

doi:10.3788/gzxb20134205.0526

Yb/P/Al 共掺双包层光纤的制备与激光性能

冯高峰¹, 杨军勇¹, 卢卫民¹, 葛锡良¹, 刘伟², 陈滔², 姜培培², 沈永行²

(1 富通集团有限公司, 浙江 富阳 311422)

(2 浙江大学 光电信息工程学系 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:采用改进化学汽相沉积结合溶液掺杂法制备了 Yb/P/Al 共掺的石英光纤预制棒, 通过光纤芯层的组份和制备工艺的优化, 实现了 Yb³⁺ 的高浓度掺杂和均匀掺杂. 预制棒芯层 Yb₂O₃ 掺杂浓度达到 ~4wt. %, Yb³⁺ 在 1 080 nm 处荧光寿命为 1 780 μs. 成功拉制出内包层截面形状为八边形的双包层光纤, 纤芯直径为 7.5 μm, 包层吸收系数达到 ~5 dB/m@976 nm. 利用拉制的掺镱双包层光纤开展了全光纤结构的掺镱光纤激光器性能测试实验, 实现了 5.15 W 的激光输出, 斜率效率达到 76%.

关键词: Yb/P/Al 共掺; 双包层光纤; 荧光寿命; 包层吸收系数; 斜率效率

中图分类号: TN244

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)05-0526-5

Fabrication and Laser Performance of Yb/P/Al Codoped Double-clad Fibers

FENG Gao-feng¹, YANG Jun-yong¹, LU Wei-min¹, GE Xi-liang¹,

LIU Wei², CHEN Tao², JIANG Pei-pei², SHEN Yong-hang²

(1 Futong Group Co., Ltd, Fuyang, Zhejiang 311422, China)

(2 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Yb/P/Al codoped silica glass preforms are fabricated by MCVD process combined with the solution doping technique. Highly and homogeneously doping of Yb³⁺ is realized by optimization of the core composition and fabrication process. The Yb₂O₃ concentration in preform core is up to ~4 wt. % and Yb³⁺ fluorescence lifetime at 1080nm reaches 1 780 μs. Double-clad fibers with octagonal inner cladding are successfully drawn from the preform, the fiber core diameter is 7.5 μm and the clad absorption coefficient is up to ~5 dB/m@976 nm. The operation of the cladding pumped all-fiber laser is demonstrated using Yb-doped double-clad fibers. Fiber lasers with output power of 5.15 W and slope efficiency of 76% are obtained.

Key words: Yb/P/Al codoped; Double-clad fibers; Fluorescence lifetime; Cladding absorption; Slope efficiency

0 引言

掺镱光纤激光器具有结构紧凑、散热效果好、与光纤耦合损耗低、效率高等显著优势而受到国内外研究者的广泛关注. 1962 年 Etzel 等人^[1]实现了掺镱光纤的激光输出. 但由于单模光纤纤芯直径较小, 泵浦光功率难以有效地耦合到纤芯中, 导致光纤激光器的输出功率只有毫瓦量级. 双包层光纤的出现

和半导体激光器的成熟使得光纤激光器实现大功率输出成为现实. 1999 年, V. Dominic 等^[2]实现了掺镱光纤激光器 110 W 的激光输出, 斜率效率为 58%. 2004 年, Y. Jeong 等^[3]实现了 1.36kW 的连续激光输出, 斜率效率为 83%, 光束质量因子 M^2 为 1.4. 之后, IPG 公司很快突破了 10 kW^[4] 的激光输出, 为了减小量子亏损, 该激光器采用 1 018 nm 光纤激光器泵浦. 更进一步, 采用相干组束技术, 光纤

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61078015)和国家重点基础研究发展计划(No. 2011CD311803)资助

第一作者: 冯高峰(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光子材料和特种光纤技术. Email: ftofgf@fso.com.cn

收稿日期: 2012-11-21; 录用日期: 2013-01-08

激光器有望实现兆瓦输出^[5]. 国内关于双包层光纤激光器的研究起步较晚,但近年来发展迅速. 2000年,南开大学与电子 46 所联合研制出掺 Yb³⁺ 双包层光纤,并开展了光纤激光器的试验研究^[6]. 2003年,上海光机所楼祺洪等^[7]研制出百瓦级掺镱双包层光纤激光器. 2006年,兵器装备研究院李伟等^[8]和电子 11 所赵鸿等^[9]研制出了千瓦级的光纤激光器. 随着掺镱光纤激光器输出功率的不断提高,其在光通信、材料加工、印刷等领域得到了广泛应用.

掺镱光纤激光器的主要激光增益介质是掺镱双包层光纤,其性能直接决定了光纤激光器的转换效率和输出功率,而目前掺镱光纤的非线性效应和光暗化已成为制约光纤激光器输出功率的主要因素^[10]. 提高非线性效应阈值最直接的方法是采用大模场面积(Large Mode Area, LMA)的光纤,但增大模场面积将会导致光纤单模特性被破坏,难以实现单模输出,并且当纤芯直径增加到~45 μm 时,弯曲损耗就大大增加^[10]. 另一种方法是通过提高掺镱光纤的掺杂浓度,从而减小光纤长度来抑制非线性效应. 然而纯石英光纤中高浓度掺杂 Yb³⁺ 容易发生团簇,甚至使预制棒芯部出现析晶. 此外,团簇会引起 Yb³⁺ 合作上转换发光,导致光纤激光器量子效率的下降. 合作上转换发光进一步可能通过色心引起光暗化效应^[11],从而使光纤激光器的输出功率随着时间的推移而逐渐下降.

石英光纤中掺入 Al₂O₃^[12] 和 P₂O₅^[13] 可以增加 Yb³⁺ 的溶解度, P₂O₅ 掺杂不仅能够减小 Yb³⁺ 的团簇,而且可以大大减小光纤激光器的光暗化效应^[14-15]. 同时共掺 Al₂O₃ 可以有效抑制磷的挥发,从而减小光纤折射率中心凹陷^[16],优化 Yb³⁺ 在光纤芯层中的分布^[17].

本文采用 MCVD 结合溶液掺杂法制备了 Yb/P/Al 共掺石英光纤预制棒,通过光纤芯层的组份和制备工艺的优化,实现了 Yb³⁺ 的高浓度掺杂和均匀掺杂. 采用 Yb/P/Al 共掺石英光纤预制棒拉制的双包层光纤进行了全光纤结构光纤激光器的性能测试实验研究,实现了 5.15 W 的激光输出,斜率效率达到 76%.

1 掺镱双包层光纤的制备

掺镱光纤预制棒采用改进化学汽相沉积(Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD)工艺结合溶液掺杂法制备. 具体制备过程为:1)隔离层沉积. 将清洗好的沉积管安装到精确校直的同步旋转卡盘上,1 800℃ 下用 SF₆、O₂ 对其进行抛光,去除表面杂质;然后用常规方法沉积隔离层,以防止沉积

管中的杂质扩散到芯层中. 2)芯层沉积. 降低温度,沉积疏松芯层;通过调节 SiCl₄ 和 POCl₃ 的气体流量来控制芯层的组分及折射率;芯层沉积的关键是控制好疏松层的孔隙度与均匀度,以提高掺杂离子的浓度和均匀度. 3)溶液浸泡. 取下沉积管,倒入配制好的溶液,使 Yb³⁺ 和 Al³⁺ 均匀地吸附在疏松芯层上,其中 YbCl₃ 的浓度为 0.06 mol/L, AlCl₃ 的浓度均为 0.15 mol/L;浸泡时间为 2 h. 4)脱水玻璃化. 沉积管用 N₂ 吹 30 min,然后逐步升高温度至~1 000℃ 同时通入 Cl₂, He 进行脱水干燥,充分去除疏松层中含有的水份;干燥之后,升温至~1 800℃ 玻璃化. 5)缩棒. 最后在~2 200℃ 下尽可能快地熔缩成透明的预制棒,以防止磷的挥发,减小折射率中心凹陷.

制作好的掺镱光纤预制棒折射率剖面由 PK2600 预制棒综合测试仪测试得到,如图 1. 将预制棒截下一小段,端面研磨抛光后用于光学测试. 荧光寿命采用英国 Edinburgh Instruments 公司的 FLS920 稳态及瞬态荧光光谱仪测试. 掺杂离子浓度和背散射电子图像由电子探针(JXA-8100)测试预制棒切片得到. 余下的预制棒按照设计的结构,内包层截面研磨抛光成八边形. 然后将所得的预制棒拉制成光纤,拉丝过程中涂覆低折射率树脂形成双包层结构,其外涂覆紫外光固化丙烯酸树脂作为光纤的外包层. 拉制后的掺镱双包层光纤参量见表 1.

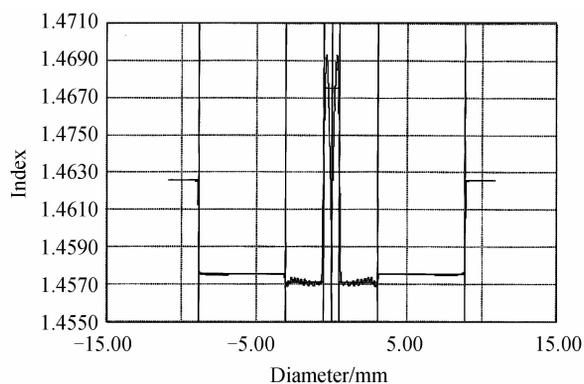


图 1 掺镱光纤预制棒折射率分布

Fig. 1 Refractive index profile of Yb-doped fiber preform

表 1 掺镱双包层光纤的参量

Table 1 Parameters of Yb-doped double-clad fiber

| Core diameter/ μm | Cladding diameter/ μm | Core N. A. | Cladding N. A. | Coating diameter/ μm |
|------------------------------|----------------------------------|------------|----------------|---------------------------------|
| 7.5 | 130 | 0.17 | 0.46 | 250 |

2 结果与讨论

图 2 为预制棒切片端面的背散射电子图像. 中间白色部分为预制棒芯层,其组份为~75 wt. % SiO₂, ~16.5 wt. % P₂O₅, ~4.5 wt. % Al₂O₃ 和 ~4 wt. % Yb₂O₃. 周围灰色部分为预制棒包层. 从

图2可以看到,预制棒芯层的掺杂较为均匀,中心未出现由于组份大量挥发而造成的暗斑。

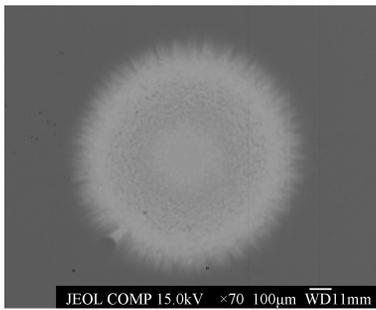


图2 预制棒切片的背散射电子图像

Fig. 2 Back-scattered electron image of Yb-doped fiber preform slice

预制棒芯层中的各组份浓度分布如图3所示,虽然 P_2O_5 的浓度由于缩棒时高温挥发在靠近芯层中心处略有下降,但 Yb_2O_3 和 Al_2O_3 在预制棒芯层的径向上分布仍较为均匀。

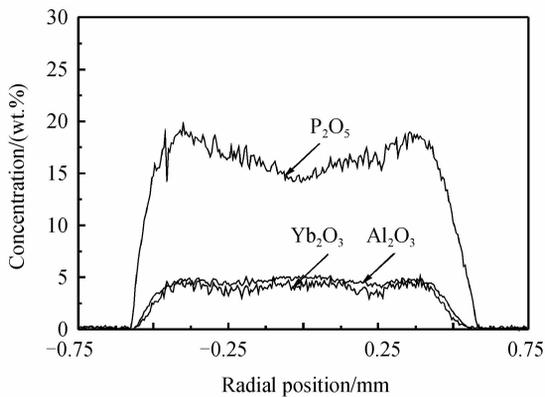


图3 预制棒芯层中的组份浓度分布

Fig. 3 Dopants distribution in the core of preform

Yb^{3+} 的荧光寿命与基质的组份、缺陷和杂质的含量以及镱掺杂浓度等有着密切的关系^[18]. 图4表征了掺镱预制棒切片在 1 080 nm 处发光的荧光衰减曲线,根据拟合得到的荧光寿命值为 1 780 μs . 相对于 Yb/Al 或 Yb/Ge 共掺石英基质^[19], Yb/P/Al 共掺石英预制棒具有更长的荧光寿命,接近于文献

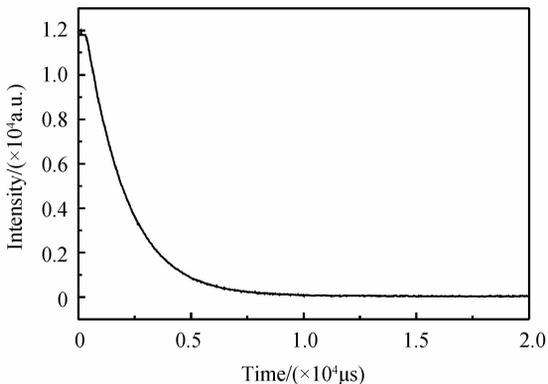


图4 掺镱预制棒切片荧光衰减曲线

Fig. 4 Fluorescence decay curve of Yb-doped fiber preform slice

[20]中的掺镱磷酸盐玻璃的荧光寿命值,表明其具有较高的荧光量子效率. 光纤预制棒制作过程中,由于工艺的不完善,光纤中 OH、杂质和团簇都会降低镱离子的荧光寿命,其中团簇会加快非辐射跃迁的速率,从而减小荧光寿命,进一步还会导致量子效率的下降^[18]. 因此,掺镱光纤预制棒制备过程中,完善制作工艺,控制团簇,对于提高掺镱双包层光纤的激光性能具有重要的意义。

图5为掺镱双包层光纤在剥除涂覆层之后在显微镜下的照片,其内包层截面为八边形结构. 采用八边形结构内包层截面的主要原因是为了增加包层泵浦激光的吸收效率. 双包层光纤的内包层是泵浦光的传输通道,圆形内包层中存在大量螺旋光,这些光在内包层的多次反射过程中始终不经过纤芯,因而泵浦光的吸收率很低. 通过采用八边形的内包层截面形状,不仅可以提高泵浦光的有效吸收,而且能够有效控制掺镱光纤与常规光纤的熔接损耗。

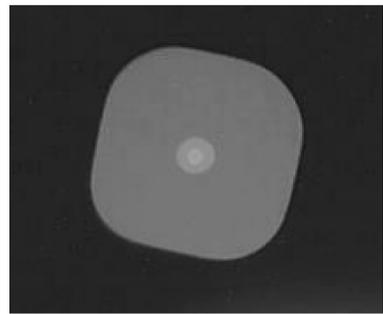


图5 掺镱光纤端面照片

Fig. 5 Photograph of cleaved Yb-doped fiber end

掺镱双包层光纤的包层吸收系数测试采用 AQ4305 白光源,波长范围为 400~1 800 nm. 白光源尾纤与掺镱光纤熔接耦合,输出光进入 AQ6317C 型光谱分析仪进行光谱分析. 被测掺镱双包层光纤的长度为 3.5 m,其 800~1 100 nm 波长范围的吸收光谱如图6. 图中的损耗带正好对应于镱离子的吸收谱,得到掺镱双包层光纤的包层吸收系数为

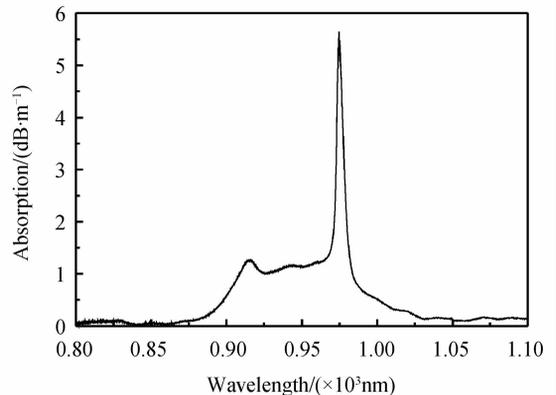


图6 掺镱光纤吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectrum of Yb-doped double-clad fiber

5 dB/m@976 nm. 掺镱光纤的吸收系数决定了光纤对泵浦光吸收的大小,吸收系数越大,达到相同的增益所需的光纤长度越小,从而可以降低非线性效应的影响。

针对所制作的掺镱双包层光纤开展了激光性能测试实验,实验装置如图 7. 泵浦源采用中心波长为 975 nm 的半导体激光器,最大功率为 10 W. 采用多模光纤合束器进行全光纤耦合,合束器的泵浦光输入光纤(105/125 μm ,数值孔径为 0.22)与泵浦源尾纤(105/125 μm ,数值孔径为 0.22)熔接,信号光传输光纤熔接一个波长在 1 061 nm 的全反光纤光栅,作为光纤激光谐振腔的前腔镜. 输出光纤(6/125 μm ,芯层数值孔径为 0.14,内包层数值孔径 0.46)与 2 m 长的掺镱双包层光纤熔接,利用光纤输出端面的菲涅耳反射(约 4%)作为后腔镜. 光功率计用来测量光纤输出端的输出功率. 虽然上述实验配置中,耦合器引起的腔内损耗(5%)会在一定程度上影响光纤激光器的效率,但因为结构简单,光纤光栅可以重复使用,故还是在所研制的光纤测试中采用。

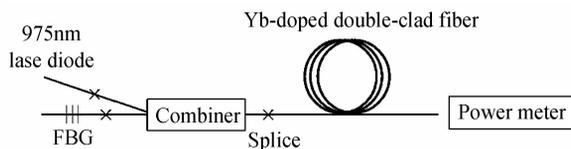


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup for Yb-doped double-clad fiber laser

通过测量不同驱动电流工作时的 LD 泵浦功率、残余泵浦功率和 1 060 nm 波段的激光输出功率,得到了激光输出功率与泵浦光吸收功率的关系,如图 8 所示,线性拟合得到掺镱光纤激光器的斜率效率为 76%. 泵浦吸收功率为 7.05 W 时,激光输出功率为 5.15 W. 从图中可以看到,激光功率与泵浦吸收功率基本呈线性关系,在实验中未观察到饱和现象. 若继续增大泵浦源的输出功率,掺镱光纤的输出功率可望进一步提高。

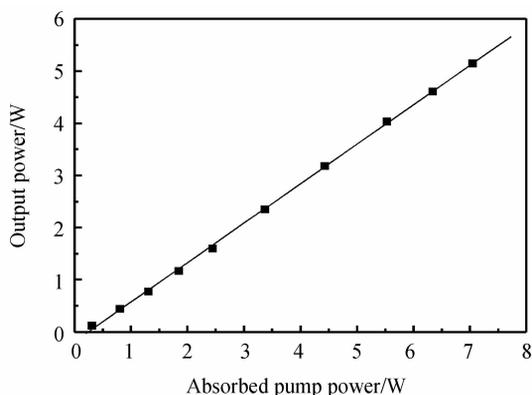


图 8 激光输出功率特性曲线

Fig. 8 Laser characteristics of Yb-doped double-clad fiber

3 结论

采用 MCVD 结合溶液掺杂法制备出了 Yb/P/Al 共掺石英光纤预制棒,通过光纤芯层的组份和制备工艺的优化,实现了 Yb^{3+} 的高浓度掺杂和均匀掺杂. 测试了掺镱预制棒切片在 1 080 nm 处发光的荧光衰减曲线,得到其荧光寿命值为 1780 μs . 利用白光光源测试了掺镱双包层光纤的损耗谱,得到其包层吸收系数为 ~ 5 dB/m@976 nm. 采用全反射光纤光栅和光纤端面的菲涅耳反射形成的线性激光腔结构,实现了 2 m 长的掺镱双包层光纤 5.15 W 的激光输出,斜率效率达到 76%. 本文所述的 Yb/P/Al 共掺双包层光纤,具有较高的 P_2O_5 和 Al_2O_3 掺杂浓度,适用于高浓度的 Yb^{3+} 均匀掺杂,有利于高吸收系数的掺镱双包层光纤制作。

致谢: 感谢中科院上海光机所王孟在荧光寿命测试上给予的帮助。

参考文献

- [1] ETZEL H W, GANDY H W, GINTHER R J. Stimulated emission of infrared radiation from Ytterbium-activated silica glass [J]. *Applied Optics*, 1962, **1**(4): 534-536.
- [2] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R, *et al.* 110 W fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1999, **35**(14): 1158-1160.
- [3] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(25): 6088-6092.
- [4] STILES E. New developments in IPG fiber laser technology[C]. Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- [5] NILSSON J, PAYNE D N. High-power fiber lasers[J]. *Science*, 2011, **332**(6032): 921-922.
- [6] LÜ Ke-cheng, LIU Wei-wei, LI Yi-gang, *et al.* High efficient Yb-doped double-clad fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(8):755-755.
吕可诚,刘伟伟,李乙钢,等. 高效率掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2000, **27**(8):755-755.
- [7] LOU Qi-hong, ZHOU Jun, JU Jiang-qiang, *et al.* 100W-class Yb-doped double-clad fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(12):1064-1064.
楼祺洪,周军,朱健强,等. 百瓦级掺镱双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1064-1064.
- [8] LI Wei, WU Zi-Chun, CHEN Xi, *et al.* High power fiber laser output power breakthrough 1kW [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(6):890-890.
李伟,武子淳,陈曦,等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1kW [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(6):890-890.
- [9] ZHAO Hong, ZHOU Shou-huan, ZHU Chen, *et al.* High power fiber laser output power breakthrough 1.2kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10):1359-1359.
赵鸿,周寿桓,朱辰,等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2kW[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1359-1359.
- [10] LEE Y W, SINHA S, DIGONNET M J F, *et al.* 20W single-mode Yb³⁺-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(22): 3255-3257.
- [11] SUZUKI S, MCKAY H A, PENG X, *et al.* Highly ytterbium-doped silica fibers with low photo-darkening[J]. *Optics Express*,

- 2009, **17**(12): 9924–9932.
- [12] POOLE S B. Fabrication of Al_2O_3 co-doped optical fibre by a solution-doping technique[C]. *ECOC'88*, **292**: 433-436.
- [13] VIENNE G G, CAPLEN J E, DONG L, *et al.* Fabrication and Characterization of Yb^{3+} ; Er^{3+} phosphosilicate fibers for lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, **16**(11): 1990-2001.
- [14] SHUBIN A V, YASHKOV M V, MELKUMOV M A, *et al.* Photodarkening of alumosilicate and phosphosilicate Yb-doped fibers[C]. Conf. Digest of CLEO Europe EQEC, 2007, CJ3-1-THU.
- [15] UNGER S, SCHWUCHOW A, JETSCHKE S, *et al.* Optical properties of Yb-doped laser fibers in dependence on codopants and preparation conditions [C]. *SPIE*, 2008, **6890**: 689016-1-689016-11.
- [16] JETSCHKE S, UNGER S, SCHWUCHOW A, *et al.* Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(20): 15540-15545.
- [17] SIDIROGLOU F, HUNTINGTON S T, ROBERTS A, *et al.* Simultaneous multidopant investigation of rare-earth-doped optical fibers by an ion microprobe[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(22): 3258-3260.
- [18] BARUA P, SEKIYA E H, SAITO K, *et al.* Influences of Yb^{3+} ion concentration on the spectroscopic properties of silica glass[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, **354**(42-44): 4760-4764.
- [19] PASCHOTTA R, NILSSON J, BARBER P R, *et al.* Lifetime quenching in Yb-doped fibres[J]. *Optics Communications*, 1997, **136**(5-6): 375-378.
- [20] QIAO Yan-bo, WEN Lei, WU Bo-tao, *et al.* Preparation and spectroscopic properties of Yb-doped and Yb-Al-codoped high silica glasses[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, **107**(2-3): 488-491.

• 下期预告 •

一种新型左手材料的设计和特性研究

易强, 周辅坤, 骆兴芳

(江西师范大学 物理与通信电子学院; 江西省光电子与通信重点实验室, 南昌 330022)

摘要:通过对左手材料的理论分析,设计了一种宽频带左手材料结构单元.该结构单元由一个矩形闭合环和十字型结构构成的谐振器和金属线组合而成.这种新结构中的谐振器实现负磁导率,金属线实现负介电常量,经过合理的设计,可以在某一频段内使得磁导率和介电常量同时为负,即具有负的有效折射率和正的波阻抗.数值仿真结果表明:在其工作频段内存在一个通带并且在17.6~29.0 GHz频率范围内折射率实部为负,而虚部接近于零;同时在该频率范围内波阻抗实部大于零,从而说明了该左手材料具有左手特性.除此之外,相对左手带宽达到48.9%,远远优于传统的左手材料.

关键词:左手材料;宽频带;负折射