

固体浸没式红外超表面透镜设计

邓三泳¹, 岳嵩², 张东亮¹, 刘昭君¹, 李慧宇¹, 柳渊¹, 张紫辰², 祝连庆¹

- (1. 北京信息科技大学, 北京 100192;
2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 红外焦平面阵列在各类红外成像系统中发挥着巨大的作用。为提升红外焦平面的工作温度、量子效率和灵敏度, 通常使用微透镜阵列作为红外焦平面的聚光器。当前微透镜阵列的制作材料通常与红外探测器材料不同, 因此在集成装配时需要额外的工艺手段, 工艺难度较大且效率较低。利用微纳光学超表面技术体系, 可以在红外探测器衬底材料上直接制作平面式的固体浸没型微透镜阵列, 实现前置微透镜与红外焦平面的单片集成。文中以红外探测领域最有潜力的碲化物 II 类超晶格红外探测器为应用目标, 设计了一种基于 GaSb 衬底的固体浸没式红外超表面透镜。设计的超表面透镜在中波红外波段工作, 能适用于所有入射偏振。器件设计焦距为 100 μm , 理论上在目标波长下的最高聚焦效率达到 70.7%, 数值孔径 (NA) 达到 1.15。该设计可以推动微透镜阵列向扁平、超薄、轻量的方向发展, 简化微透镜阵列与红外焦平面阵列的集成工艺, 有望提升红外焦平面的探测效率, 并降低制造成本。

关键词: 超表面透镜; 固体浸没; 中波红外; 传输相位; 偏振不敏感

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210360

Design of solid-immersion infrared metalens

Deng Sanyong¹, Yue Song², Zhang Dongliang¹, Liu Zhaojun¹, Li Huiyu¹, Liu Yuan¹,
Zhang Zichen², Zhu Lianqing¹

- (1. Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Infrared focal plane arrays (IR FPAs) play an important role in various infrared imaging systems. In order to improve the working temperature, quantum efficiency and sensitivity of IR FPAs, microlens arrays are usually used as light condenser for IR FPAs. Currently, materials of microlens array are usually different from the material of the infrared detector, so additional process means are required during integration of the two parts, which is difficult and inefficient. Based on metasurface, a planar solid immersion microlens array can be directly fabricated on the substrate material of the infrared detector, so that monolithic integration of the two can be realized. Aiming at the application of antimonide class type II superlattice infrared detector, a solid immersion infrared metalens based on GaSb substrate this was designed. The designed metalens worked in the mid-wave

收稿日期: 2021-05-31; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金 (61905273); 北京市科技新星 (Z191100001119058); 北京市教委科技计划一般项目 (KM202111232019); 北京高等学校高水平人才交叉培养“实培计划”项目; 高等学校学科创新引智计划 (先进光电子器件与系统学科创新引智基地, D17021)

作者简介: 邓三泳, 男, 本科, 主要从事光电信息科学与工程方面的研究。

导师简介: 岳嵩, 男, 研究员, 博士, 主要从事表面等离子体超材料与全介质超表面方面的研究。

张东亮, 男, 副研究员, 博士, 主要从事硅基光子集成器件开发和传感、计算应用; 新型低维半导体光电材料外延与光电器件方面的研究。

infrared band and could be applied to all incident polarizations. The designed focal length is 100 μm for all metalens devices designed here. Theoretically, the highest focusing efficiency at the target wavelength reaches 70.7%, and the numerical aperture (NA) reaches 1.15. This design can promote microlens array to be flat, ultra-thin and lightweight, simplifying the integration process of microlens array and infrared focal plane array. Besides, this design is expected to improve the detection efficiency of infrared focal plane device and reduce manufacturing cost.

Key words: metalens; solid-immersion; mid-wave infrared; transmission phase; polarization insensitive

0 引言

红外焦平面探测器广泛应用于工业检测、医疗诊断、气象预测、夜视成像、目标跟踪等领域^[1]。提升红外焦平面的综合性能来满足日益增加的性能需求一直是红外焦平面的研制重点。目前碲镉汞 (HgCdTe) 红外焦平面探测器已发展至第四代, 而量子阱红外探测器 (QWIP) 和以镓化锑 (GaSb) 为基础的锑化物 II 类超晶格红外探测器也正在向第四代发展^[2]。从性能上看, 基于锑化物 II 类超晶格的红外焦平面探测器已经接近碲镉汞红外焦平面探测器的水平^[3]。其理论上的工作温度更高, 在多色探测融合及低成本方面也更具优势和潜力^[1-2]。但是, 锑化物 II 类超晶格工作温度和量子效率距离理论极限还有较大差距, 目前大部分工作是从超晶格能带结构设计、材料外延工艺、器件钝化工艺方面进行优化和提升的^[4]。高集成化、高量子效率、高灵敏度和高工作温度的锑化物 II 类超晶格红外焦平面可以进一步提升红外成像装置性能, 是未来的主要发展方向。

在红外焦平面的光敏阵列中, 受制于芯片空间布局和器件结构的约束, 探测器在制造时会在像元的四周留下一定区域用来制作读出电路或热隔绝等。这些区域对红外探测本身是无用的, 也被称为死区。死区的存在严重降低了探测器的填充因子, 造成大量入射光能的浪费, 从而降低探测器阵列的工作温度、感光灵敏度和信噪比。使用微透镜阵列作为红外焦平面的聚光器是增强有效辐射功率密度的一种方法^[5], 可以提升红外焦平面的工作温度、量子效率和灵敏度^[6-8]。然而, 常规的折射型微透镜阵列与焦平面探测器的制作材料不一样, 因此微透镜阵列需要单独制造, 并需要与焦平面阵列进行对准和集成。此外, 为了提高微透镜与红外焦平面的兼容性, 需要对

微透镜阵列进行额外的镀膜工艺和校准步骤^[9], 这给研制大面阵红外焦平面的工作带来了困难。近年来, 将红外焦平面与位于探测器衬底的球面聚光器进行单片集成得到广泛关注, 其中微透镜由探测器衬底材料制成 (浸没式微透镜阵列), 这为微透镜与焦平面的单片集成提供了一种新方案^[10]。

微纳光学领域中的超表面是一种新型光学器件^[11], 它是由离散的亚波长结构单元组成的二维平面结构。通过精细设计超表面内各个结构单元以及阵列单元的布局, 可以使超表面器件对入射电磁波的振幅、相位和偏振等自由度进行灵活调控^[10-13]。目前, 多种利用超表面技术开发出的新型光学器件已被应用在各种领域, 除了超表面透镜^[14-15]、光束偏折器^[16]、定向表面波耦合器^[17]之外, 还包括一系列具有复杂相位分布的平面光学器件, 如: 超震荡透镜^[18]、涡旋光束产生器^[16]、涡旋光分束器^[19]、全息器件^[20-21]等。其中, 超表面透镜 (超透镜) 是超表面研究和应用的一个重要方向, 因为透镜不仅是一种经典的光学元件, 而且相比于传统的光学透镜, 超透镜的最大优势在于其在拥有很好光学性能的同时具有极薄的厚度^[22]。文中基于超表面光学设计思想, 提出了一种 GaSb 基固体浸没式红外超表面透镜——入射光经过超透镜层调制后, 通过衬底聚焦在红外焦平面上每个像元的有源吸收区。相比在空气中聚焦, 固体浸没式聚焦将透镜的数值孔径提高了 n 倍 (n 为浸没固体的折射率), 从而可缩小聚焦光斑的大小, 有效提升透镜的分辨率^[23-24]。文中利用有限元数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 对超表面透镜每个单元的直径、高度和周期等几何参数进行精确设计, 并根据超表面器件的相位分布, 设计了一种在中红外波段 (3~5 μm) 工作的偏振不敏感透射式超表面透镜。所设计的超透镜焦

距为 100 μm, 器件聚焦效率最高达到 70.7%, 数值孔径 (NA) 最大为 1.15, 聚焦光斑大小接近衍射极限。所设计的超透镜可通过蚀刻衬底半导体材料制作而成, 从而提升其与背面照明红外焦平面阵列架构的兼容性^[9], 这一工作为超表面微透镜阵列与红外焦平面探测器的单片集成提供了新的设计思路。

1 结构单元设计与仿真

在超表面透镜的设计理论方面, 常用的相位调节方式有几何相位和传输相位。相比于几何相位, 基于传输相位的超表面透镜更易于实现, 并且对入射光的偏振态没有特殊要求^[25-26]。光波在传播时会积累相位, 传输相位型超表面对光波的调控就是通过调节每个结构单元产生的传输相位来实现的。光波在介质中传播时积累的相位 φ 服从以下方程:

$$\varphi = nk_0d \quad (1)$$

式中: n 为介质的折射率; d 为传播距离; $k_0=2\pi/\lambda$ 为自由空间中的波矢, λ 为入射光的波长^[12]。传统的折射型光学元件和二元光学器件都是通过改变传播距离 d 来积累相应的相位。由公式 (1) 可知, 通过改变参数 n 也能够对传输相位进行调节。传输相位型超表面就是在保持器件厚度不变的情况下, 通过调节等效折射率 n , 由此构建出的一种二维平面光学器件。

由于红外焦平面的衬底需要是透光的, 对应的超

表面器件应为透射式, 图 1(a) 为设计的超表面透镜工作原理图。如图 1(a) 左侧所示, 超表面透镜由排列在正方形周期单元上的介质柱组成。从空气侧垂直入射的平面波被介质柱调制后在衬底材料中形成会聚球面波, 实现在衬底材料内部的聚焦。介质柱被直接蚀刻在 GaSb 衬底上, 由于这些圆柱是各向同性结构, 设计的器件对入射光的偏振状态不敏感, 可应用于各种偏振态入射的情况。图 1(a) 右侧为超表面透镜单个结构单元的示意图, 图 1(b) 和图 1(c) 分别为结构单元的俯视图和侧视图。结构单元的周期为 P , 介质柱的直径为 D , 所有介质柱的高度相同, 均为 H , 这三个参量为主要研究的结构参量。当光波经过结构单元时, 可以将介质柱看作一条截断的圆柱形波导^[11]。根据等效折射率理论, 当介质柱的直径 D 在 $0\sim P$ 的范围内变化时, 通过改变介质柱直径 D 便可获得不同的等效折射率。因此, 通过公式 (1) 可知, 当光通过高度 H 相同但直径 D 不同的介质柱结构单元时, 就会积累不同的相位值 φ , 从而实现传输相位调控。

由于对超表面透镜整体器件的聚焦性能进行三维仿真时需要巨大的内存, 受限于计算资源, 下文的讨论都是基于二维 GaSb 纳米柱的模型。因此, 在二维情况下得到的超表面透镜实际上是一个柱透镜, 但是相关的讨论和规律可以容易地推广到三维的情况。仿真基于有限元模拟软件 COMSOL Multiphysics

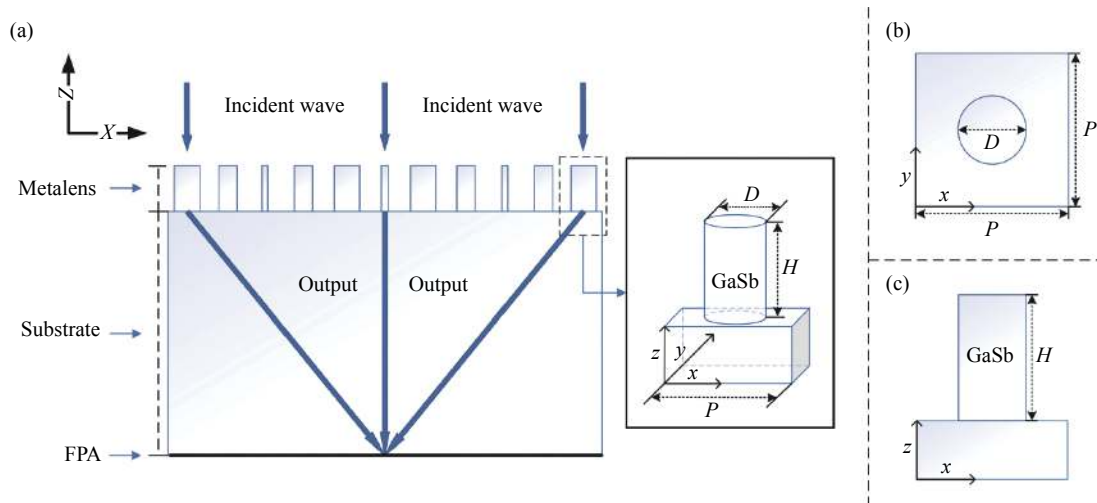


图 1 超表面透镜设计。(a) 超表面透镜工作原理及结构单元示意图; (b)、(c) 结构单元俯视图和侧视图, 显示了结构单元的周期 P 、介质柱的直径 D 和高度 H

Fig.1 Design of the metalens. (a) Working principle of the metalens and schematic diagram of the structural unit; (b), (c) Top view and side view of the structural unit, respectively, where period P , diameter D and height H of the dielectric cylinder is marked

开展。首先建立 GaSb 纳米柱的二维结构单元模型, 对入射电磁波经过周期性结构单元阵列的相位和能流透过率进行数值分析。结构单元模型的两侧采用周期性边界条件, 顶面和底面添加了吸收电磁波的完美匹配层 (PML)。采用沿 X 方向偏振的线偏振光入射, 波矢沿 $-Z$ 方向。在不同周期 P 下对介质柱的高度 H 和直径 D 进行参数扫描, 可以得到不同几何参数下结构单元的传输相位和能流透过率, 进而分析其光学行为。通过大范围的参数扫描, 在各工作波长下分别筛选出一组相位能覆盖 $0\sim 2\pi$ 、能流透过率尽量高的参数作为最佳结构单元, 后续将利用这些结果单元构建超表面透镜整体器件。

在工作波长 λ 为 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 的情况下, 分别固定介质柱高度为 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$, 对介质柱的直径 D 和周期 P 进行参数扫描。通过仿真, 可得到各工作波长下结构单元相位和能流透过率随介质柱直径 D 和周期 P 的变化情况, 结果如图 2(a)~(f) 所示。图 2(a)~(c) 分别展示了结构单元的传输相位随介质柱直径 P 和周期 D 的变化。观察发现, 在固定入射波长 λ 和介质柱高度 H 的情况下, 能覆盖 $0\sim 2\pi$ 相位范围的介质柱直径 D 的变化范围和周期 P 的取值有关。图 2(d)~(f) 展示了结构单元能流透过率随介质柱直径 D 和周期 P 的变化。可以发现, 在介质柱高度 H 固定的情况下, 当周期值较小时, 能流透过率更高; 随着结构单元的周期变大, 能流透过率将逐渐减小。在结构单元周期 P 继续增大并超过一定阈值后会有光栅衍射级次出现^[27], 透过率发生明显下降, 而这应是尽力避免的。

为了更准确地确定单元结构周期 P 的取值, 在 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 工作波长下, 分别固定介质柱高度为 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$, 直径 D 在 $0.01\ \mu\text{m}$ 到 $(P-0.01)\ \mu\text{m}$ 范围内变化。对介质柱的周期 P 进行参数扫描, 得到各个工作波长下对应结构单元的相位和能流透过率。图 2(g)~(i) 展示了不同周期 P 取值下, 介质柱直径 D 在允许范围内变化时对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 和平均能流透过率 \bar{T} 。可以发现, 无论周期 P 取何值, 能覆盖 $0\sim 2\pi$ 相位范围的介质柱直径 D 的变化范围都在周期 P 的取值范围内。一方面, 从易于实验加工的角度考虑, 应选取尽可能大的周期取值; 另一方面, 周期的取值又不能太大, 这是因为当周期

太大时, 会有光栅衍射级次出现。定量地来看, 在正入射情况下出现光栅衍射级次的周期阈值为:

$$P = \frac{\lambda}{n_s} \quad (2)$$

式中: λ 为入射波长; n_s 为基底介质的折射率。根据公式 (2), 计算出 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 工作波长下光栅衍射级次出现的阈值分别为 $0.80\ \mu\text{m}$ 、 $1.08\ \mu\text{m}$ 和 $1.35\ \mu\text{m}$, 这也对应了图 2(d)~(f) 中透过率发生明显下降的周期 P 取值。因此, 采用的周期值应在保证较高能流透过率的前提下尽量大, 但不能大于各个波长下光栅衍射级次出现的阈值。

综合上述考虑, 并根据图 2(g)~(i), 得到了各个波长下的最佳周期值。工作波长为 $3\ \mu\text{m}$ 时, 结构单元最佳周期 $P = 0.7\ \mu\text{m}$, 对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 为 2.6π , 平均能流透过率 \bar{T} 为 0.67 ; 工作波长为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 结构单元最佳周期 $P = 0.9\ \mu\text{m}$, 对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 为 2.53π , 平均能流透过率 \bar{T} 为 0.7 ; 工作波长为 $5\ \mu\text{m}$ 时, 结构单元最佳周期 $P = 1\ \mu\text{m}$, 对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 为 2.532π , 平均能流透过率 \bar{T} 为 0.725 。

随后, 在工作波长 λ 为 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 的情况下, 固定各个波长下结构单元的周期为上一步确定的最佳值, 对介质柱的高度 H 和直径 D 进行参数扫描, 结果如图 3(a)~(f) 所示。可见结构单元的相位和能流透过率随着介质柱直径 D 和高度 H 不同而变化。为了选取最优化的介质柱高度, 在图 3(a)~(f) 中显示的数据基础上, 分别在各个高度 H 下, 计算当介质柱直径 D 在允许范围内变化时的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 和平均能流透过率 \bar{T} , 结果如图 3(g)~(i) 所示。从图 3(g)~(i) 可以看出, 各个设计波长下, 随着介质柱高度的增加, 结构单元的相位覆盖范围线性地增大。然而, 随着介质柱高度的增加, 平均能流透过率却呈逐渐减小趋势。从超表面整体器件设计的角度考虑, 需要结构单元能够覆盖 $0\sim 2\pi$ 的相位范围, 同时保持尽量高的透过率。此外, 为了易于加工, 在透过率接近的情况下, 介质柱的高度应尽可能小。综合上述分析并结合图 3(g)~(i), 可以挑选出在各个波长下最佳介质柱高度 H : 工作波长为 $3\ \mu\text{m}$ 时, 最佳高度为 $H = 1.3\ \mu\text{m}$, 对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 为 2.36π , 平均能流透过率 \bar{T} 为 0.673 ; 工作波长为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 最佳高度为 $H = 1.8\ \mu\text{m}$, 对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 为 2.44π , 平均能流透

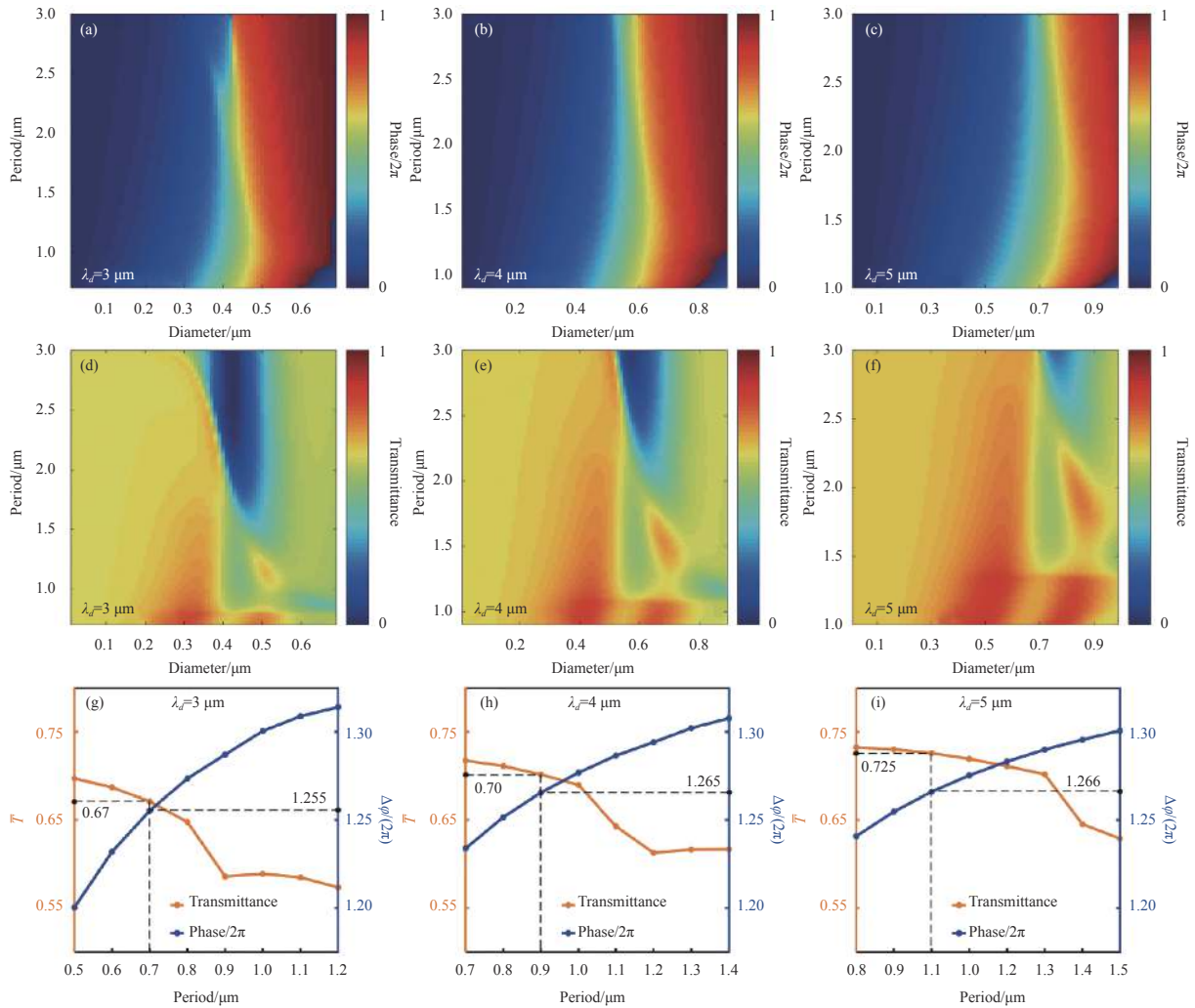


图 2 (a) 3 μm、(b) 4 μm 和 (c) 5 μm 工作波长下结构单元相位随周期 P 和介质柱直径 D 的变化; (d) 3 μm、(e) 4 μm 和 (f) 5 μm 工作波长下能流透过率随周期 P 和介质柱直径 D 的变化; (g) 3 μm、(h) 4 μm 和 (i) 5 μm 工作波长下, 取不同的周期 P , 当直径 D 在允许范围内变化时, 对应的结构单元相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 和平均能流透过率 \bar{T}

Fig.2 Phase response of the structural unit as a function of period P and diameter D of the dielectric cylinder at the operating wavelengths of (a) 3 μm, (b) 4 μm and (c) 5 μm, respectively. Transmittance of energy flow as a function of period P and diameter D of the dielectric cylinder at the operating wavelengths of (d) 3 μm, (e) 4 μm and (f) 5 μm, respectively. Phase coverage $\Delta\varphi$ and average transmittance of energy flow \bar{T} at (g) 3 μm, (h) 4 μm and (i) 5 μm operating wavelengths, respectively, when the diameter D changes within the allowable range under different period P of the structural unit

过率 \bar{T} 为 0.702; 工作波长为 5 μm 时, 最佳高度为 $H=2.6\mu\text{m}$, 对应的相位覆盖范围 $\Delta\varphi$ 为 2.82π , 平均能流透过率 \bar{T} 为 0.725。

最终选出的最佳结构单元均可实现 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖并拥有较高的能流透过率, 3 μm、4 μm 和 5 μm 工作波长下的介质柱直径 D 变化范围分别为 $0.11\sim 0.68\mu\text{m}$ 、 $0.11\sim 0.86\mu\text{m}$ 和 $0.11\sim 0.90\mu\text{m}$, 平均能流透过率分别为 0.69、0.72 和 0.75。图 4(a)-(c) 显示了在 3 μm、4 μm 和 5 μm 工作波长下最佳结构单元对

应的能流透过率和相位响应曲线, 以及对应的最佳结构单元的几何尺寸。观察图 4(a)~(c), 发现能流透过率随介质柱直径 D 的增大先不断增大, 达到第一个峰值后经历一个下降, 这是因为入射电磁波激发了结构的电偶极子共振^[9]。当直径 D 进一步增大到与周期 P 的取值接近时, 在周期性结构中相邻的两个介质柱之间的间距会很小, 从而介质柱间的光学耦合将变强, 导致传输损耗增加、能流透过率降低, 此时的传输损耗主要来自于阻抗不匹配所导致的光在介质柱界

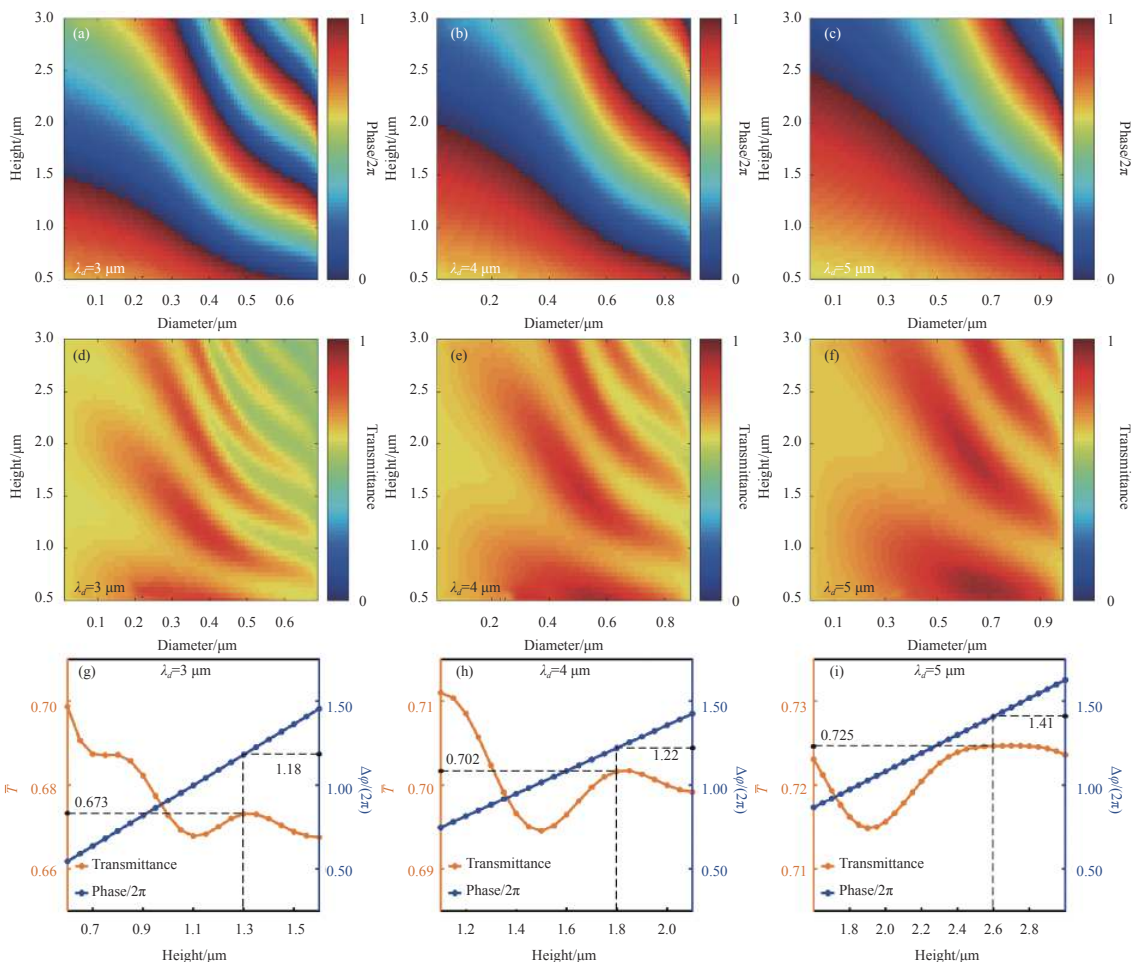


图 3 (a) 3 μm 、(b) 4 μm 和 (c) 5 μm 工作波长下结构单元产生的相位随介质柱高度 H 和直径 D 的变化; (d) 3 μm 、(e) 4 μm 和 (f) 5 μm 工作波长下能流透过率随介质柱高度 H 和直径 D 的变化; (g) 3 μm 、(h) 4 μm 和 (i) 5 μm 工作波长下, 取不同的介质柱高度 H , 当直径 D 在允许范围内变化时, 对应的结构单元相位覆盖范围 $\Delta\phi$ 和平均能流透过率 \bar{T}

Fig.3 Phase response of the structural unit as a function of height H and diameter D of the dielectric cylinder at the operating wavelengths of (a) 3 μm , (b) 4 μm and (c) 5 μm , respectively. Transmittance of energy flow as a function of height H and diameter D of the dielectric cylinder at the operating wavelengths of (d) 3 μm , (e) 4 μm and (f) 5 μm , respectively. Phase coverage $\Delta\phi$ and average transmittance of energy flow \bar{T} at (g) 3 μm , (h) 4 μm and (i) 5 μm operating wavelengths, respectively, when the diameter D changes within the allowable range under different height H of the structural unit

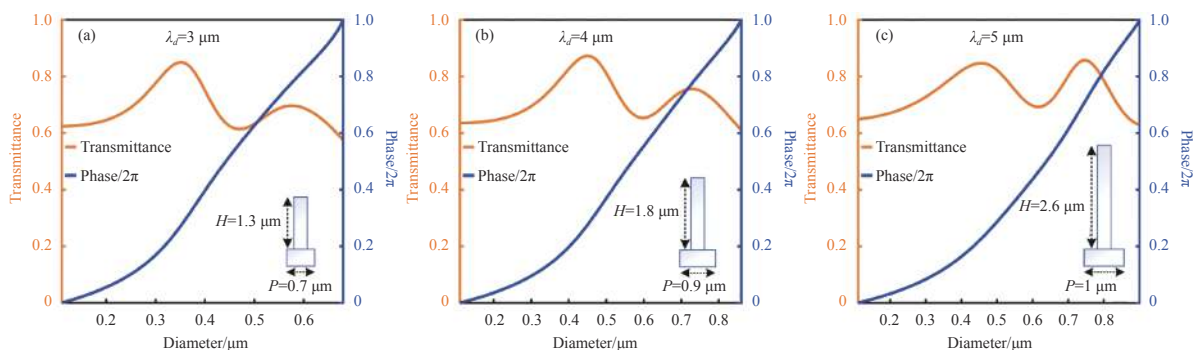


图 4 在 (a) 3 μm 、(b) 4 μm 和 (c) 5 μm 工作波长下的最佳结构单元的能流透过率和相位响应 (插图中标注了各设计波长下最佳结构单元的尺寸)
Fig.4 Transmittance of energy flow and phase response of the optimal structural unit at the operating wavelengths of (a) 3 μm , (b) 4 μm and (c) 5 μm (The size of the optimal structural unit at corresponding design wavelengths are marked in the insets)

面的背向散射^[28]。

2 整体器件设计与仿真

在得到最佳结构单元的基础上,可以设计传输相位型固体浸没式超表面透镜。当光波经过超表面界面时,超表面器件上不同位置处产生的相位跃变不同。基于上述各工作波长下的最佳结构单元,将能提供所需相位的介质柱一一对应地放置在超表面器件的相应位置上,便可以获得一个完整的超表面透镜。超表面透镜所需的相位分布 $\varphi(x)$ 满足下列方程:

$$\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + f^2} - f) \quad (3)$$

式中: λ 为入射波长; x 为超表面上某一点距器件中心的水平位置; f 为焦距。

利用 COMSOL 软件建立一个二维超表面透镜的整体器件模型,在空气侧设置入射端口,计算区域四周设置完美匹配层和散射边界条件,以吸收散射的电

磁波。仿真结果表明,在不同设计波长下均可以得到一个明显的焦点,其能流分布如图 5(a)~(c)所示。所设计超透镜的焦距均为 $100 \mu\text{m}$,在 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 入射波长下仿真得到的实际焦距分别为 $98.4 \mu\text{m}$ 、 $97.7 \mu\text{m}$ 和 $97 \mu\text{m}$,在图中使用白色虚线进行了标注。产生差异的原因是通过公式 (3) 设计的理想透镜表面相位面型在空间上是连续的,而实际超表面器件结构单元提供的相位在空间上是离散的,是对理想相位面型的一种近似,因此会带来差异。若定义焦点处的能流与入射能流之比为器件聚焦效率,通过对模拟结果进行计算得到 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 入射波长下器件的聚焦效率分别达到 70.7%、70.5% 和 70.4%。图 5(d)~(f)所示为焦平面上 ($z=f$) 沿 x 方向的归一化能流分布。计算得到各波长下数值孔径 (NA) 分别为 0.82 ($\lambda_d=3 \mu\text{m}$)、1.04 ($\lambda_d=4 \mu\text{m}$) 和 1.15 ($\lambda_d=5 \mu\text{m}$)。各波长下焦点的半高全宽 (FWHM) 分别为 $1.54 \mu\text{m}$ ($\lambda_d=3 \mu\text{m}$)、 $1.68 \mu\text{m}$ ($\lambda_d=4 \mu\text{m}$) 和 $1.90 \mu\text{m}$ ($\lambda_d=5 \mu\text{m}$)。由于采用

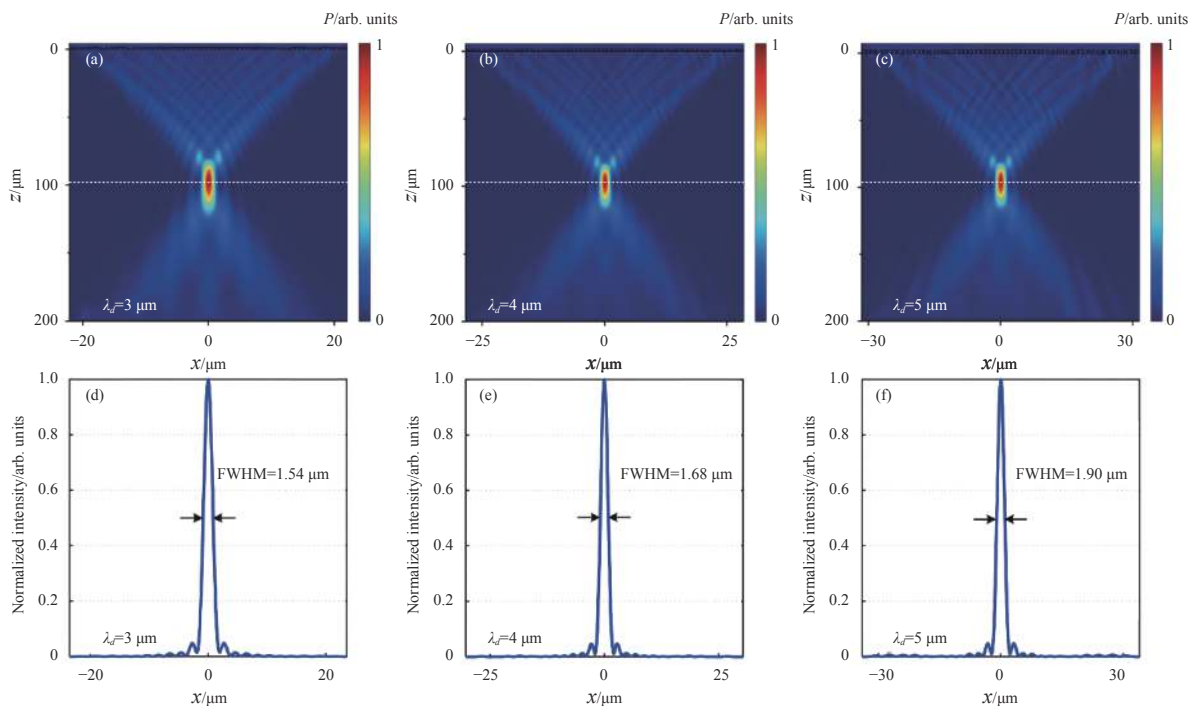


图 5 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 工作波长下超表面透镜在 x - z 平面上的聚焦性能。(a) $\lambda_d=3 \mu\text{m}$, $f=98.4 \mu\text{m}$, 聚焦效率 70.7%; (b) $\lambda_d=4 \mu\text{m}$, $f=97.7 \mu\text{m}$, 聚焦效率 70.5%; (c) $\lambda_d=5 \mu\text{m}$, $f=97 \mu\text{m}$, 聚焦效率 70.4%; (d)~(f) $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 工作波长下焦平面 (图中白色虚线) 沿 x 方向的归一化能流分布,并标注了焦点的半高全宽 (FWHM)

Fig.5 The focusing performance of the metalens in the x - z plane at operating wavelengths of $3 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$. (a) $\lambda_d=3 \mu\text{m}$, $f=98.4 \mu\text{m}$, the focusing efficiency is 70.7%; (b) $\lambda_d=4 \mu\text{m}$, $f=97.7 \mu\text{m}$, the focusing efficiency is 70.5%; (c) $\lambda_d=5 \mu\text{m}$, $f=97 \mu\text{m}$, the focusing efficiency is 70.4%; (d)~(f) Normalized energy flow distribution along the x direction at the focal plane (white dotted line in the figure) at the operating wavelengths of $3 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$, and the full width at half-maximum (FWHM) of the focus is marked

固体浸没式的设计, 聚焦光斑的尺寸小于入射波长。

文中还研究了超表面透镜在设计波长 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 范围内的色散特性。图 6(a)、(c)、(e) 展示了设计波长不同的三个器件在不同波长范围内能流沿 z 轴方向 ($x = 0$) 的归一化强度分布, 并由此分析焦点位置与入射波长的对应关系。取出图 6(a)、(c)、(e) 中不同入射波长曲线中焦点位置的横坐标, 得到图 6(b)、(d)、(f)。可

以看出, 三个设计目标波长不同的超表面透镜分别在 $2.5\sim 3.5 \mu\text{m}$ 、 $3.5\sim 4.5 \mu\text{m}$ 和 $4.5\sim 5.5 \mu\text{m}$ 波长范围内工作良好, 三个器件的焦点位置均在设计焦距 $\pm 15 \mu\text{m}$ 范围内波动, 并与波长呈负相关, 表明这些超表面透镜具有一定的负色散。虽然文中的超表面透镜没有做消色差设计, 但设计的三个器件在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围内的一定带宽下仍具有良好的聚焦效果。原则上

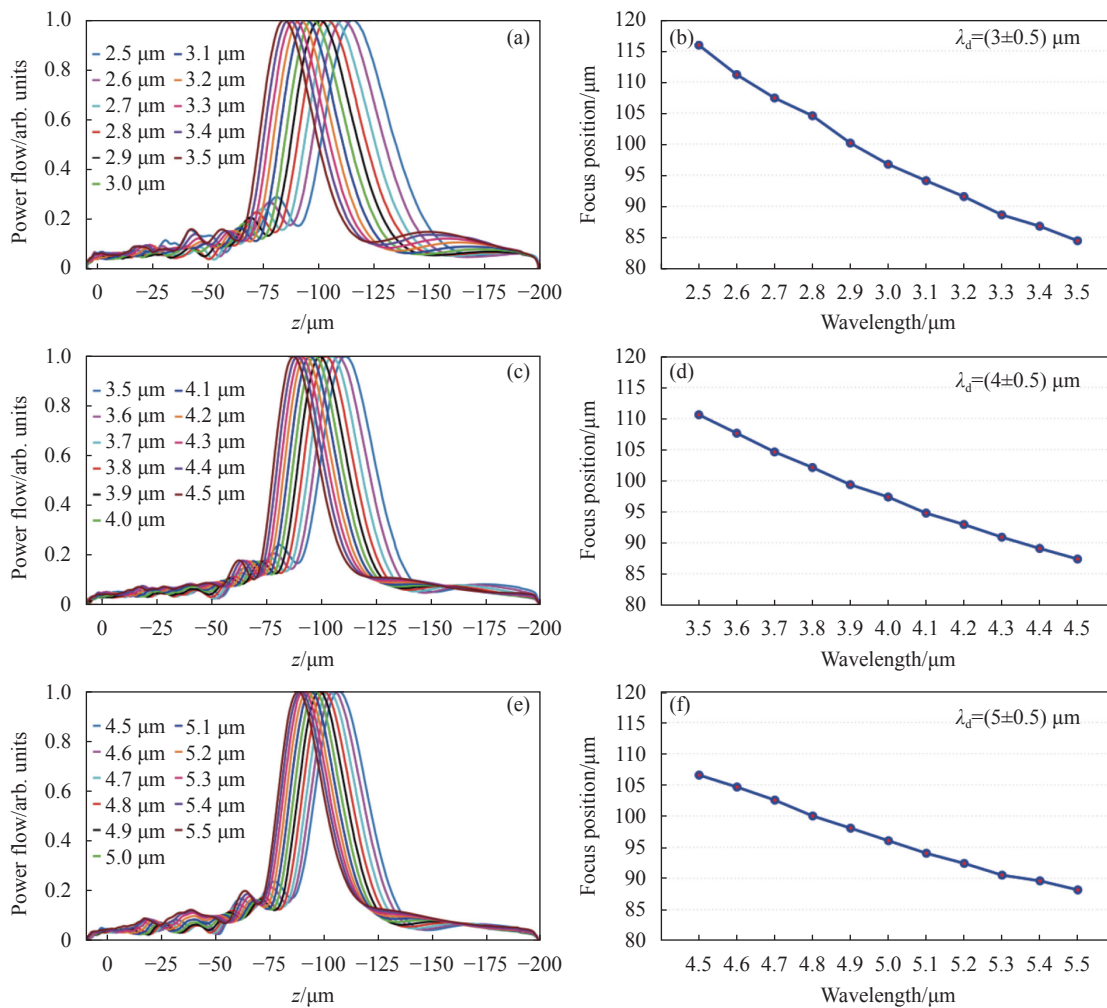


图 6 超表面透镜在设计波长 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 范围内的色散特性。设计波长为 $3 \mu\text{m}$ 的超表面透镜在 $2.5\sim 3.5 \mu\text{m}$ 波长范围内, (a) 光场沿 z 轴方向 ($x = 0$) 的归一化能流分布, (b) 焦点位置与入射波长的关系图; 设计波长为 $4 \mu\text{m}$ 的超表面透镜在 $3.5\sim 4.5 \mu\text{m}$ 波长范围内, (c) 光场沿 z 轴方向 ($x = 0$) 的归一化能流分布, (d) 焦点位置与入射波长的关系图; 设计波长为 $5 \mu\text{m}$ 的超表面透镜在 $4.5\sim 5.5 \mu\text{m}$ 波长范围内, (e) 光场沿 z 轴方向 ($x = 0$) 的归一化强度分布, (f) 焦点位置与入射波长的关系图

Fig.6 Dispersion characteristics of the metalens within $\pm 0.5 \mu\text{m}$ of the design wavelength. The metalens with a design wavelength of $3 \mu\text{m}$ within the $2.5\text{-}3.5 \mu\text{m}$ wavelength range: (a) Normalized energy flow of the light field along the z -axis direction ($x = 0$), (b) the relationship between the focal position and the incident wavelength. The metalens with a design wavelength of $4 \mu\text{m}$ within the wavelength range of $3.5\text{-}4.5 \mu\text{m}$: (c) Normalized energy flow of the light field along the z -axis direction ($x = 0$), (d) the relationship between the focal position and the incident wavelength. The metalens with a design wavelength of $5 \mu\text{m}$ within the $4.5\text{-}5.5 \mu\text{m}$ wavelength range: (e) Normalized energy flow of the light field along the z -axis direction ($x = 0$), (f) the relationship between the focal position and the incident wavelength

讲,还可以进一步加入消色差的设计实现 3~5 μm 波长范围内的消色差聚焦,从而更好地满足红外焦平面阵列探测器的应用需求。

3 结论

文中以在红外探测领域中十分有潜力的碲化物 II 类超晶格红外探测器为应用目标,理论设计并数值模拟研究了一种基于 GaSb 衬底的偏振不敏感固体浸没式红外超表面透镜。通过对结构单元周期 P 、介质柱直径 D 和介质柱高度 H 的参数化扫描,分析了上述几何参数对于超表面结构单元光学性能的影响,并筛选出各设计波长下的最佳结构单元数据,进而构建了超表面透镜整体器件。整体器件厚度不超过 2.6 μm ,远小于现有红外焦平面探测器前置微透镜的典型尺寸。器件在中波红外波段下的聚焦效率最高达到 70.7%,数值孔径 (NA) 最大为 1.15。由于采用固体浸没式的设计,聚焦光斑的尺寸小于入射波长,有望大大提升红外焦平面器件的光能利用效率。通过对超表面透镜在设计波长 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 范围内的色散特性进行研究,发现设计的超表面器件拥有负色散特性。

当前的工作仍存在一些不足和值得进一步研究的内容:(1)设计的固体浸没式红外超表面透镜未做消色差设计。虽然设计的超透镜在目标波长 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 范围内都可以实现聚焦效果,但随着入射波长的偏离,焦点位置会在设计焦距 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的范围内波动,与设计焦距之间存在偏差,同时聚焦效率有所下降。未来应用在红外焦平面上的前置微透镜阵列需要更宽的工作带宽,因此后续工作需要在现有基础上进行消色差设计。(2)文中只研究了入射光正入射情况下的聚焦特性,并没有对斜入射情况下的聚焦特性进行研究。后续工作中可以对多角度斜入射的情况进行分析,进一步完善器件聚焦特性的研究。

总体上,文中所提出的固体浸没式超透镜设计可推动微透镜阵列向扁平、超薄、轻量的方向发展,简化微透镜阵列与红外焦平面阵列的集成工艺,有望提升红外焦平面的探测效率,并降低制造成本,从而推动红外探测器整体性能的提升。

参考文献:

[1] Xie Xiumin, Xu Qiang, Chen Jian, et al. Research progress on

antimonide based type-II superlattice mid-and long-infrared detectors [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(6): 688-694. (in Chinese)

- [2] Chang Faran, Jiang Zhi, Wang Guowei, et al. Progress of long wavelength IR FPA arrays based on antimonide compounds superlattice [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2021, 51(2): 28-45. (in Chinese)
- [3] Manurkar P, Ramezani-Darvish S, Nguyen B M, et al. High performance long wavelength infrared mega-pixel focal plane array based on type-II superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(19): 1030.
- [4] Wang Guowei, Xu Yingqiang, Niu Zhichuan. Development of high-performance novel low-dimensional structure antimonide infrared FPAs: Challenges and solutions [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(2): 368-389. (in Chinese)
- [5] Antoni Rogalski. Infrared and Terahertz Detectors[M]. New York: CRC, 2019: 96-97.
- [6] Abolmaali F, Brettin A, Green A, et al. Photonic jets for highly efficient mid-IR focal plane arrays with large angle-of-view [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31174-31185.
- [7] Bai Jie, Hu Weida, Guo Nan, et al. Performance optimization of insb infrared focal-plane arrays with diffractive microlenses [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(8): 2795-2801.
- [8] Allen K W, Abolmaali F, Duran J M, et al. Increasing sensitivity and angle-of-view of mid-wave infrared detectors by integration with dielectric microspheres [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 342-473.
- [9] Zhang S, Soibel A, Keo S A, et al. Solid-immersion metalenses for infrared focal plane arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(11): 111104.
- [10] Soibel A, Keo S A, Fisher A, et al. High operating temperature nBn detector with monolithically integrated micro lens [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(4): 041105.
- [11] Fan Qingbin, Xu Ting. Research progress of imaging technologies based on electromagnetic metasurfaces [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 114208. (in Chinese)
- [12] Li Xiong, Ma Xiaoliang, Luo Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275. (in Chinese)
- [13] Saima Kanwal, Wen Jing, Yu Binbin, et al. High-efficiency, broadband, near diffraction-limited, dielectric metalens in ultraviolet spectrum [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(3): 490.
- [14] Chen Xianzhong, Chen Ming, Mehmood M Q, et al. Longitudinal multifoci metalens for circularly polarized light [J].

- Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1201-1206.
- [15] Fu Rao, Li Zile, Zheng Guoxing, et al. Reconfigurable step-zoom metalens without optical and mechanical compensations [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12221-12230.
- [16] Huang Lingling, Chen Xianzhong, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [17] Huang Lingling, Chen Xianzhong, Bai Benfeng, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3): e70.
- [18] Tang Dongliang, Wang Changtao, Zhao Zeyu, et al. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 713-719.
- [19] Ren Haoran, Li Xiangping, Zhang Qiming, et al. On-chip noninterference angular momentum multiplexing of broadband light [J]. *Science*, 2016, 352(6287): 805-809.
- [20] Zhang Xiaohu, Jin Jinjin, Pu Mingbo, et al. Ultrahigh-capacity dynamic holographic displays via anisotropic nanoholes [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(4): 1409-1415.
- [21] Lei W, Kruk S, Tang H, et al. Grayscale transparent metasurface holograms [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1504-1505.
- [22] Choudhury S M, Wang D, Chaudhuri K, et al. Material platforms for optical metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 959-987.
- [23] Zhang Dongling, Bai Yonglin, Feng Xiaoqiang, et al. Analysis of the optical field of solid immersion lens by FDTD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 884-888. (in Chinese)
- [24] Xie Jianping, Lu Yonghua, Wang Pei, et al. Analysis of near-field distribution of solid immersion lens by angular spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 413-416. (in Chinese)
- [25] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26212-26221.
- [26] Shen Yue, Luo Xiangang. Efficient bending and focusing of light beam with all-dielectric subwavelength structures [J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 174-178.
- [27] Yue Song, Wang Ran, Hou Maojing, et al. Narrow-band perfect absorption utilizing higher-order surface plasmon resonance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190489. (in Chinese)
- [28] Fan Q, Liu M, Yang C, et al. A high numerical aperture, polarization-insensitive metalens for long-wavelength infrared imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(20): 201104.