

DOI: 10.12086/oe.2022.220032

基于高阻硅超表面结构的太赫兹聚焦透镜设计

马敏^{1,2,3}, 靳琳^{2,3}, 秦华^{2,3},
孙建东^{2,3}, 陈丽香¹, 孙云飞^{1*}

¹苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏苏州 215009;

²中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏苏州 215123;

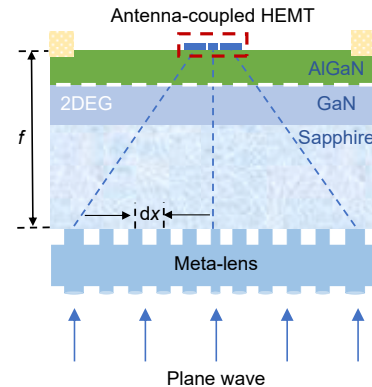
³中国科学院纳米器件与应用重点实验室, 江苏省纳米器件重点实验室,
江苏苏州 215123

摘要: 本文利用亚波长硅圆柱组成的超表面设计了用于太赫兹探测器的聚焦透镜, 通过改变硅柱的直径, 实现对太赫兹波传输相位 $0\sim 2\pi$ 的调控。在 1 THz 频率下, 所设计的单面超表面透镜, 太赫兹波电场能量密度提升到入射平面波的 32 倍。基于工艺制备可行性和抗反射考虑, 提出了一种双面超表面透镜, 将电场能量密度提升到入射平面波的 44 倍。对比于传统超半球太赫兹硅透镜, 超表面透镜具有厚度薄, 体积小等优点, 有利于太赫兹探测器组件的小型化, 为实现与太赫兹探测器的集成提供了可能性。

关键词: 超表面; 太赫兹; 聚焦

中图分类号: TB383

文献标志码: A



马敏, 靳琳, 秦华, 等. 基于高阻硅超表面结构的太赫兹聚焦透镜设计[J]. 光电工程, 2022, 49(7): 220032

Ma M, Jin L, Qin H, et al. Design of terahertz focusing lens based on high-resistivity silicon metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(7): 220032

Design of terahertz focusing lens based on high-resistivity silicon metasurface

Ma Min^{1,2,3}, Jin Lin^{2,3}, Qin Hua^{2,3}, Sun Jiandong^{2,3}, Chen Lixiang¹, Sun Yunfei^{1*}

¹School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;

²Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China;

³Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Nanodevices of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract: In this paper, a focusing lens for terahertz detection is designed using a metasurface composed of sub-wavelength silicon cylinders. By tuning the diameter of the silicon cylinder, the transmission phase of the THz wave is controlled from 0 to 2π . At 1 THz, the terahertz electric field energy density focused by the single-sided metasurface lens designed can be increased to 32 times that of the incident wave. After adding the anti-reflection, a double-sided metasurface lens is proposed, which is feasible in processing, increasing the electric field energy density to 44 times that of the original. Compared with the traditional hyper-hemispheric terahertz silicon lenses, our

收稿日期: 2022-03-31; 收到修改稿日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61975227)

*通信作者: 孙云飞, yfsun@usts.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

metasurface lens has the advantages of thin thickness and small volume, which is conducive to the miniaturization of the terahertz detector component and provides the possibility to realize the integration with the terahertz detector.

Keywords: metasurface; terahertz; focus

1 引言

太赫兹波 (Terahertz) 是指频率范围在 0.1~10 THz, 波长为 30 μm ~3 mm 的电磁波。在频谱中, 太赫兹波介于微波和红外波之间, 因此具有比红外波穿透性强、比微波成像分辨率高、比 X 射线更安全等特点, 这些特点决定了太赫兹波在无损伤探伤^[1]、安全检测^[2]、医学成像^[3] 等领域具有广泛应用。在这些应用中, 太赫兹探测器作为重要器件, 其性能对整个太赫兹技术领域的发展有重要意义。但受限于当前研究的发展, 太赫兹探测器的灵敏度还需大幅提高^[4]。目前场效应晶体管探测器的室温灵敏度可以达到 3.7 pW/Hz^{1/2}, 然而利用太赫兹波进行被动探测实验时, 探测器的室温灵敏度至少要达到 0.1 pW/Hz^{1/2} 以下^[5]。对于探测器灵敏度的提升主要有两方面, 一是对探测器天线进一步优化^[6]。由于太赫兹波段的电磁波相较于红外和可见光波长较长, 为了使光斑聚焦到尺寸很小的天线上, 需要增大透镜口径, 同时受限于衍射极限, 光斑大小远大于探测器的有效接收面积, 限制了探测器对入射太赫兹波的有效利用率。

为了解决探测器自身尺寸与太赫兹光斑失配的问题, 目前常用手段是利用超半球硅透镜与太赫兹探测器进行集成, 使光斑尺寸缩小一个量级以提升电场能量密度, 探测器灵敏度也相应得到提高。随着光学系统集成化、微型化的发展, 这种传统的光学器件由于其相位调控的原理和材料的限制, 很难做到超薄超轻, 并且非平面器件很不利于集成, 特别是对于阵列化探测器。超材料是一种人工构造的复合材料, 由亚波长尺寸的单元结构组成, 拥有自然材料不具备的电磁特性^[7]。通过单元结构形状和尺寸的设计调整, 并按一定规律进行布阵, 可以实现一些特定的电磁特性。然而, 由于超材料的三维结构和电磁特性, 一般工艺制备的过程非常复杂, 成本昂贵并且损耗较大, 于是研究者们提出了一种二维超材料, 也就是超表面。在保持超材料的良好特性的同时, 超表面更容易制备获得和片上集成^[8-9]。超表面能够对入射电磁波的振幅、相

位、偏振等进行灵活调控, 被广泛地应用于波束偏转^[10]、偏振转换^[11-12] 以及全息成像^[13] 等方面, 光学超透镜也是其重要应用之一。最初关于超透镜的设计是基于金属结构超表面, 这类超透镜由于金属的固有损耗存在, 通常效率较低。近期发展出了一种全介质超表面, 很好地避免金属损耗, 具有较高的振幅透射率, 因此可以实现高效的超透镜设计^[14]。用于太赫兹波段的全介质超表面, 通常采用高折射率和低损耗的介质^[15], 但高折射率会导致反射损耗严重。为了降低反射损耗, 在表面设计阻抗匹配层, 例如金属网格^[16]、石墨烯^[17] 和金属薄膜^[18] 等, 但这些方法工艺制造复杂, 成本高且效率低。最近 Zi^[19] 和 Li^[20] 等研究人员提出了一种双面超表面结构, 通过在超表面的平面硅衬底上刻蚀周期性相同尺寸的硅圆柱或硅方柱以实现减反射功能, 可以显著提高超表面的透射效率。

基于 AlGaIn/GaN 太赫兹探测器的结构, 本文设计了一种全介质双面超表面透镜, 在高阻硅衬底两侧制作对称分布的硅圆柱阵列, 可以在改变相位的同时达到减反射效果, 以代替传统的超半球硅透镜对入射太赫兹波进行汇聚。所设计的超表面透镜, 聚焦光斑尺寸缩小到与太赫兹天线同一量级, 电场能量密度得到提高, 增加太赫兹探测器对入射太赫兹波的有效利用率, 进一步优化太赫兹探测器的性能。同时利用超表面设计的聚焦透镜具有体积小厚度薄的性能, 推进太赫兹器件的集成化、小型化。

2 基本原理

AlGaIn/GaN 场效应太赫兹探测器是将太赫兹波入射到探测器天线上, 在二维电子气沟道内感应出平行于沟道的电场和垂直于沟道的电场, 分别调控电子漂移速度和电子浓度, 从而引起太赫兹波的混频, 因此太赫兹天线处的电场能量密度对太赫兹探测响应度至关重要。本文针对太赫兹天线处的电场能量密度的提高进行超表面透镜设计, 由于太赫兹探测器的衬底材料为蓝宝石, 太赫兹波可以透过蓝宝石衬底, 本设计超表面透镜采用背面集成方案。如图 1(a) 所示, 太

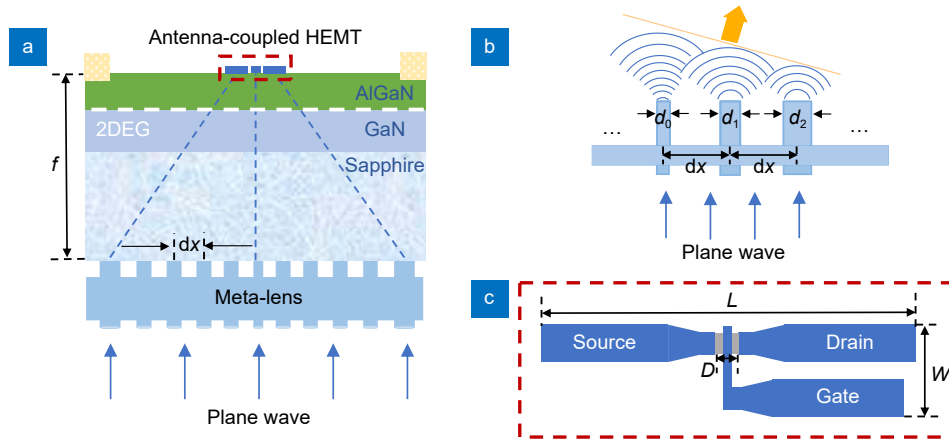


图 1 (a) AlGaIn/GaN 太赫兹探测器与超表面透镜集成模型; (b) 超表面单元阵列的相位调控示意图; (c) 太赫兹天线结构示意图

Fig. 1 (a) The integration model of an AlGaIn/GaN terahertz detector and a metasurface lens; (b) Schematic diagram of phase regulation of metasurface element array; (c) Schematic diagram of terahertz antenna structure

赫兹波通过超表面透镜进行汇聚, 经过蓝宝石材料的探测器衬底, 在太赫兹天线上聚焦。太赫兹探测器的主要厚度为蓝宝石衬底, 约为 200 μm , AlGaIn 和 GaN 材料的厚度可忽略不计^[5]。利用超表面单元结构阵列, 如图 1(b) 所示实现对波束的相位调控, 将太赫兹波在探测器的核心区域进行聚焦。对于太赫兹探测器, 其非对称蝶形天线即为核心区域^[21], 如图 1(c) 所示。当工作频率为 1 THz 时, 天线的宽度 W 约为 18 μm , 长度 L 约为 74 μm , 天线间的间距 D 约为 1.8 μm , 即太赫兹探测器的核心区域约为 18 $\mu\text{m} \times 74 \mu\text{m}$ 。考虑到将探测器芯片与超表面透镜进行背面集成时, 若将超表面透镜与探测器衬底直接进行耦合, 焦距过短 ($f \approx 200 \mu\text{m}$), 会产生较多强度较大的旁瓣, 影响聚焦效果。因此可以通过在超表面透镜与探测器衬底间叠加双抛蓝宝石基板, 将超表面透镜的设计焦距适当增加 ($f = 1 \text{ mm}$), 再与探测器进行集成。平面波透过超表面透镜后, 经过蓝宝石基板包括探测器衬底再入射到太赫兹天线上聚焦。

本文基于传输相位理论, 采用硅圆柱的全介质阵列实现了太赫兹超表面透镜, 对太赫兹波束进行汇聚。根据介质波导原理, 一定横截面的光束在自由空间传播时, 由于衍射作用将会发散, 利用高折射率的介质可以限制光束, 进行波导传输^[22]。高阻硅具有极高的折射率 ($n_{\text{Si}} \approx 3.45$), 是太赫兹镜头中最常用的材料, 并且在太赫兹范围内损耗极低, 吸收系数小于 0.05 cm^{-1} ^[23], 所以将高阻硅材料用于超表面透镜单元结构设计。同时, 超表面透镜因其布阵的对称性, 具有偏振无关特性。

图 2(a)、2(b) 为两种超表面透镜单元结构示意图, 2(c)、2(d) 分别为 1 THz 电磁波沿 z 轴正方向入射到单元结构的侧面电场能量分布图, 单元结构的硅圆柱为介质波导, 因此电磁波的能量主要限制在硅柱内。随着硅柱直径 d 的改变, 电磁波在波导中的有效波长会发生相应改变。相比于单面结构入射平面波经衬底后耦合进硅波导, 双面结构入射平面波先耦合进入硅波导经衬底后再次耦合进硅波导, 在硅波导中都近似以基模 (TE 模) 的形式传输, 从硅波导出射后波束的相位和透射率由波导基模的传输特性决定。由二维平板波导的基本原理可知, 基模的传输特性由介质折射率和波导尺寸决定^[24], 对于圆波导, 其主模为 TE 模, 模式本征方程为

$$kd = m\pi + \arctan\left(\frac{p_0}{k}\right) + \arctan\left(\frac{p_2}{k}\right), \quad (1)$$

式中:

$$k = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad (1-a)$$

$$p_0 = (\beta^2 - k_0^2 n_0^2)^{1/2}, \quad (1-b)$$

$$p_2 = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}, \quad (1-c)$$

这里 β 是导模的传播常数, 与波导有效折射率 n_{neff} 的关系是 $\beta = n_{\text{neff}}/k_0$, m 为模序数, 它取从 1 开始的有限个正整数, 其中 n_0 为波导折射率, n_1 、 n_2 为波导外介质折射率。

根据硅波导有效折射率 n_{neff} 与直径 d 的关系, 将若干个单元并排分布, 单元之间具有不同的宽度和可忽略不计的光学耦合, 则沿着不同的单元行进的光将累积与其长度成比例的相移^[25], 若要在亚波长传播长

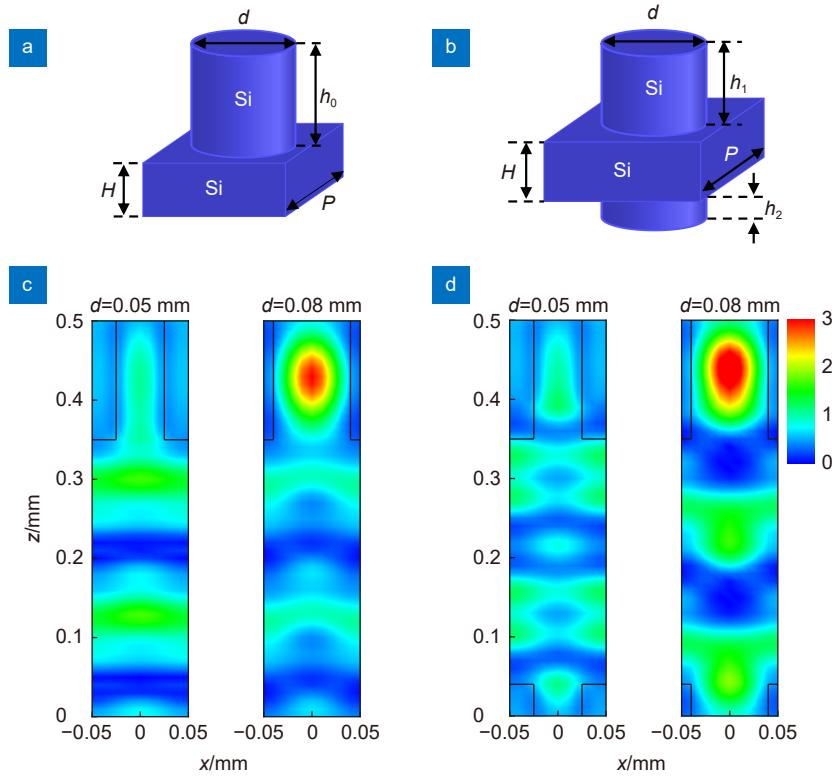


图 2 (a), (c) 分别为单面单元结构示意图及其能量分布;
(b), (d) 分别为双面单元结构示意图及其能量分布

Fig. 2 (a) and (c) show the schematic diagram of single-sided cell structure and its energy distribution;
(b) and (d) show the schematic diagram of double-sided cell structure and its energy distribution

度上获得 2π 的相位差需满足:

$$h = \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{neff}}}, \quad (2)$$

其中: Δn_{neff} 为单元之间的有效折射率差, 故通过控制硅波导的直径 d 和高度 h , 可以得到一系列相位变化范围为 $0 \sim 2\pi$ 的超表面单元结构, 从而利用相位调控原理实现对波阵面的控制。

3 超透镜设计

通常超表面透镜的单元结构是在高阻硅衬底上刻蚀高度相同的硅圆柱^[26], 如图 2(a) 所示。然而在实际

工艺制备过程中, 硅柱深宽比太大, 会产生硅柱倾斜、倒塌, 同时随着刻蚀深度的增加, 所需的胶越厚, 在刻蚀工艺结束进行清洗时, 硅柱之间的光刻胶会难以清洗。此外, 由于高阻硅的等离子刻蚀原理, 随着刻蚀深度的增加, 硅圆柱的垂直度偏差会变大, 不同占空比硅柱的刻蚀高度也会发生偏差等问题, 最终硅柱的效果是上粗下细, 高度不一, 对最后成品的实际聚集效果造成影响^[27-28]。本文设计了一种双面单元结构如图 2(b) 所示, 通过在衬底两侧刻蚀对称分布的硅柱来降低硅柱的深宽比, 提高硅柱的成品率及精度。双面结构的超表面透镜, 其一面借鉴了在可见光范围内

表 1 单元结构详细参数

Table 1 The detail parameters of unit structure

参数	单位: mm
d	0.03~0.1
P	0.1
H	0.35
h_0	0.15
h_1	0.04
h_2	0.11

发展较好的减反射涂层原理^[29]。如果减反射层的厚度是某一波长的四分之一, 即硅柱上下表面的反射光束的光程差恰好为 π , 振动方向相反叠加会使光学表面对该波长的反射波减少。根据式 (2), 利用硅圆柱设计减反射层, 需要在亚波长传播长度上获得 $\pi/2$ 的整数倍的相位差, 即减反射层的高度 $h_1=h_0/4$ 。因为减反射层的硅柱需要提供一定相位调制, 所以硅柱的尺寸在不同位置是不同的, 不能提供均匀的完全匹配减反射层。通过选取合适的减反射层硅圆柱高度, 在改变相位的同时提高入射平面波与超表面透镜的耦合效果, 降低平面硅衬底的表面反射损耗, 进一步提高超表面透镜的透射率。

单元结构由宽度为周期 $P=100 \mu\text{m}$ 的长方体硅基板和总高度 $h_0=150 \mu\text{m}$ 的硅圆柱构成, 单面结构的硅柱高度 $h_0=150 \mu\text{m}$, 双面结构的减反射层硅柱高度 $h_1=40 \mu\text{m}$, 正面硅柱的高度为 $h_2=110 \mu\text{m}$, 如图 2(a)、2(b) 所示。采用有限时域差分 FDTD 对单元结构进行模拟仿真, 边界条件设置为周期性, 激励沿着 z 轴正方向分别入射单面结构的衬底和双面结构的减反射层硅柱, 进入衬底后再耦合进入另一面硅柱。通过改变硅柱直径 d , 来实现相位的变化, 考虑到加工精度和耦合效率的问题, d 从 $30 \mu\text{m}$ 以 $1 \mu\text{m}$ 步长进行参数扫描到 $100 \mu\text{m}$, 如图 3 所示。双面单元结构与单面单元结构的相位调制特性较为一致, 并且双面单元结构的透射振幅整体大于单面结构, 在直径为 $65 \mu\text{m} \sim$

$80 \mu\text{m}$ 范围内优势更为明显。同时随着直径 d 的变化两种结构都能实现 $0 \sim 2\pi$ 相位覆盖, 符合超透镜设计需求。

为了使所提出的超表面结构实现聚焦功能, 将太赫兹平面波转化为球面波, 在距离 f 处聚焦, 需要通过计算得到超表面透镜表面每个天线的特征参数, 根据相位与光程的关系, 必须要使得焦点到透镜表面每一点的相位相等或者相差 2π 的整数倍^[30]:

$$\varphi(x, y) = 2n\pi + \left(\frac{2\pi f}{\lambda_0} - \frac{2\pi \sqrt{f^2 + x^2 + y^2}}{\lambda_0} \right) n_{\text{sapphire}}, \quad (3)$$

其中: n 是一个任意整数, f 是焦距, λ_0 为真空中电磁波 1 THz 的波长, $n_{\text{sapphire}} \approx 3$ 为蓝宝石折射率。式 (3) 可以计算出每个位置对应的相位值。图 4 为焦距 $f=1 \text{ mm}$, 口径为 3 mm , 面积为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的超表面透镜二维相位离散分布图, 以正方形基本单元进行采样, 正方形的边长为周期 P , 每个单元的相位值取其中心点位置作为计算值, 根据每个位置的离散相位值选择相应直径的硅柱完成整体超表面透镜建模。

根据二维相位分布对超表面透镜进行建模, 表 2 为详细设计参数。数值孔径 NA 是透镜中常用来描述性能的参数, 与透镜的焦距和口径相关, 被定义为 $NA=n_f \sin(\arctan(L/f))$ ^[31], 由于超表面透镜设计在蓝宝石中聚焦, $n_f=n_{\text{sapphire}}=3$, $NA=2.5$ 。两种模型的阵列分布如图 5 所示, 布阵规则选择正方形单元, 每个单元周期为 P 。根据图 3 中硅圆柱直径与相位的扫描参

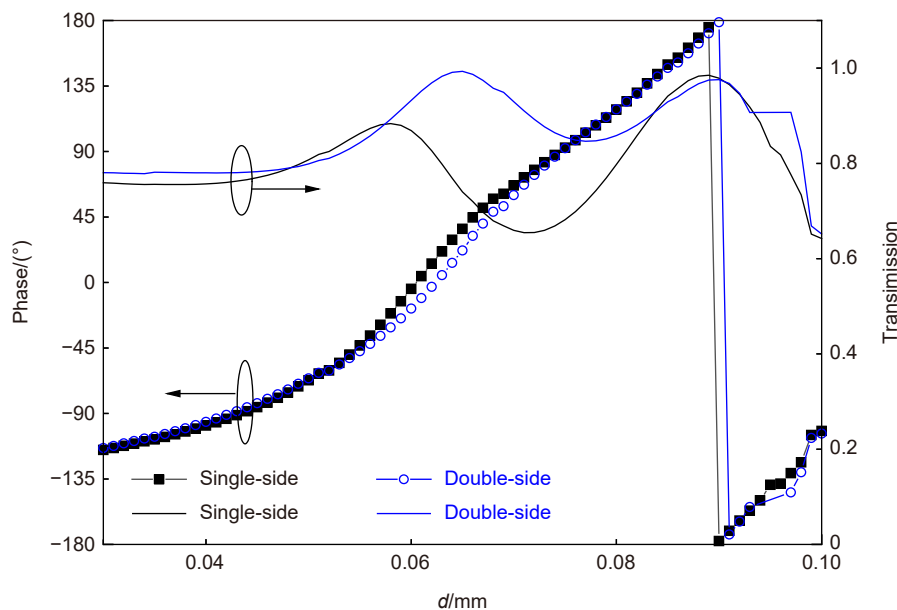


图 3 超表面透镜单双面结构的相位和透射率随直径变化曲线

Fig. 3 The phase and transmittance curves of the single and double structure of metasurface lens vary with diameter

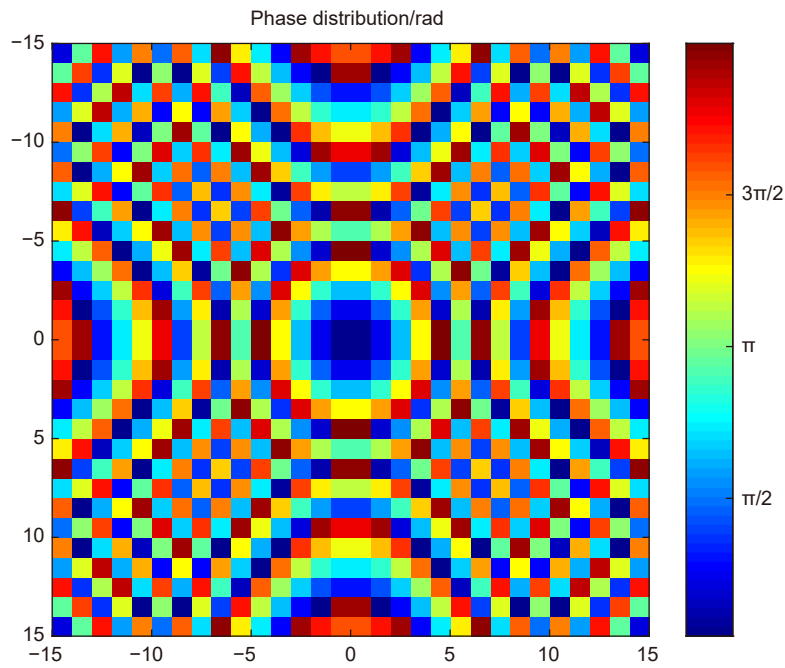


图 4 超表面透镜二维相位分布
Fig. 4 The two-dimensional phase distribution of metasurface lens

表 2 超表面透镜设计参数

Table 2 Design parameters of metasurface lens

参数	
工作频率/THz	1
超表面透镜衬底厚度 H /mm	0.35
单面超表面透镜口径 L_d /mm	3
双面超表面透镜口径 L_d /mm	3
设计焦距 f /mm	1

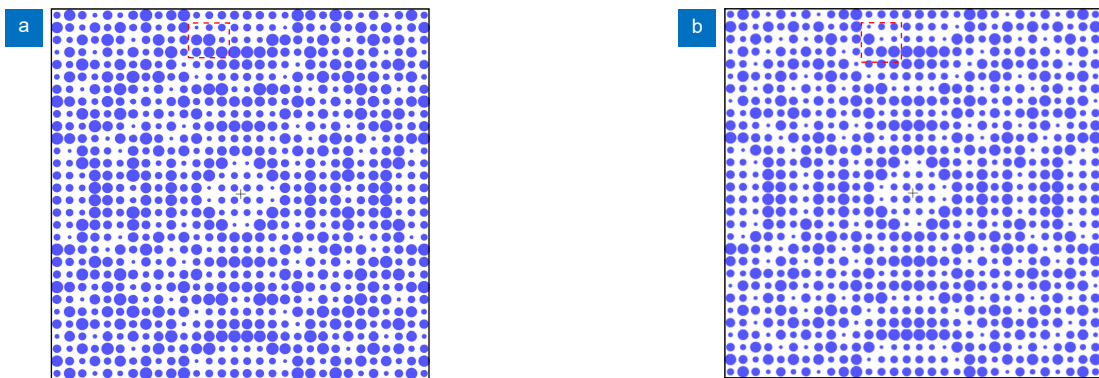


图 5 (a) 单面超表面透镜布阵; (b) 双面超表面透镜布阵
Fig. 5 (a) The array of single-sided metasurface lens; (b) The array of double-sided metasurface lens

数, 两种单元结构相位调制特性较为一致, 因此图 5(a)、5(b) 中超表面透镜的布阵区别较小, 但存在一定差异性, 例如虚线框中所示的结构。将整个结构 x 方向和 y 方向置于空气中, 边界设置为完全匹配 (PML) 边界, 电磁波几乎无反射通过该边界, 电磁波沿 z 轴正向分别入射到单面超表面透镜的硅衬底和双面超表面透镜的短硅柱面, 在蓝宝石介质中聚焦, 如图 1(a) 所示。

4 结果分析

通过监视器可以看到在空间中电磁波经过超表面透镜进入蓝宝石介质的电场分布, 图 6(a)、6(b) 分别为单面超表面透镜和双面超表面透镜在 $x=0$ 时, 电磁波沿 z 轴正向传播的电场分布, 图 6(c)、6(d) 为 $x=0$, $y=0$ 时两种超表面透镜的电场一维分布。图 6(e)、6(f) 分别为单面超表面透镜和双面超表面透镜聚焦平面的电场分布, 图 6(g)、6(h) 为聚焦平面内 $y=0$ 时两种超表面透镜的电场一维分布。两种结构的超表面透镜聚焦效果明显 (图 6(a~d)), 并且场强都在 $z=1$ mm 附近达到最大值, 形成能量峰。但两种超表面透镜的实际焦距与理论设计值 $f=1$ mm 略有偏差, 分别为 $876 \mu\text{m}$ 和 $962 \mu\text{m}$, 其中产生偏差的主要原因是超表面透镜表面单元结构的离散化排布, 无法做到全相位连续采样。1 dB 失配容差是衡量光学耦合系统的一个重要指标, 也是解决耦合封装问题的一个重要判据^[32]。根据 $y-z$ 面的场强分布, 得到超表面透镜沿 z 轴方向的容差 T_1 、 T_2 分别为 $20 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$, 因此在实际制备过程中蓝宝石的厚度误差允许范围约为 $\pm 25 \mu\text{m}$ 。超表面透镜在焦距处聚焦的光斑如图 6(e~f) 所示, 两种结构结果差异不大, 焦斑形状较好并且均匀对称。通过计算, 两种超表面透镜聚焦光斑的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 分别为 $90.5 \mu\text{m}$ 和 $98.7 \mu\text{m}$, 与太赫兹天线尺寸相当, 因此可以很好地将太赫兹波聚焦到与探测器的天线上。1 THz 的太赫兹波经过两种超表面透镜电场强度最大值分别增加到入射平面波的 6.5 倍和 7.8 倍, 核心区域内电场强度均值分别增加到入射平面波的 5.7 倍和 6.6 倍, 电场能量密度正比于电场强度的平方, 因此太赫兹波经过超表面透镜再辐射到太赫兹探测器上, 核心区域的电场能量密度分别增加 32 倍和 44 倍左右, 双面超表面透镜的能量密度较单面超表面透镜提升了约 37.5%。双面超表面透镜的工作效率优于单面超表面透镜的工作效率, 因为平面硅衬底的反射损耗较大, 太赫兹波

入射到硅衬底上得不到有效利用, 使超表面的工作效率降低。而双面结构的超表面透镜, 其一面可以在改变相位的同时充当减反射层, 从而进一步提高超表面透镜的工作效率。

我们对两种超表面进行聚焦效率计算, 定义以焦平面内焦斑为中心三倍半高宽为边长的正方形区域内能量与入射到超表面透镜的能量之比为超表面透镜聚焦效率, 单面超表面透镜和双面超表面透镜的聚焦效率分别为 8.3% 和 10.8%。表 3 为近年来不同类型的太赫兹超表面透镜性能的比较, 相比金属结构的超表面透镜, 本文工作对于太赫兹波的聚焦效率较高, 但与其它全介质超表面透镜相比, 聚焦效率没有明显优势。因为本文超表面透镜为了与太赫兹探测器更好地集成, 设计在蓝宝石介质中聚焦, 透镜口径为探测器衬底尺寸, 使得数值孔径增大, 虽然得到了较小尺寸的聚焦光斑, 但造成了旁瓣能量的增加, 如图 6(a~h) 所示, 导致聚焦效率低^[37]。同时在进行减反射层设计时, 综合考虑了工艺制备的可行性, 虽然相对于平面硅衬底具有一定的减反效果, 但没有实现均匀的减反相位调制, 达不到完全减反效果。我们计算了直径为 3 mm 的硅透镜, 在 1 THz 的工作频率下, 核心区域的电场均值增益为 19 倍, 焦斑处半高宽为 $99.3 \mu\text{m}$, 聚焦效率达到 86.9%, 对于旁瓣的抑制效果较好。接下来的工作将基于太赫兹探测器参数对超表面透镜的口径和焦距进一步优化, 抑制旁瓣, 以提升超表面透镜聚焦效率, 更好地应用于太赫兹探测器。

为了探究所设计超表面透镜的色散特性, 将频率范围为 0.9 THz~1.1 THz 的平面波入射到工作频率为 1 THz 的双面超表面透镜, 并根据聚焦原理式 (3), 对频率和焦距进行理论计算。如图 7 所示, 在频率变化较小的范围内, 超表面透镜焦距较为稳定, 整体趋势随着频率增大而增大, 与理论计算值趋势较为接近。造成超表面透镜色散的主要原因为单元结构是依赖于入射波波长所设计, 相位调制具有频率依赖特性。在后续工作中, 若要实现超表面透镜的宽频带工作, 在不改变单元结构设计基础上, 可以采用消色散结构方法对超表面进行布阵^[38], 通过复合拼接方式使不同频率入射波在同一位置聚焦, 但聚焦效率也会相应地降低。同时利用与波长无关的单元结构进行超表面透镜设计, 例如几何相位型, 单元结构的相位变化只与其几何位置相关^[25], 可以使透镜具有频率无关特性。但几何相位元件会改变电磁波偏振状态, 与太赫兹探测器进行集成设计时需要考虑入射波的偏振特性。

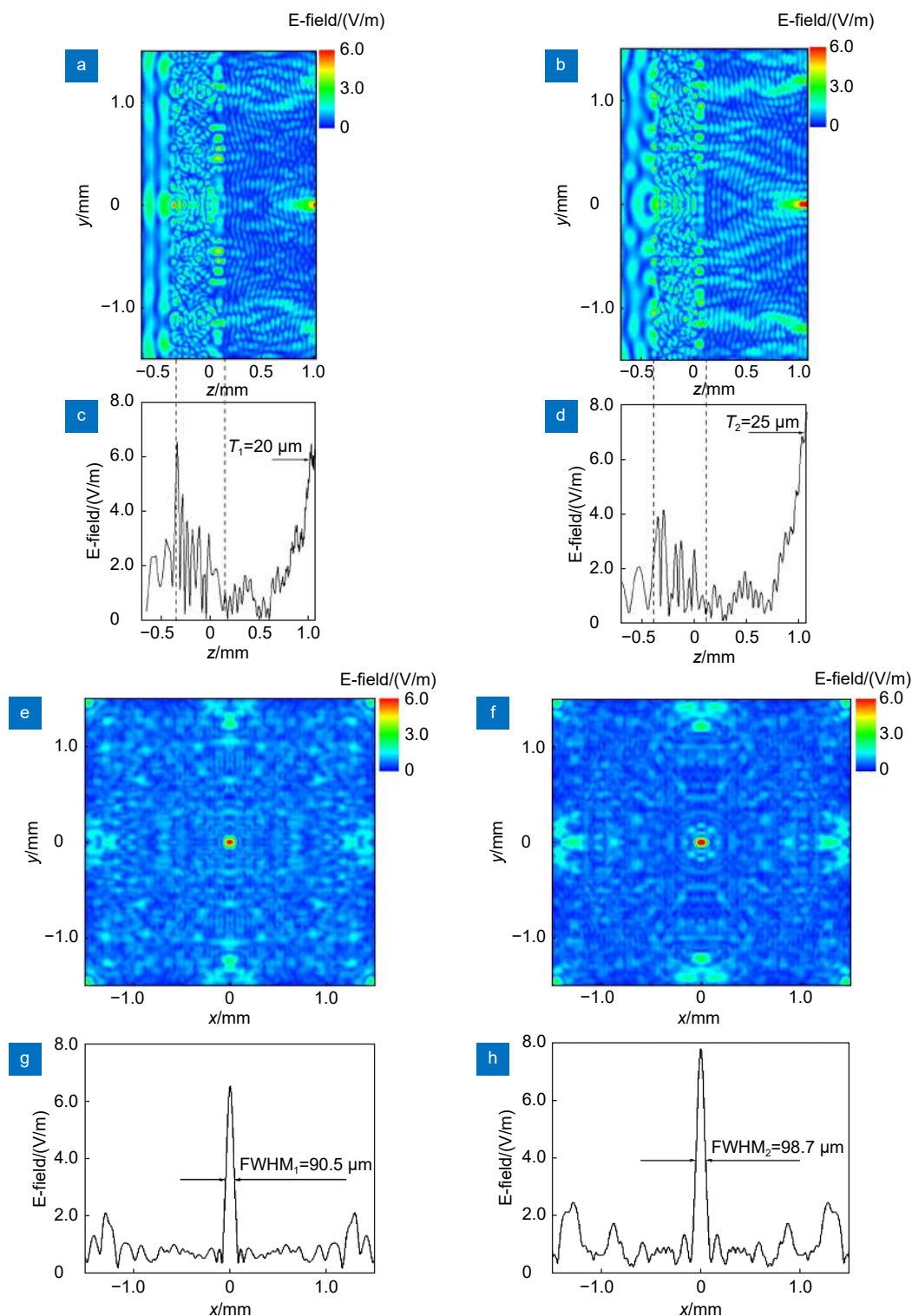


图 6 (a), (c) 分别为单面结构 $x=0$ 时, $y-z$ 面场强分布和 $y=0$ 时一维分布; (b), (d) 分别为双面结构超表面透镜 $x=0$ 时, $y-z$ 面场强分布和 $y=0$ 时一维分布; (e), (g) 分别为单面结构的超表面透镜 $z=1.026$ mm 时, $x-y$ 面场强分布和 $y=0$ 时一维分布; (f), (h) 分别为双面结构的超表面透镜 $z=1.067$ mm 时, $x-y$ 面场强分布和 $y=0$ 时一维分布

Fig. 6 (a) and (c) show the field intensity distribution on the $y-z$ plane and one-dimensional distribution on the $y=0$ of a single-sided structure when $x=0$; (b) and (d) are the field intensity distribution on the $y-z$ surface when $x=0$ and one-dimensional distribution when $y=0$ of the double-sided metasurface lens; (e) and (g) are the field intensity distribution on the $x-y$ plane and the one-dimensional distribution on $y=0$ when $z=1.026$ mm of the single-sided metasurface lens; (f) and (h) are the field intensity distribution on the $x-y$ plane and the one-dimensional distribution on $y=0$ when $z=1.067$ mm of the double-sided metasurface lens

表 3 太赫兹波段超表面透镜性能比较

Table 3 Performance comparison of metasurface lens in terahertz band

材料及结构	工作频率/THz	数值孔径	焦斑半高宽/ μm	聚焦效率/%	参考文献
V形天线(Au)+硅衬底	0.75	0.71	270	1	[30]
V形天线(Cu)+硅衬底	1.1	0.78~0.95	165~206	2.7~5.2	[33]
方环槽(Al)-介质(BCB)-方环槽(Al)	0.84	0.41	(焦斑直径450)	(电场增益5.2)	[34]
十字硅交叉	3.11	0.16	630	24	[35]
硅方柱(双面)	2.52	0.92	47.5	24.2	[36]
硅圆柱(单面)	1	2.50	90.5	8.3 (电场增益6.5)	本文工作
硅圆柱(双面)	1	2.50	98.7	10.8(电场增益7.8)	

Au: 金; Cu: 铜; Al: 铝; BCB: 苯并环丁烯

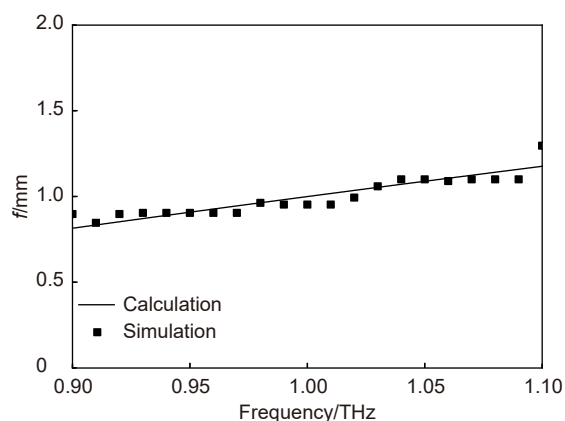


图 7 双面超表面透镜色散特性

Fig. 7 Dispersion characteristics of double-sided metasurface lens

5 结论

本文设计了一系列高阻硅圆柱单元结构, 通过改变硅柱尺寸, 实现了 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖和较高的透射率。利用硅圆柱单元结构设计了厚度仅有 $500\ \mu\text{m}$ 的超表面透镜, 将其用于中心频率为 $1\ \text{THz}$ 的太赫兹探测器, 能使焦斑尺寸与波长处于同一量级, 同时所设计的双面超表面透镜的工作效率优于单面超表面透镜, 将太赫兹天线处的电场能量密度提升到入射平面波的 44 倍。与传统超半球太赫兹硅透镜相比, 超表面透镜体积小、厚度薄更利于集成, 对减轻太赫兹系统的复杂度和提升探测器响应度有很大的前景, 为太赫兹器件的集成度和小型化提供了一种新思路。由于目前超表面透镜聚焦后产生较多旁瓣, 聚焦效率较低, 后续将对超表面透镜的材料和单元结构进一步优化, 以提高聚焦效率和电场能量密度。

参考文献

[1] Kim H S, Baik S Y, Lee J W, et al. Nondestructive tomographic imaging of rust with rapid THz time-domain spectroscopy[J].

Appl Sci (Basel), 2021, 11(22): 10594.

[2] Zhang M, Xie X R, Zhang D, et al. Nondestructive identification of wood species by terahertz spectrum[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2022.

[3] Hernandez-Cardoso G G, Amador-Medina L F, Gutierrez-Torres G, et al. Terahertz imaging demonstrates its diagnostic potential and reveals a relationship between cutaneous dehydration and neuropathy for diabetic foot syndrome patients[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 3110.

[4] Sun J D. High-responsivity room-temperature self-mixing terahertz detectors based on high-electron-mobility field-effect transistor[D]. Suzhou: Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, 2012.

孙建东. 室温高灵敏度场效应自混频太赫兹波检测器[D]. 苏州: 中国科学院大学, 2012.

[5] Sun J D, Feng W, Ding Q F, et al. Smaller antenna-gate gap for higher sensitivity of GaN/AlGaN HEMT terahertz detectors[J]. *Appl Phys Lett*, 2020, 116(16): 161109.

[6] Li X. Research on field coupling mechanism and structure of field-effect terahertz self-mixing detectors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.

李想. 场效应晶体管太赫兹混频探测器的场耦合机制和结构研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.

[7] Tian X Y, Yin L X, Li D C. Current situation and trend of fabrication technologies for three-dimensional metamaterials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, 44(1): 69-76.

田小永, 尹丽仙, 李涤尘. 三维超材料制造技术现状与趋势[J]. *光电工程*, 2017, 44(1): 69-76.

[8] Bukhari S S, Vardaxoglou J, Whittow W. A metasurfaces review: definitions and applications[J]. *Appl Sci*, 2019, 9(13): 2727.

[9] Cao T, Lian M, Chen XY, et al. Multi-cycle reconfigurable THz extraordinary optical transmission using chalcogenide metamaterials[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, 1(1): 210010.

[10] Yu F L, Yu F L, Yu F L, et al. Orthogonal manipulations of phase and phase dispersion in realization of azimuthal angle-resolved focusings[J]. *Opt Express*, 2021, 29(26): 43757-43765.

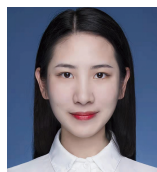
[11] Yue Z, Li J T, Li J, et al. Terahertz metasurface zone plates with arbitrary polarizations to a fixed polarization conversion[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, 1(3): 210014.

[12] Zhang H T, Cheng Y Z, Huang M L. Broadband terahertz tunable metasurface linear polarization converter based on graphene[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, 46(8): 180519.

张洪滔, 程用志, 黄木林. 基于石墨烯的宽带太赫兹可调超表面线偏振转换器[J]. *光电工程*, 2019, 46(8): 180519.

- [13] Shen C, Xu R L, Sun J L, et al. Metasurface-based holographic display with all-dielectric meta-axilens[J]. *IEEE Photon J*, 2021, **13**(5): 4600105.
- [14] Zhou Y, Liang G F, Wen Z Q, et al. Recent research progress in optical super-resolution planar meta-lenses[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(12): 210399.
周毅, 梁高峰, 温中泉, 等. 光学超分辨平面超构透镜研究进展[J]. *光电工程*, 2021, **48**(12): 210399.
- [15] Shen Y J, Xie X, Pu M B, et al. Achromatic metalens based on coordinative modulation of propagation phase and geometric phase[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200237.
申益佳, 谢鑫, 蒲明博, 等. 基于传输相位和几何相位协同调控的消色差超透镜[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200237.
- [16] Chen H T, Chang C C, Huang L. Bi-Layer metasurfaces for dual and broadband terahertz antireflection[C]//2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Cancun, Mexico: IEEE, 2017: 1.
- [17] Zhou Y X, Xu X L, Hu F R, et al. Graphene as broadband terahertz antireflection coating[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **104**(5): 051106.
- [18] Kröll J, Darmo J, Unterrainer K. Metallic wave-impedance matching layers for broadband terahertz optical systems[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(11): 6552-6560.
- [19] Zi J C, Xu Q, Wang Q, et al. Antireflection-assisted all-dielectric terahertz metamaterial polarization Converter[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, **113**(10): 101104.
- [20] Li X N, Shen Z X, Tan Q G, et al. High efficient metadevices for terahertz beam shaping[J]. *Front Phys*, 2021, **9**: 659747.
- [21] Sun Y F, Sun J D, Qin H, et al. High sensitivity room temperature terahertz detector based on silicon lens integration [J]. *Micronanoelectron Technol*, 2017, **54**(11): 729-733.
孙云飞, 孙建东, 秦华, 等. 基于硅透镜集成的高灵敏度室温太赫兹探测器[J]. *微纳电子技术*, 2017, **54**(11): 729-733.
- [22] Yariv A, Yeh P. *Optical Electronics in Modern Communications* [M]. 6th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
Yariv A, Pochi A. 光子学-现代通信光电子学[M]. 陈鹤鸣, 施伟华, 汪静丽, 等译. 6版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [23] Tian Y, Wang Y, Zhao G Z. Study on the optical properties of silicon in THz frequency band[J]. *Mod Sci Instrum*, 2006(2): 51-54.
田艳, 王洋, 赵国忠. 太赫兹频段硅的光学特性研究[J]. *现代科学仪器*, 2006(2): 51-54.
- [24] Zhang H X, Shen Y M, Han Y N. *Field and Wave Electromagnetics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
张洪欣, 沈茂远, 韩宇南. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [25] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 255-275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255-275.
- [26] He J W, He X J, Dong T, et al. Recent progress and applications of terahertz metamaterials[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2022, **55**(12): 123002.
- [27] Ren Z M, Bai B, Wang R X, et al. Deep silicon etching based on comb-tooth capacitance accelerometer[J]. *Micronanoelectron Technol*, 2017, **54**(9): 633-638.
任子明, 白冰, 王任鑫, 等. 基于梳齿式电容加速度计的深硅刻蚀[J]. *微纳电子技术*, 2017, **54**(9): 633-638.
- [28] Ouyang X, Xie Z J, Zhang M R, et al. Laser-induced periodic surface structure for microscale anti-counterfeiting structural colors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(1): 210320.
欧阳旭, 谢子健, 张孟瑞, 等. 基于激光诱导表面周期结构的微纳防伪结构色[J]. *光电工程*, 2022, **49**(1): 210320.
- [29] MacLeod H A. *Thin-Film Optical Filters*[M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [30] Hu D, Wang X K, Feng S F, et al. Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Adv Opt Mater*, 2013, **1**(2): 186-191.
- [31] Chen W T, Khorasaninejad M, Zhu A Y, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(5): e16259.
- [32] Wu L B. Research on coupling technology of laser and fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
吴良斌. 激光器与光纤耦合技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [33] Yu X, Shen Y, Dai G H, et al. Phase-controlled planar metalenses for high-resolution terahertz focusing[J]. *Photonics*, 2021, **8**(5): 143.
- [34] Yang Q L, Gu J Q, Wang D Y, et al. Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(21): 25931-25939.
- [35] Jia D L, Tian Y, Ma W, et al. Transmissive terahertz metalens with full phase control based on a dielectric metasurface[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(21): 4494-4497.
- [36] Wang Z W, Li Q, Yan F. A high numerical aperture terahertz all-silicon metalens with sub-diffraction focus and long depth of focus[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2021, **54**(8): 085103.
- [37] Zeng D J. Analysis of focal effect of metasurfaces based on dielectric nanobrick by simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
曾大俊. 微纳介质块超表面的聚焦效应仿真分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [38] Lin D M, Holsteen A L, Maguid E, et al. Photonic multitasking interleaved Si nanoantenna phased array[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(12): 7671-7676.

作者简介



马敏(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学工程的研究。

E-mail: mma2020@sinano.ac.cn

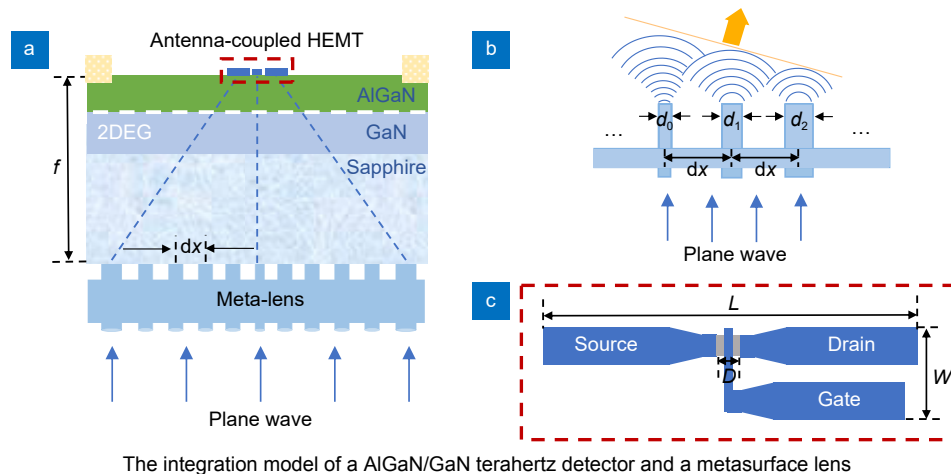


【通信作者】孙云飞(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳复合光电材料与器件的研究。

E-mail: yfsun@usts.edu.cn

Design of terahertz focusing lens based on high-resistivity silicon metasurface

Ma Min^{1,2,3}, Jin Lin^{2,3}, Qin Hua^{2,3}, Sun Jiandong^{2,3}, Chen Lixiang¹, Sun Yunfei^{1*}



Overview: Terahertz detector is an important device in the field of terahertz technology, and it is important to improve its sensitivity. The sensitivity of the detector can be improved in two aspects: one is to further optimize the antenna of the detector, and the other is to optimize the size of the detector and the spot size of incident terahertz wave. Due to the long wavelength of the electromagnetic wave in the terahertz band, the spot size is much larger than the effective acceptance area of the detector, which limits the effective absorption rate of the detector to the incident terahertz wave. In order to make the focus spot to be small, the lens aperture needs to be increased. At present, the commonly used method is to integrate the hyper-hemispheric silicon lens with the terahertz detector to reduce the spot size by one order of magnitude and increase the electric field energy density. However, hyper-hemispheric silicon lens is difficult to be ultra-thin and ultra-light, and is not planar, which is not conducive to the device integration, especially for array detectors. In this paper, a series of metasurface lenses for terahertz detectors are designed using sub-wavelength silicon cylinders. By tuning the diameter of the silicon cylinders, the transmission phase of the terahertz wave can be controlled from 0 to 2π with high transmission amplitude. At 1 THz, the backside integration of the designed single-surface lens with the terahertz detector can increase the electric field energy density in the core region of the THz detector to 32 times that of the incident plane wave, and reduce the focal spot to the same order of magnitude as the wavelength. Based on the feasibility of fabrication and anti-reflection considerations, we propose a two-sided metasurface lens, which further increases the energy density of the electric field to 44 times that of the incident plane wave. Compared with the traditional hyper-hemispheric silicon lenses, the size and thickness of the metasurface lens are smaller and more convenient for integration. Metasurface lenses have a great prospect for reducing the complexity of the terahertz system and improving the responsiveness of the detector, and provide a new idea for the integration and miniaturization of the terahertz device. However, the current metasurface lenses produce many side lobes after focusing, resulting in low focusing efficiency. Further research needs to further optimize the materials and unit structures of the metasurface lenses, to improve the focusing efficiency and electric field energy density.

Ma M, Jin L, Qin H, et al. Design of terahertz focusing lens based on high-resistivity silicon metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(7): 220032; DOI: 10.12086/oe.2022.220032

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (NSFC) (61975227)

¹School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China; ²Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China; ³Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Nanodevices of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215123, China

* E-mail: yfsun@usts.edu.cn