

基于逆向设计的片上太赫兹解复用器和光栅耦合器

朱国锋, 戴圳镛, 居学尉, 钟舜聪, 王向峰, 黄峰*

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

摘要 太赫兹解复用器和光栅耦合器的传统构建方法需借助经典理论和经验计算, 故它们的设计流程复杂, 而且性能依赖于单元结构参数。随着逆向设计方法的提出及应用, 该方法可以在限定大小的基片上设计出符合功能需求的器件结构。基于此, 将逆向设计方法应用于太赫兹解复用器和光栅耦合器的设计, 器件的尺寸分别为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ 。FDTD(Finite-Difference Time-Domain)的仿真结果表明, 太赫兹解复用器能够将一束含两种频率的太赫兹波完美地从两个端口分离, 并且透射率在 0.500 THz 和 0.417 THz 频率处均高达 0.75 以上, 其相邻通道间的串扰低于 -19 dB 。太赫兹光栅耦合器的耦合效率在 0.32 THz 频率处高达 0.85 。

关键词 集成光学; 太赫兹; 逆向设计; 解复用器; 光栅耦合器; FDTD

中图分类号 TN629.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0913001

On-Chip Terahertz Demultiplexer and Grating Coupler Based on Reverse Design

Zhu Guofeng, Dai Zhenrong, Ju Xuwei, Zhong Shuncong, Wang Xiangfeng, Huang Feng*

School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China

Abstract The traditional construction methods of terahertz demultiplexers and grating couplers need to be calculated with the help of classical theory and experience, so their design flow is complex, and their performance depends on the unit structure parameters. With the proposal and application of reverse design method, the device structure that meets the functional requirements can be designed on a limited size substrate. Based on this, the reverse design method is applied to the design of terahertz demultiplexer and grating coupler with dimensions of $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ and $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$, respectively. The simulation results of finite-difference time-domain (FDTD) show that the terahertz demultiplexer can perfectly separate a beam of terahertz waves with two frequencies from two ports, and the transmittance is more than 0.75 at 0.500 THz and 0.417 THz , and the crosstalk between adjacent channels is less than -19 dB . The coupling efficiency of the terahertz grating coupler is as high as 0.85 at 0.32 THz .

Key words integrated optics; terahertz; reverse design; demultiplexer; grating coupler; FDTD

1 引言

太赫兹技术在传感、无损检测、光谱学、医学成像、生物学和通信等众多领域有着广阔的应用前景^[1-4]。现有的太赫兹系统都是由许多分立的光学元件组成, 与现代集成光学系统相比具有体积大、价格昂贵的特点。传统太赫兹功能器件一般是基于光

学和微波波段的经验和设计理论设计的, 通过调节单元结构的特征参数可以将特定功能与适合的应用匹配, 现已存在一个丰富且应用广泛的模板库, 如基于频率选择表面设计的太赫兹带通滤波器^[5]、基于时域有限差分法设计的线栅型偏振片^[6]以及基于等离子体边缘设计的可调谐太赫兹高通滤波器^[7]等。然而基于上述方法设计的太赫兹器件的尺寸受限于

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-11-09; 录用日期: 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51675103)、福建省科技厅引导项目(2019H0005)

通信作者: *huangf@fzu.edu.cn

自成像解析理论的计算值, 所以其无法满足小型化、集成化的设计需求。因此, 小型化、集成化、高性能的片上太赫兹功能器件对实现太赫兹技术的广泛应用具有重大的研究价值。

随着逆向设计方法的提出及发展, 光学领域逐渐出现了一些利用该方法设计的具有非规则结构和小体积的光学器件^[8-9], 这是从目标性能出发, 即通过逆向设计方法在限定大小的基片上设计出符合功能需求的器件结构^[10]。当前, 逆向设计方法已在光学研究中得到大量的应用, 如基于直接二进制搜索(DBS)算法设计的偏振分束器^[11]、基于遗传算法设计的纳米光子波长路由器^[12]和基于目标优先式算法设计的多通道聚焦波长解复用器^[13]。近年来, 对于逆向设计方法在太赫兹波段的相关研究也有新的进展^[14]。

波分解复用器可以有效扩展传输容量, 有利于提高光学系统的集成度。利用光子晶体谐振腔实现解复用器是目前比较常见的手段^[15-17], 这可以实现低插入损耗和高透射率。Pan 等^[18]设计出基于超材料的太赫兹解复用器, 其在 0.225 THz 和 0.410 THz 的频率下插入损耗分别为 0.07 dB 和 0.11 dB, 说明该器件能够实现两种频率的完美分离并且可调谐。Li 等^[19]通过定向耦合方式实现了 4 通道的太赫兹解复用器, 其透射率可达 0.9 以上。光栅耦合器是光学集成系统中必不可少的元器件, 用于将电磁波耦合至光学系统中。刘萌等^[20]构建了一种基于亚波长线光栅的高效垂直光栅耦合器, 其在 1550 nm 波长下耦合效率可达 0.91。Chen 等^[21]设计并制作了二维光栅耦合器, 其耦合损耗在 1310 nm 波长下可达 -2.37 dB, 并且具有较小的偏振相关损耗。Zhang 等^[22]设计了一种二维变迹光栅耦合器, 其耦合效率理论上可达 0.645, 并且偏振相关损耗低于 0.04 dB。

然而, 解复用器和光栅耦合器的传统构建方法需借助经典理论和经验计算, 故它们的设计流程复杂, 并且性能依赖于单元结构参数。本文通过逆向设计方法设计了太赫兹解复用器和光栅耦合器, 设计过程具有简易高效的优点, 设计的解复用器具有较高的透射率并且带宽可优化, 光栅耦合器的耦合效率高达 0.85, 器件尺寸小, 有利于系统的集成化。逆向设计方法可以为一些难以通过传统方法和理论设计的太赫兹器件提供解决方案。

2 逆向设计方法

传统的正向设计方法是基于特定的解析理论提

出的。基于光子晶体结构的太赫兹解复用器是先利用平面波展开法计算其色散曲线, 然后提取色散曲线中的传播常数, 并将其代入自成像条件^[23]中以计算其自成像位置, 之后根据自成像位置来设计的。当器件的应用范围扩大到宽频带、非线性现象和集成系统时, 传统的正向设计方法将会受到严峻的挑战, 特别是在非线性器件的优化过程中需要同时优化几个互相依赖的特征参数, 这对设计人员的经验提出了更高的要求。逆向设计方法从器件的目标功能出发, 通过算法优化来设计器件的结构。由于逆向设计方法通过算法来搜索整个设计空间, 所以可以得到非周期的拓扑结构, 这些复杂的非周期结构可以实现更优的器件性能, 同时由于设计空间大大扩展, 故器件的几何尺寸可以设计得更小。本文根据逆向设计原理构建了一种基于目标优先式算法和时域有限差分(FDTD)法的逆向设计方法。FDTD 用于数值计算器件结构的电磁场, 将得到的电场和能量信息反馈给优化函数中以进行下一步优化。目标优先式算法用于寻找结构的优化方向。这种逆向设计方法可以设计出任意不规则的结构, 因此适用于设计集成系统中功能较为复杂的太赫兹器件。

目标优先式算法首先使器件符合目标电场分布, 然后使用算法来优化其所产生的物理残余并生成最优结构。逆向设计算法的优化形式为

$$\min[\sum_i^N f_i(x_i) + g(z)],$$

$$A_i(z)x_i - b_i(z) = 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

式中: N 为迭代优化次数; x_i 为电场变量; z 为结构变量, 本文中其为介电常数; $f_i(x_i)$ 为电场目标函数; $g(z)$ 为结构目标函数; $A_i(z)x_i - b_i(z)$ 为物理残余, 其为频域麦克斯韦方程组的线性代数描述形式, 即

$$\nabla\mu_0^{-1}\nabla E - \omega^2\epsilon E = -i\omega J, \quad (2)$$

式中: ∇ 为梯度算子; E 为电场; J 为激励电流; ω 为角频率; μ_0 为真空中的磁导率; ϵ 为介电常数。为了将式(2)简化成式(1), 可以用代数符号进行替换, 即 $E \rightarrow x$, $\epsilon \rightarrow z$, $\nabla\mu_0^{-1}\nabla(-\omega^2\epsilon) \rightarrow A(z)$, $-i\omega J \rightarrow b$, 其中 \rightarrow 代表替换操作。

在目标优先式算法的优化过程中, 首先通过式(2)来求出满足目标性能的介电常数^[24], 这样可以使器件结构直接符合目标电场分布, 但会造成麦克斯韦方程组出现物理残余, 即式(1)不等于零, 物理残余不为零会使最终电场值与理想电场值出现偏差。因此本文利用交替方向乘子(ADMM)法对结

构和电场进行交替优化^[25]以确认下一个结构,利用 FDTD 法进行仿真并计算其目标函数值。不断迭代优化,直到物理残余小于定值或者达到迭代次数,迭代终止后算法便自动生成符合目标性能的 GDS (Graphic Data System) 格式的太赫兹功能器件布局图。

基于目标优先式算法和有限差分法的逆向设计流程分为 4 个步骤:1)定义初始结构的优化区域及

目标函数;2)采用目标优先式算法交替对电场和介电常数进行优化,其优化方向是根据目标函数对电场与介电常数的导数来确定的,当优化达到终止条件时停止迭代;3)随后对连续变化的介电常数进行离散化(二值化)处理,得到只有硅和空气两种介质的结构;4)最终生成格式为 GDS 的太赫兹器件结构。逆向设计方法的流程如图 1 所示,其中 $\nabla_{xi}f$ 和 $\nabla_z g$ 分别为目标函数对电场和介电常数的导数。

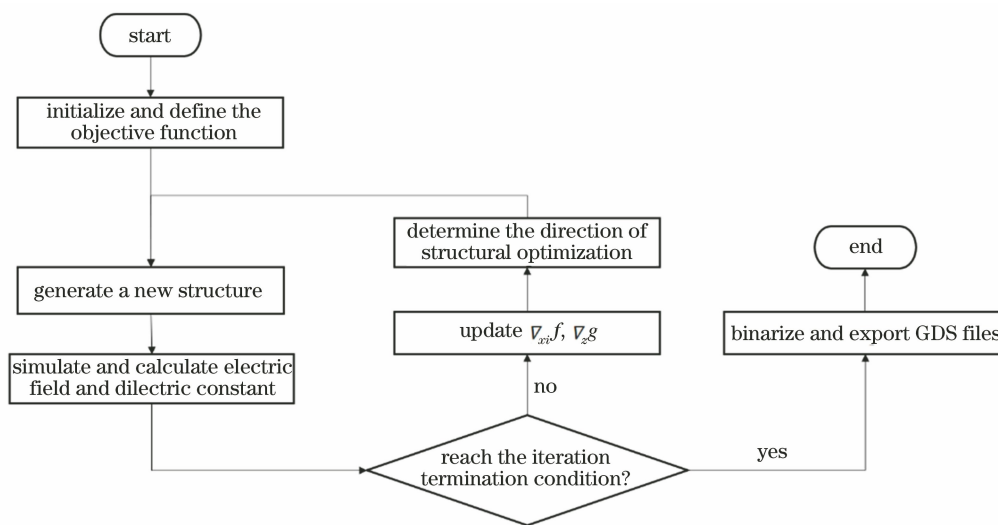


图 1 逆向设计方法的流程

Fig. 1 Flowchart diagram of reverse design method

3 太赫兹解复用器的优化仿真及结果分析

本文所设计的太赫兹解复用器可将两束频率分别为 0.500 THz 和 0.417 THz、偏振态为 TE

(Transverse Electric)的太赫兹波从两个不同端口输出。整个器件结构分为输入波导、正方形耦合区域(算法优化区域)及输出波导三个部分,初始结构布局如图 2(a)和图 2(b)所示,其中 E_{THz} 为太赫兹电场分量。正方形耦合区域的边长 L_2 为 3 mm,两

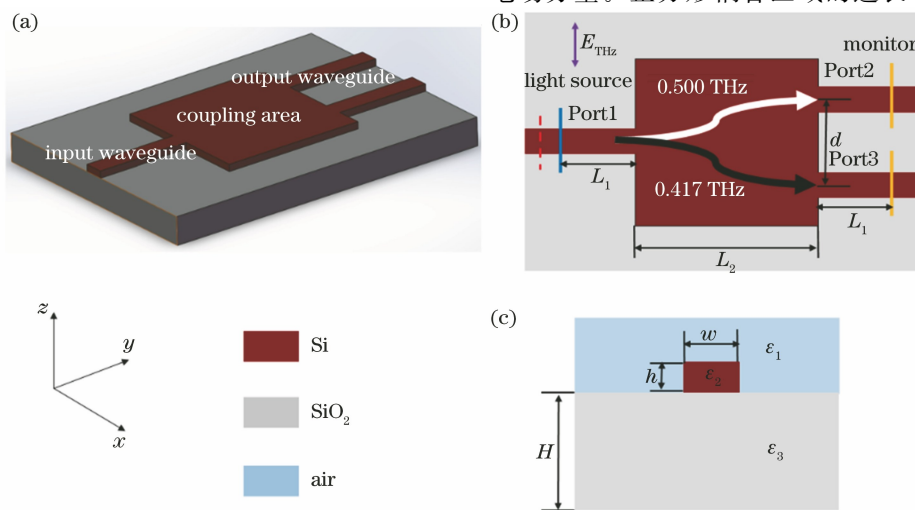


图 2 太赫兹解复用器的初始布局图。(a)初始的三维结构;(b)结构的俯视图;(c)波导结构的截面图

Fig. 2 Initial layout diagram of terahertz demultiplexer. (a) Initial three-dimensional structure; (b) top view of structure; (c) section view of waveguide structure

个输出波导中心之间的距离 d 为 1.5 mm, 输入、输出波导的宽度 w 和高度 h 均为 400 μm 和 200 μm ^[26], 空气、高阻硅和二氧化硅的介电常数分别为 $\epsilon_1=1$ 、 $\epsilon_2=11.7$ 和 $\epsilon_3=3.8$, 高阻硅的折射率为 3.42, 所以太赫兹解复用器的尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 200 μm 。图 2(c) 为垂直于输入波导方向的截面图, 其中二氧化硅起到绝缘和支撑的作用。

因为不同频率的太赫兹波在两个端口的透射率对于解复用器来说非常重要, 所以在整个优化过程中目标函数定义为

$$x_{\text{FOM}} = (1 - T_1)^2 + (1 - T_2)^2, \quad (3)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为 0.500 THz 和 0.417 THz 频率的太赫兹波在 Port2、Port3 输出端口的透射率。目标函数值越小, 代表不同频率的太赫兹波在两个端口的透射率越高。

随后将初始结构参数与目标函数导入逆向设计

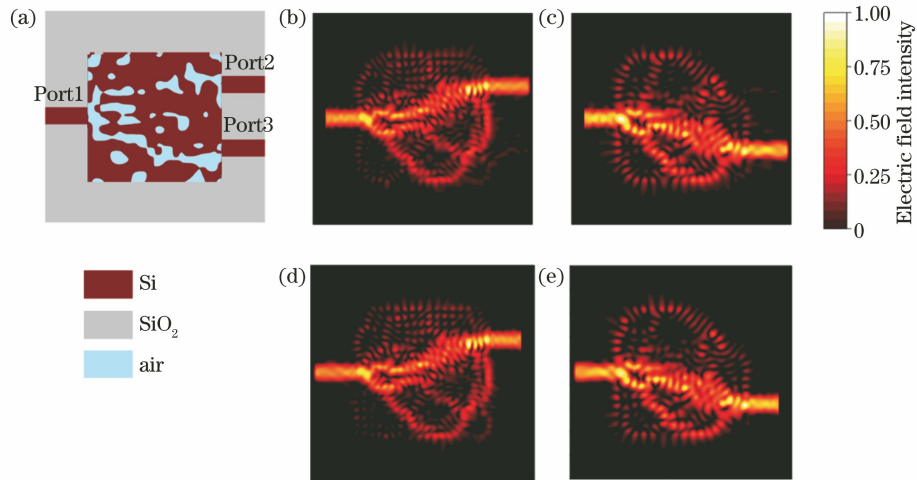


图 3 太赫兹解复用器优化后的结构和电场强度分布图。(a) 器件俯视图; (b) 太赫兹波从 Port1 入射, 0.500 THz 频率的电场强度图; (c) 太赫兹波从 Port1 入射, 0.417 THz 频率的电场强度图; (d) 太赫兹波从 Port2 入射, 0.500 THz 频率的电场强度图; (e) 太赫兹波从 Port3 入射, 0.417 THz 频率的电场强度图

Fig. 3 Optimized structure and electric field intensity distribution of terahertz demultiplexer. (a) Top view of device; (b) electric field intensity diagram of 0.500 THz frequency for terahertz wave incident from Port1; (c) electric field intensity diagram of 0.417 THz frequency for terahertz wave incident from Port1; (d) electric field intensity diagram of 0.500 THz frequency for terahertz wave incident from Port2; (e) electric field intensity diagram of 0.417 THz frequency for terahertz wave incident from Port3

本文还对该器件进行了宽频带 (0.355 ~ 0.590 THz) 的仿真并计算其透射率, 结果如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可以看到: 频率为 0.500 THz 的太赫兹波在 Port2 端的透射率达到 0.93, 在 Port3 端的透射率仅为 0.02, 由于一部分能量被散射到四周, 因此透射率的总和不为 1; 频率为 0.417 THz 的太赫兹波在 Port3 端的透射率为 0.9, 在 Port2 端的透射率为 0.03。该器件在设计频率处具有良好的

方法进行优化, 生成的最终结构如图 3(a) 所示。耦合区域由两种介质组成, 分别为硅和空气, 空气部分可通过刻蚀硅材料得到。本文对所设计的器件在 0.500 THz 与 0.417 THz 的目标频率下利用 FDTD 进行电磁场数值模拟, 得到图 3(b) 和图 3(c) 的电场强度图。从图 3(b) 和图 3(c) 可以明显看到, 一束含有两种频率的太赫兹波从 Port1 输入端口进入到中间耦合区域, 经过耦合区域后频率为 0.500 THz 的太赫兹波从 Port2 上端口输出, 频率为 0.417 THz 的太赫兹波从 Port3 下端口输出, 仿真结果符合预期。

当电场从逆方向 (输出端口) 入射时, 所设计的器件的电场强度分布基本保持不变, 如图 3(d) 和图 3(e) 所示。因此本文利用逆向设计方法设计的器件不但能将两束不同频率的太赫兹波分离, 还能够将两束不同频率的太赫兹波合并并输出。

性能, 但偏离设计频率会导致透射率快速下降至 0.5 或更低。如果器件在制作过程中出现加工误差 (刻蚀区域偏大或者偏小), 那么设计频率会出现偏移, 这样会导致实际透射率急剧降低, 因此还需要对该器件进行带宽优化, 以保证设计频率两侧的透射率仍然保持较高的值, 将带宽优化的目标函数定义为

$$x_{\text{FOM}} = \sum_{0.484}^{0.516} (1 - T'_1)^2 + \sum_{0.401}^{0.433} (1 - T'_2)^2, \quad (4)$$

式中: T'_1 为频率从 0.484 THz 到 0.516 THz 的透射率; T'_2 为频率从 0.401 THz 到 0.433 THz 的透射率。 T'_1 和 T'_2 的频率步长均为 0.008 THz, 将目标函数代入算法中以执行多个频点的优化。优化后的透射率如图 4(b) 所示。从图 4(b) 可以看到, 虽然该器件的透射率整体上出现了下降, 但是在目标频率 0.032 THz 附近的宽频范围内都能够保持接近 0.75 以上的透射率。由此可见, 相比基于光子晶体结构设计的解复用器^[19], 本文所设计的解复用器能

够在一定的带宽内保持较好的鲁棒性, 并且尺寸更小。相邻两通道间的串扰计算公式为

$$C_{ij} = 10 \times \lg(T_{ij}), \quad (5)$$

式中: T_{ij} 为第 i 个输出端口的信号耦合到第 j 个端口的透射率。因此, 两端口的太赫兹解复用器的串扰 C_{23} 和 C_{32} 经过带宽优化后分别为 -19 dB 和 -22 dB, 在 0.500 THz 和 0.417 THz 的频率下插入损耗分别为 -0.70 dB 和 -0.66 dB。

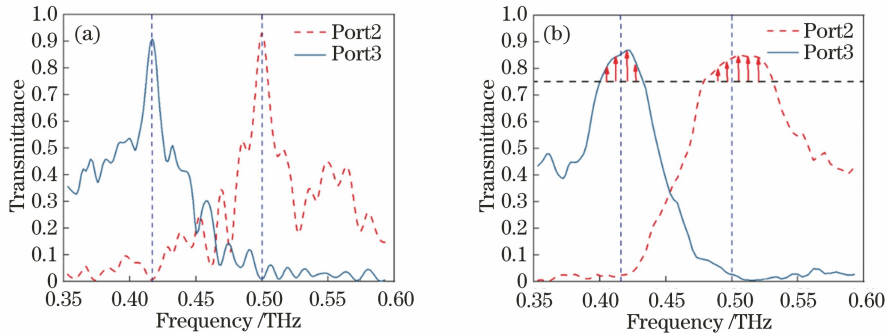


图 4 太赫兹解复用器在两输出端口的频谱图。(a) 带宽优化前; (b) 带宽优化后

Fig. 4 Spectrum diagram of terahertz demultiplexer at two output ports. (a) Before bandwidth optimization; (b) after bandwidth optimization

4 太赫兹光栅耦合器的优化仿真和结果分析

本文利用逆向设计方法设计了太赫兹光栅耦合器, 其功能是将频率为 0.32 THz、偏振态为 TE 的太赫兹波耦合至硅基波导上, 并经过锥形波导将宽

波导转化为窄波导, 最终太赫兹波从右侧的输出波导进入解复用器或其他太赫兹集成系统中。整个器件分为 4 个部分, 分别为太赫兹光源/波导、光栅耦合区域、锥形波导及输出波导, 最终的三维结构如图 5(a) 所示, 太赫兹波的传输方向如图 5(b) 所示。

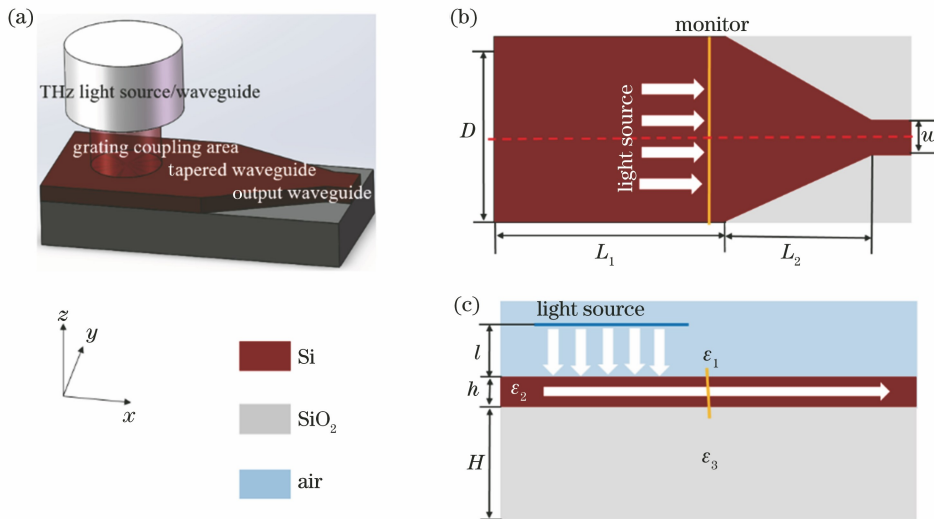


图 5 太赫兹光栅耦合器的初始布局示意图。(a) 器件的三维结构图; (b) 器件的俯视图; (c) 器件的对称截面图

Fig. 5 Schematic of initial layout of terahertz grating coupler. (a) Three-dimensional structure diagram of device; (b) top view of device; (c) symmetrical section view of device

在逆向设计方法中设置器件的初始结构参数,即光栅耦合区域的边长 $L_1 = 12 \text{ mm}$, 宽度 $D = 12 \text{ mm}$, 厚度 $h = 200 \text{ }\mu\text{m}$, 锥形波导的长度 $L_2 = 8 \text{ mm}$, 输出波导的宽度 $w = 400 \text{ }\mu\text{m}$, 所以光栅耦合器的尺寸为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 200 \text{ }\mu\text{m}$ 。光源为高斯光源, 其束腰半径 $\omega_0 = 5200 \text{ }\mu\text{m}$, 光源与光栅耦合区域之间的距离 $l = 700 \text{ }\mu\text{m}$, 监视器放在光栅耦合区域的边缘, 如图 5(b) 所示。空气的介电常数 $\epsilon_1 = 1$, 硅的介电常数 $\epsilon_2 = 11.7$, 二氧化硅的介电常数 $\epsilon_3 = 3.8$, 二氧化硅起绝缘和支撑的作用, 其厚度 $H = 500 \text{ }\mu\text{m}$ 。

设置完器件的结构参数后, 还需要设置相应的目标函数, 由于光栅仅需要优化在设计频率处的耦合效率即可, 所以在耦合器的优化过程中, 目标函数

定义为

$$x_{\text{FOM}} = (1 - T_1^*)^2, \quad (6)$$

式中: T_1^* 为 0.32 THz 频率的太赫兹波在监视器处的透射率, 即在该频率处的耦合效率。目标函数值越小, 代表不同频率的太赫兹波在对应端口的透射率越高, 即该器件的性能越好。

将设置好的初始结构参数导入逆向设计方法中, 测试目标频率为 0.32 THz , 迭代终止条件设为 400 次迭代或近 10 次的目标函数的平均变化值小于 10^{-5} 。图 6(a) 为目标函数值随迭代次数的变化曲线。从图 6(a) 可以看到, 在连续优化阶段, 虚线左半部分的迭代曲线在 107 次便停止, 表明其近 10 次的目标函数的平均变化值小于 10^{-5} , 透射率最终收敛于 0.99。

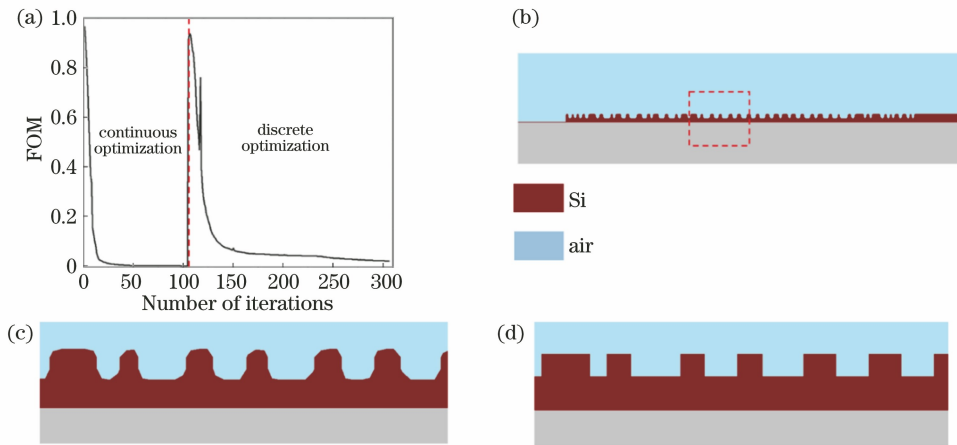


图 6 光栅耦合器的优化结构。(a) 目标函数值随迭代优化次数的变化曲线; (b) 连续优化后的光栅结构图; (c) 连续优化后的局部放大图; (d) 离散优化后的局部放大图

Fig. 6 Optimized structure of grating coupler. (a) Variation curve of objective function value with number of iterations; (b) grating structure diagram after continuous optimization; (c) local magnification map after continuous optimization; (d) local magnification map after discrete optimization

生成的连续优化结构如图 6(b) 所示, 中间耦合区域由硅和空气组成。将光栅区域中的一部分截取并放大, 得到的局部放大图如图 6(c) 所示。从 6(c) 可以看出, 上半部分的边缘轮廓呈现出凹凸不平的形状, 这增加了加工的复杂度, 为此对其进行离散优化, 使其边缘部分平整。在离散优化阶段, 在光栅槽的边缘位置进行参数化, 将原本的像素点变量更改为结构中的边缘, 并与 FDTD 中的细分网格对齐, 最终经过离散优化后, 原本凹凸不平的边缘优化成平整边缘, 如图 6(d) 所示。

最终离散优化后的结构如图 7(a) 所示, 迭代曲线如图 6(a) 中虚线右半部分的离散优化阶段。从图 6(a) 可以看到, 目标函数值最终收敛于 0.02, 表明其能量收敛于 0.85, 即光栅耦合器的耦合效率。

随后在 0.32 THz 的频率下对所设计的光栅耦合器进行电磁场仿真, 得到的电场强度分布如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可知, 在 0.32 THz 的频率下, 光栅耦合器的插入损耗为 -0.7 dB 。

从图 7(b) 可以观察到, 当光纤中的太赫兹波耦合至光栅上时, 大部分能量沿着光栅向右侧前进, 但仍有少部分能量向四周发散, 其中一部分反射至空气中, 一部分透射至二氧化硅层中, 还有很少一部分进入光栅另一侧的基底中。

5 结 论

本文提出了基于目标优先式算法的逆向设计方法, 利用这种方法设计了太赫兹解复用器与光栅耦合器。FDTD 的仿真结果表明, 所设计的太赫兹解

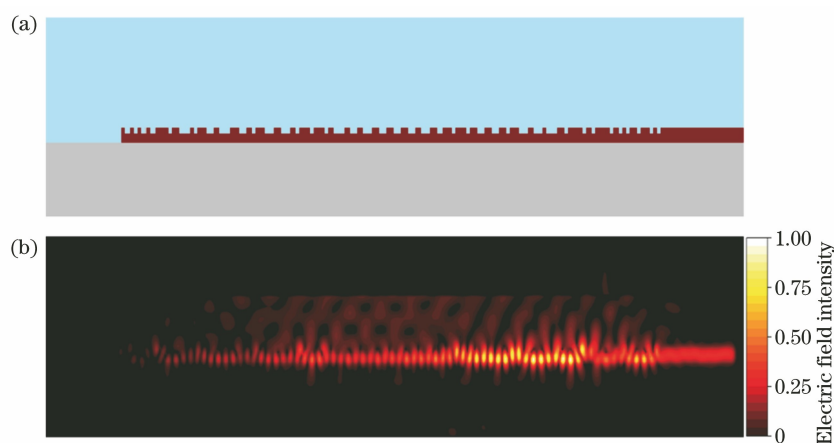


图 7 光栅耦合器的离散优化结构和仿真结果。(a)太赫兹光栅耦合器的优化结构;(b)电场强度分布图

Fig. 7 Discrete optimization structure and simulation results of grating coupler. (a) Optimized structure of terahertz grating coupler; (b) electric field intensity distribution diagram

复用器能实现目标频率在预期端口输出,具有高透射率和低通道串扰,并且可以通过算法来实现带宽优化,而太赫兹光栅耦合器具有高的耦合效率。基于逆向设计方法设计的太赫兹解复用器和光栅耦合器具有结构紧凑、集成度高的优点,在高速太赫兹通信领域具有重要的应用价值。这种设计方法可以推广应用于太赫兹开关、滤波器等太赫兹器件的设计,对未来太赫兹集成系统的发展具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Yang X, Zhao X, Yang K, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging [J]. Trends in Biotechnology, 2016, 34(10): 810-824.
- [2] Zhong S C. Progress in terahertz nondestructive testing: a review [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(3): 273-281.
- [3] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C. Terahertz band: next frontier for wireless communications [J]. Physical Communication, 2014, 12: 16-32.
- [4] Singh R, Cao W, Al-Naib I, et al. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q Fano resonances in metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(17): 171101.
- [5] Lin Y Z, Yao H Z, Ju X W, et al. Free-standing double-layer terahertz band-pass filters fabricated by femtosecond laser micro-machining [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25125-25134.
- [6] 陈燕青, 高炳攀, 林炎章, 等. 飞秒激光微加工制备金属线栅太赫兹偏振片[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0802005.
Chen Y Q, Gao B P, Lin Y Z, et al. Metal wire grid terahertz polarizer fabricated by femtosecond laser micro-machining [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0802005.
- [7] Ju X W, Hu Z Q, Huang F, et al. Tunable ultrasharp terahertz plasma edge in a lightly doped narrow-gap semiconductor [J]. Optics Express, 2021, 29(6): 9261-9268.
- [8] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer [J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 374-377.
- [9] Lalau-Keraly C M, Bhargava S, Miller O D, et al. Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21693-21701.
- [10] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics [J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 659-670.
- [11] Shen B, Wang P, Polson R, et al. An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ footprint [J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 378-382.
- [12] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, et al. Integrated nanophotonic wavelength router based on an intelligent algorithm[J]. Optica, 2019, 6(10): 1367-1373.
- [13] Huang J, Yang J B, Chen D B, et al. Implementation of on-chip multi-channel focusing wavelength demultiplexer with regularized digital metamaterials[J]. Nanophotonics, 2019, 9(1): 159-166.
- [14] He W B, Tong M Y, Xu Z J, et al. Ultrafast all-optical terahertz modulation based on an inverse-designed metasurface[J]. Photonics Research, 2021, 9(6): 1099-1108.

- [15] 潘万乐, 陈鹤鸣, 庄煜阳, 等. 基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模分-波分混合解复用器[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0413001.
Pan W L, Chen H M, Zhuang Y Y, et al. Hybrid demultiplexer for mode-wavelength division based on nanowire waveguides and one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0413001.
- [16] Rakhshani M R. Compact eight-channel wavelength demultiplexer using modified photonic crystal ring resonators for CWDM applications [J]. *Photonic Network Communications*, 2020, 39(2): 143-151.
- [17] 吴蓉, 李龙飞, 马岩岩. 六通道光子晶体波分复用器的研究与设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0323002.
Wu R, Li L F, Ma Y Y. Research and design of six-channel photonic crystal wavelength division multiplexer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0323002.
- [18] Pan W, Zhang X W, Ma Y, et al. A terahertz demultiplexer based on metamaterials applied to terahertz communication systems [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2021, 97: 13-19.
- [19] Li J S, Liu H, Zhang L. Compact four-channel terahertz demultiplexer based on directional coupling photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 248-251.
- [20] 刘萌, 郑焯, 刘文斐, 等. 基于亚波长线光栅的垂直光栅耦合器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1705002.
Liu M, Zheng X, Liu W F, et al. Design of vertical grating coupler based on sub-wavelength line gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1705002.
- [21] Chen B, Zhang X, Hu J, et al. Two-dimensional grating coupler on silicon with a high coupling efficiency and a low polarization-dependent loss [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4001-4009.
- [22] Zhang Z Y, Chen X, Cheng Q, et al. Two-dimensional apodized grating coupler for polarization-independent and surface-normal optical coupling [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 4037-4044.
- [23] Kim H J, Park I, Beom-Hoan O, et al. Self-imaging phenomena in multi-mode photonic crystal line-defect waveguides: application to wavelength demultiplexing [J]. *Optics Express*, 2004, 12(23): 5625-5633.
- [24] Lu J, Vucković J. Inverse design of nanophotonic structures using complementary convex optimization [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3793-3804.
- [25] Boyd S, Parikh N, Chu E, et al. *Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers* [M]. Hanover: Now Publishers Inc, 2011: 13-23.
- [26] Amarloo H, Safavi-Naeini S. Terahertz line defect waveguide based on silicon-on-glass technology [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(4): 433-439.