

## 基于相位梯度光栅介电超表面的高效太赫兹波异常反射器

苏英蔚, 田 震\*

(天津大学精密仪器与光电子工程学院太赫兹研究中心 光电信息技术教育部  
重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 太赫兹 (THz) 波由于其诸多独特的性质, 有着广泛的应用前景。然而由于相关材料和器件的发展相对滞后, 太赫兹技术在实际中的应用尚有诸多限制。超材料和超表面概念的提出, 能够对太赫兹波的相位、振幅、偏振进行有效操控, 为太赫兹技术的发展提供了许多新的思路。其重要的功能之一是依靠相位不连续将入射波反射到非镜面方向, 即通称的广义斯涅尔定律。然而, 此前报道的大多数异常反射装置的效率都相对较低, 在实际应用中存在局限性。针对这一问题, 文中提出了一种太赫兹超表面异常反射器, 将法向入射光反射到  $40^\circ$  方向且不改变其偏振, 并从理论上阐述了提高效率的思路, 且通过数值模拟展示其有效性。通过使用全介质材料构建超表面从而消除材料损耗, 并利用不同布洛赫波的耦合以提供非局部响应, 令器件的工作效率超过 99%。此外, 这一设计理念可以推广到偏振无关器件中, 并且对其他类似的器件也有一定参考意义。这一工作有潜力被应用于太赫兹波激光器、太赫兹波腔谐振器等太赫兹波实际器件中。

**关键词:** 太赫兹; 超表面; 异常反射; 非局域性

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220304

## High-efficiency terahertz wave anomalous reflector based on dielectric metasurface of phase gradient grating

Su Yingwei, Tian Zhen\*

(Center for Terahertz Waves and School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education of China), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Terahertz (THz) wave has broad application prospects because of its many unique properties. However, due to the relative lag in the development of related materials and devices, there are still many limitations in the practical application of terahertz technology. Metamaterials and metasurfaces can effectively manipulate the phase, amplitude, and polarization of terahertz waves, providing many new possibilities for the development of terahertz technology. One of its important functions is to reflect incident waves in non-specular directions through phase discontinuities, commonly known as generalized Snell's law. However, most of the previously reported anomalous reflection devices are relatively inefficient and have limitations in practical applications. To solve this problem, we propose a terahertz metasurface anomalous reflector that reflects normal incident light to a  $40^\circ$  direction without changing its polarization. We theoretically expound the idea of improving

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-05-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0701004); 天津市杰出青年科学基金 (20JCJQC00190)

作者简介: 苏英蔚, 男, 硕士生, 主要从事太赫兹器件方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 田震, 男, 教授, 博士, 主要从事太赫兹光子学方面的研究。

efficiency and demonstrate its effectiveness through numerical simulation. We construct a metasurface using all-dielectric materials to eliminate material losses and exploiting the coupling of different Bloch waves to provide a non-local response, the operating efficiency of the device can be increased to more than 99%. In addition, our design concept can be generalized to polarization-independent devices and could be useful for other similar devices. This work has the potential to be applied to practical terahertz devices such as terahertz lasers and terahertz cavity resonators.

**Key words:** terahertz; metasurface; anomalous reflection; non-locality

## 0 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波一般是指位于光谱 0.1~10 THz 之间的电磁波。太赫兹波的许多独特特性,如低光子能量和良好的穿透能力等,使得其在检测、成像、通信和传感等众多领域具有巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。充分利用太赫兹波的必要条件之一是能够实现对其多参数的控制的高效设备。作为太赫兹领域的热门话题,超材料一经问世就引起了极大的兴趣,它是一种由亚波长周期性结构组成的人造材料,旨在通过适当的设计实现自然材料所不具备的各类特性。超表面是一种具有平面结构的超薄超材料,能够根据不同的设计实现对相位、振幅和偏振的任意控制<sup>[4-8]</sup>。已经有许多基于超表面的功能得到了证实,包括负折射率、宽带吸收器、全息成像、计算成像等<sup>[9-12]</sup>。

超表面的一个非常重要的应用是光的异常折射和反射,因为它能够应用于成像、光束控制等。可以通过相位不连续性来实现这一功能,即广义斯涅尔定律<sup>[13]</sup>。此前已有许多工作致力于在太赫兹波段实现这一功能,提出并设计了大量不同的结构和材料。例如,基于 C 形金属开口谐振环的超表面、带有周期性图案的石墨烯超表面、金属光栅结构和双层或多层超表面等等<sup>[14-19]</sup>。尽管上述工作可以实现所需的太赫兹波偏转,但它们的效率却有待提高,受偏振转换效率、欧姆损耗、吸收损耗、寄生反射等因素的限制,大多数已发表的器件的工作效率都低于 90%。太赫兹波由于在大气中面临水分子的强吸收问题,其功能器件尤为需要考虑效率的问题。为解决等离子体超表面的材料损耗,已有一些工作致力于设计出介质相位梯度光栅来作为替代<sup>[20-22]</sup>,并证实了它们的工作效率超过了类似的金属结构。在此基础上,为了进一步提高效率,诸多学者已经进行了相当多的研究,揭示了许多潜在的机制。其中一个十分重要的结论是仅依

靠局部相位补偿不足以实现对光波的完美控制<sup>[23]</sup>,在此基础上超表面需要表现出一定的局部增益和损耗特性以满足阻抗匹配条件,而不是广义斯涅尔定律描述的均匀表面<sup>[24-26]</sup>。虽然这个结论给出了基于射线光学近似得到的效率的上限,但这样的要求在实际设计中很难满足,而且有源元件的存在会带来新的问题。这种困境的解决方案之一是引入非局部响应,通过合理的设计使得能量能够横向转移,从而使超表面局部交替地表现出损耗和增益特性,而整个超表面的响应之和仍然是无损的<sup>[27]</sup>。在此基础上提出的新结构偏离了传统斯涅尔定律的要求,并显著提升了器件的效率。然而,虽然在微波和光学波段已经提出了完美的异常反射结构<sup>[28-29]</sup>,但在太赫兹波段的相关研究仍然很少。

文中提出了一种基于硅和二氧化硅结构的相位梯度光栅超表面,用于实现太赫兹波的高效异常反射,通过全电介质设计降低吸收损耗,并优化光栅参数以进一步提高效率。该器件被设计工作在 0.96 THz,将正入射光反射至 40°角,且其偏振不改变。笔者从理论上分析了它的工作机制,仿真结果证明了其工作的效率高达 99% 以上,并这一设计理念可以推广到偏振无关器件中。

## 1 原理

实现异常折射和反射的关键是在超表面获得覆盖  $0\sim 2\pi$  的相移以满足所谓的广义斯涅尔定律,表示如下<sup>[13]</sup>:

$$n_i \sin \theta_r = n_i \sin \theta_i + \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx} \quad (1)$$

式中:  $n_i$  为入射介质的折射率;  $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别为入射角与反射角;  $\lambda_0$  是真空波长;  $d\Phi(x)/dx$  则是超表面上的相位梯度。公式 (1) 同样可以用于描述异常折射现

象,只需将  $n_i \sin \theta_i$  替换为  $n_i \sin \theta_r$ 。假设在一个周期长度  $D$  内覆盖  $2\pi$  的相移,则正入射时的反常反射角可以通过下式计算:

$$\theta_r = \arcsin \left( \sin \theta_i + \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{2\pi}{D} \right) = \arcsin \left( \frac{\lambda_0}{D} \right) \quad (2)$$

根据公式 (2),很明显,异常反射角可以通过满足适当的相移来控制。当界面处没有相位变化时,公式 (1) 便又简化为斯涅尔定律的标准形式。因此,重点是找到一种方法来实现太赫兹波段的覆盖整个  $2\pi$  范围的相移。幸运的是,已经有通过亚波长介质光栅进行相位控制的研究。高折射率对比度光栅 (HCG) 阵列提供宽带高反射率,同时调整光栅的占空比可以实现相移<sup>[30-31]</sup>。这可以用有效介质理论来解释<sup>[32]</sup>,即当入射波沿  $Z$  方向入射时,保持介质在  $Z$  方向的厚度不变,改变其  $X$  和  $Y$  方向的尺寸能够相应地改变在该方向上的有效折射率。HCG 的一个显著优点是不会改变入射波的偏振,从而避免了因偏振转换效率带来的损耗。然而,仅使用 HCG 可能无法保证在所需频率下完全覆盖  $0 \sim 2\pi$  相移,并且随着光栅占空比的改变,反射率可能会下降,从而使得效率降低。解决这个问题方法之一是通过宽带反射的平面来确保超表面的反射率,从而使得介质光栅的反射率不再重要,于是在选择光栅参数时可以优先考虑相移以确保覆盖了整个  $2\pi$  范围。

广义斯涅尔定律描述的现象可以用惠更斯原理来解释<sup>[33]</sup>,它指出波前的每个点都是出射波的次级源,因此,超表面上的场分布决定了超表面的反射。基于这个想法,可以通过确认超表面上的场和能量流分布来探寻完美异常反射存在的条件。首先选取  $X$  方向上周期的长度  $D$ ,使其满足  $\lambda < D < 2\lambda$ ,这样系统中便只有  $-1$  级,  $0$  级和  $+1$  级衍射,其中  $+1$  级是所需的异常反射,  $0$  级是正常镜面反射,  $-1$  级则是寄生反射,如图 1 所示。显然,最小化  $0$  级和  $-1$  级衍射能够使得器件工作效率最大化。假设  $\varphi_{-1}, \varphi_0, \varphi_{+1}, r_{-1}, r_0, r_{+1}$  分别是这三个衍射级的相位和振幅响应,便可以得出当 TM 波正入射时超表面上方的场的表达式为:

$$E_x = E_i (1 - r_0 e^{i\varphi_0} - r_1 \cos \theta_r e^{iGx + i\varphi_1} - r_{-1} \cos \theta_r e^{-iGx + i\varphi_{-1}})$$

$$H_y = \eta E_i (1 + r_0 e^{i\varphi_0} + r_1 e^{iGx + i\varphi_1} + r_{-1} e^{-iGx + i\varphi_{-1}}) \quad (3)$$

式中:  $E_i$  为入射平面波的电场;  $\eta = \sqrt{\epsilon/\mu}$ ,  $G = 2\pi/D$  是

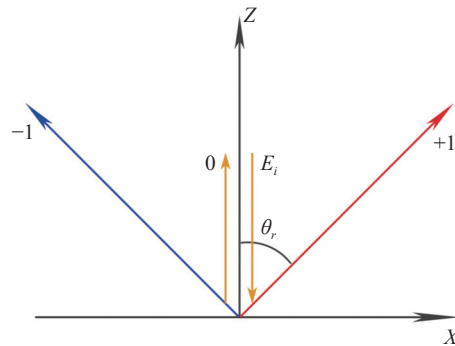


图 1 存在三个衍射级的超表面上的异常反射

Fig.1 Schematic of the anomalous reflection on metasurface with three diffraction orders

超表面的倒易矢量;  $\theta_r$  是  $+1$  阶衍射对应的反射角度,这里省略了时间因子  $e^{i\omega t}$ 。有了  $E_x$  和  $H_y$ , 便可通过  $S_{pz}(x) = \frac{1}{2} \text{Re}(E_x H_y^*)$  计算出超表面上的能流分布。当系统中没有吸收和透射时,根据能量守恒定律可得到  $r_0^2 + r_1^2 \cos \theta_r + r_{-1}^2 \cos \theta_r = 1$ ,理想状态下  $r_{-1}$  和  $r_0$  应等于 0 来让效率最大化,此时可得  $r_1 = 1/\sqrt{\cos \theta_r}$ 。于是,能流分布可以写作:

$$S_{pz}(x) = \frac{1}{2} \eta E_i^2 r_1 (1 - \cos \theta_r) \cos(Gx + \varphi_1) \quad (4)$$

为了实现公式 (4) 中的条件,即  $S_{pz}(x) \neq 0$ ,超表面需要周期性地局部展示得失响应,唯一的例外是  $\theta_r = 0$ ,也就是没有异常反射现象的时候。一个很容易想到的解决方案就是使用有源和有损组件构建系统,但这并非良策,因为这些元件难以应用于实际。值得一提的是  $\int_x^{x+D} S_{pz}(x) dx = 0$ ,意味着能量在一个周期内是无损的,而局部响应则是增益或损耗。换句话说,文中需要的是一个非局域性的超表面,它可以使能量横向转移,并且还应该满足广义斯涅尔定律描述的相位不连续性。考虑到上面提到的介质光栅,当平面波入射时,不同阶的传播布洛赫波和更高阶的倏逝波被激发,它们会相互耦合<sup>[34-35]</sup>。可以将介电光栅视为一个耦合谐振器系统,其中每个凹槽都可以视为一个谐振腔。容易想到当改变这些凹槽的宽度时,可以调节这些布洛赫模的行为,以实现想要的能量转移。于是下一步是找到一组合适的参数来达到预期的高效率。

基于这个想法,提出了如图 2 所示的由硅和二氧化硅组成的全电介质超表面,用于实现太赫兹波段的

高效异常反射。布拉格反射镜保证了反射率并降低了损耗,而相位光栅可以提供所需的相位不连续性和非局部响应。FDTD 仿真结果显示,当垂直入射时反射约为  $40^\circ$ ,效率超过 99%。文中的仿真结果基于全波模拟软件 CST Microwave Studio<sup>[21-22]</sup>。

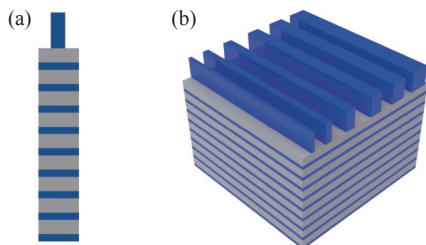


图 2 (a) 单个介质光栅结构; (b) 异常反射的介质超表面

Fig.2 (a) Schematic of unit cell of dielectric grating; (b) Dielectric metasurface for anomalous reflection

## 2 设计与结果

由于广义斯涅尔定律需要全范围的  $2\pi$  相移覆盖,对 TM 模平面波正入射下的周期为  $80\ \mu\text{m}$  的介质光栅进行仿真,下方布拉格反射镜根据其设计原理,厚度应为对应波长的  $1/4$ ,由厚度为  $23\ \mu\text{m}$  的硅层与  $42\ \mu\text{m}$  的二氧化硅层交替组成,光栅高度为  $100\ \mu\text{m}$ 。通过参数扫描功能获得了不同占空比下的反射率和相位响应。在  $0.96\ \text{THz}$  处的反射率和相位响应如图 3 所示。显然,通过调整占空比可以获得所需的相位变化,同时由于布拉格镜的存在,反射率可以很好地保持。因此,可以使用这种超光栅构建超表面以实现异常反射。

接下来,根据广义斯涅尔定律选择一组参数,即构建一个  $2\pi$  范围的线性相位分布。六个光栅的占空

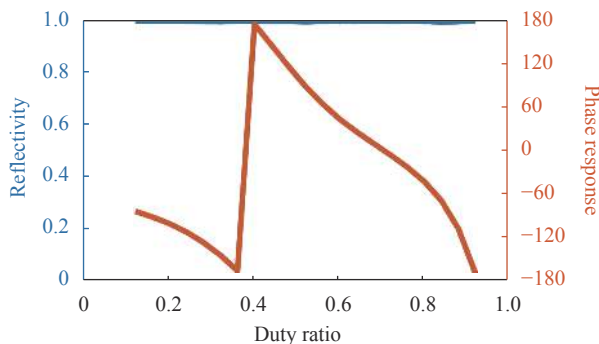
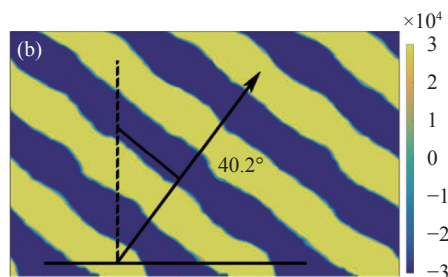
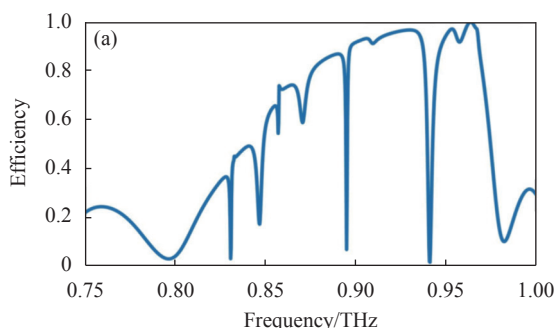


图 3  $0.96\ \text{THz}$  时,不同占空比下的介质光栅反射率和相位响应

Fig.3 Reflectivity and phase response verses the duty ratio of metagrating at  $0.96\ \text{THz}$

比分别为 18%、34%、44%、52%、64% 和 79%。这时器件的周期为  $480\ \mu\text{m}$ ,对应的异常反射角度由公式 (2) 计算应为约  $40^\circ$ 。它们是对参数的初步猜测,同时也作为对照。如前文所述,器件需要考虑非局域性响应,这意味着在这种情况下单独考虑每个组成元素各自的响应是不够的。因此,使用 CST 的优化器和参数扫描功能来优化这些参数从而实现高效率,仿真设置为频域求解器,边界条件为 unit cell,入射波为 TM 模正入射。最终选取的占空比参数从左至右依次为 14.0%、37.8%、48.4%、53.4%、58.7%、88.7%。结果如图 4 所示。从电场图中可以看出,异常反射角约为  $40^\circ$ ,与公式 (2) 计算的结果吻合。在  $0.96\ \text{THz}$  处效率超过 99%。与未经优化的原始设计相比,可以观察到效率的明显提高。图 4(c) 显示了超表面中存在横向能量转移。不同区域的向上和向下箭头表示非局部增益和损失响应。图 4(d) 显示了改变第一个光栅的占空比的效果。改变另外五个也可以观察到类似的结果。可以发现占空比变化的影响很大,这意味着通过这种方式可以有效地控制异常反射的效率。





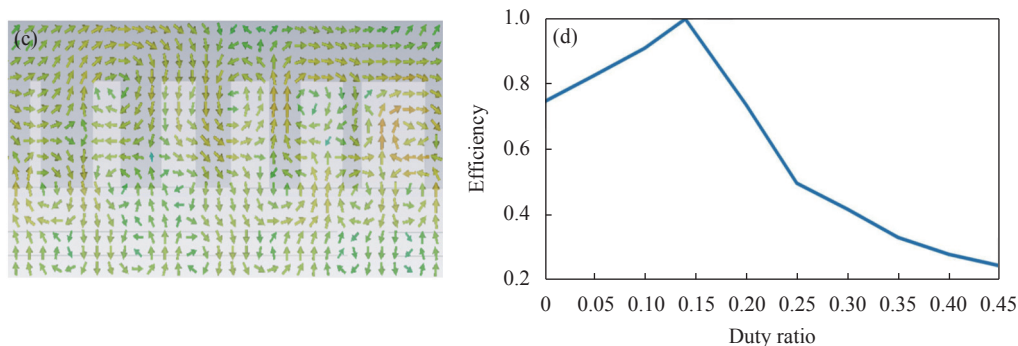


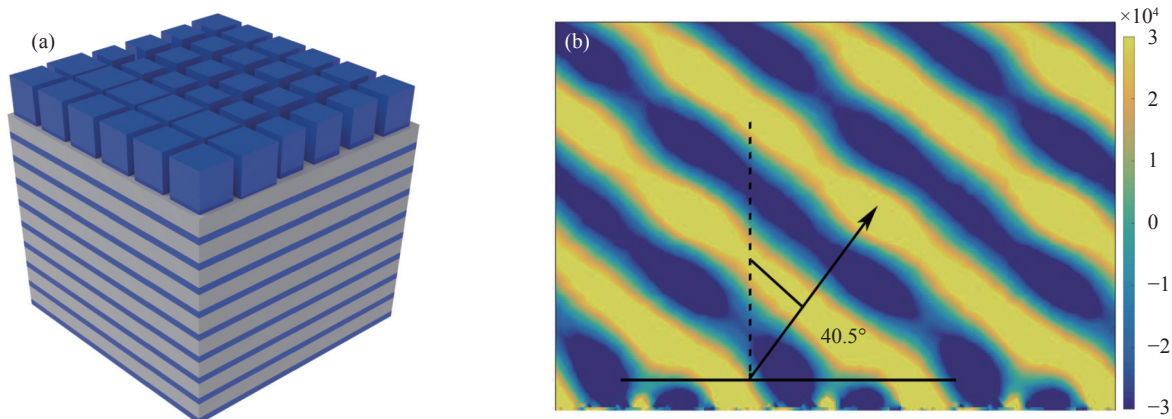
图 4 (a) 仿真得到的异常反射效率; (b) 超表面上方的异常反射场 ( $X-Z$  平面); (c) 超表面周围的能流分布; (d) 第一个光栅的占空比对异常反射效率的影响

Fig.4 (a) Simulation results of anomalous reflection efficiency; (b) Electric field of anomalous reflection above the metasurface ( $X-Z$  plane); (c) Power flow around the metasurface; (d) Anomalous reflection efficiency when the duty ratio of the first grating is scanned

类似地, 将这一设计理念扩展至二维光栅中, 从而在克服一维光栅对偏振的严格要求的同时提高效率。对长度和宽度相等的硅结构进行参数扫描, 根据广义斯涅尔定律选取合适的相位分布和对应的光栅占空比 (78%, 86%, 50%, 48%, 54%, 67%) 作为初始值, 并进一步优化这些参数。根据有效介质理论, 由于长宽相等的缘故, 这些结构对 TE 模和 TM 模的响应是一样的, 而任何偏振都可以用这两个偏振线性组合而成。因此最终提出的结构能够实现偏振无关的异常反射。图 5(a) 展示了二维超表面的结构示意图, 最终选取的二维光栅占空比参数从左至右依次为 74%、89.5%、53%、47.5%、50.5%、71.8%, 其异常反射的电场分布如图 5(b) 所示, 可见二维超表面能够实现预期的功能。图 5(c) 展示了不同偏振下异常反射的效率, 由于二维结构产生的布洛赫模更为复杂, 且不同偏振产生的谐振也不同, 因此优化效率难以达到完美, 但两种偏振在 0.96 THz 处的异常折射效率均约为 94%,

这仍然是一个可观的效率。并且, 通过对比优化后的结构与基于广义斯涅尔定律设计的二维超表面结构的对比 (效率约 80%) 展示了这一设计理念带来显著的效率提升。

所设计的结构对入射角的敏感性也是值得讨论的。反射相位分布是基于正入射的相位响应设计的, 因此当入射角变化时会随之发生偏移, 效率也会不同。图 6(a) 显示了入射角为  $5^\circ$  时的模拟结果。可以观察到异常折射角约为  $47^\circ$ , 工作效率仍能高达 95%。图 6(b) 显示了入射角为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $20^\circ$  时的效率。效率可以保持在 50% 以上, 这比之前的工作更理想。图中展示了基于传统线性相移的设计在改变入射角时的效率作为参考。随着入射角的增加, 传统设计的效率下降相对较小。这意味着两种设计使用的场景是不同的。基于非局域性的设计更适合需要更高效率或高角度灵敏度的场景, 而传统设计可以增加系统的鲁棒性或是用于可以容忍更多损失的应用中。



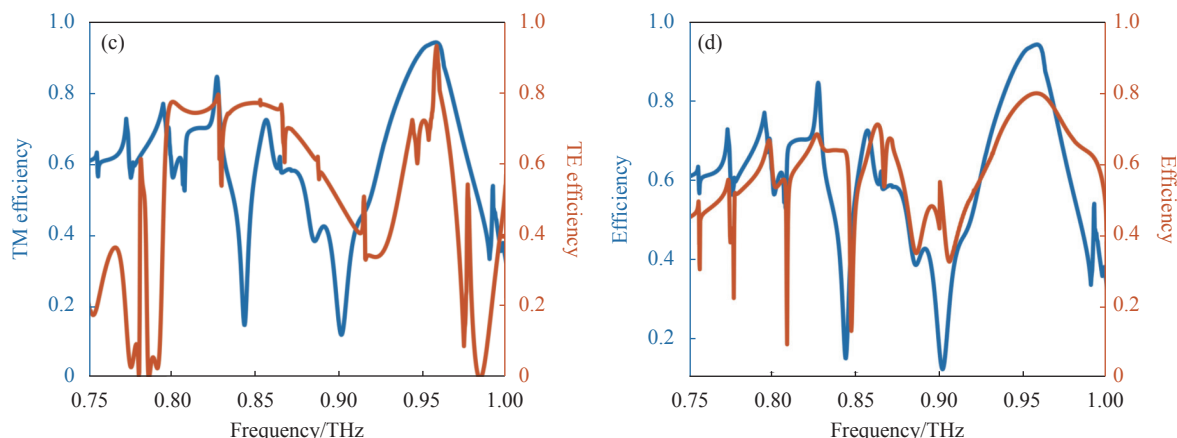


图 5 (a) 偏振无关二维超表面示意图; (b) 二维超表面上方的异常反射场 ( $X-Z$  平面); (c) TE 模与 TM 模的异常反射效率对比; (d) 文中的结构 (蓝色) 与基于广义斯涅尔定律的线性相位梯度结构 (红色) 的异常反射效率对比

Fig.5 (a) Schematic of polarization-independent two dimensional metasurface; (b) Electric field of anomalous reflection above the two dimensional metasurface ( $X-Z$  plane); (c) Efficiency of TE mode and TM mode; (d) Anomalous reflection efficiency comparison between our design (blue) and the generalized Snell's law-based linear phase gradient profile design (red)

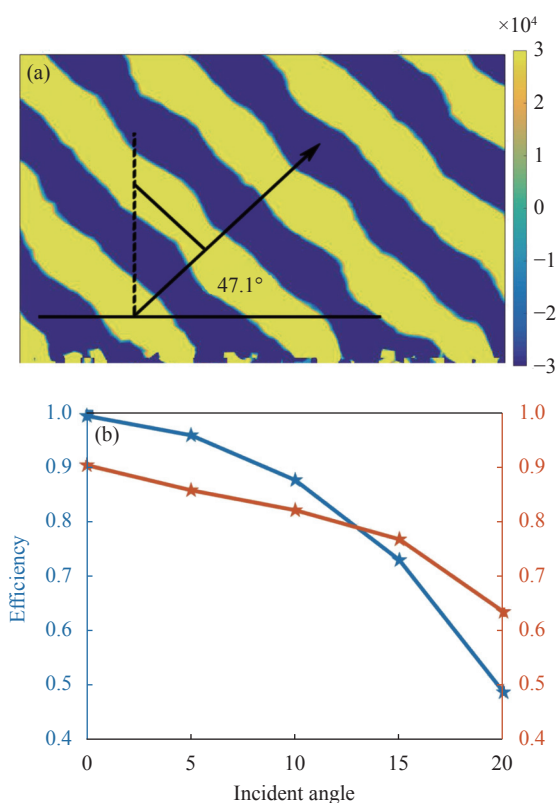


图 6 (a) 5°入射时超表面上的异常反射场; (b) 文中的结构 (蓝色) 与基于广义斯涅尔定律的线性相位梯度结构 (红色) 在入射角 0°~20°下的异常反射效率对比

Fig.6 (a) Electric field anomalous reflection above the metasurface when incident angle is 5°; (b) Anomalous reflection efficiency comparison between our design (blue) and the generalized Snell's law-based linear phase gradient profile design (red) when incident angle changes from 0° to 20°

### 3 结论

综上, 文中展示了一种在太赫兹波段工作的全介质超表面光栅异常反射器件, 通过合理选择参数, 偏离广义斯涅尔定律描述的设计, 来获得所需的非局域性, 同时避免了吸收和偏振转换损耗, 从而在太赫兹波段实现了高效率的异常反射。仿真结果表明, 异常反射的效率可高达 99% 以上。相较于此前的类似工作, 该结构使效率显著提升。此外, 这一设计理念能够有效地优化二维光栅相位超表面, 从而实现偏振无关的高效率异常反射, 进一步证明该设计能够提升用于操控太赫兹波传输的超表面的性能。这一工作有望在未来应用于实际太赫兹器件中。

### 参考文献:

- [1] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2011, 1(1): 256-263.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 97-105.
- [3] Markelz A G, Roitberg A, Heilweil E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz [J]. *Chemical Physics Letters*, 2000, 320(1-2): 42-48.
- [4] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [5] Capasso F, Aieta F, Khorasaninejad M, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J].

- Optica*, 2017, 4(1): 139.
- [6] Luo X. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1804680.
- [7] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces [J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5: 604-620.
- [8] Hao Mengzhen, Yan Fengping, Wang Wei, et al. Metamaterial-based terahertz polarization-insensitive broadband absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1214002. (in Chinese)
- [9] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [10] Zhao Y T, Wu B, Huang B J, et al. Switchable broadband terahertz absorber/reflector enabled by hybrid graphene-gold metasurface [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7161-7169.
- [11] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [12] Dun X, Ikoma H, Wetzstein G, et al. Learned rotationally symmetric diffractive achromat for full-spectrum computational imaging [J]. *Optica*, 2020, 7(8): 913-922.
- [13] Yu N, 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.
- [14] Zhang X, Tian Z, Yue W, et al. Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(33): 4567-4572.
- [15] Sun L, Zhang H, Dong G, et al. Dynamically tunable terahertz anomalous refraction and reflection based on graphene metasurfaces [J]. *Optics Communications*, 2019, 446: 10-15.
- [16] Dong X, Cheng J, Fan F, et al. Efficient wide-band large-angle refraction and splitting of a terahertz beam by low-index 3D-printed bilayer metagratings [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014064.
- [17] Liang L, Qi M, Yang J, et al. Anomalous terahertz reflection and scattering by flexible and conformal coding metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(10): 1374-1380.
- [18] Wang J, Jiang Y. Gradient metasurface for four-direction anomalous reflection in terahertz [J]. *Optics Communications*, 2018, 416: 125-129.
- [19] Wang X, Ding J, Zheng B, et al. Simultaneous realization of anomalous reflection and transmission at two frequencies using bi-functional metasurfaces [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-8.
- [20] Ma Z, Hanham S M, Albella P, et al. Terahertz all-dielectric magnetic mirror metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1010-1018.
- [21] Zhang H, Zhang X, Xu Q, et al. High - efficiency dielectric metasurfaces for polarization - dependent terahertz wavefront manipulation [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700773.
- [22] Chen K, Zhang X, Chen X, et al. Active dielectric metasurfaces for switchable terahertz beam steering and focusing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 1-11.
- [23] Estakhri N M, Alu A. Wave-front transformation with gradient metasurfaces [J]. *Physical Review X*, 2016, 6(4): 041008.
- [24] Asadchy V S, Albooyeh M, Tsvetkova S N, et al. Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(7): 075142.
- [25] Kwon D H, Tretyakov S A. Perfect reflection control for impenetrable surfaces using surface waves of orthogonal polarization [J]. *Physical Review B*, 2017, 96(8): 085438.
- [26] Epstein A, Eleftheriades G V. Synthesis of passive lossless metasurfaces using auxiliary fields for reflectionless beam splitting and perfect reflection [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(25): 256103.
- [27] Díaz-Rubio A, Asadchy V S, Elsakka A, et al. From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors [J]. *Science Advances*, 2017, 3(8): e1602714.
- [28] Asadchy V S, Wickberg A, Díaz-Rubio A, et al. Eliminating scattering loss in anomalously reflecting optical metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(5): 1264-1270.
- [29] He T, Liu T, Xiao S, et al. Perfect anomalous reflectors at optical frequencies [J]. *Science Advance*, 2022, 8(9): eabk3381.
- [30] Fattal D, Li J, Peng Z, et al. Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 466-470.
- [31] Mateus C F R, Huang M C Y, Deng Y, et al. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 518-520.
- [32] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [33] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [34] Ito K, Iizuka H. Highly efficient -1st-order reflection in Littrow mounted dielectric double-groove grating [J]. *AIP Advances*, 2013, 3(6): 759-116.
- [35] Matsui T, Miura A, Ikeda N, et al. Experimental investigation of double-groove grating satisfying total internal reflection condition [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25362-25370.