

高写入效率的大圆孔微结构光纤光栅

任晓敏¹ 李 晓^{1,2} 王志斌^{1,2} 王冠军^{1,2}

¹ 中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051
² 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 针对传统微结构光纤光栅写入过程中的写入散射大的问题,采用时域有限差分法分析了大圆孔微结构光纤光栅的写入场分布特性,并用有限元法验证了分析结果。提出将适当折射率的流体填充至大圆孔区域,利用柱形流体的微透镜效应会聚高斯光能量至纤芯掺杂区域,从而改善写入效率。仿真结果表明改进后的光纤光栅写入效率分别是周期性光子晶体光纤光栅和单模光纤光栅写入效率的 290% 和 210% 左右,可以提高光纤光栅的写入效率,降低散射损耗。此外,还针对高斯光束写入角度误差对写入效率的影响进行了初步分析。

关键词 光纤光学; 微结构光纤光栅; 写入效率; 时域有限差分法; 有限元法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0805001

Large Side-Hole Microstructured Optical Fiber Grating with High Inscription Efficiency

Ren Xiaomin¹ Li Xiao^{1,2} Wang Zhibin^{1,2} Wang Guanjun^{1,2}

¹ *Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*

² *Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*

Abstract Aiming at the problem of the high grating inscription scattering of previous microstructured optical fiber, inscription characteristics of a large side-hole microstructured optical fiber grating are analyzed by finite-difference time-domain method and the analysis result is confirmed by finite element method. The large hole can be filled with fluid of suitable refractive index, the fluid-filled hole acting as a converging lens and the inscribing Gauss beam can focus into the core region, which improves grating inscription efficiency. The simulation results show that the inscription efficiency of the modified structure is 290% of conventional array hole photonic crystal fiber grating and 210% of single model fiber grating, respectively. An ultrahigh inscription efficiency and a relative less grating inscription scattering can be achieved, while the influence of inscription angle deviation is also discussed.

Key words fiber optics; microstructured optical fiber grating; inscription efficiency; finite-difference time-domain method; finite element method

OCIS codes 050.5298; 230.5298; 230.7390; 290.1990

1 引 言

光纤光栅是一种新型光无源器件,自 1978 年发现以来已经得到了长足发展,现被广泛应用于光通

信、光纤激光器和光纤传感器等领域^[1]。

微结构光纤(MOF)是一种新型波导,与单模/多模光纤相比,由于引进了微结构气孔,使 MOF 具

收稿日期: 2013-03-11; **收到修改稿日期:** 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015)、国际科技合作项目(2012DFA10680)、国际科技合作项目(2013DFR10150)和中北大学校基金

作者简介: 任晓敏(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: renxiao_min@163.com

导师简介: 李 晓(1972—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电信息处理技术及电气自动化控制技术等方面的研究。E-mail:lixiaoydx@163.com(通信联系人)

有独特的光学特性。通过对光纤及其微孔结构进行有针对性的设计,可以灵活地选择适宜于传感的多种光学性能,从而易于实现优异的传感特性和多参量传感。

MOF 和传统的光纤光栅写入技术的结合为制造新型的微结构光纤光栅(MOFG)提供了难得的良机。1999年, Eggleton 等^[2]制作了微结构布拉格光纤光栅和长周期光纤光栅。因此,对 MOFG 高质量写制的研究成为其研究的先导。MOFG 写入方法目前主要有紫外曝光法、热激成栅法、机械压力法和双光子吸收法等^[3]。虽然 MOF 内部周期性的气孔成就了其独特的光学特性,但是也导致了 MOFG 写入过程中的高散射,这极大地影响了光栅写入效率和写入质量^[4]。

针对这一问题,目前大致有如下几种改进方法:采用微孔填充折射率匹配液辅助写入^[5]、旋转角度写入^[6]、基于锥形光纤方法写入和缩小气孔直径^[7]等。通过在 MOF 微孔内部填充折射率与光纤材料相匹配液体的方法可以降低光束写入过程中的散射效应,明显改善写入效率,当液体折射率从 1 增长至 1.35 时,气孔内能量从 1.3% 升至 11.4%。但由于匹配液需要从光纤端部微米尺寸的气孔端部灌入,特别是当 MOF 长度较长且匹配液粘度较大时,流体填充及随后的排除过程将十分缓慢,不利于大规模生产;通过旋转光纤写入角度的方法可以在一定程度上降低散射损耗的影响,相对于填充液体折射率方法,可大大减少写入时间,但其并未从根本上解决光栅写入的散射问题,优化后光纤横截面耦合效率仅是普通掺杂光子晶体光纤和纯硅光子晶体光纤的 1.57 倍和 1.11 倍^[8],改善光栅写入效率的效果十分有限;基于拉锥缩小纤芯方法制作的光纤光栅的重复性较差,也存在一些需要解决的技术问题;通

过缩小气孔直径和设计更少的气孔包层的方法可以提高写入效率,但是此类制作方法将影响或限制需要写入的光纤光栅特性。

本文研究了一种在包层中引入大圆孔式的微结构光纤光栅的写入特性。利用柱形流体的会聚透镜作用将写入高斯光束高效会聚至纤芯掺杂区域,从而提高写入效率。并通过分析大圆孔半径、纤芯半径、光源、激光写入角度等参数对写入效率的影响,使写入效率达到最优。

2 结 构

为简化分析模型,不考虑如下影响因素的情况: 1) 光纤外侧面散射损耗的影响; 2) 匹配液的光吸收和光热因素; 3) 纤芯掺杂区域的光吸收效应^[9]。如图 1 所示,与 ESM-12-01 微结构光纤相比,改进之处在于用一尺寸较大的圆型气孔来取代部分周期性气孔。如图 1(c) 所示,写入光束可以通过该大圆孔区域而非周期性小气孔区域进入光纤纤芯掺杂区域进行光栅写入,这样将大大降低 MOFG 周期性气孔产生的散射损耗,有利于提高光栅写入效率。此外,大圆孔加入一定折射率的液体后,该大圆孔又可以等效于会聚透镜,改变液体折射率相当于改变该等效微透镜的焦点,选择适当的折射率可以使微透镜焦点处于纤芯掺杂区域,从而使写入光会聚至纤芯掺杂区域,这将促成高能量激发光聚焦在纤芯部分,也有助于对光纤光栅写入进行优化。进一步提升效率,也有利于降低对写入光强度的要求。同时会聚光束也可以改善纤芯掺杂区域的写入场分布,有助于改善写入光栅质量。而且此类光纤仍保留了相当部分的微气孔结构,也就相应保留了微结构光纤的灵活的特性设计能力。

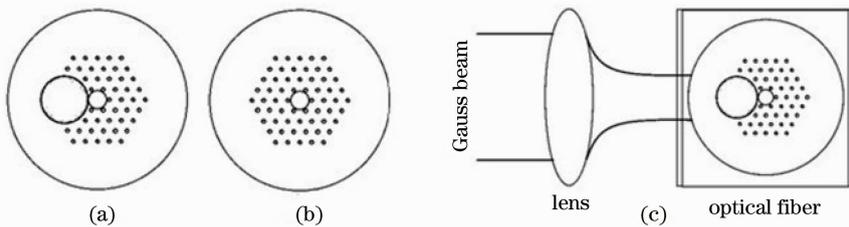


图 1 光纤结构及写入方法示意图。(a) 大圆孔微结构光纤;(b) ESM-12-01 微结构光纤;(c) 大圆孔微结构光纤光栅

Fig. 1 Schematic of optical fiber and fiber grating inscription. (a) Large side-hole microstructured optical fiber; (b) ESM-12-01 microstructured optical fiber; (c) large side-hole microstructured optical fiber grating

使用目前商用的基于时域有限差分法(FDTD)的分析软件 Opti FDTD 进行仿真,另外使用了基于有

限元法(FEM)的电磁场传输分析软件 COMSOL multiphysics 验证分析结果的准确性。假设所用光源

为平面高斯光束^[4],光束半峰全宽范围为 20~60 μm ,平面光束位置距离纤芯中心 60 μm ,光源波长选择激光写入光纤光栅可以用到的波长为 1550 nm。

仿真过程涉及到的光纤结构参数参考了目前商用的 ESM-12-01 微结构光纤。目前该类光纤在布拉格光栅和长周期光栅中应用比较广泛。纤芯半径 R 为 6 $\mu\text{m}/4 \mu\text{m}/2 \mu\text{m}$;大圆孔半径为 20 $\mu\text{m}/12 \mu\text{m}$;小圆孔半径为 1.84 μm ;孔间距为 8 μm 。光纤基底^[10] $n_{\text{SiO}_2} = 1.444024$ (当波长为 1550 nm 时);假设纤芯掺杂区域刚开始受到写入光照射的瞬态,所以 $n_o = 1.444024$;流体折射率参考了美国 Cargille Laboratories, Inc 产品库资料。

3 仿真及分析

分析上述参数情况下,填入不同的液体折射率值时写入场分布发生的变化。从图 2 可见,液体填充的大圆孔起到一微透镜作用,高斯光束在纤芯掺杂区域附近有一焦点,选择适当的折射率可以使微透镜焦点处于纤芯掺杂区域中心。周边小气孔散射位置在高斯光束边缘,相对于中心具有聚焦效应的圆孔区域,该部分气孔参数对写入场的影响较小。光束过光纤纤芯后区域由于周期性气孔的存在会产生一定的散射。随着液体折射率的提高,写入光束在光纤截面的场分布逐渐变化。当 $n = 1.444024$ 时,液体折射率和基底材料相同,等效于周期性光子晶体光纤。当 $n = 1.7$ 时,可明显看出圆孔已经起到一微透镜作用,高斯光束在纤芯掺杂区域后面有一焦点。因为液体折射率和基底材料的区别还不够明显,使得焦距较大。增加液体折射率相当于缩小微透镜的焦距,当 $n = 1.85$ 时,发现光束焦点已经移至纤芯掺杂区域中心,由于此时能量高度集中在纤芯掺杂区域,可以推测这将有助于提高光纤光栅的写入效率。

另外,从图 2 可以看出该大圆孔式微结构光纤有助于提高写入光束的峰值能量密度,纤芯最大峰值能量密度由 $n = 1.50$ 时的 176503 上升至 472815。这对于峰值能量密度上限要求比较苛刻的材料光纤,比如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)塑料微结构光纤,将有助于降低对激发光功率的要求。使得以较低的功率实现原来较高写入光功率才能达到的效果。更进一步提高液体折射率,可以看出焦点逐步移出纤芯掺杂区域,纤芯区域光场强虽然有所下降,但是光场分布相对比较均匀,有利于一定程度

上改善较大纤芯掺杂区域的写入场分布不均匀性的问题。

为了验证仿真分析结果的准确性,采用基于 FEM 的 COMSOL 软件对上述结果进行验证。设置结构参数与基于 FDTD 方法的完全一致。在同样参数下基于 FEM 法的仿真结果如图 3 所示。对比两种方法,可以明显看出仿真结果具有非常好的相似性,由于采用了两种软件计算结果相互验证的方法,可以看出相互之间差别十分微小,产生微小差别原因可以归结为网格划分方法不同和软件分析原理不同产生的误差。

为了更进一步分析写入场的改善效果,对纤芯掺杂区域场分布进行了面积分:

$$P = \iint P_{xz} ds = \sum_x \sum_z p_{xz} dx dz, \quad (1)$$

由于在使用 FDTD 软件对光纤进行光栅写入分析时,设定覆盖纤芯掺杂区域的矩形区域为均匀网格,网格数目为 241×241 (在 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 面积内), $dx = 50 \text{ nm}$, $dz = 50 \text{ nm}$ 。利用 FDTD 的数据导出功能将该区域内能量 S_x 和 S_z 分量导出,并在 Matlab 软件中根据公式

$$P = \sqrt{S_x^2 + S_z^2}, \quad (2)$$

得到一网格点的能量强度,随后根据(1)式对纤芯掺杂区域(圆形区域)的能量强度点进行面积分。这种情况下得到的数值反映了纤芯区域场总能量。对比分析不同条件下的数值则反映不同情况下的光栅写入效果程度。

根据上述方法,定性分析了大圆孔微结构光纤光栅写入效率与大圆孔尺寸、高斯光束参数、纤芯半径之间的关系。结果如图 4~6 所示。

图 4 为在 TE 模式下,当高斯光束半峰全宽为 20 μm ,纤芯半径为 6 μm 时,将圆孔半径从 12 μm 扩大至 20 μm ,得到纤芯区域能量分布和流体折射率之间的关系。三角表示使用 FEM 法所得结果,正方形表示使用 FDTD 法所得结果,这两种方法相对一致,这进一步验证了仿真结果的准确性。由图 4 可知,改变圆孔参数,写入纤芯掺杂区域达到最大效率的条件将发生改变。当大圆孔半径为 12 μm 时,最大写入效率在 $n = 1.85$ 位置,而大圆孔半径为 20 μm 时,最大写入效率在 $n = 2.1$ 位置,这是由于改变圆孔具体参数,相当于更换微透镜曲率。其焦距自然会有所改变,因此需要结合具体光纤圆孔结构来选择合适的距离。

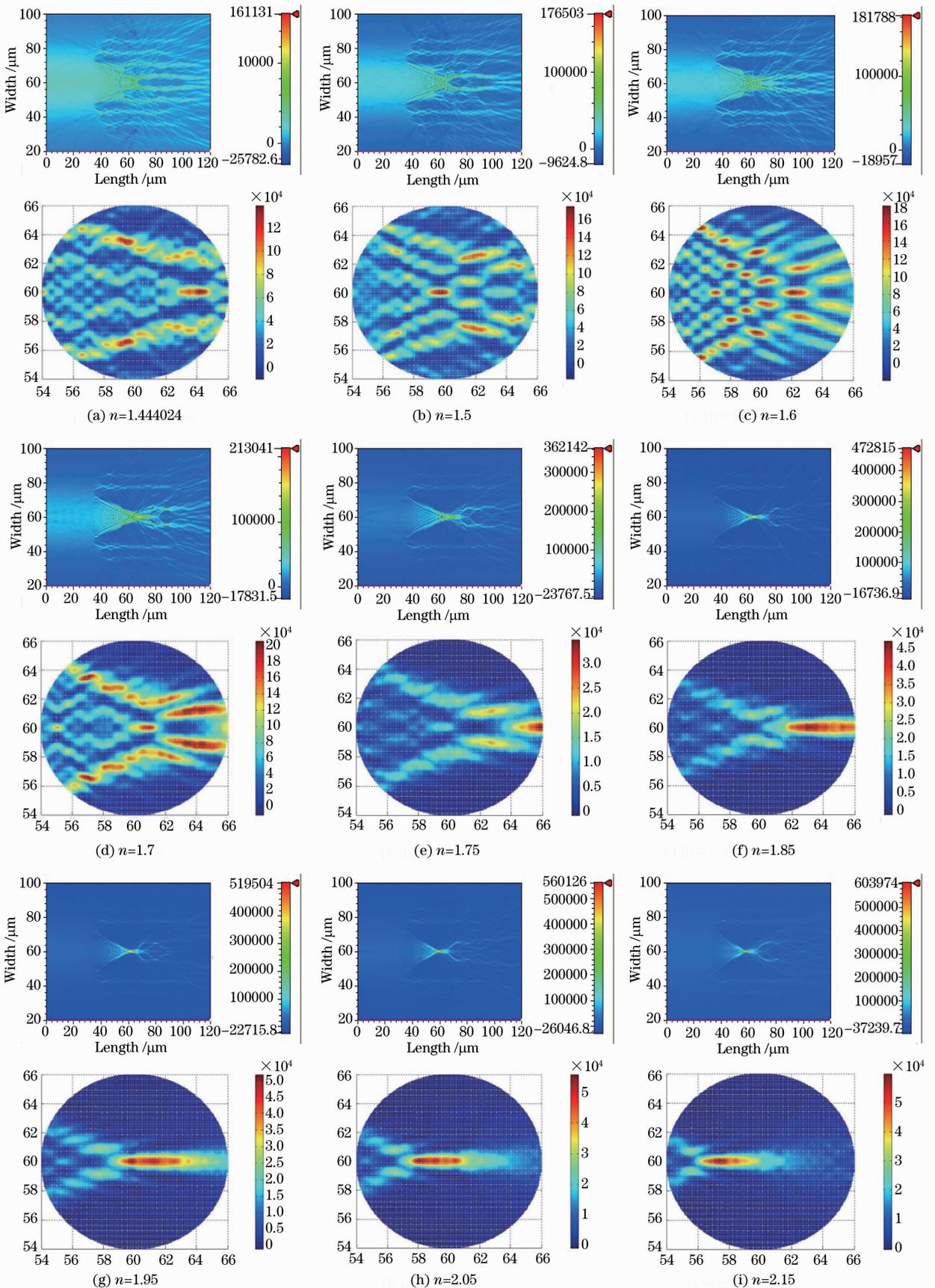


图 2 n 不同时基于 FDTD 法的光栅写入横截面(上)和纤芯区域写入场分布(下)

Fig. 2 Grating inscription cross section (up) and core inscription field distribution (down) utilizing FDTD methods with different n

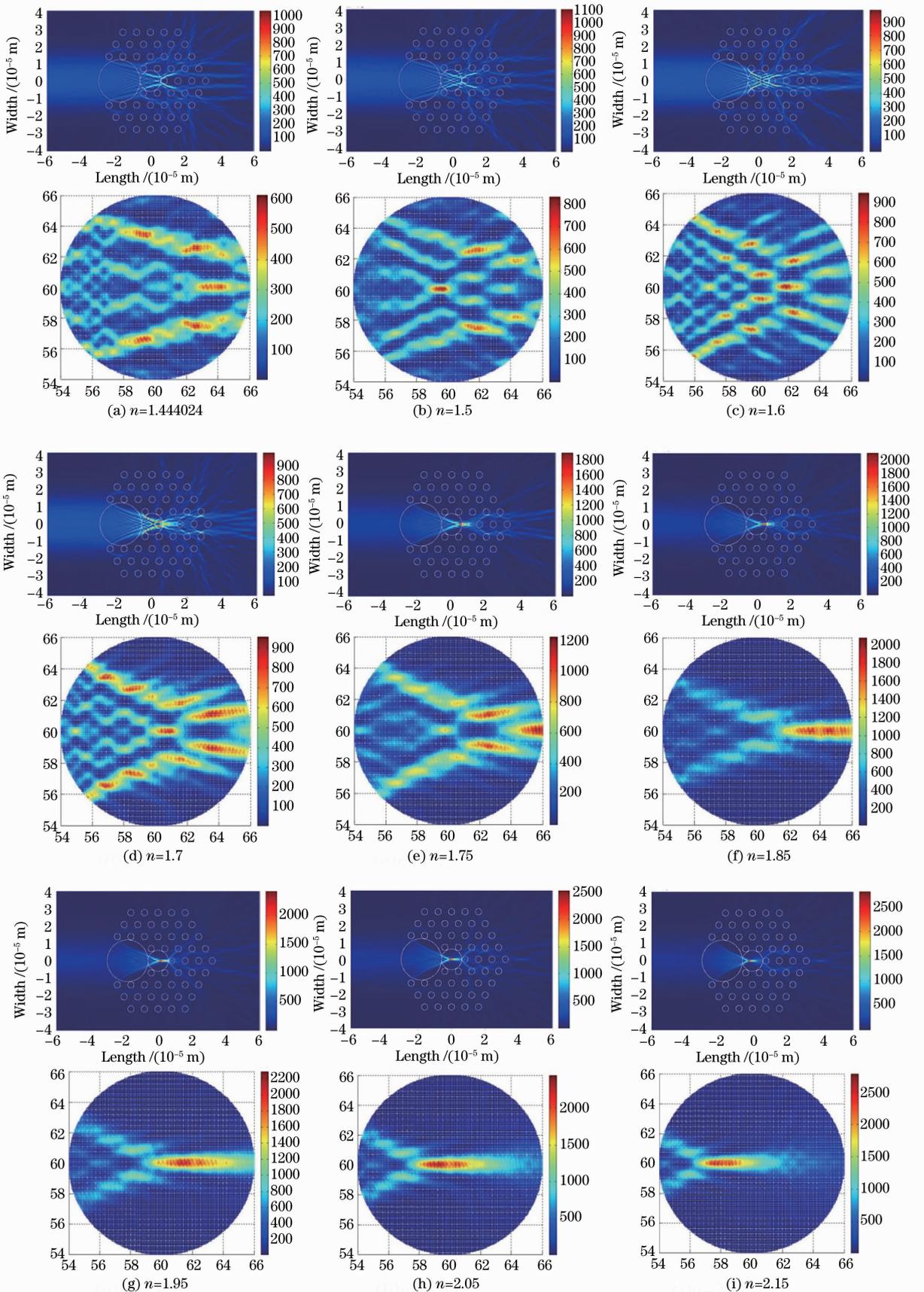


图3 n 不同时基于 FEM 法分析的光栅横截面(上)和纤芯区域写入场分布(下)

Fig. 3 Grating inscription cross section (up) and core inscription field distribution (down) utilizing FEM methods with different n

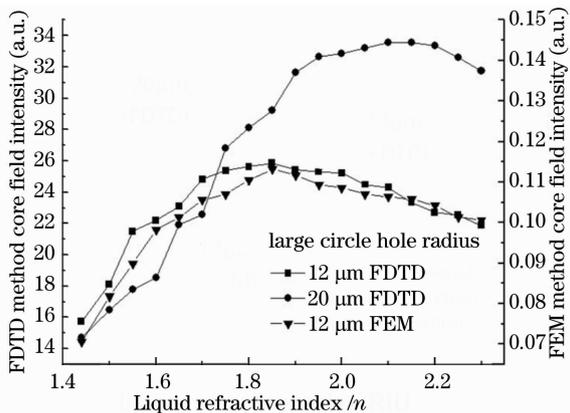


图 4 大圆孔半径对写入效率的影响

Fig. 4 Large circle hole radius as a function of grating inscription efficiency

图 5 为在 TE 模式下,当大圆孔半径为 12 μm,纤芯半径为 6 μm 时,将高斯光束半峰全宽从 20 μm 提高至 60 μm,得到的纤芯区域能量分布和流体折射率之间的关系。由于改变高斯光束参数,在功率一定的情况下,其幅值能量必然会增加,那么到达纤芯的能量值也会增加,所以其写入的效率必然增大。需要注意的是,由于大圆孔半径具有一定尺寸,可以推测超过圆半径边缘的光束在传输过程中将不经过圆孔区域,该部分能量自然不会产生聚焦效应。所以一味改变光束半径不一定能有效提高写入效率。最佳高斯光束光斑半径取决于圆孔半径。所以此类光纤若应用于实际实验时写入光束半径选取需要考虑到圆孔半径尺寸的影响。

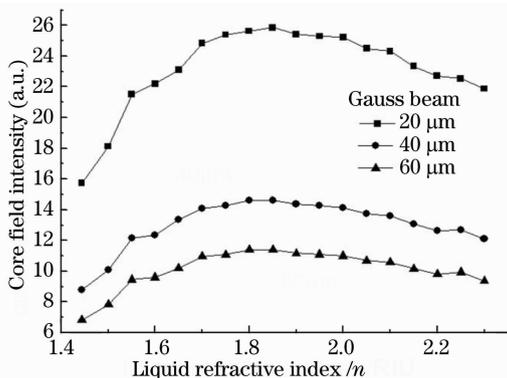


图 5 高斯光束参数对写入效率的影响

Fig. 5 Gauss beam parameters as a function of inscription efficiency

图 6 为在 TE 模式下,当大圆孔半径为 12 μm,高斯光束半峰全宽 20 μm 时,纤芯半径从 2 μm 变化至 6 μm,得到的纤芯区域能量分布和流体折射率

之间的关系。由于光束能量主要集中与纤芯中间带状区域,缩小纤芯半径,仍然可以产生较高地写入效率和峰值能量密度。说明此种强聚焦光栅写入方法尤其适合于细纤芯光纤、特别是性能突出的纳米纤芯光纤。

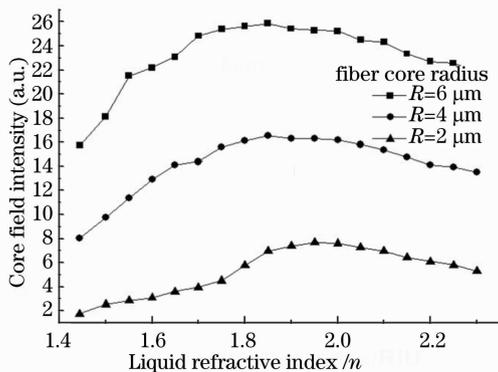


图 6 纤芯半径对写入效率的影响

Fig. 6 Fiber core radius as a function of grating inscription efficiency

为了有效地进行对比,仿真分析了周期性光子晶体光纤光栅和单模光纤光栅的写入场总能量情况。得到在 TE 模式下,当高斯光束半峰全宽为 20 μm、纤芯半径为 6 μm/4 μm/2 μm 时,周期性光子晶体光纤和单模光纤写入场总能量为 $9.00 \times 10^8 / 3.97 \times 10^8 / 5.19 \times 10^7$ 和 $1.26 \times 10^9 / 5.73 \times 10^8 / 1.47 \times 10^8$,与同等参数情况下的大圆孔微结构光纤写入场总能量的最大值相比,可以算出写入效率分别是其写入效率的 290% 和 210%。缩小纤芯半径,该数值还可以进一步增加。可见大圆孔微结构光纤结构在提高光纤光栅写入场峰值功率密度和写入效率方面均具有明显地效果。图 7 为利用 FDTD 法(上)和 FEM 法(下)所得三种光纤光栅结构写入场分布,两者结果具有一致性,但又有细微差别,这是因为利用 FDTD 法得到的图为 S_x 分量,而利用 FEM 法得到的图为由(2)式归一化的量,这正是 COMSOL 强大的后处理功能所在。

另外考虑到实际写制光栅的过程中,高斯光束可能不会完全垂直地写入,而以一定的小角度 θ 写入[假设图 8(a)方向角度为负]。由前面分析可知,当 $n=1.85$ 左右时,纤芯区域能量最高在 TE 模式下,当大圆孔半径为 12 μm,高斯光束半峰全宽为 20 μm,纤芯半径为 6 μm, $n=1.85$ 时,得到的纤芯区域能量分布和角度($-5^\circ \sim 5^\circ$)之间的关系如图 8(b)所示。

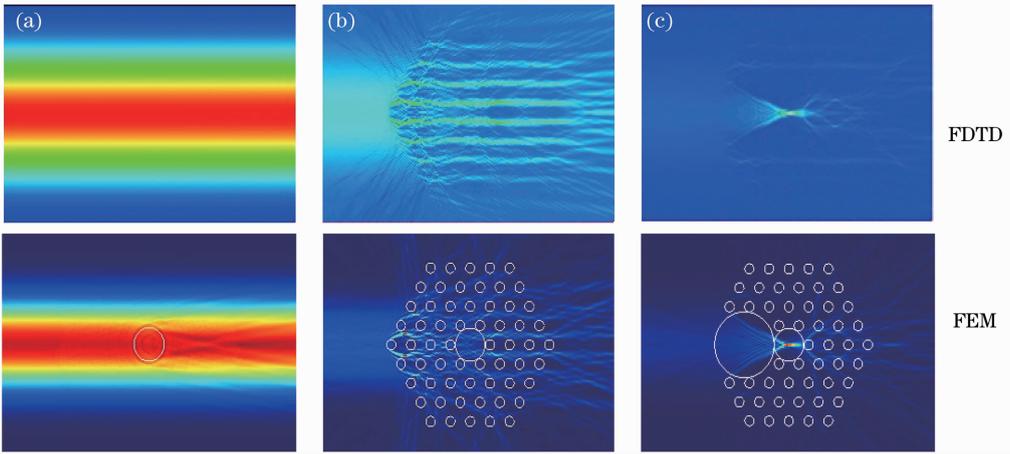


图 7 利用 FDTD(上)和 FEM(下)所得三种光纤光栅结构写入场分布。(a) 单模光纤光栅；(b) 周期性光子晶体光纤光栅；(c) 大圆孔型微结构光纤光栅

Fig. 7 Inscription field distribution of three optical fiber gratings utilizing FDTD and FEM. (a) SMFG; (b) periodical photonic crystal fiber grating; (c) a large side-hole MOFG

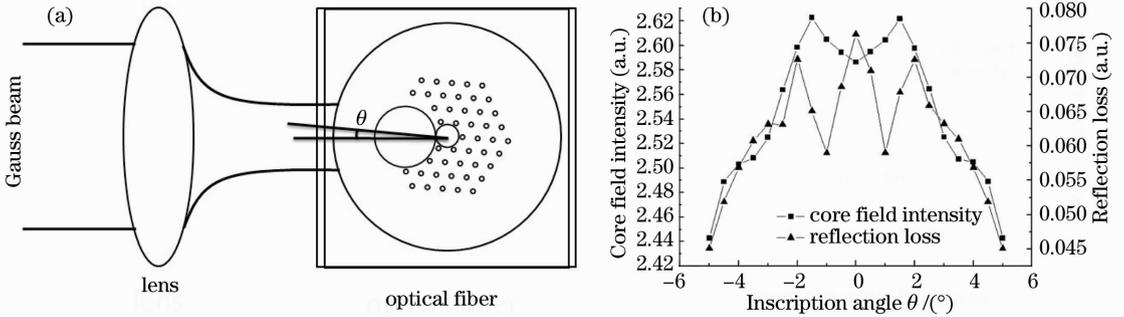


图 8 (a) 以角度 θ 写入的微结构光纤光栅界面；(b) 角度对写入效率、反射损耗的影响

Fig. 8 (a) Interface of MOF inscriptat angle θ ; (b) MOF inscription angle as a function of grating inscription efficiency and reflection loss

图 9 对比了刻写角度分别为 0° 和 1.5° 时的反射损耗，可以看出除了竖轴零点附近有几个明显的损耗峰外，其余部分的损耗与零度入射相比，均有明显地下降，对所有损耗进行积分，可知 1.5° 下的损耗

仅为 0° 下的 88.9%。可见随着写入角度的增加，一方面会影响写入焦点位置和纤芯区域的总能量；另一方面也会适度降低写入光束在第一个圆孔上的反射损耗。两种效果的综合使得最佳写入角度相对于

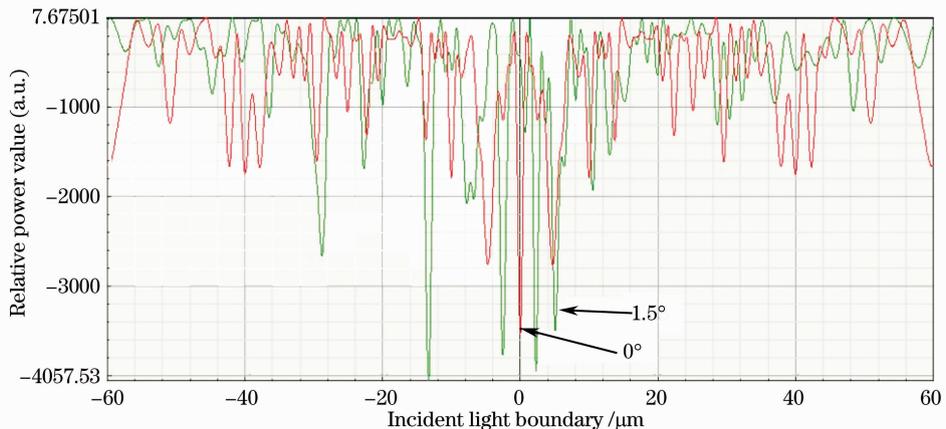


图 9 1.5° 和 0° 的反射损耗对比图

Fig. 9 Comparison of reflection loss with inscription angle of 1.5° and 0°

垂直角度有略微的倾斜。

4 结 论

利用微结构光纤内填充适当折射率液体的大圆孔的微透镜作用将写入高斯光束高效会聚至纤芯掺杂区域,提高了微结构光纤光栅的写入效率。利用FDTD法和FEM法分析了大圆孔半径、纤芯半径和光源等参数对光栅写入场分布和写入效果的影响。另外也对光栅写入过程中的激光写入角度误差影响进行了初步分析。分析结果认为,大圆孔微结构光纤光栅可以改善光纤光栅的写入效率,降低散射损耗。但是也发现存在写入场从左到右不均匀的问题,会导致双折射的产生,这有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Gu Zhengtian, Deng Chuanlu. Application and development of coated fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1317-1326.
顾铮先, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1317-1326.
- 2 B J Eggleton, P S Westbrook, R S Windeler, *et al.*. Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers [J]. Opt Lett, 1999, 24(21): 1460-1462.

- 3 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Jin Long, *et al.*. Recent progress on imprinting technologies of photonic crystal fiber gratings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 42-47.
涂勤昌, 张伟刚, 金龙, 等. 光子晶体光纤光栅制备方法最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 42-47.
- 4 J Petrovic, T Allsop. Scattering of the laser writing beam in photonic crystal fiber [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(7): 1172-1175.
- 5 H R Sorensen, J Canning, J Laegsaard, *et al.*. Liquid filling of photonic crystal fibers for grating writing [J]. Opt Commun, 2007, 270(2): 207-210.
- 6 G D Marshall, D J Kan, A A Asatryan, *et al.*. Transverse coupling to the core of a photonic crystal fiber; the photo-inscription of gratings [J]. Opt Express, 2007, 15(12): 7876-7887.
- 7 S J Mihailov, D Grobncic, C W Smelser, *et al.*. Induced Bragg gratings in optical fibers and waveguides using an ultrafast infrared laser and a phase mask [J]. Laser Chemistry, 2008(2008), Article ID 416251.
- 8 T Baghdasaryan, T Geernaert, F Berghmans, *et al.*. Geometrical study of a hexagonal lattice photonic crystal fiber for efficient femtosecond laser grating inscription [J]. Opt Express, 2011, 19(8): 7705-7716.
- 9 Jin Wei, Ruan Shuangchen. The New Progress of Optical Fiber Sensing Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005.
靳伟, 阮双琛. 光纤传感技术新进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 10 M J Weber. Hand Book of Optical Materials [M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 2003.

栏目编辑: 李文喆