

平面光波导光分路器耦合结构优化设计

李勇奇¹,蒋金宏¹,余明芯¹,张克非^{2*},刘维光²

(1.西南科技大学 理学院,四川 绵阳 621010; 2.西南科技大学 计算机科学与技术学院,四川 绵阳 621010)

摘要:为了提升光纤阵列与平面光波导芯片耦合时的耦合效率和稳定性,基于光场模式匹配理论,分析光纤阵列耦合特性,理论推导出耦合效率与耦合装置各参数之间的关系。改进传统耦合光场匹配模型,加入端面斜 8° 对准理论,提出一种针对平面光波导光分路器耦合装置的优化方案。对径向错位、端面分离和角度失配进行了理论计算,为V型槽及芯片固定结构提供了优化的技术参数。利用ZEMAX软件仿真表明:最终优化耦合结构的耦合效率达93%。

关键词:光通信;平面光波导光分路器;光场模式匹配;斜端面对准

中图分类号:TN256 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)07-0009-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimal design of the coupling structure of planar lightwave circuit optical splitter

LI Yongqi¹, JIANG Jinhong¹, YU Mingxin¹, ZHANG Kefei^{2*}, LIU Weiguang²

(1. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

2. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: In order to improve the coupling efficiency and stability of the coupling between the fiber array and the planar lightwave circuit chip, based on the light field pattern matching theory, the coupling characteristics of the fiber array were analyzed and the relationships between the coupling efficiency and the parameters of the coupling device were derived theoretically. An optimal scheme of the coupling device of planar lightwave circuit optical splitter was proposed by improving the traditional matching model of coupled optical field and adding the 8° inclined alignment theory of the end face. Theoretical calculations for radial misalignment, end face separation and angular mismatch were provided, which provide optimized technical parameters for V-groove and chip fixed structure. ZEMAX software simulations show that the coupling efficiency of the optimized coupling structure reaches 93%.

Key words: optical communication; planar lightwave circuit optical splitter; optical field mode matching; oblique end alignment

0 引言

在光通信网络中,光分路器需要实现对光信号传输方向的控制、对光信号功率的分配及各器件之间的耦合控制等功能,是光纤到户(FTTH)中不可或缺的关键器件^[1-4]。平面光波导(PLC)光分路器相比于熔融拉

锥式分路器具有集成度高、分光均匀和损耗低等优点,在FTTH的传输中应用更加广泛,其波导芯片与器件封装是PLC器件制造的关键技术^[5,6]。

为了不断提升PLC器件的性能,研究人员提出了不同的改进方案。Song W等人^[7]对常用的 1×4 多模干涉光分路器进行了改进,提出了一种新的输入/输出波导宽度线性变化的分路器形式,改进后光分路器的传输损耗为0.12 dB,比原来降低了70%,功率波动减小了50%。李旭等人^[8]设计了一种PLC分路器的一体化封装装置,将输入光纤阵列、输出光纤阵列与连接头、法兰等直接集成在一起,构成一体化输入端和一体化输出端。贺锋涛等人^[9]引入光子晶体材料,设计了一种

收稿日期:2019-04-02。

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划资助项目(项目编号:201810619047)资助;四川省大学生创新创业训练计划资助项目(项目编号:201810619091)资助。

作者简介:李勇奇(1997-),男,本科,现就读于西南科技大学理学院光电信息科学与工程专业,主要研究方向:光通信器件与光纤传感器。负责主持四川省大学生创新创业训练计划资助项目和西南科技大学大学生创新基金项目精准资助专项各1项。

*通信作者:张克非(zhangkefeijike@163.com)。



氟掺杂双芯光子晶体光纤偏振光分束器, 当光纤长度为 $102.717 \mu\text{m}$ 的超短长度时, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处具有超强的分离 2 束正交偏振光的能力, 提高了有效带宽。

近年来, 国内外关于 PLC 光分路器的主要研究以 $1 \times N$ 分支的通光性能优化、波导芯片与阵列光纤对准耦合的改进和新型光纤 (如光子晶体光纤) 接入研究为主^[10-14], 主要对光分路器局部结构进行优化, 但对于传统 PLC 光分路器整体耦合结构并没有较大改善。在工程应用上, 随着器件的长期使用, PLC 芯片与光纤阵列会出现相对位移, 直接导致耦合效率大幅下降, 甚至器件损坏; 生产成本方面, 在光电子集成器件的生产过程中, 由于器件封装时间长, 导致封装成本高^[15,16], 一定程度上阻碍了 PLC 光分路器的发展。因此, 本文根据传统 1×8 PLC 光分路器耦合结构的缺陷, 结合实际生产需要, 在耦合结构基板中引入斜 8° 和 V 型槽工艺, 设计一种新型整体基板结构。

1 理论模型

为达到良好的对准耦合效果, 在 PLC 光分路器的实际封装中多采用倾斜端面处理, 其光纤阵列与 PLC 芯片对准耦合理论用斜端面耦合模型描述, 具体简化模型如图 1 所示。

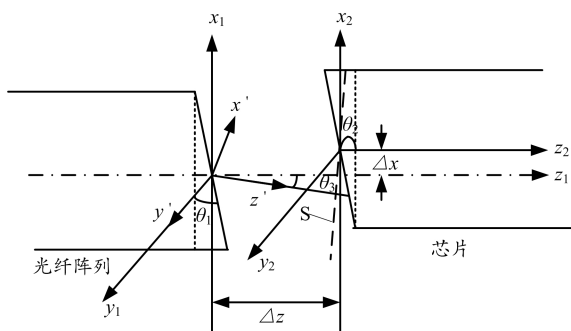


图 1 斜端面耦合模型

根据模式匹配理论, 在 z_2 处的耦合效率为^[16]:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1 \varphi_2^* dx_2 dy_2 \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1 \varphi_1^* dx_2 dy_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_2 \varphi_2^* dx_2 dy_2} \quad (1)$$

其中, φ_1 为 PLC 芯片斜端面 S 处的光场分布, φ_2 为 PLC 芯片内的光场分布, 且有:

$$\Delta t = \frac{n_0 k_0 (x'^2 + y'^2)}{2R} - \tan^{-1} \left(\frac{n_0 k_0 \omega_f^2}{2R} \right) + \frac{n_0 k_0 (-x_2) \sin(\theta_2 + \theta_3)}{\cos \theta_2} \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_f}} \exp \left\{ -\frac{x'^2 + y'^2}{\omega_f} - i \Delta t \right\} \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_f}} \exp \left[-\left(\frac{x_2^2}{\omega_x} + \frac{y_2^2}{\omega_y} \right) - i n_2 k_0 (-x_2 \tan \theta_2) \right] \quad (4)$$

其中, k_0 为真空中的波数, n_0 为两端面之间的介质折射率, n_2 为 PLC 芯片折射率, R, ω_f 分别为光纤在垂直于光传播路径上任一平面处的波前曲率半径和光斑尺寸, ω_x 和 ω_y 分别表示在 X 方向和 Y 方向上的光斑尺寸。

根据式(1)~式(4)可以看出, PLC 光分路器的耦合效率受光纤阵列与 PLC 芯片对准时在垂直、水平和角度偏移方面的影响, 这 3 方面影响分别表征径向错位、端面分离和角度失配。

光纤阵列与 PLC 芯片之间的光场耦合是一个重要环节, 工业上普遍采用六维紧密对准来保证耦合效率, 但该方法步骤繁多、操作复杂, 存在一定误差。本文对单一单模光纤与芯片耦合进行分析, 在角度失配、径向错位和端面分离这 3 个方面通过理论计算来探讨不同误差对耦合效率的影响。

2 耦合效率分析

2.1 角度失配

为了减小菲涅尔反射对光信号传输的影响, 光纤阵列和 PLC 芯片都会进行斜 8° 处理以提高回波损耗。在本文的优化设计中, 二者接触面的斜 8° 处理是工业加工的重点。对此, 依次取光纤阵列端面倾角为 7° 、 8° 和 9° , PLC 芯片端面倾角取 $0^\circ \sim 16^\circ$, 设 $\Delta x = \Delta y = 0 \mu\text{m}$, $\Delta z = 1.6 \mu\text{m}$, 以此讨论斜 8° 处理的耦合效果。根据式(1)得出角度错位与耦合效率的关系如图 2 所示。

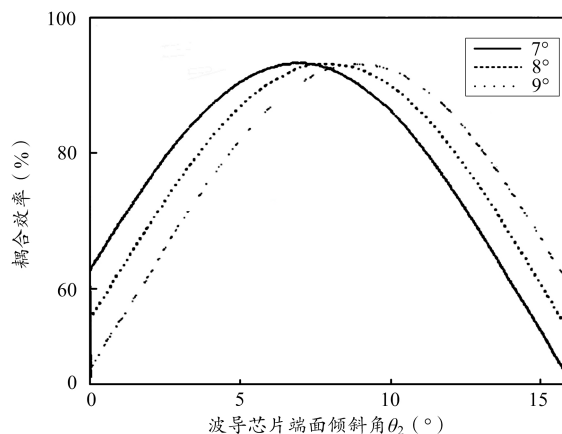


图 2 端面倾角对耦合效率的影响

由图 2 可知, 角度失配越大, 耦合效率越低。同时, 由于菲涅尔反射的损耗^[17], 耦合效率无法达到 100%, 当光纤阵列与 PLC 芯片端面倾角相差度数小于 0.5° 时, 耦合效率大致为 93%。

2.2 径向错位

为保证良好的耦合效率, 新型耦合结构在设计时进行了理论计算, 但在进行实际封装时, 芯片和光纤阵列在粘合处会产生径向错位。对此, 根据图 1 将错位分解为 x_1 和 y_1 两个方向进行分析, 且根据实际封装情况取光纤阵列与 PLC 芯片间距 $\Delta z = 5 \mu\text{m}$, 得出径向错位对耦合效率的影响, 如图 3 所示。

从图 3(a) 可以看出, 相比于 0° 端面, 斜 8° 端面最大耦合效率并不在 $\Delta x = 0 \mu\text{m}$ 处, 而是在负方向上有一定的偏移。这是因为一旦存在倾斜角, 光斑中心就会偏离光纤纤芯的中心轴。斜 8° 端面在 x_1 方向上最大耦合效率处对应 $\Delta x = -1.3 \mu\text{m}$, 最大耦合效率为 93%。

从图 3(b) 可以看出, 相比于 0° 端面, 斜 8° 端面最大耦合效率在 y_1 方向上没有随角度发生偏移, 但最大值减小了。这是因为一旦存在倾斜角, 光斑的能量相对分散, 导致光纤纤芯中心轴处的能量降低。所以, 斜 8° 端面在 y_1 方向上光纤阵列与 PLC 芯片芯层应在同一轴线上, 此时最大耦合效率为 93%。

2.3 端面分离

传统 PLC 光分路器的封装过程中, 在调整好 x_1 方向和 y_1 方向使耦合效率最大后, 就要调整 z_1 方向的距

离来减小端面分离对耦合效率的影响。端面之间的距离 Δz 与耦合效率之间的关系如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 端面分离距离 Δz 越大, 耦合效率越低。

同时, 相比于 0° 端面, 斜 8° 端面耦合效率随端面分离距离增加而下降的速度更快。与 y_1 方向的径向错位类似, 这是因为倾斜角分散了光斑能量, 光纤纤芯中心轴处能量减小。另外, 工业封装中通常端面分离的距离 $\Delta z = 5 \mu\text{m}$, 此时理论耦合效率达到 99.7%。然而, 由于耦合时存在菲涅尔反射, 导致耦合效率进一步降低。光场在进行耦合时, 耦合部位会存在一定的空气, 这部分空气的折射率与光纤纤芯或芯片芯层的折射率不同, 因此导致了菲涅尔反射, 耦合效率下降到 93%。

通过上述分析发现, 耦合中存在菲涅尔反射会导致耦合效率降低。理论计算结果表明: 优化后耦合结构的耦合效率可以达到 93%。理论计算数据为新型设计 V 型槽及芯片固定结构提供了优化的技术参数。

3 新型耦合结构

传统 1×8 PLC 光分路器耦合结构分散、制作工艺较复杂、封装难度大、成本较高, 且连接部位需要使用胶水粘合, 随着器件的长期使用, 光纤阵列与 PLC 芯片会出现相对位移等问题, 具体结构如图 5(a) 所示。

针对传统结构的缺陷, 根据上述理论计算与分析, 本文设计了新型 1×8 PLC 光分路器整体基板耦合结构, 如图 5(b) 所示。将光纤阵列与 PLC 芯片两大核心部分合二为一, 增加耦合结构整体稳定性, 改善器件工作中的应力偏移, 延长器件使用寿命, 并降低制作工艺难度和封装难度; 对 PLC 芯片与光纤阵列接触的端面进行斜 8° 处理, 降低耦合对准难度, 增大回波损耗, 保证稳定的光功率输出, 从而实现光信号的高效耦合。

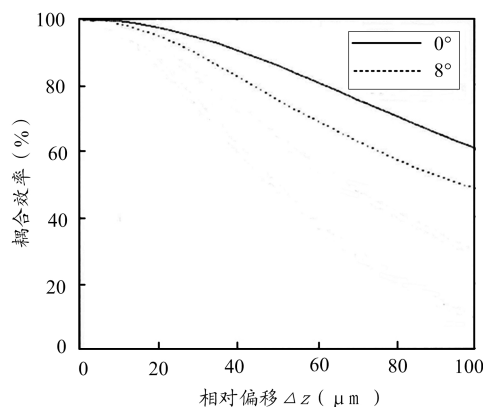
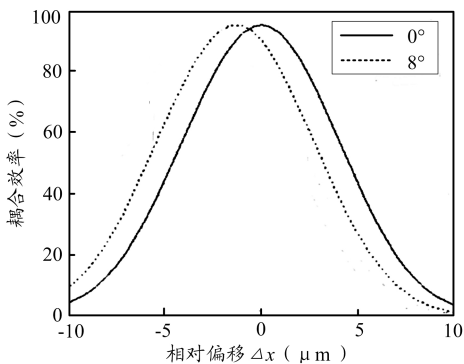
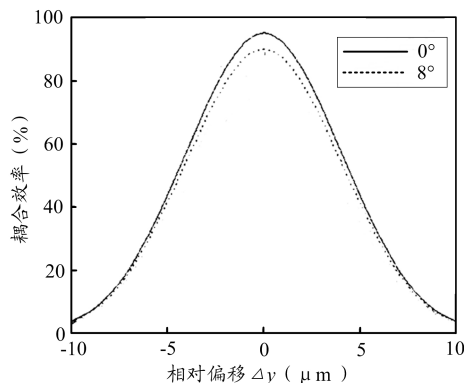


图 4 端面分离对耦合效率的影响

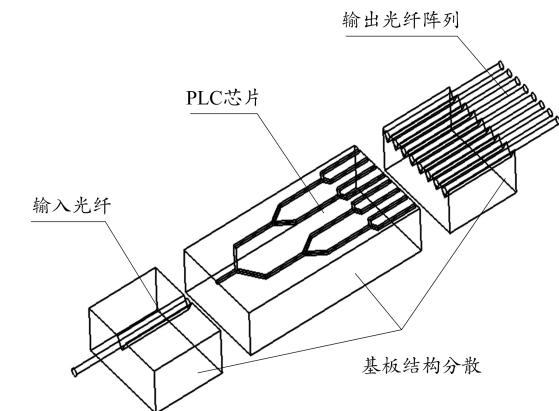


(a) x_1 错位与耦合效率的关系

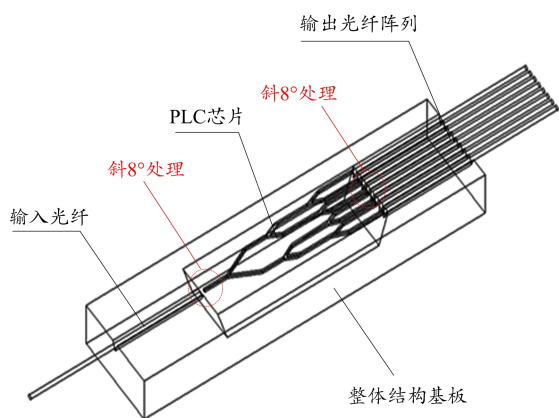


(b) y_1 错位与耦合效率的关系

图 3 x_1 和 y_1 错位对耦合效率的影响



(a) 传统 1x8 PLC 光分路器耦合结构



(b) 新型 1x8 PLC 光分路器耦合结构

图5 光分路器耦合结构

4 仿真及讨论

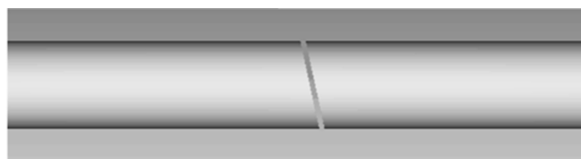
4.1 模型建立

根据上述理论分析和新型耦合结构,我们模拟了光纤与 PLC 芯片耦合情况并验证耦合效率。在 ZEMAX 非序列模式下设定激光中心波长为 1550 nm, 光纤纤芯和 PLC 芯片芯层选用 F_SILICA 材料, 纤芯半径为 5 μm , PLC 芯片半径为 5.2 μm , 光纤与 PLC 芯片接触的端面斜 8° 处理, 建立主光纤与 PLC 芯片耦合模型, 如图 6 所示。

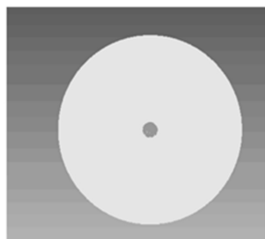
PLC 芯片中传输光的芯区一般为正方形, 其尺寸应与光纤纤芯接近, 以保证它与光纤纤芯对接时不会产生较大损耗^[16]。

4.2 仿真数据与理论数据对比

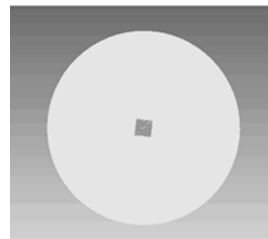
光纤与 PLC 芯层耦合时, 存在径向错位、端面分离和角度适配这 3 个方面所产生的误差影响。由于设计模型已经确定端面分离距离和角度大小, 故只考虑



(a) 主光纤与 PLC 芯片端面斜 8° 处理



(b) 主光纤横截面

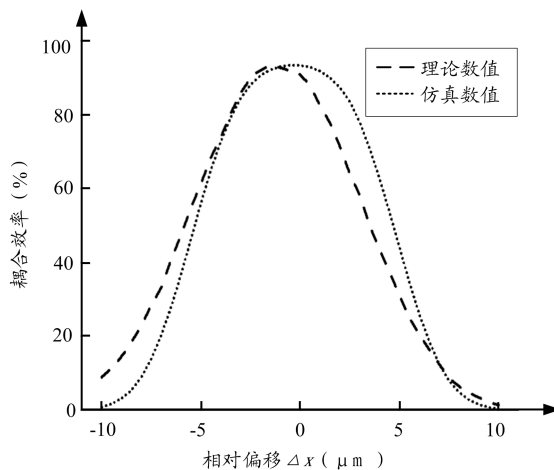


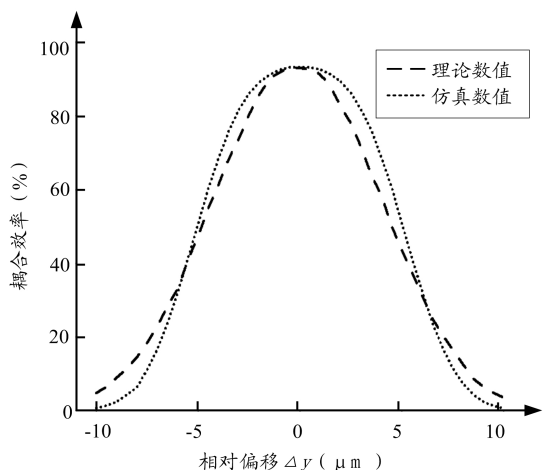
(c) PLC 芯片横截面

图6 主光纤与 PLC 芯片耦合模型图

和分析耦合时存在的径向错位误差即可。在 ZEMAX 中利用几何形状建立光纤与 PLC 芯片模型(如图 6 所示), 两者端面距离 $\Delta z=5 \mu\text{m}$, 通过改变光纤与 PLC 芯层在 x_1 与 y_1 方向上的相对错位数值, 得到相应位置误差对耦合效率的影响, 并与理论情况进行对比, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 存在 x_1 方向偏移时, 仿真情况下在相对偏移 $\Delta x=-0.5 \mu\text{m}$ 处有最大耦合效率, 为 93%; 存在 y_1 方向偏移时, 仿真情况耦合效率最大值处与理论情况相同, 最大耦合效率为 93%; 在 2 种不同偏移条件下, 当相对偏移量较小时, 仿真情况的耦合效率比理论情况下降得慢。以上现象是因为光纤与 PLC 芯片耦合时, PLC 芯片的尺寸比光纤纤芯尺寸大, 保证了两

(a) x_1 错位情况

(b) y_1 错位情况图7 x_1 和 y_1 错位与理论情况

者耦合时受到相对偏移误差的影响较小,提升了器件的容错率。

5 结束语

根据现有耦合结构存在的缺陷,本文在传统 1×8 PLC 光分路器的基础上,提出一种高稳定性的整体基板耦合结构设计方案。ZEMAX 仿真结果与理论计算结果表明:整体基板耦合结构将 PLC 芯片和光纤阵列两大核心部分合二为一,并对该耦合结构端面进行斜 8° 处理,耦合效率达 93%。整体设计具有震荡偏移小、工作寿命长和封装相对简单等优点。

参考文献:

- [1] 严清峰,余金中,陈少武.从 OFC2003 看平面光波导器件的发展动向[J].光电子·激光,2003,14(10):1124-1128.

- [2] 汪钦,徐红春,胡广文.用于无源光网络的平面光波回路光电集成器件[J].激光与光电子学进展,2012,49(11):164-169.
- [3] 涂兴华,倪彬,杨烁,等.平面波导型 1×4 光分路器的优化设计[J].计算机应用,2015,35(S2):24-26.
- [4] 涂兴华,耿胜各.一种新型 1×8 平面波导光分路器的设计[J].量子电子学报,2018(1):102-107.
- [5] 郑煜,段吉安.平面光波导与阵列光纤耦合分析[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(3):681-686.
- [6] RAY C. Packaging and integration of high-speed optical components[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2004, 7(2): 60-62.
- [7] SONG W, XIE K. Optimal design of a multi-mode interference splitter based on SOI[J]. Optoelectronics Letters, 2008, 4(2): 92-95.
- [8] 李旭,晏欣欣.一种平面光波导分路器的一体化封装装置:中国, CN202583507U [P]. 2012-12-05.
- [9] 贺锋涛,孙力,惠战强,等.基于氟掺杂双芯光子晶体光纤偏振光分束器的设计及研究[J].光子学报,2016,45(9):7-12.
- [10] CHUN Jing, WU Yulie, DAI Yifan, et al. Fiber optic active alignment method based on a pattern search algorithm [J]. Optical Engineering, 2006, 45(4): 045005-69-045005-74.
- [11] 王亮亮,安俊明,吴远大,等.特种非对称低损耗 1×5 光分路器[J].光子学报,2013,42(3):298-302.
- [12] 吴立恒,王明红.光子晶体信道分路滤波器特性的研究[J].中国激光,2015,42(5):160-164.
- [13] 胥清波,郝晓剑,周汉昌.基于 Zemax 光纤耦合透镜激光光路设计[J].激光与光电子学进展,2015,52(10):237-240.
- [14] 章玲,曾燕,陈国庆,等.楔形微纳光纤能量分布特性研究[J].激光技术,2015,39(5):689-693.
- [15] 淳静.光纤有源器件激光焊接封装的关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [16] 王铭杰.平面光波导与光纤阵列的耦合封装研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [17] 张秀梅,蒋书波,王旭.空芯光子晶体光纤与单模光纤耦合优化及在拉曼气体检测中的应用[J].红外与毫米波学报,2017,36(6):660-664.

《光通信技术》首届年度优秀论文评选活动公告

尊敬的各位作者和读者:

为了活跃光通信学术氛围,提高光通信科技水平,提升《光通信技术》杂志所刊登光通信技术文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从 2019 年起,每年举办一次《光通信技术》优秀论文评选活动,评选出本年度 6~10 篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500 元/篇),获奖名单将在 2019 年第 12 期《光通信技术》杂志和网站公布。敬请广大作者积极支持我们的工作,踴跃佳作,与我们共同携手把《光通信技术》办得更好。

《光通信技术》编辑部