

·激光技术·

阶跃型多模光纤的选择性模式激励

李影, 谭中伟, 孙剑, 刘艳, 李唐军

(北京交通大学 光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要:随着光信息处理技术的发展,基于光纤模式色散的光信息处理技术也开始得到了关注,但是如何准确地激励出满足条件的模式一直限制着其应用。对于渐变多模光纤的模式激励已经有解析解,阶跃多模光纤的模式激励没有解析解,然而基于模式色散的光信息处理需要采用阶跃光纤来引入较大的模式色散。文中用 Matlab 数值仿真讨论阶跃光纤的模式激励。仿真结果表明,改变高斯光束的入射条件,例如偏移光束、倾斜光束、改变光束束腰半径,均能得到不同的激励模式。最后,通过实验验证了倾斜光束时的模式激励和模间色散的情况。

关键词:模式激励;功率耦合系数;高斯光束;阶跃型光纤

中图分类号:TN915.63

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-01-0011-05

Selective Mode Excitation of Step-index Multimode Fiber

LI Ying, TAN Zhong-wei, SUN Jian, LIU Yan, LI Tang-jun

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing 100044, China)

Abstract: With the rapid development of optical information processing technology, optical information processing technology based on multimode fiber dispersion is concerned. However, how to exactly excite the required modes has limited the application. There is the analytical solution for graded-index multimode fiber, but not for step-index multimode fiber. Step-index multimode fiber is more suitable for the optical information processing since it has large mode dispersion. The mode excitation of step-index fiber is discussed through Matlab simulation. Simulation results show that different excitation modes can be obtained by changing the conditions of the incident Gaussian beam such as offsetting beam, tilting beam, changing the radius of the beam waist. At last, the mode excitation of tilting beam and the modal dispersion of the fiber are tested through experiments.

Key words: mode excitation; power coupling coefficient; Gaussian beam; step-index fiber

随着网络带宽和数据传输流量的飞速持续增加,越来越迫切的需要超高速的信息处理技术,传统的电信息处理技术由于电子的“固有瓶颈”的限制,导致其越来越难以满足超高速信息处理技术的要求,而光子不具有荷电性,因此不具有电子的“固有瓶颈”,是一种理想的信息载体。此外光纤作为光的传输介质,具有巨大的传输容量和优越的传输性能,为光子作为信息载体提供了可能性。

长久以来,模式色散一直是限制多模光纤应用的一个重要因素,因为多模光纤中可以传输多个模式,而各个模式间的传输速度、传输路径不同,导致到达光纤接收端的时延不同,从而造成光脉冲的展宽,因此如何减小色散是光纤通信的重要研究内容之一^[1-2]。由于具有较小的模式色散,在光纤通信系统中使用的多为折射率渐变光纤^[3-6]上,对多模光纤中模式激励的研究也主要是针对折射率渐变光纤^[7-8]。

收稿日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金(61177012);北京高等学校“青年英才”计划(YETP0529);中央高校基本科研业务费专项资金(2013JBM005)

作者简介:李影(1990-),女,北京交通大学硕士研究生,主要研究方向为光纤通信。

随着光信息处理技术的发展,开始利用模式色散产生的时延来实现光信息处理技术,如全光积分器^[9],利用模式色散增强色度色散^[10]等。因此,需要采用阶跃型多模光纤来引入较大的模式色散。然而,在基于模式色散的光信息处理技术中,如何准确地激励出满足条件的模式一直是其应用的一个重要限制因素。比如,利用模式色散增强色度色散需要激励出一个特定的模式,而基于模式色散的积分器则需要激励出具有相同的功率大小的模式,所以有必要研究阶跃型多模光纤的模式激励问题。文中通过数值仿真和实验研究了如何选择性地激励阶跃型多模光纤中模式的问题。功率耦合系数是选择性模式激励研究中的一个重要定量参数,对于折射率渐变光纤,可以通过解析方法来研究,推导出特定形式的入射光束对模式的激励情况^[11-13],但是,对于阶跃型多模光纤没有解析解。文中根据功率耦合系数公式编写 Matlab 程序进行仿真,这个程序对于任意的入射光束都适用,只要知道入射光束的表达式,就可以得到不同入射条件下,能够激励起的光纤中各个模式的功率。最后,通过实验测试了不同入射角度下,激励起的光纤中各个模式及其模间色散的情况。

1 基于高斯光束的阶跃型多模光纤的选择性模式激励

下面是入射光束激励起的光纤中各个模式的功率耦合系数的表达式

$$\eta_{mn} = \frac{\left| \iint_{A_{\text{core}}} \overline{E}_{\text{inc}}(x,y) \cdot \overline{E}_{mn}^*(x,y) dx dy \right|^2}{\iint_{A_{\text{core}}} |\overline{E}_{\text{inc}}(x,y)|^2 dx dy \iint_{A_{\text{core}}} |\overline{E}_{mn}(x,y)|^2 dx dy} \quad (1)$$

其中, $\overline{E}_{\text{inc}}$ 是入射光束的模场表达式; \overline{E}_{mn} 是光纤的模场表达式; A_{core} 是纤芯的面积。

为了方便与折射率渐变光纤的模式激励情况作比较,使用高斯光束为例进行仿真。

假设有一个线性偏振的高斯光束,其几何图由图 1 所示。表达式如下^[14-15]

$$\begin{aligned} \overline{E}_{\text{inc}}(r,\varphi,z) = & \overline{e}_x E_0 \frac{w_0}{w(z)} \cdot \\ & \exp\left(-\frac{r^2 - 2 \times \text{offset} \times r \times \cos \varphi + \text{offset}^2}{w^2(z)}\right) \cdot \\ & \exp(-ik\delta(r \cos \varphi - \text{offset})) \exp(-ik\frac{r^2}{2R(z)}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $w(z)$ 为 z 处的光斑半径; w_0 为 $z=0$ 处的光斑半径,也就是光斑的束腰半径; $R(z)$ 为 z 处的波前曲面的曲率半径,当 $z=0$ 时, $R=+\infty$; offset 为 x 方向的偏移; δ 为 x 方向的倾斜角; $k=nk_0$ 为空间波束。

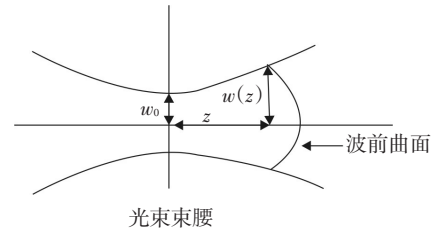


图 1 高斯光束的几何图

阶跃型光纤中的线性偏振模 LP_{mn} 的模场表达式为^[16]

$$\begin{cases} \overline{E}_{mn}(r,\varphi) = \overline{e}_x A \frac{1}{J_m(U)} J_m\left(\frac{Ur}{a}\right) \cos(m\varphi) & r < a \\ \overline{E}_{mn}(r,\varphi) = \overline{e}_x A \frac{1}{K_m(W)} K_m\left(\frac{Wr}{a}\right) \cos(m\varphi) & r \geq a \end{cases} \quad (3)$$

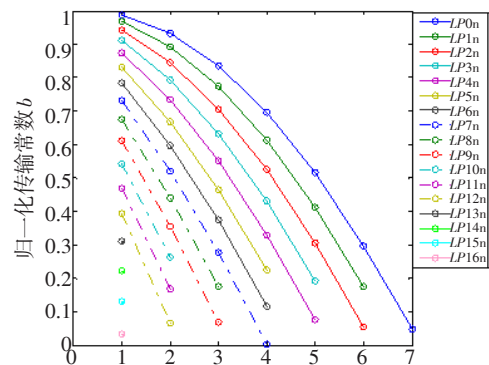
$$\begin{cases} \overline{E}_{mn}(r,\varphi) = \overline{e}_x A \frac{1}{J_m(U)} J_m\left(\frac{Ur}{a}\right) \sin(m\varphi) & r < a \\ \overline{E}_{mn}(r,\varphi) = \overline{e}_x A \frac{1}{K_m(W)} K_m\left(\frac{Wr}{a}\right) \sin(m\varphi) & r \geq a \end{cases} \quad (4)$$

其中, $J_m(x)$ 为第一类贝塞尔函数; $K_m(x)$ 为修正贝塞尔函数; a 为纤芯半径; U 是纤芯中的归一化横向参数; W 是包层中的归一化横向参数^[17]。

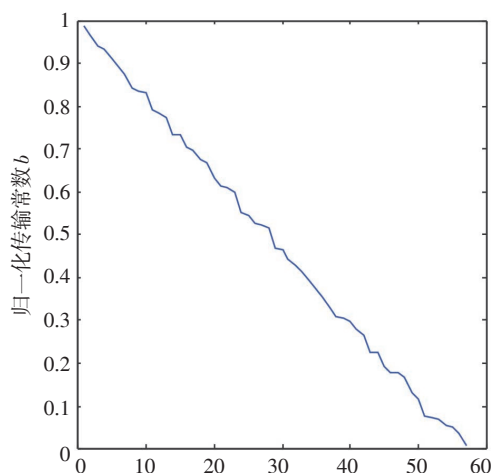
首先求解阶跃型多模光纤的特征方程^[16](式(5)所示)。

$$\frac{J_{m+1}(U)}{UJ_m(U)} + \frac{K_{m+1}(W)}{WK_m(W)} = 0 \quad (5)$$

获得传输模式的归一化传输常数 b , 如图 2 所示。按照归一化传输常数从大到小的顺序, 将各个归一化传输常数排列起来。随着模式阶数的增大, 归一化传输常数曲线虽然在局部区域有一些波动, 单曲线整体呈现明显的线性增加的趋势。



(a) x轴表示径向模式数(n)



(b)x轴表示按模式从低阶到高阶的顺序排列

图2 LP_{mn} 的归一化传输常数 b

然后根据功率耦合系数公式,利用归一化传输常数、阶跃型多模光纤的模式场、高斯光束的模式场表达式编写求解功率耦合系数的程序,进行数值仿真。

2 仿真结果分析

程序中采用的阶跃光纤的参数为:纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$,包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1=1.45$,包层折射率 $n_2=1.436$ 。

图3是功率耦合系数和高斯光束束腰半径的关系曲线。此时,光束无偏移,无倾斜角,波前曲面的曲率半径为正无穷。

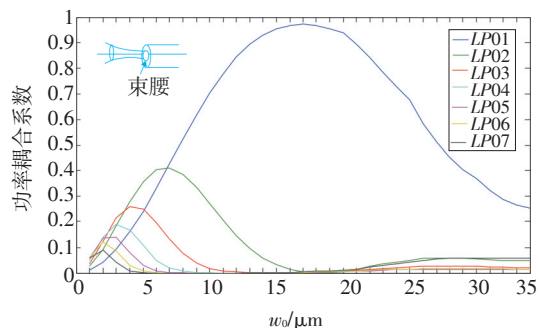


图3 功率耦合系数和高斯光束束腰半径的关系

可以看出,只有 LP_{0n} 模式被激励出来,在 w_0 为 $17\ \mu\text{m}$ 的时候,只有基模 LP_{01} 模式被激励出来,这个点被称为匹配点。光束在光纤开始处激励出的模

式场和光束自身模场分布相似, LP_{01} 模场分布可近似认为高斯分布,所以说当 w_0 为 $17\ \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 的模场和高斯光束的模场匹配, LP_{01} 模式的模场半径和高斯光束的束腰半径应该基本上相等^[11]。

根据 Marcuse 提出的估算模场直径的公式为

$$W = 2a(0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}) \quad (6)$$

其中, V 为归一化截止频率。通过计算得出 LP_{01} 模式的模场半径为 $W/2 \approx 17\ \mu\text{m}$, 等于高斯光束的束腰半径。

图4是光束偏移 $0\sim 34\ \mu\text{m}$ 后的各个模式的功率耦合系数,此时光束无倾斜,波前曲面的曲率半径为正无穷。

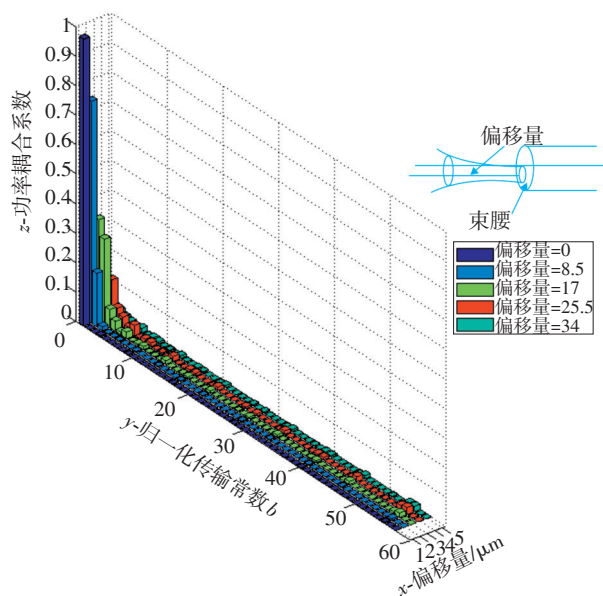


图4 功率耦合系数和高斯光束偏移量的关系

x 轴表示的是不同的偏移量, y 轴表示的是模式的归一化传输常数 b , b 是按从大到小的顺序排列。

由图中可以看出来,当偏移量为 $0\ \mu\text{m}$ 时,只有基模 LP_{01} 模式被激励出来;当随着偏移量增加到 $8.5\ \mu\text{m}$ 时, LP_{11} 模式也被激励出来,此时它的功率远远小于 LP_{01} 模式;当偏移量为 $17\ \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 和 LP_{11} 模式的功率基本相当,此时 LP_{21} 等模式也被激励出来;偏移量继续增加到 $25.5\ \mu\text{m}$ 时, LP_{11} 模式的功率大于 LP_{01} 模式,激励出来的模式数增多;再继续增加偏移量,光束的功率损失严重,激励出来的模式的功率变小,这是应该避免发生的情况。

偏移的情况虽然能激励出除基模 LP_{01} 外的其他模式,但是这些模式的功率耦合系数比较小,是以损失大部分光束功率为代价的,而且激励出的模式基本上只集中在前几个低阶的模式范围内。

根据文献[11]可以知道,通过偏移入射光束和倾斜入射光束都可以选择性地激励起多模光纤中的不同模式。图5是倾斜角从 $0^\circ \sim 8.60^\circ$ 各模式的功率耦合系数,此时光束无偏移,波前曲面的曲率半径为正无穷。倾斜角是以 $\delta_0 = \lambda / (\pi w_0) \approx 0.57^\circ$ 的整数倍为间隔选取的。当倾斜角 $\delta = 0^\circ$ 时,只激励出基模 LP_{01} 模式;当 $\delta = 0.57^\circ$ 时,激励出 LP_{01} 、 LP_{11} 模式;随着倾斜角的增大,被激励出来的模式数越来越多,而且模式的阶数也越来越高;继续增大倾斜角,当倾斜角接近临界角的时候,有相当多的光功率被辐射出去,激励出的模式数开始变少,其所携带的功率也变小,比如 $\delta = 8.60^\circ$ 时,这是应该避免发生的情况。

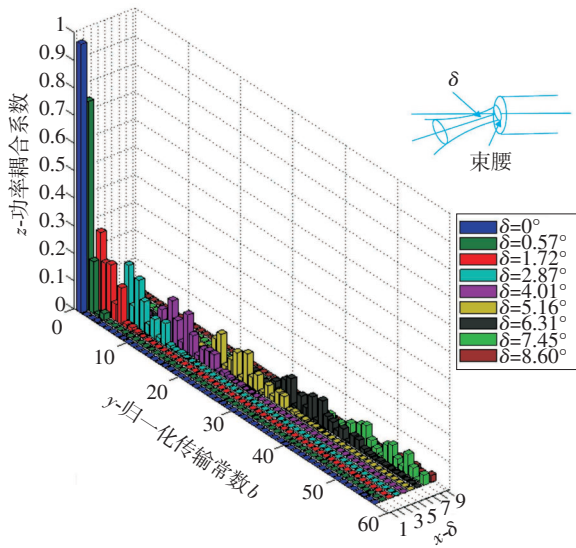


图5 不同倾斜角下各模式的功率耦合系数

x 轴表示的是不同的倾斜角, y 轴表示的是模式的归一化传输常数 b , b 是按从大到小的顺序排列。

对比光束偏移的情况可以看出,光束倾斜可以得到更好的模式选择性激励,所以接下来对光束倾斜的情况进行实验验证。

图6是从另一个角度看倾斜角较大时各模式的功率耦合系数。可以和图5对照来看。由于去掉了入射角很小的情况,避免了功率耦合系数很大时的基模和低阶模式,更便于观察各个高阶模式的激励情况。从仿真的结果来看,随着倾斜角的增大,不断激励起更高阶的模式。由于不同模式的传输常

数不同,光信号在以更高阶的模式传输时将产生更大的群时延。

x 轴表示的是不同的倾斜角, y 轴表示的是模式的归一化传输常数 b , b 是按从大到小的顺序排列。

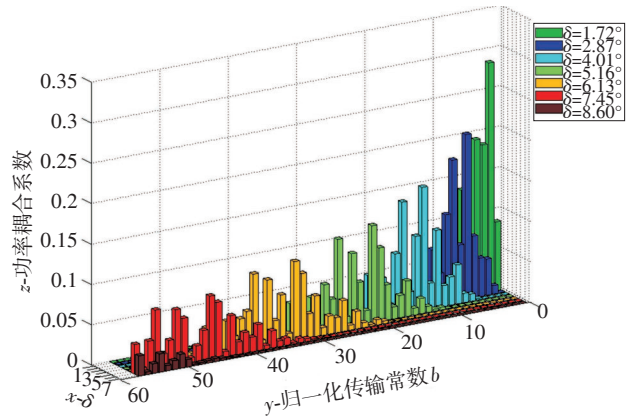


图6 倾斜角较大时各模式的功率耦合系数

3 实验

关于不同角度入射激励起不同模式的研究,已经有文献进行过相关报道,而对于不同入射角度激励不同模式的时延特性的研究还较少。其中,一个比较困难之处在于改变入射光的角度需要对光路进行较大的调整,对于需要精确度较高的时延特性的检测是比较困难的。为了对仿真结果进行验证,按照图7的结构搭建了实验系统,使入射光束展宽成长条形状,再汇聚到光纤端面,这样就能够包含很宽范围的入射角。通过移动狭缝,就可以选择入射光的角度,使整个测试系统连续可调。

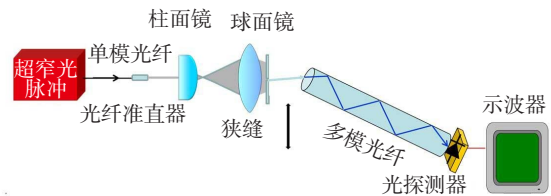


图7 不同入射角激励条件下多模光纤的时延特性测试系统结构图

为了测试多模光纤中模间色散引起的时延特性,使用了一个脉冲宽度为 1.5 ps , 脉冲间隔为 6.4 ns 的窄脉冲作为光源。经过一个光腰直径为 1 mm 的光纤准直器输出,由一个焦距为 25 mm 的柱面镜在 y 方向上展宽,最后由一个焦距为 30 mm 的球面镜汇聚到多模光纤,两个透镜间距约 200 mm 。这两个

透镜的作用是将光束在 y 方向上展宽超过6 mm,使汇聚后的光束以大角度入射到多模光纤。为了便于光束的耦合,这里使用了长50 m,芯径为200 μm ,数值孔径为0.37的多模光纤跳线。探测器使用了一个10 GHz带宽的高速光电探测器,电信号由一个50 GHz带宽的高速示波器进行测试。根据仿真结果,当光束垂直入射时,激励起的基模的功率将远远大于其他模式,受到高速示波器的动态范围的限制,测试时测量得到的将主要是基模的情况。为了便于测试更多高阶模式的分布和时延特性,让多模光纤和光束主轴之间有超过 10° 的夹角,由于光束本身是接近高斯光束的分布,这样使垂直入射的基模的光功率很低,相应的低阶模的光功率也较低,这样便于测试各个高阶模的特性。光束汇聚后通过一个宽度为0.2 mm的窄缝,从上到下移动窄缝的位置就获得了不同角度的入射,每0.1 mm移动一次,换算成角度,每一步相当于角度倾斜了 0.2° ,倾斜角度的变化总共约为 4° ,测试结果如图8所示。图8中的数字1~21指的是每次倾斜 0.2° 后的时延特性。

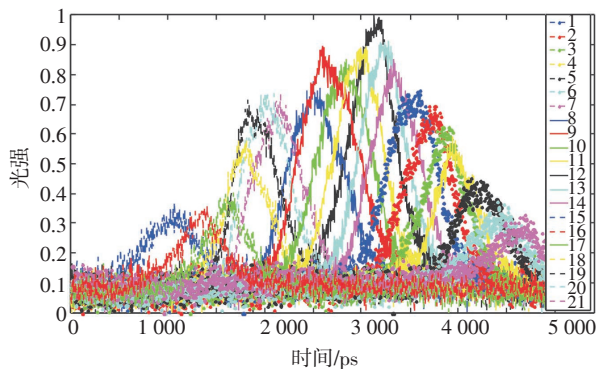


图8 不同入射角激励条件下多模光纤的时延特性

从图8中可以发现,随着入射角度的增大,不断有更高阶的模式被激励起来,而由于高阶模的传输常数较大,所产生的时延也不断增大。根据图2b所示,随着模式阶次的增大,传输常数近似线性减小,因此,模式的时延近似线性增加。在一定范围之内,随着入射角的增大,激励起的高阶模式的传输常数和光纤产生的延时呈近似线性增大的关系。狭缝的位置与最后获得的光脉冲的延时具有一一对应的关系。每个人射角不可能仅仅激励起一个模式,而是会激励起传输常数接近的一组模式,因此,脉冲有一定的展宽,而且,入射角很大的情况

下,将激励起更多的模式,体现在时延特性上,测量得到的光脉冲的宽度也有增大的趋势。实验结果与仿真结果是一致的。由于输入光束本身的光功率是高斯分布,实验中不同入射角度之间的功率也是呈高斯分布,因此,与仿真的结果相比,实验测量得到的各个模式之间的功率耦合系数更加均匀。此外,受到 x 方向的光束尺寸、光纤模式耦合、入射角度改变的同时也存在着入射位置的偏移和狭缝的衍射效应等问题的制约,激励起的光脉冲波形有一定畸变。

需要说明的是,实验中所用的光纤纤芯直径为200 μm ,包层直径为220 μm ,数值孔径 $NA=0.37$,而仿真程序中采用的光纤纤芯直径为50 μm ,包层直径为125 μm ,纤芯折射率 $n_1=1.45$,包层折射率 $n_2=1.436$ 。仿真和实验所选的参数不一致,是因为光纤尺寸越大,则能传输的模式数越多,计算所需要的时间过长,而大的芯径和数值孔径有利于实验中光的耦合,所以仿真时光纤的尺寸选得较实验小,但是变化规律是一样的。

4 结 论

通过数值仿真发现,当光束相对于光纤轴心没有偏移时,只能激励出基模 LP_{01} ,增加偏移量,可以激励出其他的模式,但是,随着偏移量的继续增加,这些模式所携带的功率逐渐减小。当光束相对于光纤轴心没有倾斜时,激励出的也主要是基模 LP_{01} ,随着倾斜角的增大,激励出来的模式数越来越多,而且阶数越来越高,选择模式激励效果较偏移的情况也有所变化。由于模间色散的影响,更高阶次的模式也对应着更大的时延。通过实验验证了不同入射角情况下多模光纤输出光束的延时特性,与仿真结果基本一致。

参考文献

- [1] 曹文华,王勇,刘颂豪. 光纤通信系统中基于光学相位共轭和预啁啾的色散及非线性补偿研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0906005.
- [2] TAN Zhong-wei, NING Ti-gang, LIU Yan, et al. Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-haul DWDM system[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2799-2803.

(下转第40页)

- Advanced Materials, 2006, 18(22):3038-3042.
- [5] Pereverzev Y V, Gunnerson K N, Prezhdo O V, et al. Guest-host cooperativity in organic materials greatly enhances the nonlinear optical response[J]. J. Phys. Chem., 2008, 112(11):4355-4363.
- [6] Haller M, Luo J, Li H, et al. A novel lattice-hardening process to achieve highly efficient and thermally stable nonlinear optical polymers[J]. Macromolecules, 2004, 37(3):688-690.
- [7] Oh M C, Zhang H, Zhang C, et al. Recent advances in electrooptic polymer modulators incorporating highly nonlinear chromophore[J]. Selected Topics in Quantum Electronics IEEE Journal, 2001, 7(5):826-835.
- [8] Moehlmann A G R, Horsthuis W H G, Donach A M, et al. Optically nonlinear polymeric switches and modulators[J]. Proc Spie, 1990:215-225.
- [9] Chen D, Fetterman H R, Chen A, et al. Demonstration of 110 GHz electro-optic polymer modulators[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(25):3335-3337.
- [10] Mark L, Katz H E, Christoph E, et al. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer[J]. Science, 2002, 298(5597):1403-1405.
- [11] Baehr-Jones T, Penkov B, Huang J, et al. Nonlinear polymer-clad silicon slot waveguide modulator with a half wave voltage of 0.25 V[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(16):163303-163303-3.
- [12] Enami Y, Mathine D, Derose C T, et al. Hybrid cross-linkable polymer/sol-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1550 nm[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(9):093505-093505-3.
- [13] Jin D, Chen H, Barklund A, et al. EO polymer modulators reliability study[C]// SPIE, 2010, 7599:75990H.
- [14] Wang X, Yu C, Yu Z, et al. Sampled phase-shift fiber Bragg gratings [J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(4): 190-191.
- [15] WU Liang-ying, PEI Li, LIU Chao, et al. Spectral analysis of the UFBG-based acousto optical modulator in V-I transmission matrix formalism[J]. Chinese Physics B, 2014, 11(11):247-252.
- [16] ZHAO Zhi-min, CHEN Yu-ming, YU Xiao-lei, et al. The new technology of composite materials repairing by light wave[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, 2004, 19(02):41-43.
- [17] WANG Zhi, ZHANG Jin-lei. Effect of the electrodes in an electro-optic polymer modulator on waveguide characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3):379-382.
- [18] 董小伟, 裴丽, 简伟, 等. 基于长周期光栅的有机聚合物高速电光调制器[J]. 光学技术, 2004, 30(3):289-291.
- [19] Li P, Dong X, Li B, et al. Study on a low loss, low voltage, polarization-independent EO modulator based LPG [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(2):442-448.
- [20] Carl Arft, Diego R Yankelevich. In-line fiber evanescent field electrooptic modulators[J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2000, 9(1):79-94.
- [21] WU Chong-qing. Theory of Optical Waveguide[M]. Beijing: Tsinghua University, 2000:24-26.
- [22] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009:209-211.
- [23] Lee M, Mitrofanov O, Katz H E, et al. Millimeter-wave dielectric properties of electro-optic polymer materials[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(8):1474-1476.
- [24] 薄淑晖, 陈卓, 徐光明, 等. 高效微带线聚合物电光调制器的研制[J]. 红外与激光工程, 2014, 9(9):3066-3069.

(上接第15页)

- [3] Takayoshi Mori, Taiji Sakamoto, Takashi Yamamoto, et al. Wideband WDM coherent optical MIMO transmission over 50 lm-core GI-MMF using selective mode excitation technique[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19: 658-664.
- [4] Haas Z, Santoro M A. Extending the bandwidth-distance product for multimode fiber systems[J]. Fiber Integr. Opt, 1992, 11: 111-122.
- [5] Alon E, Stojanovic V, Kahn J M, et al. Equalization of modal dispersion in multimode fiber using spatial light modulators[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, Dallas, 2004.
- [6] Erni D, Jungo M, Baechtold W. Segmented VCSEL contact geometry for active coupling efficiency enhancement[C]// Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, 2003.
- [7] Dubois F, Emplit P, Hugon O. Selective mode excitation in graded-index multimode fiber by a computer-generated optical mask[J]. Opt. Lett., 1994, 19: 433-435.
- [8] Raddatz L, White I H, Cunningham D G, et al. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links[J]. J. Lightw. Technol, 1998, 16(3): 324-331.

(下转第67页)