



宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜

田梓聪 郭遗敏 胡晨岩 王慧琴 路翠翠

Broadband efficient focusing on-chip integrated nano-lens

Tian Zi-Cong Guo Yi-Min Hu Chen-Yan Wang Hui-Qin Lu Cui-Cui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 244201 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200948

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200948>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光照明条件对超振荡平面透镜聚焦性能的影响

Effect of laser illumination conditions on focusing performance of super-oscillatory lens

物理学报. 2020, 69(18): 184215 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200577>

基于蜷曲空间结构的近零折射率声聚焦透镜

Acoustic focusing lens with near-zero refractive index based on coiling-up space structure

物理学报. 2017, 66(24): 244301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244301>

不同样品温度下聚焦透镜到样品表面距离对激光诱导铜击穿光谱的影响

Influence of distance between focusing lens and sample surface on laser-induced breakdown spectroscopy of brass at different sample temperatures

物理学报. 2019, 68(6): 065201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182198>

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

物理学报. 2017, 66(6): 064102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064102>

平面超透镜的远场超衍射极限聚焦和成像研究进展

Advances in the far-field sub-diffraction limit focusing and super-resolution imaging by planar metalenses

物理学报. 2017, 66(14): 144206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.144206>

基于电动可调焦透镜的大范围快速光片显微成像

High-speed and large-scaled light-sheet microscopy with electrically tunable lens

物理学报. 2020, 69(8): 088701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191908>

宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜*

田梓聪¹⁾ 郭遗敏¹⁾ 胡晨岩¹⁾ 王慧琴^{1)†} 路翠翠²⁾

1) (南昌大学物理系, 南昌 330031)

2) (北京理工大学物理学院, 北京 100081)

(2020年6月19日收到; 2020年8月18日收到修改稿)

在光学材料与器件中, 由于不同波长的光会以不同速度传播, 因此一束复色光经过单个光学器件后会产生色散, 导致普通透镜不同波长的光无法聚焦. 传统的聚焦系统可通过叠加多个透镜解决这一问题, 但这是以增加系统的复杂度、质量和成本为代价, 不适用于高集成度的纳米光学系统. 目前比较好的解决方法是平面超透镜, 即利用超表面对各点的振幅、相位、偏振等进行空间调控, 达到聚焦的目的, 但这种平面超透镜难以直接片上集成. 本文将有限元法与遗传算法相组合发展出一种智能算法, 优化出一种宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜. 该透镜尺寸只有 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, 可实现波长从 470 nm 至 1734 nm 的低色散聚焦, 能将大小为 $2\ \mu\text{m}$ 的激光光束通过透镜与波导的耦合聚焦成 200 nm 以下的光束, 耦合传播效率可达 80% 以上. 同时, 该智能算法能够适用于不同的纳米结构, 均可获得类似的聚焦效果和高效的耦合传播效率. 该工作为宽带高效的纳米透镜提供了重要思路, 也为实现高密度集成的纳米光子器件提供了新途径.

关键词: 纳米透镜, 宽带高效聚焦, 片上集成, 智能算法**PACS:** 42.15.Eq, 42.25.Fx, 42.82.-m, 78.20.Bh**DOI:** 10.7498/aps.69.20200948

1 引言

光学透镜作为一种基本光学元件被广泛应用于聚焦、成像和光通信系统等领域中^[1,2]. 随着对光学系统的体积、集成度和性能要求的不断提高, 传统透镜已无法满足日益增长的社会需求, 研究人员通过不同途径去实现高分辨率低色散的复合微透镜. 2011年, 哈佛大学 Capasso 团队^[3] 首先提出超表面来拓展斯涅耳定律, 并设计 V 型天线阵列的超表面结构提供梯度的相位突变与渐变来实现色散控制, 使宽波段的聚焦成为可能; 该团队在超表面的研究工作基础上, 在 2016 年实现了将可见光波段聚焦于一点的高分辨率平面超透镜^[4]; 2018 年, 哥伦比亚大学 Yu 团队^[5] 利用超表面结构消除相位色差, 成功制造出首个近红外波段的平面超透镜, 透镜厚度为 $1\ \mu\text{m}$, 能实现将波长为 1200 nm

到 1650 nm 范围内的光聚焦到同一焦点, 其聚焦效率最高可达 50%. 然而, 就目前的研究成果看, 超透镜实现的低色散聚焦范围仍然较小, 效率仍然较低; 另外, 这种超透镜是独立元件, 难以实现片上集成. 整个光路系统的色散问题, 不会因为某一个元件的分辨率高、色散低而完全得到解决, 它还受限于其他元件的色散. 因此从整个光路进行的低色散片上集成器件设计更符合应用需求.

我们在利用智能算法优化设计出多通道的片上波长路由器件^[6] 和偏振路由器件的基础上^[7], 结合多年对无序介质的多重散射相干叠加理论的研究^[8-12], 对智能算法在基础结构建设、适应度函数、迭代方式、参数的设定及实际运算等方面进行了改进, 设计了一种可实现从可见光到近红外波段高效聚焦的片上集成纳米透镜, 将该智能算法向一个全新的设计方向推广. 该透镜结构是以二氧化硅为衬底, 设计碳化硅矩形柱的排列结构, 其衬底尺

* 国家自然科学基金 (批准号: 91850117) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hqwan@ncu.edu.cn

寸仅为 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$. 该纳米透镜可在纳米级别操控光的传播, 实现了 470 nm 至 1734 nm 波段低色散聚焦, 聚焦效率最高达 55% 以上, 最低为 30%, 平均聚焦效率为 42.1%. 在不另加任何材料和制备工艺的前提下, 在原基片上的透镜聚焦区域后加设 200 nm 波导, 通过波导能将大小为 $2\ \mu\text{m}$ 的激光光束通过透镜与波导的耦合聚焦成 200 nm 以下的光束, 耦合传播最高可达 80% 以上.

此外, 为说明该智能算法的普适性, 本文还设计了三角形、菱形和圆形纳米柱所排列组成的聚焦透镜结构, 得到了相近的聚焦结果和耦合传播效率. 对比平面超透镜^[4,5], 本文利用光的干涉与衍射并以无序结构为基础, 利用逆向设计的思想, 将遗传算法与有限元算法结合, 在二维平面上设计优化了一种透镜, 该透镜有着更简单的结构、更宽的聚焦范围 (包含可见光波段与近红外波段), 在实际应用上可实现片上集成, 并为宽带高效的纳米透镜的设计提供了新的思路.

2 设计原理与方法

1958 年, 美国物理学家安德森 (Andersen) 预测^[13], 如果在导体内加入杂质, 电子会在传导时被这些杂质散射, 多重散射波相互干涉, 结果会导致电子的运动停止, 金属的导电性消失, 呈现出绝缘体的性质. 我们将此理论应用到纳米光子器件中, 对于周期性结构, 如果引入一个随机位势, 会打破其周期性变成无序结构, 当光通过无序结构中的局部散射体时, 其传播方向将会发生改变, 产生散射^[14]. 由于多重散射波会相互发生干涉, 某些区域的干涉会增强, 某些区域的干涉会抵消, 所以当这个位势发生变化并到达临界值时, 也就是说无序达到一定的程度时, 可以将光局域到某一特定位置^[15], 如图 1 所示.

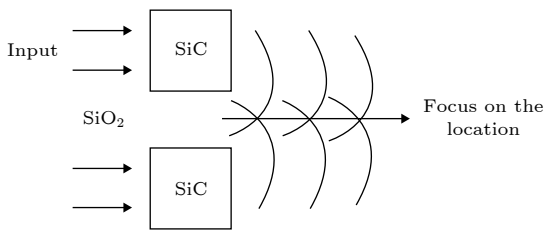


图 1 光经过碳化硅矩形后的衍射与干涉

Fig. 1. Diffraction and interference of light after passing through the silicon carbide rectangle.

对于本文的结构, 利用介电常数的平均值 ϵ_0 和无序介质的空间波动介电常数 $\epsilon(x)$ 来描述总介电常数 ϵ , 可得到不规则结构的电场 \mathbf{E} :

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \frac{\omega^2 \epsilon(x)}{c^2} \mathbf{E} = \frac{\omega^2 \epsilon_0}{c^2} \mathbf{E}, \quad (1)$$

式中, ω 为光的频率, c 为光速. 当 δ 越接近 1 时, 光子局域化的效果将越强,

$$\delta = 2\pi l / \lambda \sim 1 \quad (2)$$

式中, λ 为真空中的波长, l 为平均自由程.

基于该理论, 本文利用算法进行逆向设计^[16], 通过遗传算法与有限元方法组合构建一种新的智能算法, 使用 Comsol 和 Matlab 联合进行模拟设计出我们所期望的器件功能^[17-19]. 为了满足片上集成的需要, 考虑一个规则的平面二维结构, 该结构由两种不同折射率的材料组成. 左端为入射端

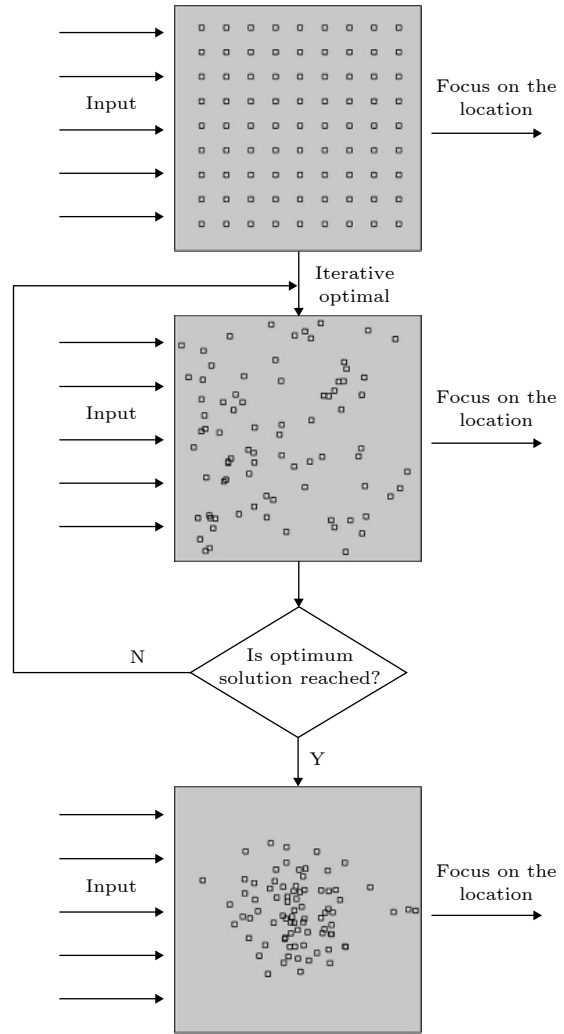


图 2 纳米透镜的结构优化示意图

Fig. 2. Schematic diagram of nano-lens structure optimization.

口, 宽度为 2000 nm, 右端为出射端口. 通过设置出射端口的输出要求, 可以得到所需要的结构. 通过有限元方法对输出端口的能量密度进行计算, 计算得到的结果将在遗传算法中使用; 在遗传算法中, 通过目标函数, 利用该结果将更好的结构保留, 并将这些结构中小矩形柱的位置生成二进制代码, 通过交叉、变异、迭代之后, 最终得到满足期望的结构. 为了降低运算的时间, 可以预先设置一些参

数, 如矩形的尺寸、材料等. 本文结构优化过程示意图如图 2 所示.

本文平面透镜的结构由二氧化硅衬底上设计碳化硅小矩形柱组成, 该器件尺寸为 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, 小矩形碳化硅的尺寸为 $40\ \text{nm} \times 40\ \text{nm}$, 共有 81 块, 入射光为 TE 波. 经过迭代优化, 并将数据进行归一化, 得到的透镜结构的聚焦效果如图 3(a)—(h) 所示.

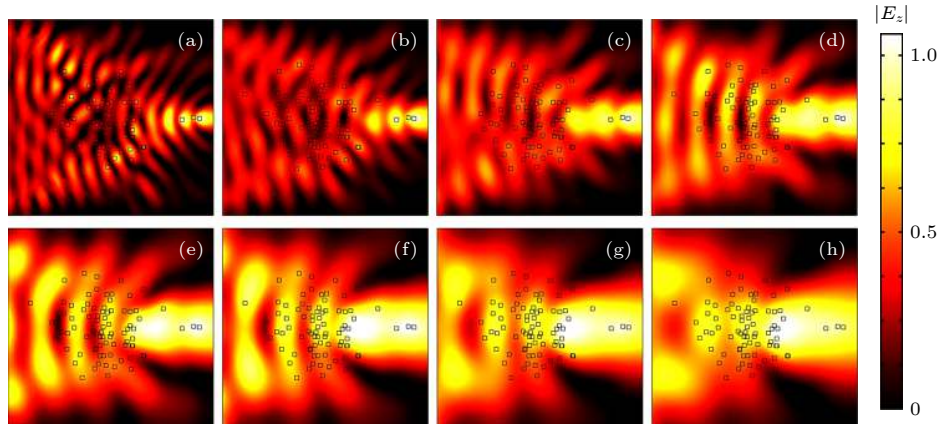


图 3 不同波长下电场幅值分布图 (a) 500 nm; (b) 650 nm; (c) 800 nm; (d) 950 nm; (e) 1100 nm; (f) 1250 nm; (g) 1400 nm; (h) 1550 nm

Fig. 3. Distribution of the electric field intensity of different wavelength: (a) 500 nm; (b) 650 nm; (c) 800 nm; (d) 950 nm; (e) 1100 nm; (f) 1250 nm; (g) 1400 nm; (h) 1550 nm.

3 结果分析与讨论

3.1 基于正方形纳米柱宽波段高效聚焦结构

从计算结果中每隔 150 nm 选出一个波长的电场幅值分布图来进行分析比较, 其对应的电场幅值分布图为图 3(a)—(h) 所示. 将出射端端口的总能量 W_{out} 与入射端端口的总的能量 W_{in} 之比作为聚焦效率 α :

$$\alpha = \frac{W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}}. \quad (3)$$

聚焦效率计算结果如图 4 所示.

由图 4 可得, 在 470 nm 至 1734 nm 波段的光入射时, 聚焦效率最高达 55% 以上, 最低为 30%, 平均聚焦效率为 42.10%, 可见光波段聚焦效率更高.

为了拓展该器件的应用, 本文探究了光在聚焦后的耦合传播问题, 在不另加任何材料和制备工艺的前提下, 在聚焦区域沿 x 轴加设一条宽度为

200 nm 的碳化硅纳米波导, 并探测光在波导输运时的能量变化. 以波长为 800 nm 为例, 其电场幅值分布如图 5 所示.

波长为 800 nm 的光原本聚焦光斑大小约为 400 nm, 大于耦合波导 200 nm 的宽度, 将图 5 与图 3(c) 对比可以发现: 在透镜聚焦区域后接波导后, 光斑大小得到了进一步的控制, 能量再次聚集,

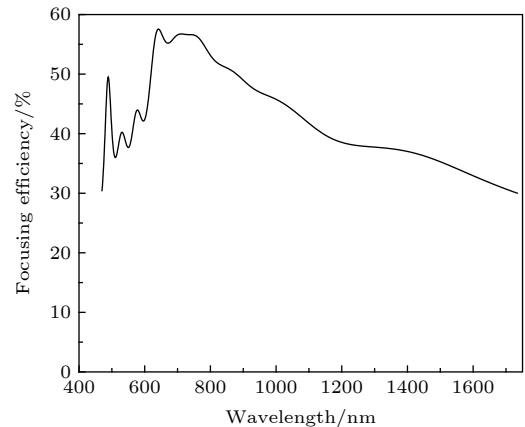


图 4 对不同波长光的聚焦效率

Fig. 4. Focusing efficiency for different wavelengths of light.

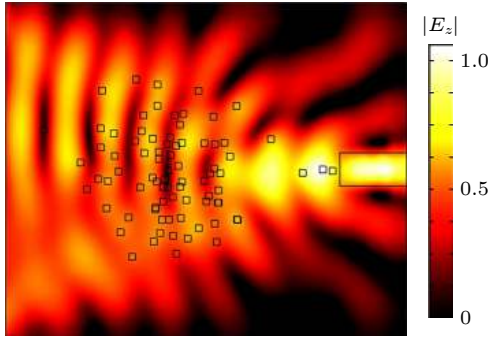


图 5 聚焦光的波导耦合输出

Fig. 5. Waveguide coupling output of focused light.

聚焦光进入波导后能量更强,且成振荡输出,形成似驻波场分布.在波导中每间隔 50 nm 进行一次能量测量,将该点的能量 W_x 与入射端口的总能量 W_{in} 之比定义为该透镜与波导的耦合传播效率 β :

$$\beta = \frac{W_x}{W_{in}}. \quad (4)$$

传播效率计算结果如图 6 所示.

由图 6 得,在透镜聚焦区域加设波导后,光束保持聚集不散,能量沿着波导高效传播,耦合传播效率可达 80% 以上.这一特点意味着光聚焦后可以高效耦合进入波导,可见该结构不仅可实现微米级的光斑聚焦缩小成百纳米量级,还可直接实现片上集成.

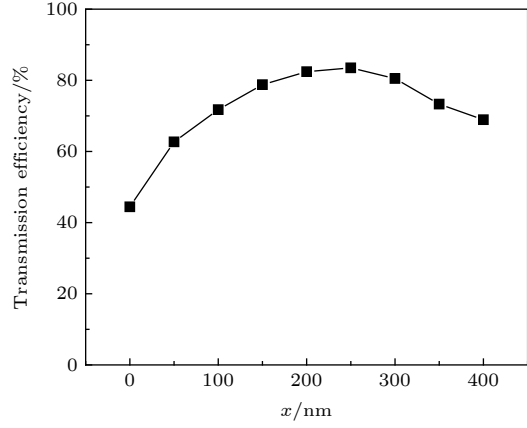


图 6 光经透镜后在波导中的传播效率

Fig. 6. Propagation efficiency of light in a waveguide after passing through the lens.

3.2 基于三角形、菱形、圆形纳米柱宽波段高效聚焦结构

使用智能算法,在不改变基础材料的基础上,设计了以三角形、菱形、圆形为纳米柱结构的宽带高效聚焦结构.其中,三角形是腰为 $20\sqrt{2}$ nm 的等腰直角三角形,直角指向出射方向;菱形为边长为 40 nm 的正菱形,菱形的角指向出射方向;圆形的半径为 20 nm.优化所得结构与以 800 nm 为例的电场幅值分布如图 7(a)–(f) 所示.聚焦效率如图 8(a)–(c) 所示,由于每个形状具有不同的特点,所以在有限的迭代次数所得到最佳的聚焦波长是

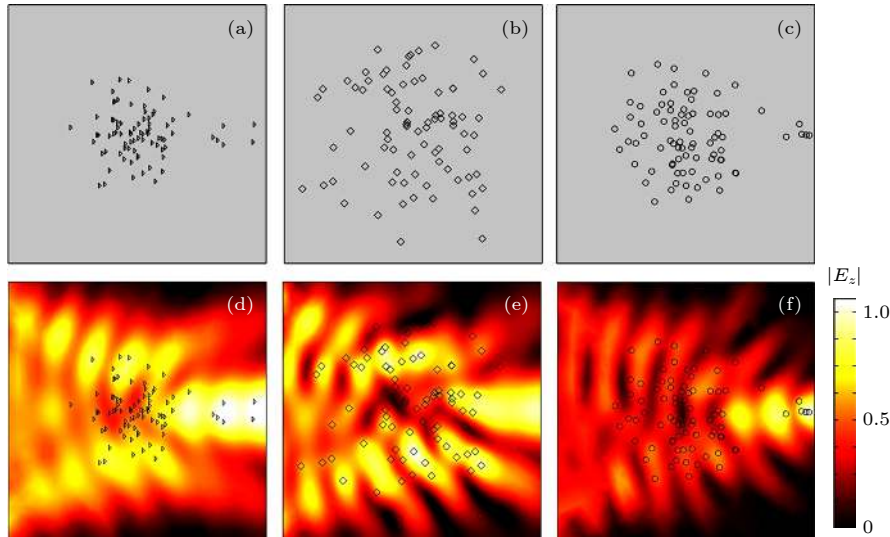


图 7 纳米柱结构与 800 nm 场幅值分布 (a) 三角形结构; (b) 菱形结构; (c) 圆形结构; (d) 三角形结构场幅值分布; (e) 菱形结构场幅值分布; (f) 圆形结构场幅值分布

Fig. 7. Nanoparticle structure and distribution of the electric field intensity at 800 nm: (a) Triangular structure; (b) rhombic structure; (c) circular structure; (d) the electric field intensity distribution of triangular structure; (e) the electric field intensity distribution of rhombic structure; (f) the electric field intensity distribution of circular structure.

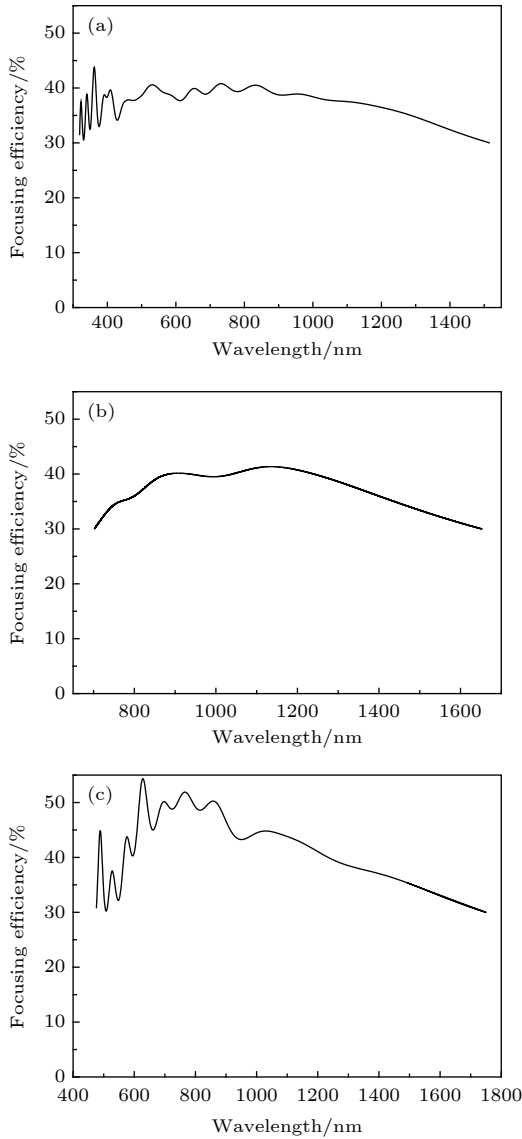


图 8 聚焦效率 (a) 三角形结构; (b) 菱形结构; (c) 圆形结构
 Fig. 8. Focusing efficiency: (a) Triangular structure; (b) rhombic structure; (c) circular structure.

不同的, 三角形结构可实现在 319—1515 nm 波段 30% 以上的聚焦效率, 平均聚焦效率为 39.09%; 菱形结构可实现在 702 nm 至 1653 nm 波段 30% 以上的聚焦效率, 平均聚焦效率为 37.14%; 圆形结构可实现在 475—1750 nm 波段 30% 以上的聚焦效率, 平均聚焦范围为 40.82%. 如果增加迭代次数可得到更相近的结果.

以同样的方式, 探究了光在聚焦后的传播问题. 以圆形结构, 波长为 800 nm 为例, 电场幅值分布如图 9(a) 所示, 传播效率如图 9(b) 所示. 同样发现光经过聚焦区域后能耦合进入波导, 能量可沿着波导高效传播, 与正方形纳米柱结构所得结论

一致. 这一特点意味着由其他纳米柱结构排列而成的纳米透镜均可实现微米级光斑的进一步聚焦, 且可将聚焦后的光直接耦合进入波导, 并可实现片上集成.

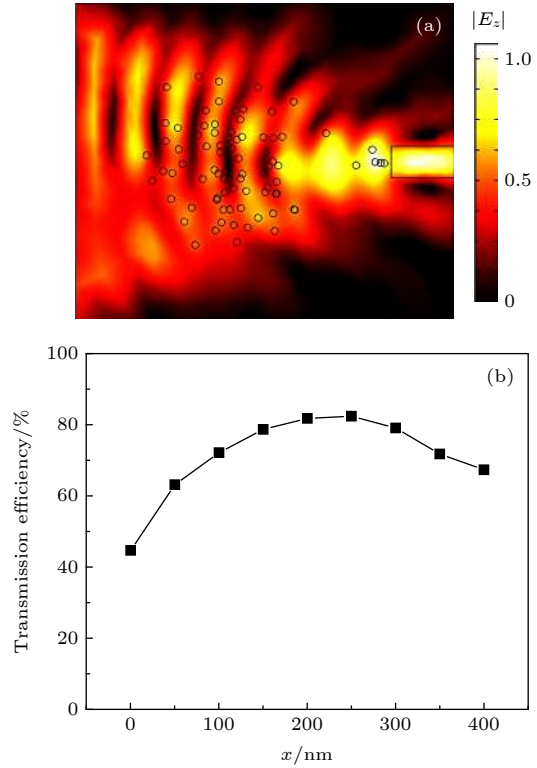


图 9 (a) 聚焦光的波导耦合输出; (b) 光经透镜后在波导中的传播效率
 Fig. 9. (a) Waveguide coupling output of focused light; (b) propagation efficiency of light in a waveguide after passing through the lens.

4 结 论

本文将遗传算法与有限元算法结合, 设计宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜. 透镜的尺寸仅为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 满足高密度集成的需求. 仿真结果表明正方形纳米介质柱透镜在 470 nm 至 1734 nm 波段最高可实现 55% 以上的聚焦效率, 最低为 30%, 平均聚焦效率为 42.1%; 在不另加任何材料和制备工艺的前提下, 在原基片的透镜聚焦区域加设一条 200 nm 的波导后, 光束可保持聚集不散, 能量可沿着波导高效传播, 最终耦合效率可达 80% 以上; 通过波导的再次聚焦能将大小为 $2 \mu\text{m}$ 的激光光束通过透镜与波导的耦合聚焦成 200 nm 以下的光束. 可见, 该结构能实现将微米量级的光斑进一步聚焦缩小成百纳米量级, 可用于激光束的聚

焦,并能直接片上集成.同时,通过对三角形、菱形、圆形其他三种纳米柱结构进行智能排列,经过同样方法研究,得到了相近的聚焦结果和耦合传播效率,证明了该智能算法的普适性.该工作为宽带高效的纳米透镜的设计提供了一种新的方法,也为实现高密度集成的纳米光子器件提供了新策略.

参考文献

- [1] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, Jin W, Vucković J, Rodriguez A W 2018 *Nat. Photonics* **12** 659
- [2] Tanemura T, Balram K C, Ly-Gagnon D S, Wahl P, White J S, Brongersma M L, Miller D A B 2011 *Nano Lett.* **11** 2693
- [3] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [4] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, Oh J, Zhu A Y, Capasso F 2016 *Science* **352** 1190
- [5] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, Stein A, Yu N 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 1081
- [6] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, Lu C C, Wang H Q, Wu Y, Hu X Y, Liu Y C, Zhang H Y, Zhang X D 2019 *Optica* **6** 1367
- [7] Lu C C, Liu Z H, Wu Y, Xiao Z Y, Yu D Y, Zhang H Y, Wang C Y, Hu X Y, Liu Y C, Liu X Y, Zhang X D 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1902018
- [8] Wang H Q, Gong Q H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214202 (in Chinese) [王慧琴, 龚旗煌 2013 物理学报 **62** 214202]
- [9] Wang H Q, Fang L G, Wang Y F, Yu A L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014203 (in Chinese) [王慧琴, 方利广, 王一凡, 余奥列 2011 物理学报 **60** 014203]
- [10] Liu Z D, Wang H Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1648 (in Chinese) [刘正东, 王慧琴 2009 物理学报 **58** 1648]
- [11] Wang H Q, Ou Y H, Han D F, Wang Y F 2011 *Optoelectronics Lett.* **7** 179
- [12] Wang H Q, Liu Z D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2281 (in Chinese) [王慧琴, 刘正东 2006 物理学报 **55** 2281]
- [13] Anderson P W 1958 *Phys. Rev.* **109** 1492
- [14] John S 1991 *Phys. Today* **44** 32
- [15] Cao H, Xu J Y, Seelig E W, Chang R P H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2997
- [16] Lu J, Vucković J 2013 *Opt. Express* **21** 13351
- [17] Forrest S 1993 *Science* **261** 872
- [18] Goh J, Fushman I, Englund D, Vucković J 2007 *Opt. Express* **15** 8218
- [19] Zhang J J, Ji Y, Yao D C, Chen J B 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 789 (in Chinese) [张静娟, 姬扬, 姚德成, 陈俊本 1996 物理学报 **45** 789]

Broadband efficient focusing on-chip integrated nano-lens*

Tian Zi-Cong¹⁾ Guo Yi-Min¹⁾ Hu Chen-Yan¹⁾

Wang Hui-Qin^{1)†} Lu Cui-Cui²⁾

¹⁾ (*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

²⁾ (*School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(Received 19 June 2020; revised manuscript received 18 August 2020)

Abstract

As a basic optical element, optical lens is widely used for realizing the focusing, imaging and optical communication systems. Light of different wavelengths will propagate at different speeds. A beam of polychromatic light will produce chromatic dispersion after passing through a single optical device, which prevents the ordinary lenses from focusing the light of different wavelengths into a point. This means that the light of different wavelengths cannot be focused ideally. Traditional focusing systems can solve this problem by superimposing multiple lenses, but this is at the expense of increasing the complexity, weight, and cost of the system, and is not suitable for highly integrated nano-optical systems. At present, a better solution is to use the plane metalens, that is, using the metasurface to control the amplitude, phase and polarization at each point in space. However, the plane metalens is difficult to directly integrate on the chip. An intelligent algorithm developed by combining finite element method with genetic algorithm is used to optimize the design of multi-channel on-chip wavelength router devices and polarization router devices. In this paper, combining with years' research results of the theory of multiple scattering coherent superposition of disordered media, the use of intelligent algorithm to design an on-chip integrated nano-lens that can achieve efficient focusing from the visible to the near infrared band. In the lens structure SiO₂ serves as a substrate, and the arrangement structure of SiC rectangular column is designed. The substrate size is only 2 μm × 2 μm. The lens achieves low-dispersion focusing in the band from 470 nm to 1734 nm, with a focusing efficiency of over 55% at the highest level and 30% at the lowest level, and an average focusing efficiency of 42.1%. A 200-nm waveguide is added behind the focusing region. After refocusing through the waveguide, the laser beam with a size of 2 μm can be focused by the coupling of the lens and the waveguide into a beam below 200 nm in size. The focusing efficiency goes up to 80%. At the same time, the intelligent algorithm can be applied to different types of structures. The focusing lens structures composed of triangle, diamond, or circular nano columns are designed, which can achieve an approximate focusing effect and efficient coupling propagation efficiency. This work provides important ideas for developing broadband and efficient focusing nano-lens, as well as a new way to achieve the high-density integrated nanophotonic devices.

Keywords: nano-lens, broadband efficient focusing, on-chip integration, intelligent algorithm

PACS: 42.15.Eq, 42.25.Fx, 42.82.-m, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.69.20200948

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91850117).

† Corresponding author. E-mail: hqwan@ncu.edu.cn