

## 基于全局拓扑优化深度学习模型的超构光栅分束器

邓人隽, 史 坦, 李向平, 邓子岚

(暨南大学 光子技术研究院 广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632)

**摘要:** 将深度学习模型应用于超构光栅分束器的逆向设计, 可以在全局范围内获得具有良好均匀性和高衍射效率的结构。利用基于全局拓扑优化的深度学习模型, 围绕超构光栅分束器的结构设计和衍射效率及均匀性等光学性能展开了一系列的研究。在波长为 900 nm 的入射光下, 基于全局拓扑优化深度学习模型设计出大角度高衍射效率超构光栅分束器, 设计的分束角为 120° 与 150° 时衍射效率分别达到 95% 与 85%。

**关键词:** 超构光栅; 分束器; 深度学习

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211028

## Global topology optimized metagrating beam splitter based on deep learning

Deng Renjun, Shi Tan, Li Xiangping, Deng Zilan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** With the help of the deep learning model applied in the inverse design of the metagrating beam splitter, good uniformity and high diffraction efficiency can be obtained. The structure design, diffraction efficiency and uniformity of the metagrating beam splitter was studied by using the global topology optimization neural networks. Under the working wavelength of 900 nm, the beam splitter with splitting angle of 120° and 150° designed based on the global topology optimization networks had high diffraction efficiencies of 95% for 120° and 85% for 150°.

**Key words:** metagrating; beam splitter; deep learning

分束器是一个重要的衍射光学元件, 在干涉仪、光子晶体等领域都有着广泛的应用。分束器有着高衍射效率和高均匀性的要求。近年来, 人们对衍射光分束器进行了广泛研究, 如 Lingwei Guo 等人提出了一种大型高效的 1×9 达曼光栅分束器<sup>[1]</sup>; Dong Cheon Kim 等人使用伴随态方法<sup>[2]</sup>优化光学元件的拓扑结

构, 得出高性能、多功能的广角衍射分束器<sup>[3]</sup>; Jinzhe Li 等人提出了新的矢量迭代傅里叶变换算法 (IFTA) 来实现准连续超表面分束器的设计<sup>[4]</sup>。

为了满足分束器在高衍射效率和高均匀性方面的要求, 文中基于全局拓扑优化的深度学习模型<sup>[5]</sup>对超构光栅分束器展开了一系列的研究。基于全局拓

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62075084); 广东省珠江人才创新团队项目 (2016ZT06D081); 广东省科学基金面上项目 (2020A1515010615); 广州市基础与应用基础研究项目 (202102020566); 中央高校基本业务费 (21620415)

作者简介: 邓人隽, 男, 本科生, 主要研究方向为超构光栅。

导师简介: 李向平, 男, 教授, 博士, 主要研究方向为等离激元、超分辨、激光加工、光存储。

邓子岚, 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为微纳光子学、电磁超构材料、新型光场调控。

扑优化的深度学习模型的结构如图 1(a) 所示, 由两个密集连接层和四个转置卷积层依次连接而成, 其输出结果为由 100 个超构光栅分束器的设计参数构成的张量  $n$ , 用以表示超构光栅每个周期的折射率分布; 输入的参数为入射高斯光束的波长  $\lambda$  和分束光的偏折角

$\theta$ , 以及和张量  $n$  大小维度完全相同的随机生成的张量  $z$ 。超构光栅分束器由一系列厚度为 325 nm 的 Si 柱子和 SiO<sub>2</sub> 衬底组成, 如图 2(b) 所示。超构光栅分束器的衍射效率  $\eta$  和均匀性  $UE$  的定义为:

$$\eta = \eta_1 + \eta_{-1} \tag{1}$$

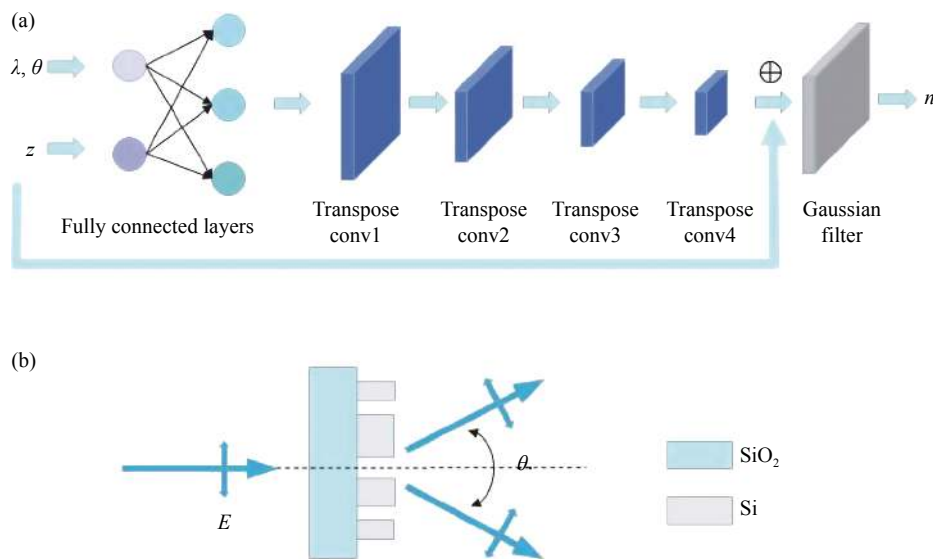


图 1 (a) 深度学习模型示意图; (b) 超构光栅分束器示意图

Fig.1 (a) Schematic diagram of deep learning model; (b) Schematic diagram of metagrating beam splitter

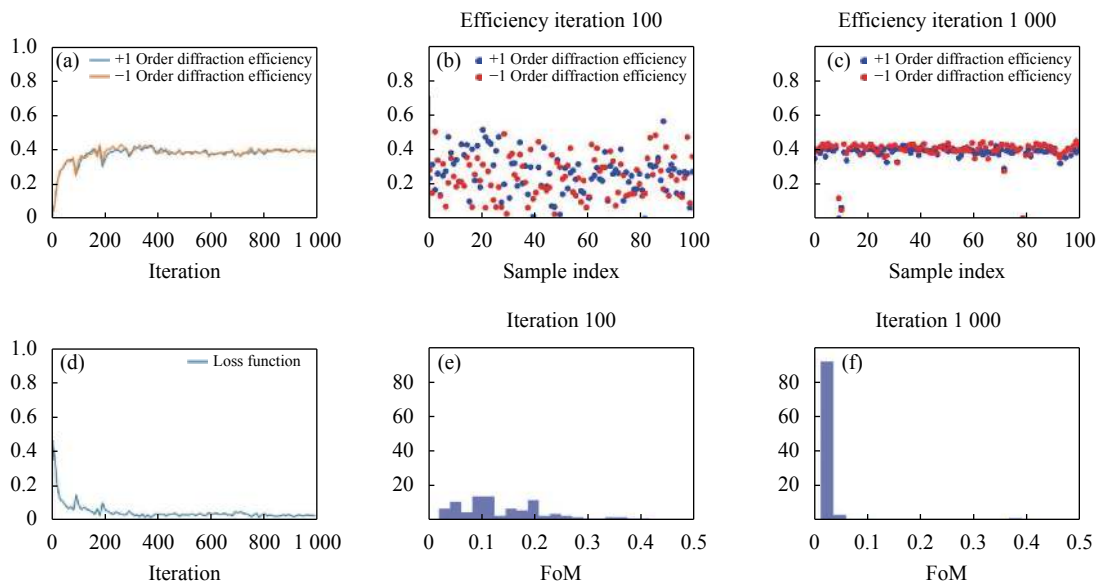


图 2 偏折角为 150° 的超构光栅分束器对应的衍射效率和目标函数值。(a)、(d) 超构光栅分束器平均衍射效率和平均目标函数值随训练次数的变化; (b)、(c) 训练 100 次和 1000 次时超构光栅分束器的衍射效率分布; (e)、(f) 训练 100 次和 1000 次时超构光栅分束器的目标函数值分布

Fig.2 Diffraction efficiency and target function of metagrating beam splitter with deflection angle 150°. (a), (d) Average diffraction efficiency and the average target function values of the metagrating beam splitter vs training times; (b), (c) Distribution of diffraction efficiency of the metagrating beam splitter after 100 and 1000 times of training; (e), (f) Distribution of target function values of the metagrating beam splitter after 100 and 1000 times of training

$$UE = \frac{|\eta_1 - \eta_{-1}|}{\eta_1 + \eta_{-1}} \quad (2)$$

式中:  $\eta_1$ 、 $\eta_{-1}$ 为+1级和-1级的衍射效率。根据分束器+1衍射级和-1衍射级的衍射效率,定义了描述超构光栅分束器衍射效率和均匀性的目标函数(即深度学习模型中的损失函数):

$$FoM = (\eta_1 - \eta_{tgt})^2 + (\eta_{-1} - \eta_{tgt})^2 \quad (3)$$

式中:  $\eta_{tgt}$ 为目标衍射效率。在深度学习模型的每一次训练中,  $FoM$ 关于神经网络每一个权重值的偏导数将会调整该权重值,使深度学习模型朝着最小化损失函数的方向优化,从而使超构光栅分束器的两个衍射级的衍射效率趋向于目标衍射效率。

设定工作波长为 900 nm,分束光的偏折角设置为 150°, +1级和-1级的目标衍射效率均设置为 50%, 训练次数为 1000 次。深度学习模型运行结果如图 2 所示。随着训练次数的增加,由图 2(d)可以看出深度学习模型的目标函数减小至趋近于 0,而超构光栅分束器的两个衍射级的平均衍射效率均稳定在

40%左右,如图 2(a)所示。而图 2(b)和图 2(c)则分别表示当训练次数为 100 和 1000 时的 100 个超构光栅分束器的衍射效率,蓝点表示+1级的衍射效率,红点表示-1级的衍射效率。当训练 100 次时,超构光栅分束器的衍射效率分布较为散,而当训练 1000 次时,大部分超构光栅分束器两个衍射级的衍射效率都集中在 40% 附近,因此具有良好的均匀性。图 2(e)和图 2(f)则表示当训练次数为 100 和 1000 时超构光栅分束器对应的目标函数值分布,当训练完 1000 次时,超构光栅分束器对应的目标函数值绝大部分都很接近 0。

为了进一步验证超构光栅分束器的实际光学性能,将分束光的偏折角设置为 150°和 120°,各训练 1000 次后从结果中选取了(150°时 $\eta_1$ 和 $\eta_{-1}$ 为 41.25%和 43.68%, $\eta$ 为 84.93%, $UE$ 为 1.5%; 120°时 $\eta_1$ 和 $\eta_{-1}$ 为 48.28%和 46.85%, $\eta$ 为 95.13%, $UE$ 为 2.86%)最优超构光栅分束器,使用 FDTD Solutions 仿真软件进行了全波模拟,得出超构光栅分束器的场分布,如图 3 所示。图 3(a)、图 3(b)分别表示偏折角为 120°和 150°时

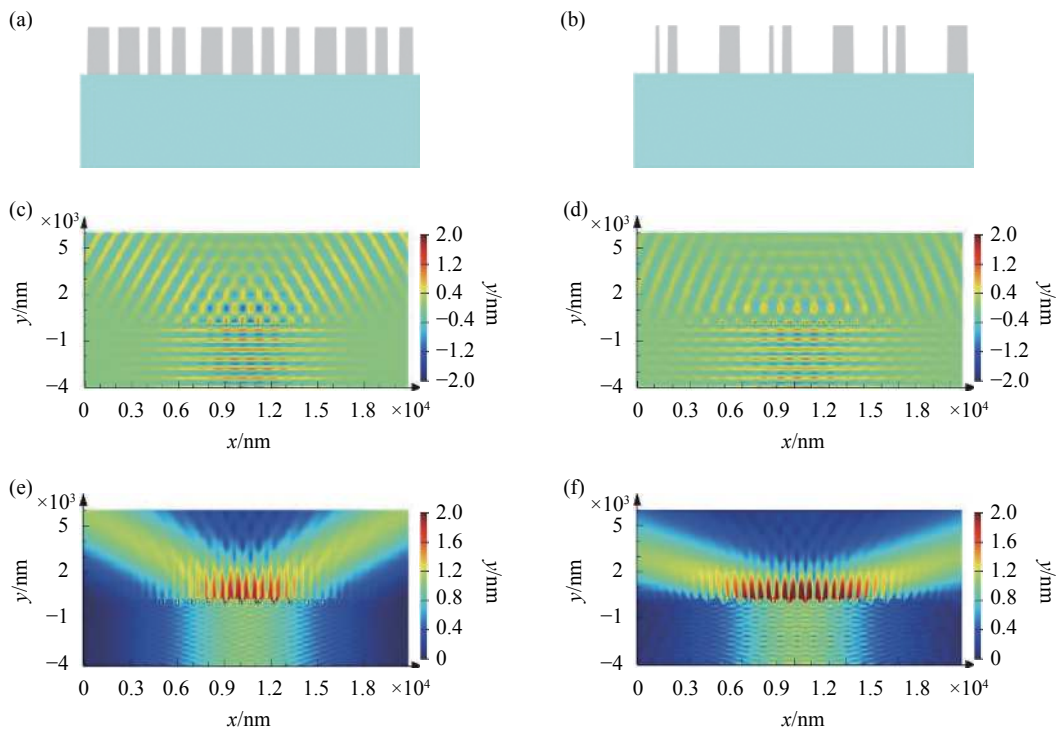


图 3 偏折角为 120°和 150°时对应的超构光栅分束器结构和全波模拟结果。(a)、(b)偏折角为 120°和 150°时对应的超构光栅分束器结构; (c)、(d)偏折角为 120°和 150°时对应的超构光栅分束器的 $E_x$ 分布; (e)、(f)偏折角为 120°和 150°时对应的超构光栅分束器的场分布

Fig.3 Structure and the full wave simulation results of the metagrating beam splitter with deflection angle of 120° and 150°; (a), (b) Structure of the metagrating beam splitter with the deflection angle of 120° and 150°; (c), (d)  $E_x$  distribution of the metagrating beam splitter with the deflection angle of 120° and 150°; (e), (f) Electric field distribution of the metagrating beam splitter with the deflection angle of 120° and 150°

超构光栅每个周期的结构,图 3(c)、图 3(d)分别表示偏折角为  $120^\circ$ 和  $150^\circ$ 时超构光栅分束器的  $E_x$ 分布,图 3(e)、图 3(f)分别表示偏折角为  $120^\circ$ 和  $150^\circ$ 时超构光栅分束器的场分布。这些结果表明基于全局拓扑优化深度学习模型设计出的超构光栅分束器实现了良好的均匀性和较高的衍射效率。

#### 参考文献:

- [1] Guo Lingwei, Wang Jin. A high-diffraction-efficiency subwavelength silica Dammann grating [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 157: 319-325.
- [2] Dong Cheon Kim, Andreas Hermerschmidt, Pavel Dyachenko, et al. Inverse design and demonstration of high-performance wide-angle diffractive optical elements [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22321-22333.
- [3] Liu Yongqiang, Che Yongxing, Qi Kainan, et al. Design and demonstration of a wide-angle and high-efficient planar metasurface lens [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126061.
- [4] Li Jinzhe, Zhang Fei, Pu Mingbo, et al. Quasi-continuous metasurface beam splitters enabled by vector iterative Fourier transform algorithm [J]. *Materials*, 2021, 14(4): 1022.
- [5] Jiang J, Fan J A. Global optimization of dielectric metasurfaces using a physics-driven neural network [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5366-5372.