

光束会聚型亚波长光栅 1×4 功率分束器

黄诚^{1,2}, 白成林^{1,2*}, 房文敬^{1,2}, 范鑫焯^{1,2}, 姜夕梅^{1,2}

¹聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252000;

²山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252000

摘要 提出一种具有光束会聚功能的单层亚波长光栅结构, 该结构能够实现光束会聚及四路分光。利用严格耦合波分析法和波前相位控制原理设计并优化该亚波长光栅结构, 并给出具体相位设计规则。基于有限元软件 COMSOL 对其进行仿真分析, 结果表明, 当波长为 1550 nm 的横磁(TM)偏振光入射时, 该结构可实现四路分束, 每束光功率都相等且可实现光束会聚, 经计算得到总体透射率为 92.670%。该亚波长光栅结构有望在光通信集成以及空间光耦合等领域得到重要应用。

关键词 光栅; 亚波长光栅; 会聚光束; 功率分束器; 波前相位控制原理; 光学器件

中图分类号 O463.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030502

Sub-Wavelength Grating 1×4 Power Splitter with Beam Convergence

Huang Cheng^{1,2}, Bai Chenglin^{1,2*}, Fang Wenjing^{1,2}, Fan Xinye^{1,2}, Jiang Ximei^{1,2}

¹School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, China;

²Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology,
Liaocheng, Shandong 252000, China

Abstract This paper proposes a single-layer sub-wavelength grating structure with beam convergence function and four-way beam splitting. The structure is designed and optimized using a rigorous coupled-wave analysis method and wavefront phase control principle, and the specific phase design rules are given. The simulation results of the structure using finite element software COMSOL show that the structure can realize four-way splitting under irradiation of transverse magnetic (TM) polarizes light at 1550 nm wavelength. Moreover, the optical power of each beam is equal and beam convergence is realized. The calculated total transmittance is 92.670%. Thus, the sub-wavelength grating structure can be applied in the important fields of optical communication integration and spatial optical coupling.

Key words gratings; sub-wavelength grating; beam convergence; power splitter; wavefront phase control principle; optical device

OCIS codes 050.6624; 050.1940; 050.2770; 050.5080

1 引言

功率分束器能将入射光按照比例分配到几个方向输出, 在光接入网“最后一公里”部分发挥着重要作用, 是光通信系统中重要的功能元件之一^[1-3]。传统功率分束器是使用某些晶体的自然双折射效应或者多层介电涂层的偏振特性进行设计的, 体积较大, 不利于制备^[4-6]。通过离子交换融合锥形技术设计

的集成光波导(PLC)型功率分束器具有宽带宽、结构紧凑、体积小以及均匀性强等优势, 但是该功率分束器结构存在曲线结构, 相对不易设计^[7]。基于亚波长光栅结构的功率分束器具有尺寸小(微纳米计量)、便于制备(电子束曝光制备矩形条结构)、结构稳定、宽带宽以及能量损耗小等优势, 有望逐渐取代部分传统功率分束器^[8-12]。

目前已有报道的亚波长光栅功率分束器能实现

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-07-31; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 国家重点研究发展计划(2016YFB0402105)

* E-mail: baichenglin@lcu.edu.cn

1×2 与 1×3 分束,关于 1×4 分束的设计较少。2016 年,北京邮电大学 Wang 等^[13]利用块状光栅设计了一种可实现 1×2 平均分光的功率分束器,其每束光都能实现会聚。2018 年,南京大学 Xiao 等^[14]利用倒锥形亚波长光栅把一束入射光耦合到两个不同的方向,实现了 1×2 分光,但是在光通信网络分配能量过程中,不仅要实现 1×2 分束,有时还要考虑更多束分光。2008 年以来,哈佛大学团队^[15-16]利用二维块状光栅将一束入射光衍射至 0 级与 ±1 级,每束光的能量接近相等,实现了三束分光。2016 年,广东工业大学舒文浩^[17]利用条形光栅衍射特性设计了一种 1×3 功率分束器,但是更高级别的衍射很难保证功率均分,因此无法实现更多束光的均匀分光。2011 年,北京大学 Yang 等^[18]利用两层亚波长闪耀光栅实现了 1×4 分束。2017 年,以色列研究团队^[19]通过改变光栅接触部分材料的折射率,设计了一种 1×4 功率分束器,但是这些功率分束器都是双层光栅结构,这增大了光的传播距离,能量损耗较多,不易制备,且出光口面积大于微型光电器件接收端面积,不利于耦合。如何设计亚波长光栅 1×4 功率分束器,使其能实现多束光的平均分光,提高耦合效率,且结构简单便于制备,是目前研究中亟待满足的需求。

针对目前亚波长光栅功率分束器双层不易制备、功率不能均分的问题,本文提出一种具有光束会聚功能的单层亚波长光栅 1×4 功率分束器。采用严格耦合波分析(RCWA)法和波前相位控制原理

对该结构进行分析,并给出了具体的分析方法^[20]。利用有限元软件 COMSOL 对其进行仿真分析,结果表明,当 1550 nm 波长的横磁(TM)偏振光垂直入射时,该结构可实现光功率均等的四路分束,且每束光都能实现光束会聚,经计算该结构总体透射率可达 92.67%,具有高透射效果。该光学器件结构简单、便于制备,能量损耗较小,且分开的每束光都能实现会聚,可有效减少光在传播过程中产生的散射损耗,从而提高与其他光功能器件的耦合效率,有望广泛应用在面向光纤通信的集成光电器件中^[21]。

2 理论与设计

2.1 结构模型

图 1 为具有光束会聚功能的亚波长光栅 1×4 功率分束器原理图,由于一维亚波长光栅仅在 $x-z$ 平面分析,因此 y 方向视为无限延长。本结构主要包括四个具有光束会聚功能的单层亚波长光栅结构,每个光栅结构完全相同,分别用光栅 A、B、C、D 标注。如图 1 所示,当波长为 1550 nm 的 TM 偏振光垂直入射时,依次经过四个区域:区域 I 为光入射区域,材料为空气,折射率 n_1 为 1;区域 II 为光栅区域,该层由空气与硅交替排列组成,高度为 d ,当波长为 1550 nm 时,硅的折射率为 3.48;区域 III 为光栅衬底,厚度为 h ,材料为二氧化硅(SiO_2),当波长为 1550 nm 时, SiO_2 的折射率 n_2 为 1.47;区域 IV 为光透射区域,材料为空气,折射率 n_3 为 1。当入射光垂直入射时,能获得四路会聚光束,且每束光功率都相等。

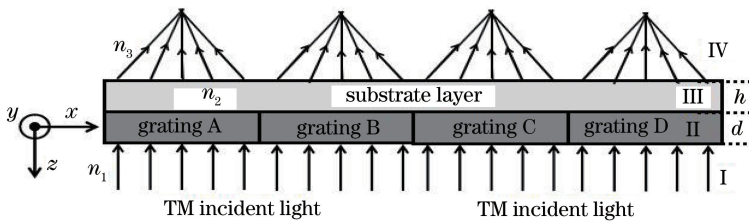


图 1 具有光束会聚功能的亚波长光栅 1×4 功率分束器原理图

Fig. 1 Schematic of sub-wavelength grating 1×4 power splitter with beam convergence

2.2 波前相位控制理论

由于图 1 中四个非周期亚波长光栅结构完全相同,所以只单独分析光栅 A 如何实现光束会聚即可。

图 2 为一维非周期亚波长光栅结构图,深色矩形区域代表光栅条。光栅周围被空气覆盖,其中 P_0 、 P_1 、 P_2 分别为单个光栅的周期, b_0 、 b_1 、 b_2 分别为单个光栅条的长度, $\Phi(x_i)$ ($i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$) 为每一个独立光栅条对应的相位。因为亚波

长光栅的局部相位仅取决于局部结构参数,所以通过改变亚波长光栅局部结构参数就可以控制透射或者反射光束的总体相位分布。光栅厚度、周期及占空比 f (光栅条长度和周期的比值) 是设计光栅结构的重要参数。首先确定光栅厚度,在厚度固定的情况下,改变每个光栅条的周期以及占空比就能控制输出光束的相位分布,当相位分布满足抛物线分布时可实现光束会聚。

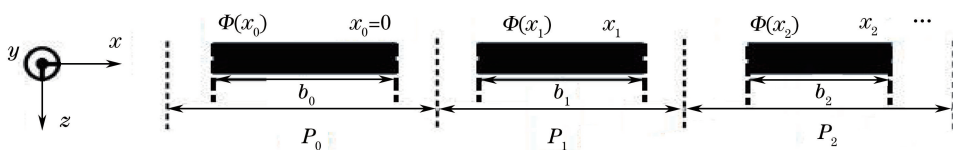


图2 非周期亚波长光栅结构图

Fig. 2 Schematic of non-periodic sub-wavelength grating structure

图3为亚波长光栅A的截面分布图。图3中亚波长光栅A(总长度为 L)关于 $x=x_0=0$ 对称,在 $x=x_0=0$ 的右半部分,每个光栅条对应的 x 坐标分别表示 x_1, x_2, \dots, x_n 。设光栅某一点透射光与入射光间的夹角为 θ_i ,对应光栅中心位置 x_i ,入射光都会聚到了一个点,该点到光栅衬底的距离为焦距 F_x 。透射波在 x 附近的电场强度表示为

$$E(\theta_i, x, z) = E(x, z) \exp[jk_0(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)], \quad (1)$$

式中: k_0 为真空中入射光波长为 λ_0 时的传播常数,即为 $k_0=2\pi/\lambda_0$;角度 θ_i 为 z 轴正方向与透射光之间的夹角。因为这里 z 轴方向上的数值没有变化,

是定值,透射平面上的相位表示为

$$\Phi(x) = k_0 x \sin \theta_i + c, \quad (2)$$

式中: c 为常数。

对相位 $\Phi(x)$ 求微分,得到

$$\Phi'(x) = k_0 \sin \theta_i. \quad (3)$$

根据图3中透射光线的传播路径,可得

$$\sin \theta_i = \frac{\Phi'(x)}{k_0} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + F_x^2}}. \quad (4)$$

对(4)式里的 $\Phi'(x)$ 进行积分,得

$$\Phi(x) = \int \Phi'(x) dx = k_0 \sqrt{(x^2 + F_x^2)} + c. \quad (5)$$

由此得到透射光会聚时的相位分布。

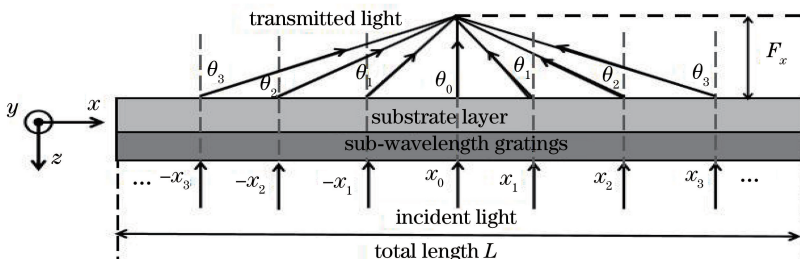


图3 亚波长光栅A的截面分布图

Fig. 3 Sectional distribution of sub-wavelength grating A

2.3 设计过程

对于会聚型亚波长光栅功率分束器的设计,首先要使用RCWA法计算出周期亚波长光栅的透射率,然后根据相位规则取单独的光栅条,并对其从左到右依次排布。RCWA法是一种通过傅里叶级数展开光栅区域介电常数以处理平面结构或者表面浮雕结构的方法,能有效求解周期光栅的反射率或者透射率。以图1所示结构为例,简单介绍利用RCWA法求解周期型亚波长光栅的过程,这里TM波归一化磁场写为

$$H_{inc,y}(\theta_i, x, z) = \exp[-jk_0 n_1 (x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)], \quad (6)$$

式中: k_0 为真空中的传播常数,即 $k_0=2\pi/\lambda_0$, λ_0 为真空中的波长。

当光波到达光栅层后,入射区域I和透射区域III中的衍射磁场分别表示为

$$H_{1,y} = H_{inc,y} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x - k_{1,zi}z)], \quad (7)$$

$$H_{III,y} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi}x - k_{III,zi}(z-d)]\}, \quad (8)$$

式中: R_i 为区域I中光栅的第 i 级反射系数; T_i 为区域III中光栅的第 i 级透射系数; $k_{1,zi}$ 和 $k_{III,zi}$ 分别为区域I和区域III第 i 级衍射波沿 z 方向的分量。根据光栅方程,

$$k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta_i - i(\lambda_0/P)], \quad (9)$$

式中: P 表示周期光栅的周期。区域II(光栅层)中,磁场以傅里叶级数形式展开,表示为

$$H_{II,z} = \sum_i U_{zi}(z) \exp(-jk_{xi}x), \quad (10)$$

式中: $U_{zi}(z)$ 为光栅区域中第 i 级光栅模式的幅值。

把(6)~(10)式代入波动方程得到耦合波方程组,然后将耦合波方程组转变为特征值求解问题;再依次将 $z=0$ 和 $z=d$ 处的边界磁场连续条件代入耦合波方程组,这样可以求出区域I各级衍射波反射系数 R_i 与区域III各级衍射波透射系数 T_i ;利用

求得的反射系数 R_i 和透射系数 T_i 以及边界条件的匹配性,可求得光栅区域各级光栅模式的幅值。关于周期光栅透射率与相位值可以通过仿真软件 MatLab 编程计算获得,经过计算不同光栅的厚度值,最终选择光栅厚度 $d=0.86\ \mu\text{m}$,衬底厚度 $h=0.5\ \mu\text{m}$ 的结构,进而得到如图 4 与图 5 所示的结果图。图 4 为以周期为横轴,以光栅占空比为纵轴的透射率分布图,图 5 为周期亚波长光栅在不同周期、占空比下的相位分布图,两幅图中周期都在 $0.2\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 范围内变化,占空比在 $0.2\sim 0.8$ 范围内变化。图 4 和图 5 中的数据可以看作查找表,可以将光栅周期、占空比、相位以及透射率一一对应。需要注意的是,高透射区域所对应的相位只能覆盖尽可能大的相位范围,要选取合适的光栅结构参数才能产生高透射型的会聚效果。由图 4 与图 5 可以看出,在高透射率区域选择的透射光相位能够覆盖 $0\sim 2\pi$ 区间的全部范围,然后依次选择每个光栅条,使得相邻光栅的相位满足(5)式。

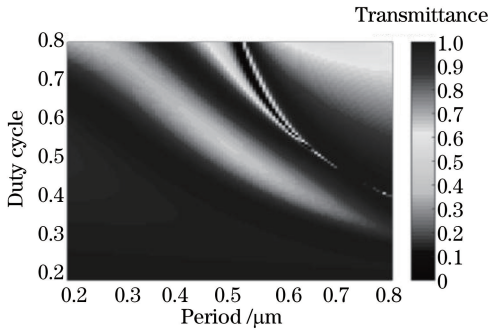


图 4 周期亚波长光栅周期、占空比和透射率的关系图
Fig. 4 Relationship of periodic sub-wavelength grating's period, duty cycle and transmittance

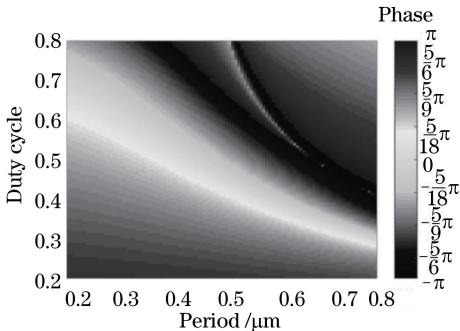


图 5 周期亚波长光栅周期、占空比和相位的关系图
Fig. 5 Relationship of periodic sub-wavelength grating's period, duty cycle and phase

本文亚波长光栅结构的会聚焦距 F_x 为 $30\ \mu\text{m}$,由于光束会聚型亚波长光栅是关于 $x_0=0$ 对称的,所以在设计过程中,只考虑 $x_0>0$ 的部分即可。从

最中间位置的第 0 个光栅条开始,利用仿真软件 MatLab 在高透射区域由左向右依次挑选排列出满足相位分布的光栅条周期和占空比。通过计算得到 $x_0>0$ 部分总长度为 $22.332\ \mu\text{m}$,包含 90 个光栅条,为了清晰体现相位差与光栅长度的分布关系,仅列出光栅长度在 $0\sim 8\ \mu\text{m}$ 范围内的相位分布关系,如图 6 所示。图 6 为在高透射区域选取满足相位分布的离散相位分布图。黑点表示相应离散相位值,都能均匀地分布在抛物线两侧,满足光束会聚所需的抛物线型相位分布。最后,把第 1 到第 n 个光栅条排列成关于 $x_0=0$ 对称,就可以得到光栅右半部分参数,将所有的参数组合起来即可形成具有光束会聚功能的非周期亚波长光栅结构。

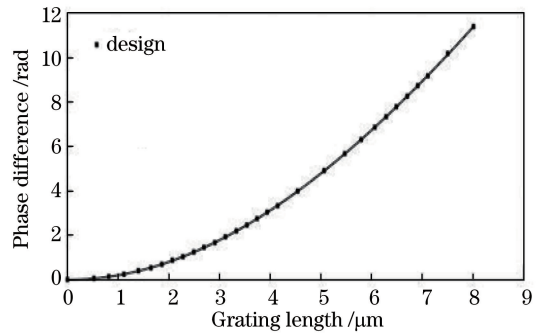


图 6 会聚光栅相位设计图

Fig. 6 Design of convergent grating phase

3 仿真分析

采用基于有限元法的商业软件 COMSOL 来仿真该亚波长光栅 A 结构,且为了避免光束反射发生干涉,在仿真过程中添加完美匹配层以及散射边界,便于计算器件的透射率。图 7 为 TM 偏振光垂直入射时的电场强度分布图,可以明显看出,透射平面的光束会聚在一起。图 7 中的横坐标表示光栅结构在 x 方向上的长度,纵坐标表示光栅结构在 z 方向上的长度,能通过纵坐标测量出光束会聚的焦距,即 F_x 为 $29.85\ \mu\text{m}$,透射率为 92.670% 。

光栅结构 B、C 及 D 与光栅结构 A 完全相同,将四个光栅结构组合在一起可得到图 1 所示具有光束会聚功能的亚波长光栅 1×4 功率分束器模型。图 8 即为 TM 偏振光垂直入射功率分束器时的电场强度分布图,在 A、B、C、D 四端分别设置线积分,计算出的四个端口的透射率分别为 23.168% 、 23.170% 、 23.169% 、 23.167% ,四个出光端口透射率基本一致,可以实现 1×4 功率均分。通过这种光栅组合的方法,课题组可以继续设计能实现 1×8 以及

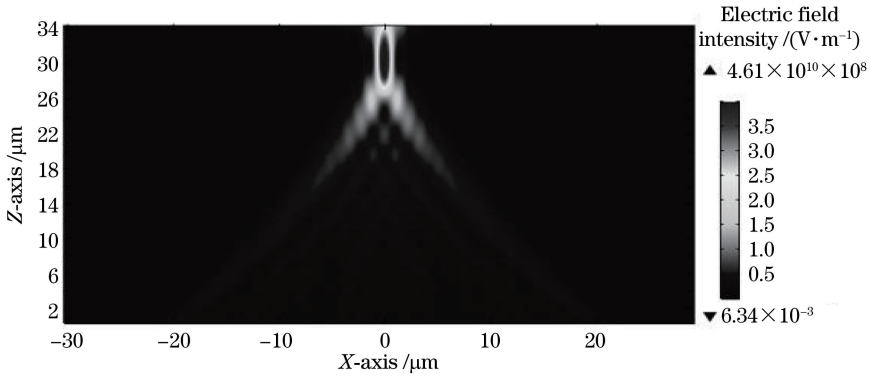


图7 光栅 A 的电场强度分布图

Fig. 7 Distribution of electric field intensity of grating A

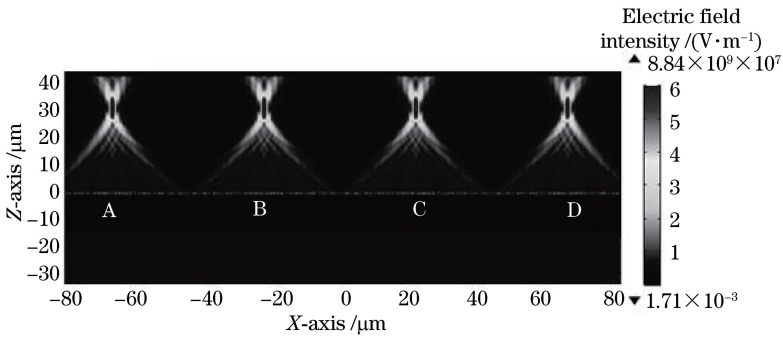


图8 功率分束器的电场强度分布图

Fig. 8 Distribution of electric field intensity of power splitter

更多束分光的光学器件。

在功率分束器中,插入损耗(IL)是极为重要的性能指标,可采用分贝值表示,其公式为

$$l_{IL} = 10 \lg \frac{P_i}{P_o}, \quad (11)$$

式中: P_i 和 P_o 分别为输入光功率和某一输出端光功率的大小。经过计算,该功率分束器插入损耗为

0.33 dB。

当入射光波长变化范围为 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 时,功率分束器的透射率发生了一定变化,如图9所示。根据图9可知,在 $1.49 \sim 1.64 \mu\text{m}$ 波长范围内,功率分束器总透射率在85%以上,表明该功率分束器具有宽带宽特性。

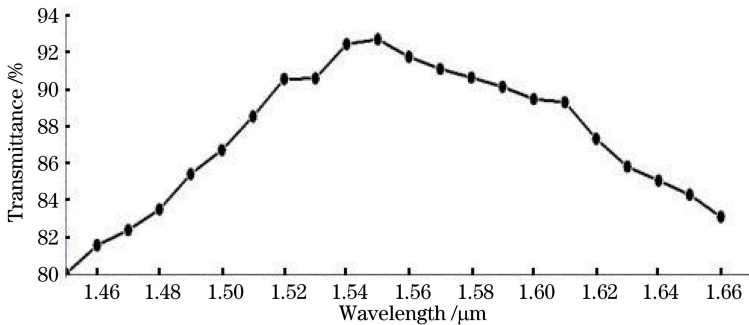


图9 不同入射光波长的透射率

Fig. 9 Transmittance with different incident wavelengths

4 结 论

本文设计了一种具有光束会聚功能的亚波长光栅 1×4 功率分束器。该器件可实现四路分束,每束

功率均等且光束会聚。利用仿真软件 COMSOL 对其进行仿真,计算得到器件总透射率为 92.670%,4 个端口的透射率分别为 23.168%、23.170%、23.169%、23.167%,每个端口的透射率基本相等,

实现了功率均分。这种会聚型 1×4 功率分束器不仅可以平均分配入射光功率,而且能提高与其他光功能器件的耦合效率,在面向光纤通信的集成光电器件方面有着巨大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Mao M, Huang Y Q, Fang W J, et al. Novel optical power splitter based on nonperiodic subwavelength high-index-contrast grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 010603.
毛敏, 黄永清, 房文静, 等. 基于非周期高折射率差亚波长光栅的光功分器[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 010603.
- [2] Fang W J. Research on integration of novel subwavelength grating and semiconductor photodetector for optical communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 15-18.
房文敬. 光通信系统中新型亚波长光栅与半导体光探测器集成的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 15-18.
- [3] Wang Y. Research on sub-wavelength grating and grating based beam splitters in optical communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 12-14.
王莹. 光通信中的亚波长光栅及分束器件的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 12-14.
- [4] Carletti L, Malureanu R, Mørk J, et al. High-index-contrast grating reflector with beam steering ability for the transmitted beam[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23567-23572.
- [5] Ma J Y, Xu C, Qiang Y H, et al. Broadband non-polarizing beam splitter based on guided mode resonance effect [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(10): 104209.
- [6] Wang B. High-efficiency two-port beam splitter of total internal reflection fused-silica grating [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44(6): 065402.
- [7] Wang L L, An J M, Wu Y D, et al. A compact and low-loss 1×8 optical power splitter using silica-based PLC on quartz substrate [J]. *Optics Communications*, 2014, 312: 203-209.
- [8] Lü X, Qiu W B, Wang J X, et al. A chirped subwavelength grating with both reflection and transmission focusing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 2200907.
- [9] Yang J B, Zhou Z P, Zhou W, et al. High efficient subwavelength binary blazed grating beam splitter via vertical coupling [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 896-898.
- [10] Feng J J, Zhou C H, Zheng J J, et al. Dual-function beam splitter of a subwavelength fused-silica grating [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2697-2701.
- [11] Chen Y, Tian Y N, He L, et al. Research on subwavelength metal grating/dielectric/metal hybrid waveguide sensing structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0110001.
陈颖, 田亚宁, 何磊, 等. 亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导传感结构的研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0110001.
- [12] Fang X M, Jiang X W, Zhao J W. Influence of grating shape on LED light extraction efficiency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082302.
方晓敏, 江孝伟, 赵建伟. 光栅形状对发光二极管光提取效率的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082302.
- [13] Wang Y, Huang Y Q, Fang W J, et al. Novel beam splitter based on 2D sub-wavelength high-contrast gratings [C] // *Asia Communications and Photonics Conference 2016*, November 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington, D. C.: OSA, 2016: AF2A.58.
- [14] Xiao J B, Guo Z Z. Ultracompact polarization-insensitive power splitter using subwavelength gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(6): 529-532.
- [15] Feng J J, Zhou C H, Wang B, et al. Three-port beam splitter of a binary fused-silica grating [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(35): 6638-6643.
- [16] Khorasaninejad M, Crozier K B. Silicon nanofin grating as a miniature chirality-distinguishing beam-splitter [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5386-5391.
- [17] Shu W H. Research of three-port beam splitter based on high density grating [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016: 19-45.
舒文浩. 基于高密度光栅的三通道分束器研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2016: 19-45.
- [18] Yang J B, Zhou Z P, Wang X J, et al. Compact double-layer subwavelength binary blazed grating 1×4 splitter based on silicon-on-insulator [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 837-839.
- [19] Katz O, Malka D. Design of novel SOI 1×4 optical power splitter using seven horizontally slotted waveguides [J]. *Photonics and Nanostructures-*

Fundamentals and Applications, 2017, 25: 9-13.

- [20] Li L, Zhang B, Xia Y W, et al. Pulse temporal profile measurement technology of frequency modulation based on self-focusing lens coupling optical fiber sampling for high power laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (5): 0504002.

李磊, 张波, 夏彦文, 等. 基于自聚焦透镜耦合光纤取样的高功率激光装置调频脉冲时间波形测量技术 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504002.

- [21] Kang J, Cheng Z, Zhou W, et al. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane germanium waveguides [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2094-2097.