

光学学报

基于异常反射型超表面的中红外激光偏振合束器

杨露露^{1,2}, 王欣^{1,2*}, 张梦^{1,3}, 杨苏辉^{1,3}, 张金英^{1,2}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081;³信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

摘要 提出一种基于异常反射超表面的偏振合束器。当两束偏振态正交的(X方向线偏振和Y方向线偏振)4.0 μm波段光束分别以11.54°和-11.54°角入射至超表面时,借助异常反射效应,两路光会同时以0°角反射,从而实现偏振合束。超表面偏振合束器由2 μm×20 μm的周期性排列超胞构成,制备在硅衬底上。每个超胞包含10个离散的2 μm×2 μm单胞。单胞由底层金、中间层二氧化硅和顶层矩形硅柱构成。采用粒子群算法优化顶层硅柱的两个边长尺寸,可实现两路正交偏振光相位和振幅的独立操纵,使X和Y方向线偏振光的异常反射率高达96.6%和97.7%。基于这一偏振合束器,设计了中红外激光偏振合束实验装置。当两路入射光均为基横模高斯光束时,通过仿真分析得到合束后光束的传输质量因子 M^2 为1.12,整个合束装置的合束总效率为85.3%。仿真结果表明,所提出的合束技术可有效提高中红外激光的输出亮度。

关键词 物理光学; 中红外波段; 超表面; 偏振合束; 异常反射

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS232007

1 引言

量子级联激光器(QCL)可通过设计子带间的跃迁实现激射波长的自由调控,使这类激光器发射波长的可调控范围覆盖3~300 μm^[1]。得益于巨大的设计潜力和紧凑的结构,QCL自1994年被Faist等^[2]发明以来就广受关注,并迅速发展成为最重要的实用化中红外光源之一^[3-4]。

在环境监测、物质检测、红外对抗等应用中,要求QCL具有高输出功率和高光束质量。受限于上能级注入效率^[5],目前报道的中红外QCL单管芯输出功率不超过3 W^[6-7]。要通过优化设计有源层和器件结构来提高输出功率十分困难。与可见光和近红外波段半导体激光器的发展类似,利用激光合束技术拓展输出功率和亮度是必然趋势。半导体激光器中常用的功率合束技术主要有波长合束^[8]/光谱合束、空间合束和偏振合束。其中,光谱合束^[9-10]和波长合束^[11]借助色散元件或二色镜将多束不同波长的激光合为共轴的一束光,空间合束^[12]是通过光束在空间上的排布实现总输出功率提升,偏振合束则是利用偏振元件来实现两束正交偏振入射光的合束。偏振合束充分发挥了半导体激光器输出光的高线偏特性,具有结构简

单、合束效率高的优点,可与其他合束技术结合使用,进一步提升输出功率和激光亮度。目前,中红外波段常用的偏振合束元件有布儒斯特偏振、线栅偏振片以及双折射晶体。布儒斯特偏振片和线栅偏振片均是利用正交偏振光的透射和反射进行合束,而双折射晶体则是通过改变偏振光的传播路径使其共轴输出^[13]。2008年,Wagner等^[14]使用硅制作了布儒斯特偏振合束片,实现了3.7~5.0 μm波段两束正交线偏振光的合束,合束效率为82%。中长波红外QCL的光谱宽度约为100 nm,这使得偏振镀膜较为困难。此外,较大的布儒斯特角也为光路调节增加了难度。2022年,王珂等^[15]使用金属线栅偏振片实现了两路4.05 μm波段QCL合束,合束效率约为86%。要制作更长波长的金属线栅偏振片较为困难,且由于金属线的存在,透过率被限制在80%左右。受限于中长波波段低损耗双折射晶体材料,常用的MgF₂双折射晶体合束器的正交偏振光分离角仅有1.2°,两束入射光的小分离角度使得光路设计比较困难,不利于小型化。

相比于传统的偏振元件,超表面在光波振幅、相位、偏振态调控上展现出极高的自由度^[16-17]。利用等离激元调控机理,已成功设计并制备出偏振转换器^[18-20]、涡旋光生成器^[21-23]、全息显示器^[24-26]、消色差透

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-02-18; 录用日期: 2024-02-26; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61875011)、173领域基金(2022-JCJQ-JJ-0568)

通信作者: *wangxin@bit.edu.cn

镜^[27-29]、多路分束器^[30-32]等光学功能元件,这为高效率偏振合束器的设计及制备提供了新思路。虽然利用超表面进行合束的研究较少,但超表面分束器可提供原理借鉴。2015年,Jia等^[30]设计了8.4~9.6 GHz频段的大分光角偏振分束器,可将正交偏振的两束光分离到 $+45^\circ$ 和 -45° 方向上。2021年,Wang等^[33]设计了800 nm波长处可实现将正交偏振光以任意角度分束的偏振分束器。2023年,Chen等^[29]实现了3~5 μm 波段5个波长10种偏振态的光束分离及聚焦。

根据光路可逆原理,利用超表面实现两路正交偏振光及多路不同波长正交偏振光束的合束是可行的。因此,本研究利用超表面异常反射实现两束正交线偏振光合束的技术。所研究的异常反射超表面由周期排列的超胞构成,每个超胞包含10个离散的单元。每个单元由金属衬底、介质中间层和顶层矩形柱构成。通过设计单元中矩形柱的两条边长,可使两束正交偏振的入射光具有不同的相位响应,从而使得以对称角度入射的X方向线偏振(X-LP)光和Y方向线偏振(Y-LP)光具有相同的反射角,从而实现偏振合束。经过对组成材料及其厚度的优化,超表面对X-LP和Y-LP光的反射率可分别达到96.5%和97.8%,具有极高的偏振合束效率。基于所设计的偏振合束器,在Zemax软件的物理光学模式下计算了反射光束在自由空间的传播情况,以分析反射波前和不同单元反射率对合束激光的影响。仿真中假设两束入射偏振光均为基模高斯光束,计算得到合

束光的光束传输质量因子 M^2 为1.12。上述结果表明偏振合束超表面不仅具有极高的偏振合束效率,而且所引起的波前畸变很小,可确保合束激光具有很好的光束质量。

2 理论设计与分析

利用超表面进行偏振合束的原理如图1(a)所示,合束器的反射面为XOZ平面。得益于超表面对入射光相位调控的灵活性,当两个中红外QCL出射的正交线偏振光分别以对称角度(θ 和 $-\theta$)准直入射到超表面时,若两个偏振态感受到的相位梯度正好为 $-\frac{2\pi}{\lambda}\sin\theta$ 和 $\frac{2\pi}{\lambda}\sin\theta$,则两束反射光均会从垂直于超表面的方向反射,从而实现偏振合束。图1(b)为同时操控X-LP光和Y-LP光发生异常反射的超表面结构示意图。本文选用具有三层结构的异常反射型介质超表面。整个超表面由多个周期排列的超胞组成,每个超胞包含多个离散的单元。单元底部为金属反射层,中间为介质层,顶部为矩形纳米天线柱。超表面制备在硅衬底上。当单元中的矩形天线柱具有不同边长时,可为两束具有正交偏振态的入射光提供 $0\sim 2\pi$ 的独立相位延迟。单元的三维结构及俯视图如图1(c)所示,其中单元周期为 U ,天线柱高度为 H_1 ,中间介质层和底部金属层的厚度分别为 H_2 和 H_3 ,通过设计天线柱的长 L 和宽 W 可以实现单元对X-LP和Y-LP入射光传输相位的调控。

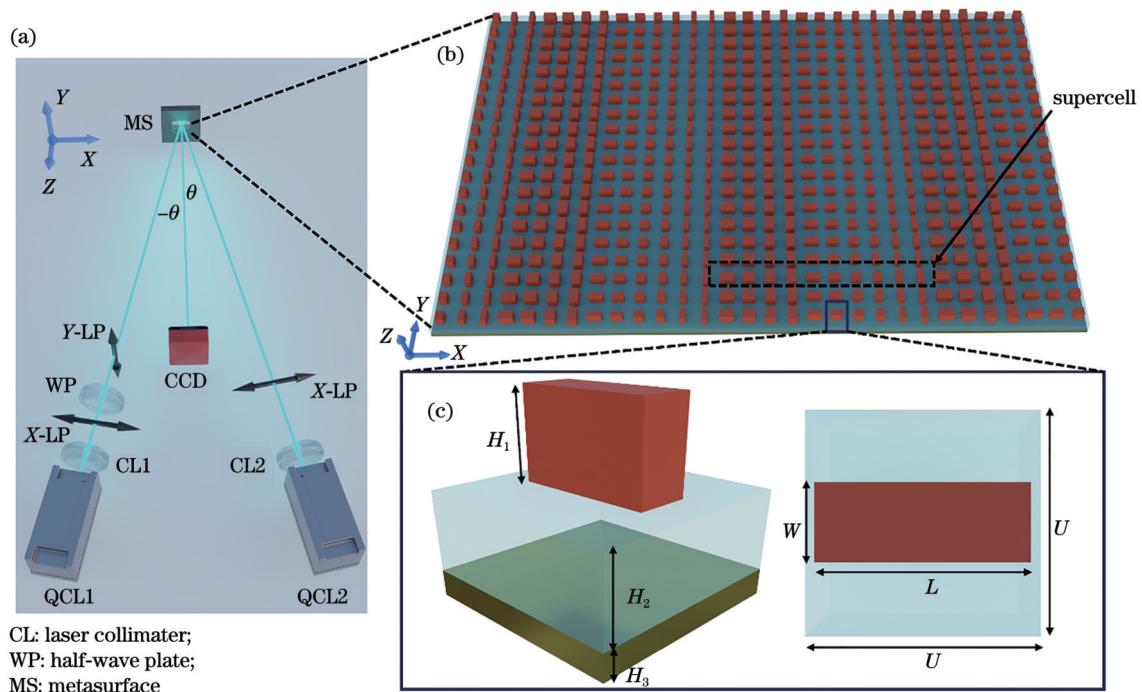


图1 超表面偏振合束原理及结构。(a)中红外超表面偏振合束原理图;(b)超表面结构示意图;(c)单元三维结构示意图(左)和俯视图(右)

Fig. 1 Working principle and structure of metasurface polarized beam combiner. (a) Working principle of mid-infrared metasurface polarized beam combiner; (b) metasurface structure; (c) three-dimensional structure (left) and top view (right) of the unit cell

设计偏振合束超表面的关键是通过优化单胞的材料参数、厚度和顶层矩形天线柱的尺寸来获得期望的相位和振幅响应。对于入射的两束正交线偏振光,反射相位可由矩形天线柱的长 L 和宽 W 分别控制,进而使这两束偏振光具有所需的反射角。根据图 1(a) 的工作原理,偏振合束器能够使两束以对称角度入射的 QCL 正交线偏振光在超表面垂直反射合束,这种对称的光路设计可降低光路调节难度。为实现入射光的异常反射,即两个入射平面波经超表面异常反射后仍为平面波,超表面偏振合束器对入射的 X-LP 和 Y-LP 光的相位响应空间分布须满足方程^[16]

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{X-LP}}{dX} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \\ \frac{d\varphi_{Y-LP}}{dX} = -\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ 为入射光的波长; $-\theta$ 和 θ 分别为 X-LP 和 Y-LP 的入射角。定义 N 为超胞内的单胞个数,则 NU 为超胞沿 X 方向的周期。离散单胞所引起的入射线偏振光相位延迟和单胞个数的选取应保证相邻超胞的相位延迟差覆盖整数个 2π , 以避免相邻超胞之间的相位不连续。本文选取超胞所包含的离散单胞个数

N 为 10。此时,相邻单胞的最小相位延迟差为 $2\pi/10$ 。对于中红外波段,假设 QCL 的中心波长为 $4.0 \mu\text{m}$, 则超表面不产生高阶衍射时的单胞周期 U 可设定为 $2 \mu\text{m}$ ^[34], 通过广义斯涅尔反射定律[式(1)]计算可得, X-LP 和 Y-LP 光的入射角度分别为 -11.54° 和 11.54° 。

为了使单胞具有理论设计所期望的相位,使用 FDTD 仿真软件对图 1(c) 所示的单胞进行建模,计算矩形天线柱的长 L 和宽 W 由 $0.2 \mu\text{m}$ 变化到 $1.6 \mu\text{m}$ 时波长为 $4.0 \mu\text{m}$ 的 X-LP 和 Y-LP 入射光的相位和幅度响应。仿真时,对单胞的 X 和 Y 方向施加周期性边界条件, Z 方向采用完美匹配层,并设置平面波沿 $-Z$ 方向从结构上方入射。通过对仿真结果的分析,最终选择底层金属为 Au、中介质层为 SiO_2 、顶层矩形天线柱的材料为单晶 Si, SiO_2 和 Si 的折射率分别为 1.39 和 3.43, 三层材料的厚度 H_1 、 H_2 和 H_3 分别为 $0.9 \mu\text{m}$ 、 $0.9 \mu\text{m}$ 和 $0.3 \mu\text{m}$ 。此时,单胞对两束正交线偏振光的相位响应可完全覆盖 2π 范围,且所有单胞的异常反射率均维持在一个较高的水平(优于 90%)。单胞对波长为 $4.0 \mu\text{m}$ 入射光的相位和振幅响应如图 2(a)、(b) 所示。

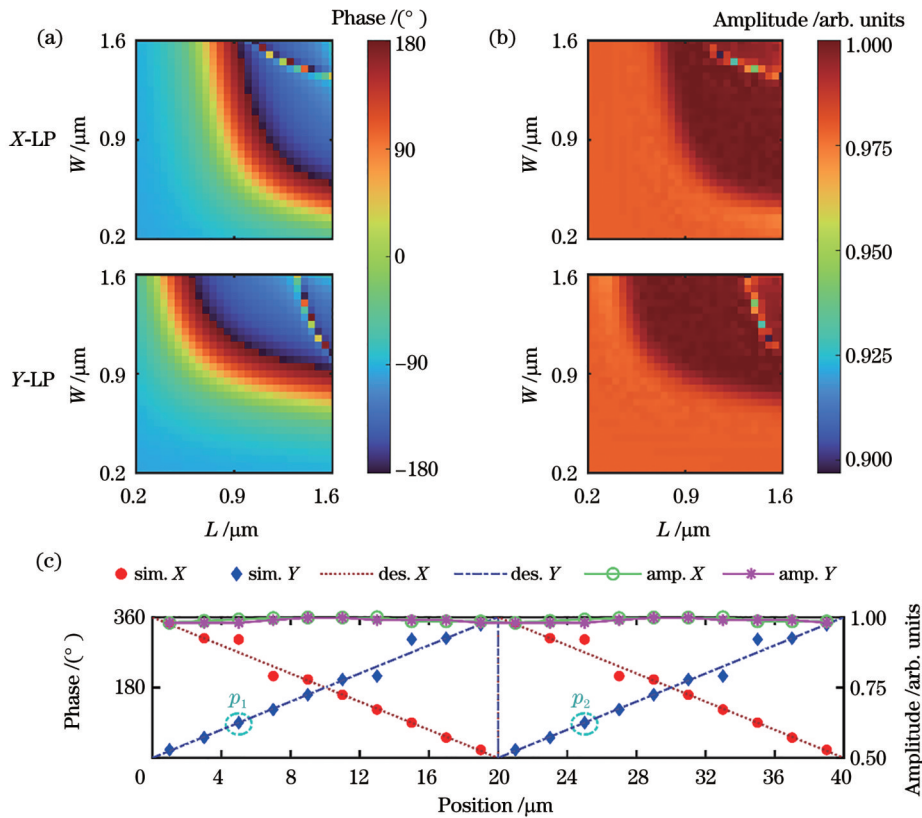


图 2 超表面设计原理。矩形 Si 天线柱对 X-LP 和 Y-LP 入射光的 (a) 反射相位和 (b) 反射率随长 L 和宽 W 的变化; (c) X-LP 和 Y-LP 入射光的期望相位 (Des. X 和 Des. Y)、单胞相位 (Sim. X 和 Sim. Y) 和单胞反射率 (Amp. X 和 Amp. Y)

Fig. 2 Design principle of metasurface. (a) Reflection phases and (b) reflectivity of X-LP and Y-LP incident light induced by Si nano-antennas with different length L and width W ; (c) comparison of the desired phase (Des. X and Des. Y), the localized cell induced phase (Sim. X and Sim. Y), and the reflectance (Amp. X and Amp. Y) for X-LP and Y-LP incident light at $4.0 \mu\text{m}$ wavelength

接下来,需要在单胞仿真结果中找到一组 Si 天线柱的长和宽,使其相位延迟满足式(1)对两种入射偏振光的要求。对于入射的 X-LP 光,超表面所引入的相位沿 X 正方向减小,相位梯度为 $-\pi/5$;对于入射的 Y-LP 光,超表面所引入的相位则沿 X 正方向逐渐增大,相位梯度为 $\pi/5$ 。利用粒子群优化算法从图 2(a)所示的仿真结果中寻找出满足所需相位的矩形天线尺寸,位于 X 轴不同位置处的 10 个离散单胞的天线尺寸如表 1 所示。所选择的材料及单胞尺寸均可通过较为成熟的微电子机械系统 (MEMS) 工艺完成制备。图 2(c) 为沿 X

正向排列的两个周期单胞的相位和幅度响应,其中虚线代表所处空间位置期望的相位,散点代表此位置处单胞的相位响应值。横坐标 $0\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围对应第一个超胞,横坐标 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ 范围对应另一个相邻超胞。 p_1 和 p_2 分别对应 Y-LP 光入射下两个超胞的第 3 个单胞的相位响应, p_1 与 p_2 之间的相位差即为两个超胞的相位差,该相位差为 2π 。由图 2(c) 可知,所设计单胞引入的相位与两种入射偏振光所期望的相位相符,并且反射率始终维持在较高水平,表明所设计的超表面偏振合束器具有非常好的波前一致性和较高的合束效率。

表 1 不同空间位置处的单胞 Si 天线柱尺寸

Table 1 Length L and width W of Si nano-antennas at different X positions

Position / μm	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Length L / μm	0.875	1.100	1.300	0.825	0.925	1.175	1.325	0.500	0.550	0.725
Width W / μm	0.725	0.550	0.500	1.325	1.175	0.925	0.825	1.300	1.100	0.875

3 结果和讨论

采用表 1 中的单胞尺寸设计结果,仿真分析了波长为 $4.0\ \mu\text{m}$ 的准直 X-LP 和 Y-LP 光分别以 -11.54° 和

11.54° 角入射到超表面时反射场的归一化远场强度分布和近场波前传输相位分布,仿真结果如图 3(a)、(b) 所示。图 3(a) 中 X-LP 和 Y-LP 光的反射强度峰值所对应的角度均为 0° , X-LP 和 Y-LP 入射光的反射率分

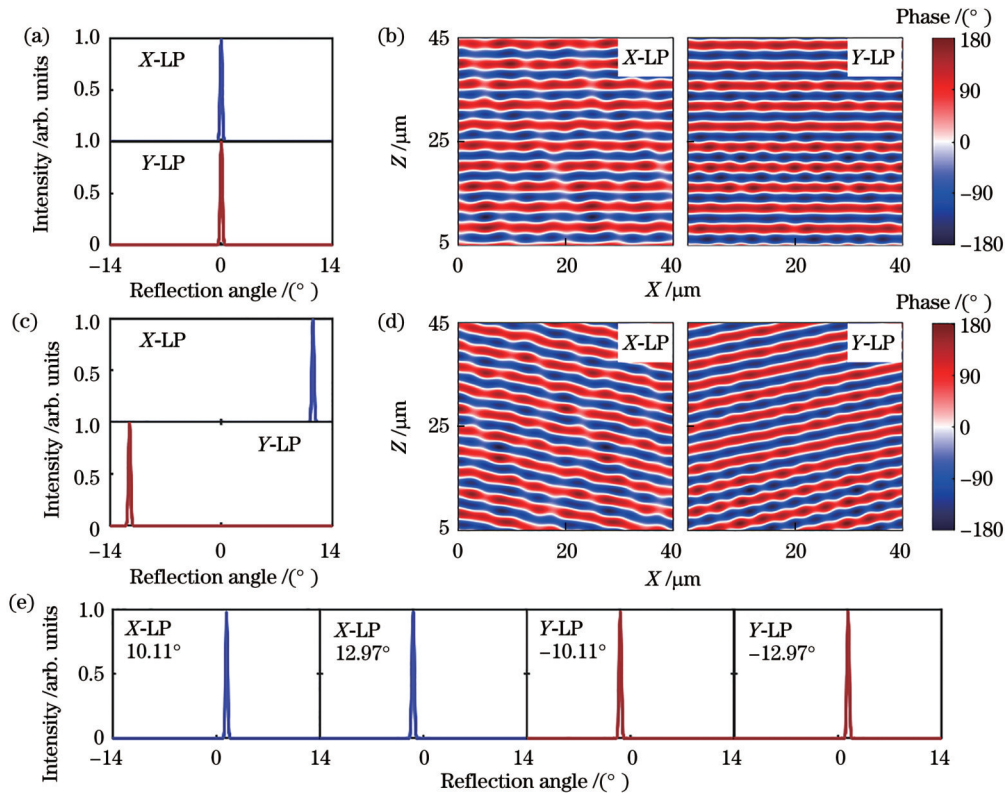


图 3 $4.0\ \mu\text{m}$ 波长下的仿真结果。X-LP 和 Y-LP 光分别以 11.54° 和 -11.54° 入射到超表面时反射场的 (a) 归一化远场强度分布和 (b) 近场传输相位分布; X-LP 和 Y-LP 光同时以 0° 入射到超表面时反射场的 (c) 归一化远场强度分布和 (d) 近场传输相位分布; (e) $4.0\ \mu\text{m}$ 波长下发散角为 $50\ \text{mrad}$ 的归一化远场强度分布

Fig. 3 Simulation results at $4.0\ \mu\text{m}$ wavelength. (a) Normalized far-field intensity distribution and (b) near-field transmission phase distribution of the reflected field when X-LP and Y-LP light incident on the metasurface at 11.54° and -11.54° , respectively; (c) normalized far-field intensity distribution and (d) near-field transmission phase distribution of the reflected field when both of X-LP and Y-LP light incident on the metasurface perpendicularly; (e) normalized far-field intensity distribution of $50\ \text{mrad}$ divergence angle at $4.0\ \mu\text{m}$ wavelength

别为 96.5% 和 97.9%，实现了高效率的偏振合束，且仿真结果与设计预期相符。由图 3(b)可知，两种不同偏振态入射光反射场的等相位面为较好的平面，等相位面的法线方向为 Z 轴正方向，表明两路反射光均为反射角度为 0° 的平面波。根据光路可逆性，仿真分析了波长为 4.0 μm 的准直 X-LP 和 Y-LP 光同时以 0° 角入射至超表面的情况，结果如图 3(c)、(d) 所示。由图 3(c) 可知，X-LP 和 Y-LP 光的反射角度分别为 11.54° 和 -11.54°，与理论值相符，反射率分别为 97.0% 和 97.8%。图 3(d) 中的倾斜波前清楚地表明两束正交偏振光分别以对称角度反射，且反射波前为平面。正反向入射的仿真结果均表明，Y-LP 入射光具有略好的波前一致性和略高的反射率。尽管个别相位调控的不准确造成期望的等相位面不连续，形成类似于具有周期性微小起伏的镜面反射，但是以上仿真结果仍可表明，所设计的超表面不仅能实现高效率的偏振合束，也可作为高反射率的偏振分束器。

为了研究入射光具有发散角时合束器的性能，分析了波长为 4.0 μm、发散角为 50 mrad 的入射光束的异常反射情况。此发散角下，X-LP 和 Y-LP 光束的入射角范围分别为 10.11°~12.97° 和 -12.97°~-10.11°。异常反射仿真结果如图 3(e) 所示。当 X-LP 光的入射角为 10.11° 和 12.97° 时，光束反射角分别为 1.38° 和

-1.38°，反射率分别为 96.1% 和 96.4%；当 Y-LP 光以 -12.97° 和 -10.11° 入射时，光束反射角分别为 -1.38° 和 1.38°，反射率分别为 96.9% 和 97.2%。X-LP 和 Y-LP 光反射后的发散角为 2.76°，即 48 mrad，与入射光发散角一致，说明入射光具有发散角或入射角度出现偏差时，异常反射角会随之发生变化，但反射率几乎不变。由此可见，异常反射光束的发散角与入射光保持一致。当入射角度出现偏差时，异常反射角将产生等量偏差。

考虑到目前常用的 QCL 多为 FP 腔，在增益谱宽较宽且工作在远高于阈值的状态 (W 级输出功率) 时，其发射光谱的宽度约为 100 nm，且发射中心波长会随温度和驱动电流的变化而产生漂移，仿真分析了入射波长在 3.9~4.1 μm 的 200 nm 带宽范围内变化时，超表面偏振合束器的反射特性。图 4(a) 为不同波长的 X-LP 和 Y-LP 光分别以 11.54° 和 -11.54° 入射时的超表面反射率 (仿真中入射光波长的变化步长取 0.01 μm)。两路偏振光在整个波段内的反射率均在 95% 以上。X-LP 光在该波段内的平均反射率为 96.6%，反射率峰值为 97.7%，位于 4.02 μm 处；Y-LP 光在该波段内的平均反射率为 97.7%，反射率峰值为 98.4%，位于 4.0 μm 处。进一步分析了入射波长为 3.9 μm 和 4.1 μm 时，反射光的远场归一化强度分布

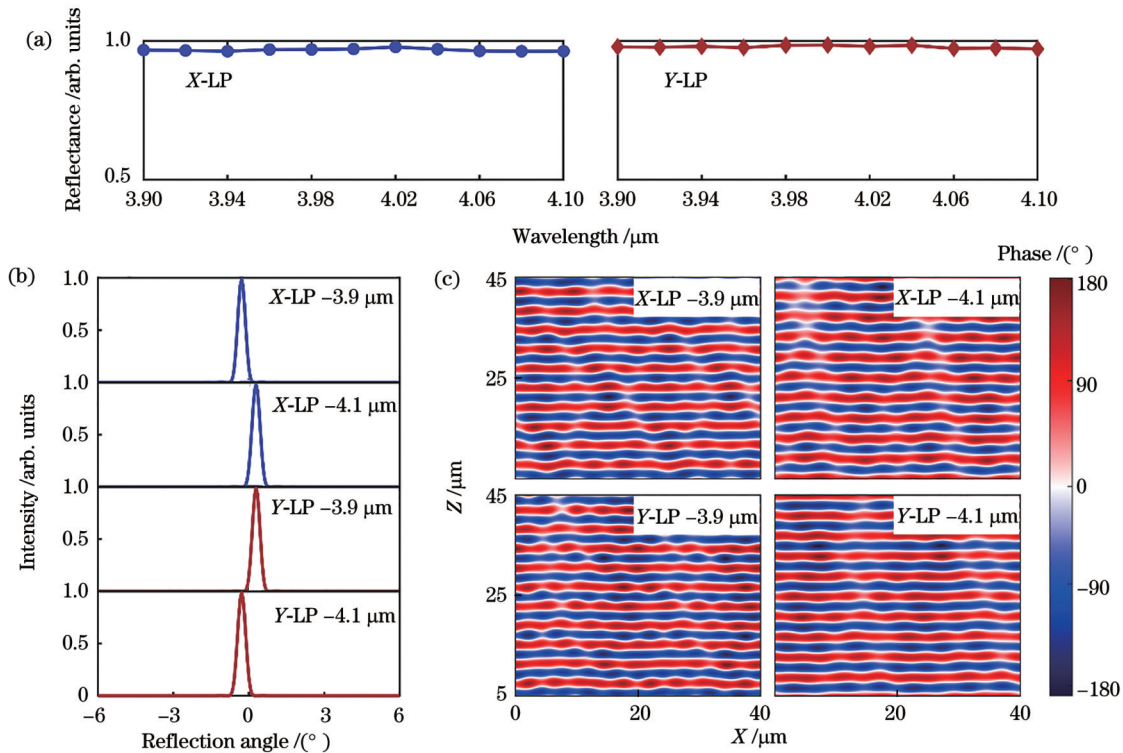


图 4 3.9~4.1 μm 波段的仿真结果。(a) X-LP 光和 Y-LP 光在 3.9~4.1 μm 波段的反射率；3.9 μm、4.1 μm 波长的 X-LP 和 Y-LP 入射光的 (b) 归一化远场反射强度分布和 (c) 反射场的近场传输相位分布

Fig. 4 Simulation results in 3.9–4.1 μm wavelength band. Reflectance of (a) X-LP and Y-LP light within 3.9–4.1 μm wavelength band; (b) normalized far-field intensity distribution and (c) near-field transmission phase distribution of reflected field when X-LP and Y-LP light wavelengths are 3.9 μm and 4.1 μm.

和近场传输相位分布,如图 4(b)、(c)所示。图 4(b)中波长为 $3.9\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 的 X-LP 光反射强度峰值分别出现在 -0.28° 和 0.28° , 波长为 $3.9\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 的 Y-LP 光反射强度峰值分别出现在 0.28° 和 -0.28° 。图 4(d) 的近场传输相位分布结果显示, 两路偏振光的反射场等相位面依然是平面, $3.9\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 波长 X-LP 光的等相位面法线方向分别为 -0.28° 和 0.28° , $3.9\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 波长 Y-LP 光的等相位面法线方向分别为 0.28° 和 -0.28° 。仿真结果表明, 对于 $3.9\sim 4.1\ \mu\text{m}$ 的宽光谱入射光, 经过超表面偏振合束器后会形成 $10\ \text{mrad}$ 的发散角。入射激光的线宽越

窄, 引入的合束光发散角越小。

$3.9\sim 4.1\ \mu\text{m}$ 波段内的反射、吸收和透射情况如表 2 所示。经过超表面反射后, 光束的绝大部分被反射至合束方向, 其余部分被反射至正常反射方向或被器件吸收。当入射光为 X-LP 光时, 反射至合束方向的光强占比为 96.6% , 反射至正常反射方向 (-11.54°) 的光强占比为 0.9% , 而被合束器吸收的光强占比为 2.5% ; 当入射光为 Y-LP 光时, 反射至合束方向的光强占比为 97.7% , 反射至正常反射方向 (11.54°) 的光强占比为 0.7% , 被合束器吸收的光强占比为 1.6% 。

表 2 超表面合束器对 $3.9\sim 4.1\ \mu\text{m}$ 波段内入射光束的响应特性

Table 2 Response characteristics of metasurface beam combiner in the $3.9\sim 4.1\ \mu\text{m}$ band

Polarized light	Total reflection efficiency / %	Intensity in beam combiner direction / %	Intensity in normal reflection direction / %	Absorbed intensity / %	Transmitted intensity / %
X-LP	97.5	96.6	0.9	2.5	0
Y-LP	98.4	97.7	0.7	1.6	0

为了进一步分析反射光和合束光在自由空间传输时的光束质量, 使用 FDTD 软件仿真得到的反射近场强度和相位分布, 利用周期性场拼接技术构造一个半径为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的圆形辐射源。X-LP 和 Y-LP 辐射光源的强度和相位分布如图 5(a)、(b) 所示。由于所设计超表面仅在 X 方向具有相位梯度, 图 5 中只在 X 方向观察到光强和相位的周期变化, 而同一 X 值对应的不同 Y 值处光场强度和相位一致。将构造的光源放置在 $Z=0$ 位置处, 借助 Zemax 中的物理光学传播

(POP) 工具可仿真得到不同距离处传输场的光强分布。计算了 Z 值在 $0\sim 100\ \text{mm}$ 内 20 个不同距离处的光斑分布, 图 5(c)、(d) 中的实心散点分别为 X-LP 和 Y-LP 反射光的光斑半径。当光束在自由空间传输时, 由光强二阶矩定义的光斑半径与距离之间满足双曲线关系^[35]

$$\omega_z = \left[\omega_0^2 + \theta_z^2 (Z - Z_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中: ω_z 为距离 Z 处的光斑半径; ω_0 为束腰; θ_z 为远场发散角; Z 为传输距离; Z_0 表示束腰位置。利用式 (2)

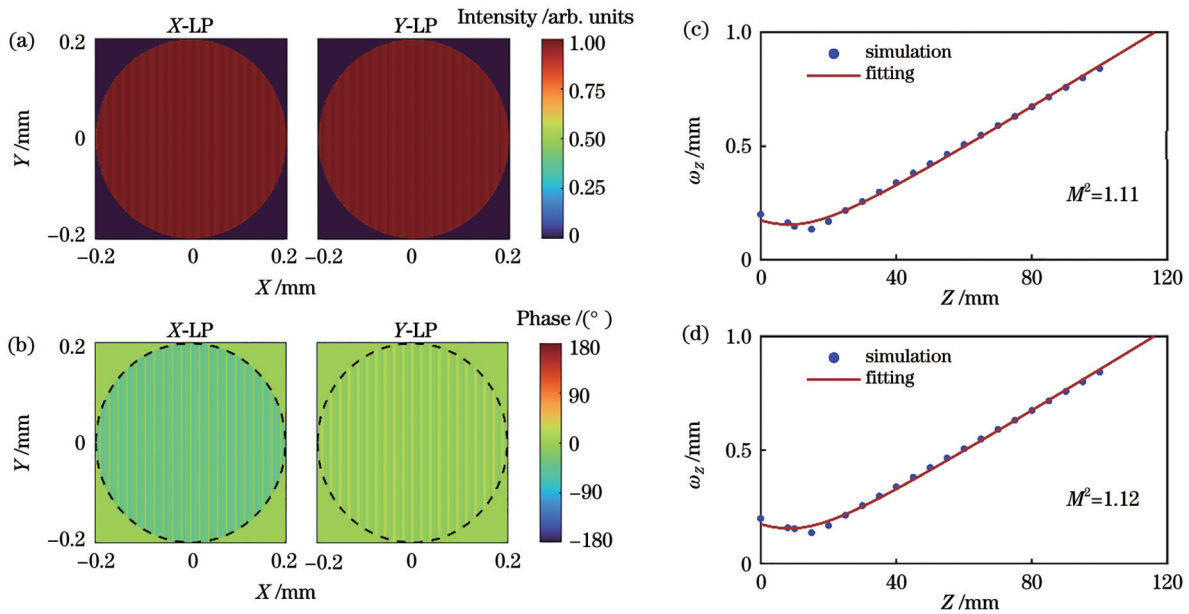
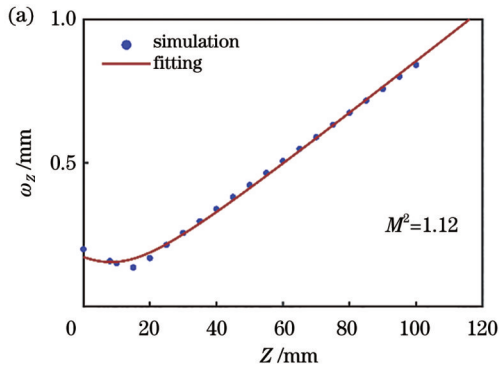


图 5 反射光束传输性能。X-LP 和 Y-LP 反射光的 (a) 近场光强分布和 (b) 相位分布; (c) X-LP 和 (d) Y-LP 反射光传输到不同距离处的光斑半径

Fig. 5 Transmission performance of the reflected beam. (a) Near field intensity distribution and (b) phase distribution of reflected X-LP and Y-LP light; spot radii of reflected (c) X-LP and (d) Y-LP light transmitting to different distances

对计算结果进行拟合,得到 X-LP 反射光的发散角为 9.2 mrad,光束传输质量因子 M^2 为 1.11; Y-LP 反射光的发散角为 9.3 mrad,光束传输质量因子 M^2 为 1.12。拟合曲线见图 5(c)、(d)的实线,两路线偏振反射光均具有良好的光束质量。需要说明的是,当入射光束为理想基模高斯光束($M^2=1$)时, X-LP 和 Y-LP 异常反射光束传输质量因子分别为 1.11 和 1.12,反射率的不一致和相位的不完美导致光束质量出现轻微恶化。

由于两束正交线偏振光的传播具有独立性,因此



反射后合束光强度为线性叠加关系。图 6(a)所示为反射合束光的传输仿真结果,光束发散角为 9.3 mrad,光束传输质量因子 M^2 为 1.12。图 6(b)所示为合束前后的激光光谱。合束前光谱为实验测量的 QCL 光谱,当驱动电流为 1.2 A 时, X-LP QCL 的输出中心波长为 3.93 μm ,光谱半峰全宽为 50 nm; Y-LP QCL 的输出中心波长为 3.97 μm 、光谱半峰全宽为 20 nm。根据图 4(a)所示的不同波长的入射光合束效率计算得到合束后激光光谱,如图 6(b)红色点划线。

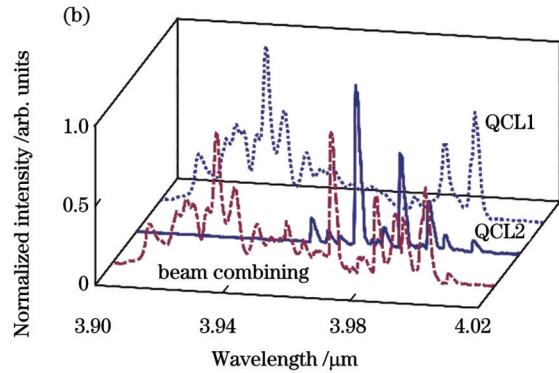


图 6 偏振合束性能。(a)偏振合束后光束宽度随传输距离的变化情况;(b)偏振合束前后输出光谱的比较

Fig. 6 Performance of polarized beam combining. (a) Variation of beam width with transmission distance after polarized beam combining; (b) comparison of output spectra before and after polarized beam combining

根据图 1(a)的偏振合束实验装置,超表面偏振合束器在实验所用 QCL 波段内的 X-LP 和 Y-LP 光的平均合束效率为 96.6% 和 97.7%。假设准直镜(CL1 和 CL2)的透过率为 90%、半波片(WP)的透过率 95%,则 X-LP 和 Y-LP 光的合束效率分别为 82.5% 和 88.0%,整个合束装置的合束总效率可达 85.3%。由此可见,所研究的偏振合束方法适用于宽光谱 QCL,可实现高光束质量、高效率偏振合束。相比于布儒斯特偏振片,所研究的超表面偏振合束器可通过微纳加工技术制备,不需要额外的镀膜工艺即可在 3.9~4.1 μm 带宽内实现高效率合束;相比于线栅偏振片,所设计合束器的反射效率优于 95%,且在 200 nm 带宽范围内具有很小的色散,不会造成宽光谱线宽入射光合束后的光束质量退化;相比于 MgF_2 双折射晶体,所设计合束器的两路合束光的入射角度可通过设计超表面结构来灵活调控,易于简化光路和小型化。

4 结 论

基于异常反射超表面设计了可工作于中红外波段的偏振合束器,以实现两束正交线偏振光的反射合束。该偏振合束器由 2 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的周期性排列超胞构成,制备在硅衬底上。每个超胞包含 10 个离散的 2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 单胞。单胞由底层 Au、中间层 SiO_2 和顶层矩形 Si 柱构成。3 层材料的厚度分别为 0.3 μm 、0.9 μm 和 1.0 μm 。在 4.0 μm 工作波段内,对顶层硅柱的长和宽进行优化;当 X-LP 和 Y-LP 光分别以 11.54°

和 -11.54° 入射时,超表面偏振合束器对两路入射光的反射角均为 0°,从而实现了反射合束。在 3.9~4.1 μm 宽带内,两路偏振光的反射率分别为 96.6% 和 97.7%,具有大工作带宽和高合束效率。此外,根据反射场的近场光强分布和相位分布,利用周期性场拼接方法和高斯光束传播规律,模拟了合束光在自由空间的传播情况。当两路入射光均为基横模时,计算得到合束光的光束传输质量因子 M^2 为 1.12,这得益于超表面合束器的较完美梯度波前分布、高一致性的反射率空间分布及工作带宽内的超低色散。所研究的超表面偏振合束器设计灵活,制备材料和特征尺寸适配成熟 MEMS 工艺,有望解决中长波红外波段偏振及合束器件制备困难、工作效率低的难题。

参 考 文 献

- [1] Razeghi M, Zhou W J, Slivken S, et al. Recent progress of quantum cascade laser research from 3 to 12 μm at the Center for Quantum Devices[J]. Applied Optics, 2017, 56 (31): H30-H44.
- [2] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. Science, 1994, 264(5158): 553-556.
- [3] Bai Y B, Slivken S, Kuboya S, et al. Quantum cascade lasers that emit more light than heat[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 99-102.
- [4] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2012, 6: 432-439.
- [5] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. Tapered 47 μm quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 45 Watts of continuous wave optical power[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4382-4388.

- [6] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. High-performance continuous-wave room temperature 4.0- μm quantum cascade lasers with single-facet optical emission exceeding 2 W[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(44): 18799-18802.
- [7] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A G, et al. Multi-watt level short wavelength quantum cascade lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7953: 79531L.
- [8] 曹宇轩, 舒世立, 孙方圆, 等. 中红外半导体激光器合束技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1003002.
Cao Y X, Shu S L, Sun F Y, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003002.
- [9] Gu Z H, Zhang J C, Zhai S Q, et al. Spectral beam combining of discrete quantum cascade lasers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(10): 584.
- [10] Zhang J, Peng H Y, Wang J B, et al. Dense spectral beam combining of quantum cascade lasers by multiplexing a pair of blazed gratings[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 966-971.
- [11] Sun F Y, Li J H, Tan K H, et al. Beam combining of a broadly and continuously tunable quantum cascade laser[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 35999-36009.
- [12] Zhao Y, Zhang J C, Zhou Y H, et al. External-cavity beam combining of 4-channel quantum cascade lasers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 52-55.
- [13] 彭芊芊, 王弦歌, 杨克羽, 等. 中红外高双折射悬吊芯硫系光纤的优化及制备[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 0101021.
Peng Q Q, Wang X G, Yang K Y, et al. Optimization and fabrication of chalcogenide high-birefringence suspended-core fiber in mid-infrared[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(1): 0101021.
- [14] Wagner J, Schulz N, Rösener B, et al. Infrared semiconductor lasers for DIRCM applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7115: 71150A.
- [15] 王珂, 蔡军, 丁宇, 等. 中红外量子级联激光器偏振合束实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20210679.
Wang K, Cai J, Ding Y, et al. Study on polarization beam combining experimental of mid-infrared quantum cascade laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210679.
- [16] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [17] 刘亮, 周绍林, 全海洋, 等. 双通道偏振复用可擦除介质型全息超表面[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813016.
Liu L, Zhou S L, Quan H Y, et al. Erasable dual-channel polarization multiplexed dielectric hologram metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813016.
- [18] Jin C Q, Afsharnia M, Berlich R, et al. Dielectric metasurfaces for distance measurements and three-dimensional imaging[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(3): 036001.
- [19] Fei P, Vandenbosch G A E, Guo W H, et al. Versatile cross-polarization conversion chiral metasurface for linear and circular polarizations[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(13): 2000194.
- [20] 潘武, 李永瑞, 张彬, 等. 超表面太赫兹双频带线极化转换器设计及分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19): 1930002.
Pan W, Li Y R, Zhang B, et al. Design and analysis of metasurface terahertz dual-band linear polarization converter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 1930002.
- [21] Zhang B L, Hu Z D, Wu J J, et al. Metasurface-based perfect vortex beams with trigonometric-function topological charge for OAM manipulation[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(9): 2409-2412.
- [22] Cheng K X, Liu Z X, Hu Z D, et al. Generation of integer and fractional perfect vortex beams using all-dielectric geometrical phase metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(20): 201701.
- [23] Zhang B L, Hu Z D, Wang J C, et al. Creating perfect composite vortex beams with a single all-dielectric geometric metasurface[J]. *Optics Express*, 2022, 30(22): 40231-40242.
- [24] Zhou H Y, Zhang S, Wang S J, et al. Optically controlled dielectric metasurfaces for dynamic dual-mode modulation on terahertz waves[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(2): 026005.
- [25] Burch J, Ma J, Hunter R I, et al. Flexible patches for mm-wave holography[J]. *Applied Physics Letters*. 2019, 115(2): 021104.
- [26] Degl'Innocenti R. Terahertz metasurface platform for modulation, holography, and encryption[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(2): 020503.
- [27] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [28] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [29] Chen J, Yu F L, Liu X S, et al. Polychromatic full-polarization control in mid-infrared light[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 105.
- [30] Jia S L, Wan X, Bao D, et al. Independent controls of orthogonally polarized transmitted waves using a Huygens metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(5): 545-553.
- [31] Xu Y H, Li Q, Zhang X Q, et al. Spin-decoupled multifunctional metasurface for asymmetric polarization generation[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(11): 2933-2941.
- [32] Li Z Y, Palacios E, Butun S, et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1615-1621.
- [33] Wang H, Zhang B F, Han C, et al. Polarization-multiplexed wavefront-engineering by all-dielectric metasurface with asymmetric polarization-decoupled meta-atoms[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32377-32387.
- [34] Li T, Chen C, Xiao X J, et al. Revolutionary meta-imaging: from superlens to metalens[J]. *Photonics Insights*, 2023, 2(1): R01.
- [35] Bélanger P A. Beam propagation and the ABCD ray matrices[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(4): 196-198.

Mid-Infrared Polarized Beam Combiner Based on Anomalous Reflective Metasurface

Yang Lulu^{1,2}, Wang Xin^{1,2*}, Zhang Meng^{1,3}, Yang Suhui^{1,3}, Zhang Jinying^{1,2}

¹*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

²*Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China;*

³*Key Laboratory of Photonics Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China*

Abstract

Objective High-power mid-infrared lasers extensively apply in explosive monitoring, medical diagnosis, environmental monitoring, infrared countermeasures, and industrial control. However, limited by the upper-level electron injection efficiency and the energy level structure, the output power of the mid-infrared laser quantum cascade operating under fundamental transverse mode cannot exceed 3 W. Beam combining technology has been proven to be an effective way to further expand output power and brightness. Taking full advantage of good linear polarization characteristics of semiconductor lasers, polarization beam combining offers simple structure and high efficiency. Moreover, it can be synergistically combined with other beam combining technologies to further enhance output power and laser brightness. Traditional polarization beam combiners are Brewster plate, metal grating polarizer, and birefringent prism. For the Brewster plate, broadband (approximate 100 nm), high transmission coating for P-polarization is required. It is a big challenge to mid-infrared. Due to the presence of metal lines, the transmission of the metal grating polarizer is usually lower than 80%, which results in a low beam combining efficiency. Commonly used birefringent MgF₂ prism in mid-infrared has a small separation angle of 1.2°, which makes the optical path arrangement difficult. Metasurfaces offer a high degree of freedom in optical wave amplitude, phase, and polarization state regulations. It has already been applied in polarization beam splitters, which inspires the design of a beam combiner. By anomalous reflection, two light beams with orthogonal polarizations and different incident angles can be reflected in the same direction. We propose a polarization beam combiner based on anomalous reflection metasurface, which shows a high efficiency and broad working spectral band.

Methods The proposed metasurface consists of periodic supercells. Each supercell contains 10 discrete single cells, which comprise a metal substrate, a dielectric middle layer, and a top rectangular column. By changing the two side lengths of the rectangular column of single cells, desired phase responses can be achieved for two orthogonal polarized incident beams. When ten optimized single cells are arranged spatially, the X-direction linear polarization (X-LP) incident beams experience a positive linear phase response. Meanwhile, the Y-direction linear polarization (Y-LP) incident beam experiences a negative linear phase response. Therefore, both beams are reflected perpendicularly to the metasurface when the incident angles of X-LP and Y-LP beams are 11.54° and -11.54° respectively.

Results and Discussions According to the purpose and methodology of this study, we design a metasurface polarization beam splitter optical path operating in the middle-wave infrared range [Fig. 1(a)] and a three-layer metasurface structure [Fig. 1(b)]. By modeling the individual unit cell of the metasurface [Fig. 1(c)], we calculate the phase and amplitude responses of X-LP and Y-LP incident beams as we vary the length and width of the rectangular antenna column from 0.2 to 1.6 μm [Fig. 2(a)–(b)]. The particle swarm optimization algorithm is employed to determine the dimensions of the rectangular antenna that satisfy our desired phase requirements (Table 1). The phase introduced by the designed single cell aligns well with expectations for both incident polarizations while maintaining consistently high reflectivity levels throughout [Fig. 2(c)]. When the collimated X-LP and Y-LP beams with a central wavelength of 4.0 μm and incident angles of 11.54° and -11.54° reach the metasurface, both beams are reflected anomalously in the normal direction of the metasurface [Fig. 3(a)–(b)]. Reversely, when the collimated X-LP and Y-LP beams incident perpendicularly on the metasurface beam combiner, the X-LP beam is reflected in 11.54° direction and the Y-LP beam is reflected in -11.54° direction [Fig. 3(c)–(d)]. When the incident beam has a divergence angle of 50 mrad, the reflected beam has a divergence angle of 48 mrad [Fig. 3(e)]. To study the anomalous reflection of the metasurface for a light source with broad spectral bandwidth, we scan the incident light central wavelength from 3.9 to 4.1 μm. The resulting combined beam exhibits a divergent angle of 10 mrad while the reflectivity is maintained as high as 95% (Fig. 4). Based on the above theoretical simulation results, the reflected beam propagation properties in the free space are investigated by Zemax's physical optical propagation (POP) tool. Assuming both X-LP and Y-LP incident beams are fundamental Gaussian beams, the beam

quality factor of the reflected X-LP beam is 1.11, and that of the reflected Y-LP beam is 1.12 (Fig. 5). Therefore, when X-LP and Y-LP beams are combined to propagate in the same direction, the beam quality factor of the combined beam is 1.12 [Fig. 6(a)]. The spectrum of the combined beam coincides well with the overlap of the two individual incident laser spectra [Fig. 6(b)]. Consequently, this study demonstrates that a polarization beam combiner based on the anomalous reflective metasurface has not only high combination efficiency but also broad operation bandwidth. It is suitable to be used for the mid-infrared QCL power combining.

Conclusions We study a polarization beam combiner based on anomalous reflective metasurface, which is utilized to combine two incident beams with orthogonal linear polarizations. The beam combiner consists of periodic supercells with a dimension of $2\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$. Each supercell contains 10 single cells of $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$. The single cell comprises a metal substrate, a dielectric middle layer, and a top rectangular column. When the collimated X-LP and Y-LP beams with a central wavelength of $4.0\ \mu\text{m}$ and incident angles of 11.54° and -11.54° reach the metasurface, both beams are reflected anomalously in the normal direction of the metasurface. The polarization beam combination is realized. Within a broad spectral band of 3.9 to $4.1\ \mu\text{m}$, high average anomalous reflectivity of 96.6% and 97.7% are obtained for X-LP and Y-LP incident beams, respectively. Based on the near field reflective intensity and phase distribution, the propagation of the combined beam in free space is simulated by the periodic field splicing method and Gaussian beam propagation law. Assuming both X-LP and Y-LP incident beams are fundamental Gaussian beams, the beam quality factor of the combined beam is 1.12. The metasurface beam combiner shows high design flexibility and can be prepared by mature MEMS technology. It has a good potential to solve the problems in mid- and long-infrared power beam combinations.

Key words physical optics; mid-infrared waveband; metasurface; polarized beam combination; anomalous reflection