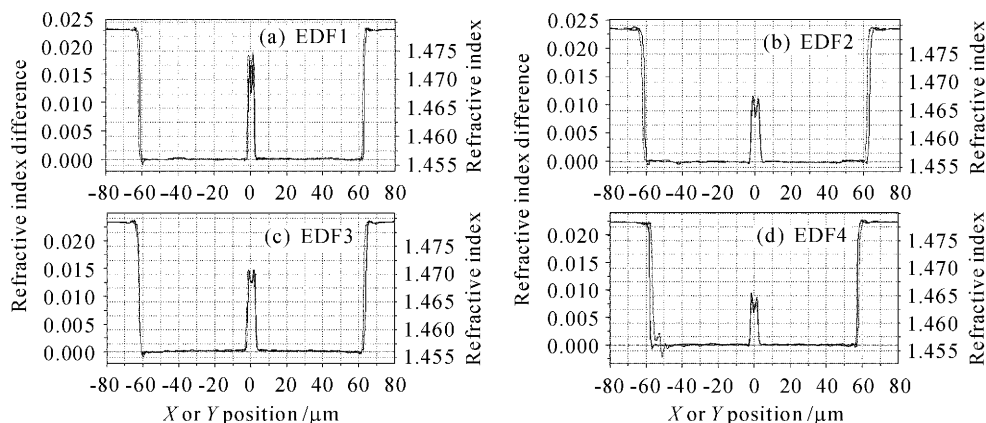


图1 EDF1(a),EDF2(b),EDF3(c)和 EDF4(d)的折射率分布

Fig. 1 Refractive index profile of EDF1 (a), EDF2 (b), EDF3 (c) and EDF4 (d)

测试波长为 674.8 nm,这四种光纤的纤芯包层折射率差最大值分别为 0.0184, 0.0115, 0.0141, 0.0108,四种掺铒光纤的纤芯折射率相差很大。为了找到问题的原因,通过电子探针微小分析(EPMA),分析了四种掺铒光纤预制棒的纤芯成分,并得到了光纤预制棒纤芯中铝和锗的摩尔分数随径向的变化,见图 2。图中 r_0 为光纤预制棒的半径, r 为沿半径方向的不同位置。从光纤预制棒成分分析的数据可以发现,其中铝的摩尔分数:EDF1<EDF3<EDF2<EDF4,而锗的摩尔分数:EDF1>EDF3>EDF2>EDF4,此时纤芯折射率 n_1 为 EDF1>EDF3>EDF2>EDF4。因此沉积光纤纤芯疏松层时二氧化硅和二氧化锗量比例一定的情况下,在最后制作出的掺铒光纤中,铝的摩尔分数越高,则锗的摩尔分数就会下降得越多,折射率就越低。根据文献资料[8],在石英玻璃中掺入铝和锗都会提高玻璃的折射率。在制作的光纤中,掺铝后纤芯折射率降低的主要原因就是由铝增加而使折射率提高的量小于由锗减少而使折射率降低的量,因此导致了掺铝后纤芯折射率下降这一现象。从成分分析发现,掺铝导致的二氧化锗摩尔分数的下降不是线性的,从图 2(a)可见,铝的摩尔分数增加到 1%时,二氧化锗的摩尔分数减小的量大于 10%,而铝摩尔分数继续增加到 3%左右时,二氧化锗的摩尔分数仅减小 6%左右。

层时,为了研究制作出的光纤数值孔径符合设计要求,使沉积纤芯通过四氯化硅和四氯化锗的通氧量保持一定,两者的气流量之比为 1:1.25。用 EXFO 公司的 NR9200 测试了这四种掺铒光纤的折射率分布,折射率测试结果见图 1。

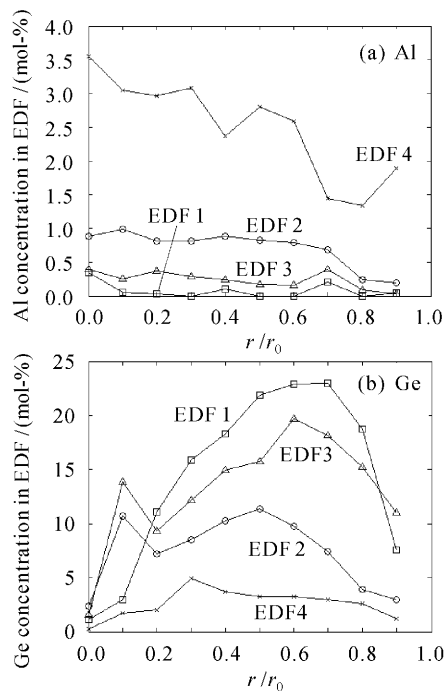
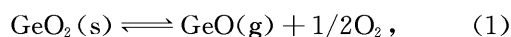


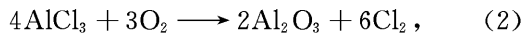
图2 掺铒光纤预制棒中铝(a)和锗(b)摩尔分数的径向分布

Fig. 2 Radial distribution of Al (a) and Ge (b) in EDF preform

二氧化锗相对于二氧化硅来说,很容易挥发,它具有化学平衡式



二氧化锗为固态,而氧化锗为气态,当(1)式的化学反应正向进行时,二氧化锗转化为氧化锗而摩尔分数减少。经溶液浸泡之后,氯化铝附着在疏松体中,在高温熔化疏松层过程中,氯化铝要与氧气反应生成三氧化二铝,具有反应方程式



对于疏松体来说,此时铝离子已经分布到整个疏松体结构中,虽然在高温玻璃化的过程中,石英管中间通氧以防止锗的挥发,但是疏松层有相当高的致密度,管中通的氧气很难进入疏松体中为 AlCl_3 利用。因此反应式(2)中的氧主要来自反应式(1)中产生的氧气。因此,疏松层中原有的 AlCl_3 浓度越高,需要的氧气就越多,促进了反应式(1)的正向进行,导致了更多的二氧化锗的挥发。并且由于是铝离子遍布整个纤芯疏松体,使纤芯二氧化锗的浓度整体减小,不同于普通单模光纤制作时的纤芯中心折射率凹陷,后者只是纤芯中间锗的挥发造成的。

由于疏松体直接与光纤包层接触,在玻璃化的过程中,部分锗会直接扩散到包层中,这对于纤芯直接玻璃化的光纤来说,是不会发生的。这个结论在用电子探针微小分析研究了锗在整个预制棒纤芯截面及与包层边界上的分布之后得到了证实,锗的分布见图 3。

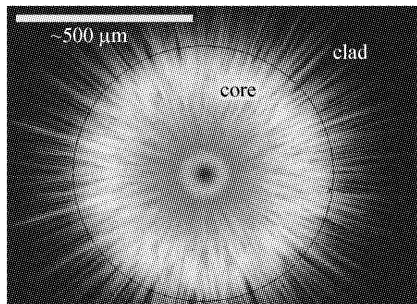


图 3 EDF3 光纤预制棒中锗的分布

Fig. 3 Germanium distribution in the core of EDF3 preform

图 3 中亮色表示锗的摩尔分数比较高的地方,浅色为锗摩尔分数少的地方,深黑色就是不含锗的区域。铝共掺的掺铒光纤预制棒中锗的分布略呈放射状,且在纤芯和包层的界面上有大量的锗挥发进入到包层。

对于 EDF2 和 EDF3 来说,从图 2 中可以看到,EDF2 中铝的摩尔分数比 EDF3 的高,同时 EDF2 中锗的摩尔分数比 EDF3 的低,也符合上述的结论。而溶液浸泡过程中,EDF2 预制棒疏松层所用铈溶

液中的铝离子的浓度比 EDF3 所用溶液中的铝离子浓度低,与制成预制棒之后纤芯铝离子浓度不一致。经过分析,这种反常情况的原因是由疏松层的致密度不一致造成的,浸泡 EDF3 的疏松层所用铈溶液的铝离子浓度虽然高,但是由于用改进型化学气相沉积法制作的疏松层致密度比较高,而使铝离子进入二氧化硅和二氧化锗疏松体比较困难,进入的实际铝离子的量反而不如进入 EDF2 的多。因此,对于疏松体中二氧化硅和二氧化锗比例一定的情况下,进入疏松体网络的实际铝离子的摩尔分数决定了最后光纤中二氧化锗的摩尔分数,同时也决定了掺铒光纤的纤芯折射率。而进入疏松体网络实际的铝离子摩尔分数又由浸泡所用铈溶液中的铝离子浓度和疏松层的致密度所决定。由于在沉积纤芯疏松层时,温度的微小变化对疏松层的致密度会产生较大的影响,而这里的温度微小变化对生成二氧化硅和二氧化锗的效率不会产生多大影响。因此为了制作的掺铒光纤有很好的可重复性,沉积纤芯疏松层时的温度需要严格控制。因此,在高掺铝的掺铒光纤制作过程中,为了满足纤芯数值孔径的要求,需要进一步提高沉积疏松层时二氧化锗的比例。

3 结 论

研究了掺铒光纤的折射率,研究表明对于采用改进型化学气相沉积法制作预制棒纤芯疏松层,并用溶液浸泡法制作的掺铒光纤来说,光纤纤芯折射率不仅由沉积时疏松层中二氧化硅和二氧化锗的比例决定,还取决于掺入纤芯中的铝的摩尔分数。而铝的掺入量由铈溶液中铝离子的浓度和纤芯疏松层的致密度决定。研究结果为我们制作出符合要求的纤芯折射率提供了指导,为提高掺铒光纤的成品率和质量提供了保证。

参 考 文 献

- Huang Liqun, Wang Li, Wang Zhi *et al.*. Design on gain-flattening filters of L-band EDFAs [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):829~832
黄力群,王 里,王 智等. L 波段掺铒光纤放大器的增益平坦滤波器设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):829~832
- Ge Chunfeng, Tan Li, Ding Yongkui *et al.*. Research on amplified spontaneous emission and gain of L-band EDFA [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1530~1532
葛春风,谭 莉,丁永奎等. L 波段掺铒光纤放大器的自发辐射谱与增益的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11):1530~1532
- M. Ohashi. Design considerations for an Er^{3+} -doped fiber amplifier [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(9):1099~1104
- B. Pedersen, A. Bjarklev, J. H. Povlsen *et al.*. The design of

- erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(9):1105~1112
- 5 E. Desurvire, J. L. Zyskind, C. R. Giles. Design optimization for efficient erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(11):1730~1741
- 6 M. N. Zervas, R. I. Laming, J. E. Townsend *et al.*. Design and fabrication of high gain-efficiency erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(12):

- 1342~1344
- 7 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):271~282
- 8 Wu Chongqin. Theory of Optical Waveguide [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 163~164
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 163~164

光学期刊联合编辑部举行新春茶话会

2006年1月16日,《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 和《激光与光电子学进展》在上海光机所举行专家、编委新春座谈会。徐至展院士、王育竹院士,上海光机所祝如荣副所长,各研究室的主任、副主任,四种刊物的部分编委、特约编辑以及编辑部的编辑共36人参加了座谈会。

座谈会由上海光机所信息中心副主任杨蕾主持,她简要介绍了《光学学报》等四种光学期刊2005年的运转情况。信息管理中心主任薛慧彬分八个方面详细汇报了这四种期刊在2005年取得的主要成绩。其中包括《光学学报》、《中国激光》双双入选“中国百种杰出学术期刊”; *Chinese Optics Letters* 稳步发展,进入了世界光学领域重要检索库——美国光学学会 Optics InfoBase;《激光与光电子学进展》积极加强与企业的联系,以科技创新带动产业发展,步入了新的发展期;整合期刊办刊资源,提高期刊办刊效率;依靠专家办刊、加强队伍建设、提高期刊学术水平;积极联络 SCI 选刊部推介我刊(在 SCI 中的被引情况);中国光学期刊网发展迅速,从最初的4种刊源发展到现有16本期刊加入网站;广告发行工作有了较大突破,编辑部联合国内11家知名光学期刊进行了联合征订,等等。

祝如荣副所长对期刊工作给予了高度评价。他还结合自身从事宣传工作的经历,提出一些指导性意见。《光学学报》和 *Chinese Optics Letters* 主编徐至展院士在发言中强调,期刊一定要争取进入 SCI,希望主办单位在经费、人员等方面给予更大的支持。办刊方面,既要发挥老专家的作用,又要吸收年轻编

委,吸引国际作者投稿,积极参加光学领域的国际、国内重要学术会议。



与会专家还对期刊近期的发展和远景规划提出了各自的看法。编委、福建物构所沈鸿元研究员认为:光学期刊联合编辑部的同志工作非常努力,也取得了明显的成效,期刊应该明确自身定位,并经常与审稿人沟通,以便更好地把握稿件的取舍;光学学报执行主编刘立人研究员建议联合编辑部应该多参加国际会议,利用多种手段扩大杂志的影响力;中国激光副主编雷仕湛指出,在目前作者来稿面广量大的情况下,要注意选择反映最新研究成果的优秀论文,以努力打造精品期刊;编委张正泉和上海光机所高功率激光单元技术研究与发展中心主任胡丽丽研究员要求编辑要通过多种方式捕捉审稿人信息,并努力寻找国外审稿人,以使期刊真正实现国际化。

此次座谈会使光学期刊联合编辑部全体编辑备受鼓舞,他们表示要进一步努力,实现期刊的跨越式发展,为我国的光学事业多做贡献。