

多功能太赫兹超表面偏振控制器

杨磊 范飞 陈猛 张选洲 常胜江

Multifunctional metasurfaces for terahertz polarization controller

Yang Lei Fan Fei Chen Meng Zhang Xuan-Zhou Chang Sheng-Jiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 080702 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.080702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于铟化铟亚波长阵列结构的太赫兹聚焦器件

InSb based subwavelength array for terahertz wave focusing

物理学报.2016, 65(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010701>

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection

物理学报.2015, 64(23): 237802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237802>

工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究

Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(11): 117801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.117801>

用最小结构单元频率选择表面实现大入射角宽频带的透波材料

Wideband and large incident angle wave transparent material based on frequency selective surface with miniaturized elements

物理学报.2014, 63(13): 137803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137803>

基于VO₂薄膜相变原理的温控太赫兹超材料调制器

Thermally controlled terahertz metamaterial modulator based on phase transition of VO₂ thin film

物理学报.2013, 62(13): 130702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.130702>

多功能太赫兹超表面偏振控制器*

杨磊 范飞[†] 陈猛 张选洲 常胜江[‡]

(南开大学, 现代光学研究所, 天津 300071)

(2015年12月8日收到; 2016年1月7日收到修改稿)

本文提出了一种“金属栅-开口环/硅环-金属栅”结构的透射式超表面偏振控制器, 研究了入射角度和抽运光对该器件传输及偏振态控制性能的影响. 研究表明, 当线偏振太赫兹波垂直入射时, 可对0.39—1.11 THz频段的太赫兹波实现偏振方向 90° 旋转, 偏振旋转效率为99%, 损耗为1 dB. 对于斜入射的情况, 偏振转换性能在 $0-60^\circ$ 范围内基本保持不变, 且透过率达到90%以上. 同时, 通过调控抽运光强度的方式, 该器件能够实现对透射与反射太赫兹光束的强度调制, 调制深度均达到90%, 且可以实现太赫兹波偏振分束功能. 该器件可以作为未来太赫兹空间光通信和信息处理的宽带、角度不敏感、可调谐的偏振转换器和分束器.

关键词: 太赫兹, 人工超表面, 偏振转换, 偏振分束

PACS: 07.57.Pt, 78.67.Pt, 42.79.Fm

DOI: 10.7498/aps.65.080702

1 引言

太赫兹波(terahertz, THz)是指频率范围在0.1—10 THz之间的电磁波, 位于电磁波谱中的微波与红外光波之间^[1]. 随着太赫兹辐射源和探测技术^[2-5]的逐渐成熟, 太赫兹技术在通信、成像、生物技术、安全检查^[6-11]等领域越来越受到人们的关注. 作为太赫兹应用系统中必不可少的部分, 太赫兹功能器件(例如滤波器^[12]、偏振器^[13]、分束器^[14]、偏振转换器^[15]等)的研究已成为目前的热点.

传统的金属栅偏振器^[16]、石英波片^[17]等太赫兹光学器件存在体积大、插入损耗高以及不利于集成等缺点, 而人工电磁微结构材料(包括光子晶体^[18]、超材料^[19]、表面等离子体^[20]等)可以通过结构设计使之实现自然材料所不具备的物理性质^[21], 为THz波段偏振控制器件的设计提供了一个崭新的方向. 利用超表面器件能够与太赫兹波

产生良好电磁响应的特性, 通过合理的结构设计可实现对太赫兹波振幅、传播方向和偏振态的调控^[22-27]. Grady等^[28]提出了以金属线为周期单元的透射与反射式两种线偏振转换器, 其振幅透射比达到80%以上; 并且通过改变金属线的结构参数可实现光束的异常折射, Cheng等^[29]提出了以同心金属开口环和圆盘为谐振单元的周期性结构, 当入射光线偏振方向与开口环开口方向呈 45° 时, 反射光可在0.65—1.45 THz频段实现线偏振态的旋转, 旋转角度为 90° . 但是基于反射式的偏振转换器存在偏振转换效率不稳定、器件损耗较大等缺点. Cong等^[30]提出了由三层金属栅组成的超表面偏振旋转器, 通过太赫兹波在超表面和间隔层间法布里珀罗腔中的共振来实现透射波偏振态的转变, 工作带宽为0.8 THz, 损耗为3 dB. 然而, 太赫兹技术的发展对太赫兹功能器件的损耗提出了更高的要求. 实现低损耗、可调控的偏振控制器成为太赫兹功能器件研究的关键技术之一.

在光抽运下半导体硅(Si)材料的电导率会发

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339800)、国家自然科学基金(批准号: 61171027, 61505088)、天津市自然科学基金(批准号: 15JCQNJC02100)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA010205)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fanfei@nankai.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

生改变,且能够在太赫兹波段产生良好的电磁响应,因此把超表面结构与硅材料相结合能够制备多种THz调控功能器件. Heyes等^[31]利用光抽运下的硅材料实现了带宽为1 THz、调制深度达到-10 dB的太赫兹波调制. 田伟等^[32]研究了掺金硅材料少数载流子的寿命,并在激光抽运下,利用该材料实现了对太赫兹波的调制,调制速率为4.3 MHz,调制深度为21%. Xie等^[33]通过将光作用于本征Si材料,设计了一种太赫兹波空间调制器,可用于高分辨率的太赫兹成像.

本文提出了一种基于“金属栅-开口环/硅环-金属栅”结构的透射式超表面偏振控制器,当线偏振太赫兹波垂直入射时,该器件能够实现偏振方向90°的旋转,透过率达到90%以上. 在激光抽运下,半导体Si环可以产生光生载流子,金属开口环与太赫兹波相互耦合产生的表面电流在开口处形成一个连续回路,利用开口环表面电流分布的变化实现对太赫兹波振幅和偏振态的控制. 同时,由于Si材料的载流子浓度随着抽运光功率的增加而变大,因而可以通过调节抽运光的功率实现对反射光与透射光的光功率分配,调制深度均达到90%以上. 该偏振控制器具有宽频段、对入射角度不敏感以及可调谐的特点,是理想的THz波段线偏振转换器和分束器.

2 结构设计与理论分析

图1为本文提出的基于金属栅-开口环/硅环-金属栅结构的器件示意图. 在结构单元中参数的设定如下: 单元周期长度 $L = 110 \mu\text{m}$,其中黄色部分是金属,绿色部分是二氧化硅(SiO_2)间隔层;金属厚度均为 $t = 0.2 \mu\text{m}$, SiO_2 层厚 $m = 30 \mu\text{m}$. S1和S4是方向相互正交的金属栅阵列,线栅周期 $d = 10 \mu\text{m}$,宽度 $w = 4 \mu\text{m}$. S2为金属开口环,内径 $R_1 = 36 \mu\text{m}$,外径 $R_2 = 48 \mu\text{m}$,开口方向与 x 轴成45°. S3为硅圆环,结构尺寸与S2相同.

为了更好地解释线偏振光在多层超表面器件中的传输特性,本文使用斯托克斯参量(S_0, S_1, S_2 和 S_3)来表示太赫兹透射光束的偏振态^[34],分别对应的斯托克斯参量为

$$S_0 = |t_{xx}|^2 + |t_{yx}|^2, \quad (1)$$

$$S_1 = |t_{xx}|^2 - |t_{yx}|^2, \quad (2)$$

$$S_2 = 2|t_{xx}||t_{yx}|\cos\delta, \quad (3)$$

$$S_3 = 2|t_{xx}||t_{yx}|\sin\delta, \quad (4)$$

式中, t_{ij} 表示线偏振光电场分量沿 j 方向入射时透射光在 i 方向上的振幅透射比($i, j = x, y$), δ 表示相位差.

$$\tan(2\alpha) = \frac{S_2}{S_1}, \quad (5)$$

$$\sin(2\chi) = \frac{S_3}{S_0}, \quad (6)$$

式中 α 和 χ 分别表示透射光的偏振方位角和椭圆率角.

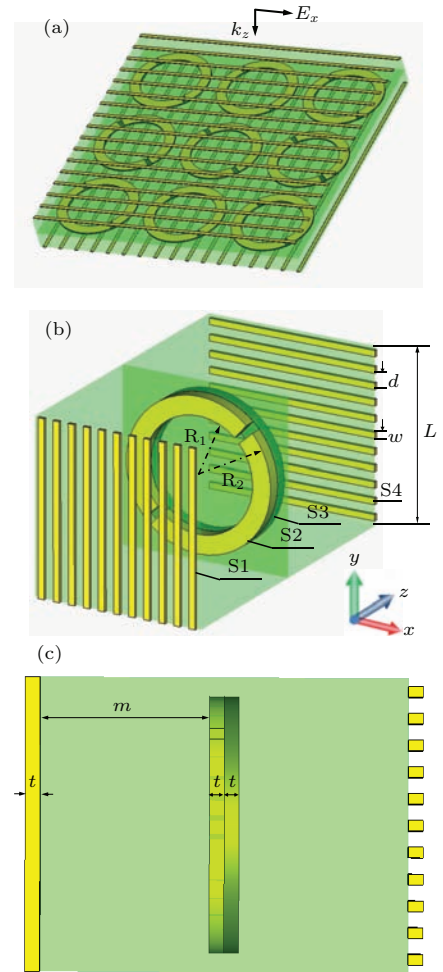


图1 (网刊彩色) 超表面偏振控制器示意图 (a) 周期结构阵列示意图; (b) 结构单元透视图; (c) 结构单元侧视图; S1和S4是金属栅; S2和S3分别是金属开口环和硅环

Fig. 1. (color online) Schematic of the metasurfaces polarization controller (a) Schematic of periodic structure array; (b) perspective view of the designed unit cell; (c) right view of the designed unit cell, S1 and S4 are metal wire grids; S2 and S3 are metal split ring and Si ring, respectively.

另外,偏振转换效率(polarization conversion ratio, PCR)可用以描述器件对线偏振入射光的偏

振转换能力, 定义为^[35]:

$$\text{PCR}_x = \frac{|t_{yx}|^2}{|t_{xx}|^2 + |t_{yx}|^2}, \quad (7)$$

$$\text{PCR}_y = \frac{|t_{xy}|^2}{|t_{yy}|^2 + |t_{xy}|^2}. \quad (8)$$

3 模拟结果与讨论

3.1 偏振转换特性研究

本文采用有限元法 (finite element method, FEM), 利用 CST Microwave Studio 软件对该器件的偏振转换特性进行了模拟计算. 图 2 (a) 给出了器件的偏振转换过程示意图. 本文模拟计算了当偏振方向平行 x 轴的太赫兹波沿 z 方向垂直入射该器件时透射光中 x, y 偏振分量的透过率曲线, $T_{ix} = 20 \log |t_{ix}| (i=x, y)$, 如图 2 (b) 所示. 可以看到, 在 0.2—1.4 THz 频段内透射太赫兹波的 x 偏振

分量透过率 (T_{xx}) 在 -30.2 — -43 dB 范围内变化, 可认为透过率近似为零. 而 y 偏振分量的透过率 (T_{yx}) 在 0.5 THz 时具有最大值 -0.04 dB, 透过率为 99.5%, 且在 0.39—1.11 THz 范围内透过率大于 90%, 损耗仅为 1 dB.

利用 (1)—(6) 式, 本文在理论上研究了透射光的偏振态. 由于透射太赫兹波中 x, y 偏振分量 (T_{xx}, T_{yy}) 之间的相位差近似为零, 利用 (6) 式可得到椭率角 χ 为零, 从而证明透射光束为线偏振光. 图 3 (a) 给出了由 (5) 式得到透射光的偏振旋转角随入射光频率的变化曲线. 可发现在 0.39—1.11 THz 范围内, 透射光偏振旋转角为 87 — 89.5° , 实现了线偏振态的转换. 图 3 (b) 进一步给出了该器件的偏振转换效率 PCR_x 随入射光频率的变化曲线, 此结果由 (7) 式得到, 在 0.39—1.11 THz 范围内器件的偏振转换效率为 99%.

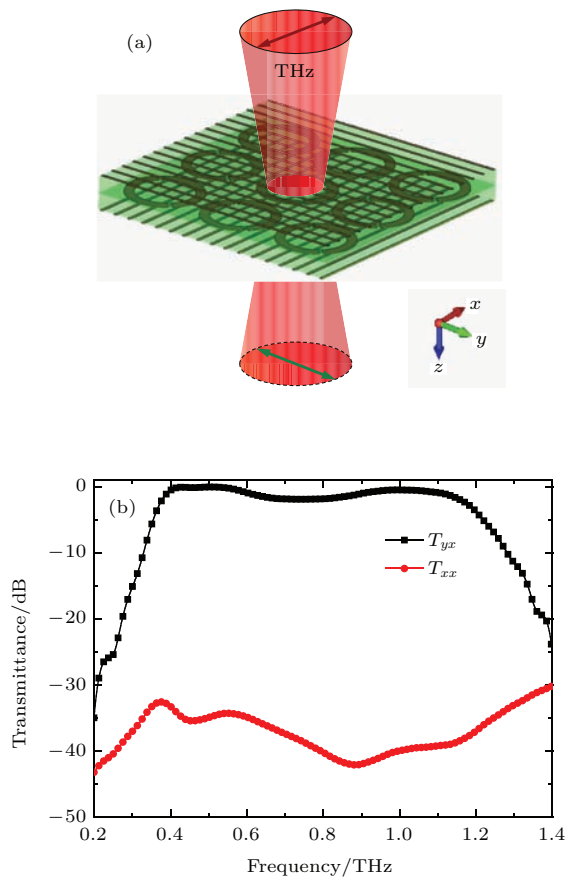


图 2 (网刊彩色) 超表面偏振控制器的传输特性 (a) 原理示意图; (b) 沿 x 方向的线偏振光入射时器件的透射谱
Fig. 2. (color online) Transmission characteristic of the metasurfaces polarization controller: (a) Schematic diagram of principle; (b) transmittance spectra for x -polarized incident waves.

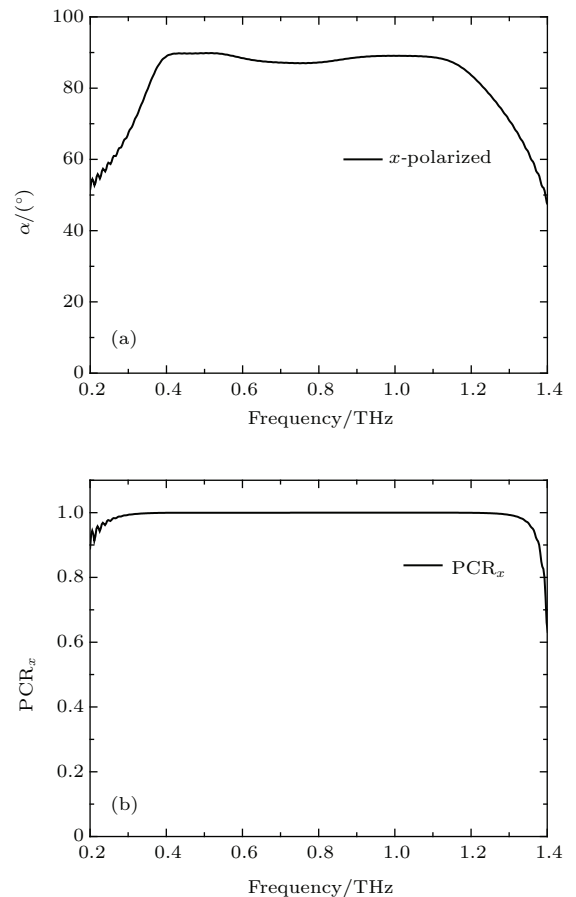


图 3 超表面偏振控制器的性能参数 (a) 偏振旋转角曲线; (b) 偏振转换效率曲线
Fig. 3. Performance parameter of the metasurfaces polarization controller: (a) The polarization rotation angle; (b) the polarization conversion ratio.

此外, 本文还研究入射角对该偏振控制器工作状态的影响, 图4给出了入射角分别为 0° , 30° 和 60° 时的透射谱线. 通过对比发现, 当入射光以 30° 和 60° 倾斜角入射到偏振控制器时, 在 $0.52\text{--}1.05\text{ THz}$ 频段 y 偏振分量的透过率 T_{yx-30° , T_{yx-60° 处于 $-1.2\text{--}-2.6\text{ dB}$ 之间, 说明器件在大角度入射时依然能保持高透过率的线偏振旋转功能.

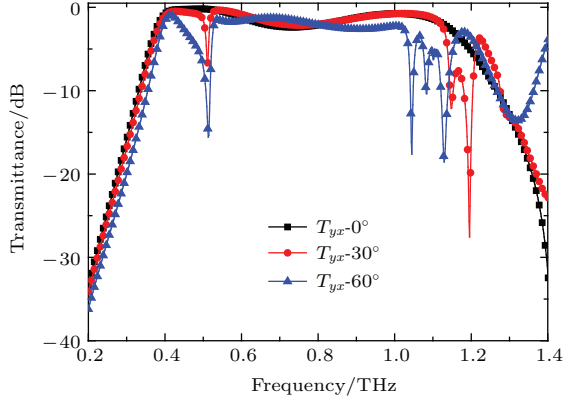


图4 (网刊彩色) 入射角度分别为 0° , 30° 和 60° 时 y 偏振分量的透射谱
Fig. 4. (color online) The y -polarized transmittance at oblique incidence, azimuth = 0° , 30° and 60° , respectively.

3.2 器件原理分析与建模

为了探讨器件的偏振控制机理, 本文模拟了 1 THz 时线偏振太赫兹波与金属开口环相互作用形成的表面电流分布, 如图5所示. 开口环的开口方向与 x 轴呈 45° 夹角. 本文设定 u, v 坐标分别沿开口方向和垂直于开口方向(图5(c)), 在 $u-v$ 坐标下, 电场分量 E_x 可以分解为 E_u, E_v 两个分量. 由图5(a)所示的表面电流分布可发现, 此时仅 E_u 分量与开口环耦合, 形成平行于该分量的电偶极谐振. 同理, 图5(b)所示的电流分布是由 E_v 分量引起的电偶极谐振. 在 $x-y$ 坐标下, 电偶极谐振不平行于任意坐标轴, 因此透射光在 x, y 方向上均有电场分量.

由于独立的金属开口环形成的偏振转换效率低, 本文引入由金属栅组成的类法布里-珀罗(F-P)谐振腔(如图1所示), 并利用F-P谐振效应增强金属开口环表面电流的振荡. 从图6可以看出, 一束沿 x 轴偏振的线偏光 E_0 入射到该器件后, 与金属开口环相互作用, 产生 y 偏振分量 $E'_{t,y}$ 并从后金属栅透射. 对应的 x 偏振分量 $E'_{t,x}$ 则被反射, 并再次与开口环相互作用, 产生新的 y 偏振分量 $E_{t,y1}$, 通

过重复该过程, 透过率得以增强.

本文利用多光束干涉(multiple-beam interference, MI)理论对器件的偏振旋转过程进行了建模. 图6中太赫兹波传播过程中的各电场分量可表示为

$$\begin{cases} E_{r,x} = E_0 r'_{xx}, \\ E'_{t,x} = E_0 t'_{xx}, \\ E'_{t,y} = E_0 t'_{yx}, \\ E''_{t,y} = E'_{t,y} t'_{yy}, \\ E'_{r,x1} = E'_{t,x} r'_{xx}, \\ E_{t,y1} = E'_{r,x1} t'_{yx}, \\ E_{t,x1} = E'_{t,y1} t'_{xx}. \end{cases} \quad (9)$$

同理:

$$E''_{t,y2} = E'_{t,y2} t'_{yy}, \quad (10)$$

其中, r'_{ix}, t'_{ix} 分别表示开口环在 x 和 y 方向的振幅反射比和透射比($i = x, y$), r'_i, t'_i 分别表示金属栅在 x 和 y 方向上的振幅反射比和透射比($i = x, y$). 由于透射光束的相干叠加, 器件透射光的电场分量 E_t 为:

$$E_t = E''_{t,y} + E''_{t,y2} + \dots \quad (11)$$

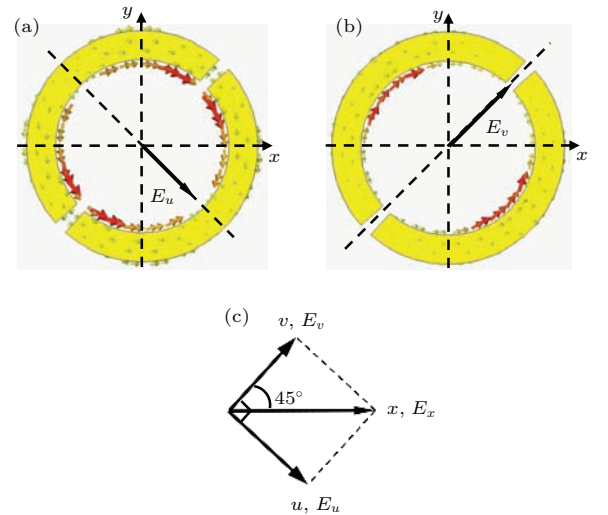


图5 (网刊彩色) 在 1 THz 时沿 x 方向的偏振光入射金属开口环形成的表面电流分布图 (a)和(b)分别表示由电场分量 E_u 和 E_v 引起的表面电流; (c) 电场强度 E_x 在 u, v 方向分量示意图

Fig. 5. (color online) Surface current distributions on the split ring for incident x -polarized waves at 1 THz : (a) and (b) are the surface current distributions caused by the electric field component E_u and E_v , respectively; (c) schematic of the decomposed electric fields.

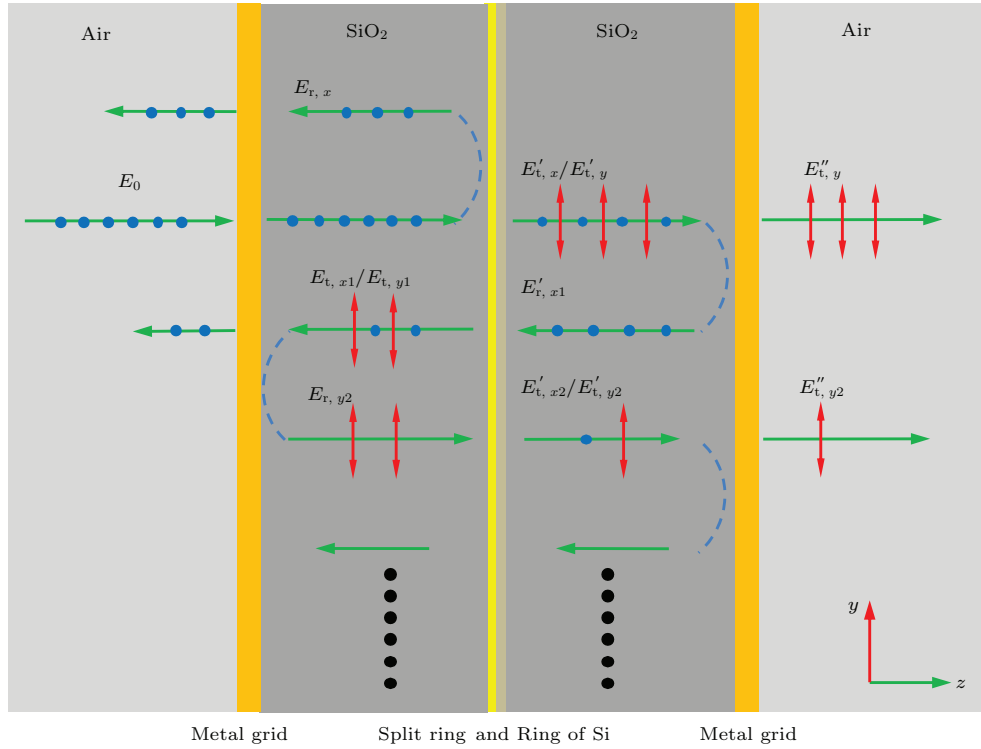


图6 (网刊彩色) 超表面偏振控制器中类F-P干涉效应示意图

Fig. 6. (color online) Schematic of the Fabry-Pérot-like interference effect in metasurfaces polarization controller.

由(9)—(11)式可得到器件总的透过率:

$$T_{\text{total}} = 20 \log \left(\frac{t'_{yx} t'_{yx} t'_y e^{i\Delta\phi} + r'_{xx} t'_{xx} t'_{yx} r'_y e^{i\Delta\phi}}{1 - r'^2_{xx} e^{i\Delta\phi} - t'^2_x e^{i\Delta\phi}} \right), \quad (12)$$

$$\Delta\phi = \delta + 4\omega nm/c, \quad (13)$$

式中, $\Delta\phi$ 为相干透射光束之间的相位差, n 为二氧化硅折射率, δ 是由开口环在 y 方向上引起的相位差, c 为真空中的光速.

图7给出了由(12)式计算得到的太赫兹波透

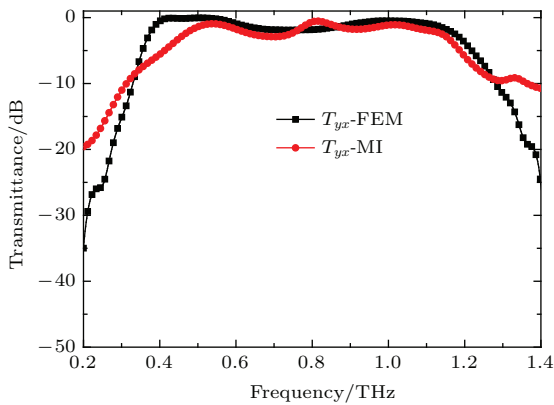


图7 (网刊彩色) 由MI理论和FEM法得到的器件透射谱
Fig. 7. (color online) Simulated transmittance spectra by MI theory and FEM, respectively.

过率随入射光频率的变化曲线, 其中红色曲线为MI理论计算的结果, 黑色曲线为FEM方法仿真的结果. 由于本文在MI理论分析中假设透射光能量集中在 $E''_{t,y}$ 和 $E''_{t,y2}$, 导致了MI理论曲线比FEM模拟结果略低. 同时, MI理论中忽略了金属环和硅环的薄层对光程的影响, 从而在0.81 THz时透射谱出现相干极大值. 但是通过对比两曲线可发现, 在0.39—1.11 THz频段内理论计算与仿真结果符合较好.

3.3 分束特性研究

此外, 本文还研究了光抽运硅环时器件分束功能的变化规律. 选择800 nm连续激光抽运, 随着抽运光功率的增强, 硅环光生载流子浓度增加, 开口环表面电流在开口处由隔离转变为连通状态, 形成一个连续回路与太赫兹波相互耦合. 该开口环结构可以认为是一个在开口处有稀疏载流子的金属圆环, 可由Drude模型描述:

$$\epsilon_{\text{Drude}} = \epsilon_{\text{Si}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau}, \quad (14)$$

$$\omega_p^2 = \sigma/(\epsilon_0\tau), \quad (15)$$

$$\Delta d = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}, \quad (16)$$

式中 τ , ω_p , σ 和 Δd 分别表示自由电子气的弛豫时间、等离子体频率、电导率和趋肤深度, ϵ_{si} 表示硅的相对介电常数. 由 (14)–(16) 式可以发现, 硅环的电导率与上述模型的性质密切相关. 本文利用 CST Microwave Studio 中的 FEM 计算了光抽运硅环时器件的功率透射谱和反射谱, 如图 8 (a) 和 (b)

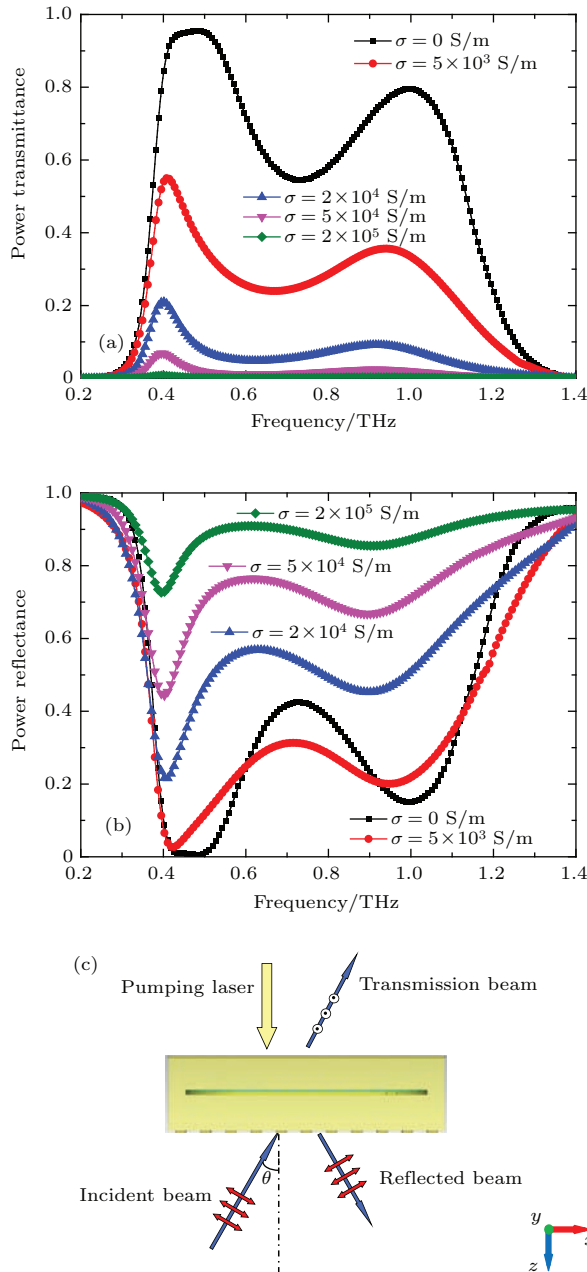


图 8 (网刊彩色) 超表面偏振控制器的分束特性 (a) 不同电导率下的透射光和 (b) 反射光的功率变化谱线; (c) 偏振分束功能示意图

Fig. 8. (color online) Beam splitting characteristic of the metasurfaces polarization controller: (a) The power transmittance and (b) power reflectance for x -polarized waves with different conductivity; (c) schematic of splitting beam.

所示. 当 x 偏振方向的太赫兹波沿 z 轴方向垂直入射时, 随着抽运光功率的增加, 硅圆环电导率增大, 器件透射功率逐渐降低, 当 σ 由 0 S/m 增大到 2×10^5 S/m, 透射光功率从 95% 降低到零. 与之相反, 当硅圆环电导率变大时, 反射太赫兹波的功率逐渐增大, 当 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m 时, 反射太赫兹波的功率达到 90%. 图 8 (c) 为该器件偏振分束功能示意图, 从无抽运到强抽运的过程中, 透射光功率逐渐减小至消失, 而反射光功率逐渐增大到 90%. 在整个光抽运调制过程中, 器件可以实现对入射太赫兹波的偏振分束、强度调制和功率分配.

4 结 论

基于金属开口环在类法布里-珀罗谐振腔中的电磁谐振特性, 本文设计和仿真分析了“金属栅-开口环/硅环-金属栅”太赫兹超表面偏振控制器的传输特性, 并对器件的偏振控制过程进行了理论建模. 结果表明, 该器件可以对垂直入射的线偏振太赫兹波进行高效的偏振态控制, 在 0.72 THz 的工作带宽内, 可以实现偏振方向 90° 的旋转, 损耗为 1 dB. 当太赫兹波倾斜入射且倾斜角度不大于 60° 时, 该器件依然能够在 0.52–1.05 THz 频率间保持良好的偏振旋转特性, 透过率达到 90% 以上. 此外, 本文利用不同强度的光场抽运器件中的硅环, 实现了器件的可控偏振分束功能. 该器件是可以作为未来太赫兹空间光通信和信息处理的宽带、角度不敏感、可调谐的偏振转换器和分束器.

参考文献

- [1] Tonouchi M 2007 *Nat. Photon.* **1** 97
- [2] Leitenstorfer A, Hunsche S, Shah J, Nuss M C, Knox W H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1516
- [3] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, Jordan K, Neil G R, Williams G P 2002 *Nature* **420** 153
- [4] Rochat M, Ajili L, Willenberg H, Faist J, Beere H, Davies G, Linfield E, Ritchie D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1381
- [5] Li Z Y, Yao J Q, Xu D G, Zhong K, Wang J L, Bing P B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054207
- [6] Federici J, Moeller L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 111101
- [7] Awad M M, Chevillon R A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 221107
- [8] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, Baraniuk R G, Rudd J V, Koch M 1999 *Appl. Phys. B* **68** 1085
- [9] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26

- [10] Nagel M, Bolivar P H, Brucherseifer M, Kurz H, Bossert-hoff A, Büttner R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 154
- [11] Li S S, Zhang H, Bai J J, Liu W W, Chang S J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154201 (in Chinese) [李珊珊, 张昊, 白晋军, 刘伟伟, 常胜江 2015 物理学报 **64** 154201]
- [12] Liu Z Q, Chang S J, Wang X L, Fan F, Li W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 130702 (in Chinese) [刘志强, 常胜江, 王晓雷, 范飞, 李伟 2013 物理学报 **62** 130702]
- [13] Huang Z, Park H, Parrott E P J, Chan H P, Pickwell-MacPherson E 2013 *Photon. Tech. Lett. IEEE* **25** 81
- [14] Lin C J, Li Y T, Hsieh C F, Pan R P, Pan C L 2008 *Opt. Express* **16** 2995
- [15] Kaveev A K, Kropotov G I, Tsygankova E V, Tzibizov I A, Ganichev S D, Danilov S N, Olbrich P, Zoth C, Kaveeva E G, Zhdanov A I, Ivanov A A, Deyanov R Z, Redlich B 2013 *Appl. Opt.* **52** B60
- [16] Costley A E, Hursey K H, Neill G F, Ward J M 1977 *JOSA* **67** 979
- [17] Masson J B, Gallot G 2006 *Opt. Lett.* **31** 265
- [18] Qi L M, Yang Z Q, Lan F, Gao X, Li D Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034210
- [19] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [20] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [21] Withayachumnankul W, Abbott D 2009 *Photon. J. IEEE* **1** 99
- [22] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [23] Chen H T, Palit S, Tyler T, Bingham C M, Zide J M O, O'Hara J F, Smith D R, Gossard A C, Averitt R D, Padilla W J, Padilla W J, Jokerst N M, Taylor A J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 091117
- [24] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, Azad A K, Averitt R D, Taylor A J 2009 *Nat. Photon.* **3** 148
- [25] Shu J, Qiu C, Astley V, Nickel D, Mittleman D M, Xu Q 2011 *Opt. Express* **19** 26666
- [26] Yang Y M, Huang R, Cong L Q, Zhu Z H, Gu J Q, Tian Z, Singh R, Zhang S, Han J G, Zhang W L 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 121114
- [27] Karl N, Reichel K, Chen H T, Taylor A J, Brener I, Benz A, Reno J L, Mendis R, Mittleman D M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 091115
- [28] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [29] Cheng Y Z, Withayachumnankul W, Upadhyay A, Headland D, Nie Y, Gong R Z, Bhaskaran M, Sriram S, Abbott D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 181111
- [30] Cong L, Cao W, Zhang X Q, Tian Z, Gu J Q, Singh R, Han J G, Zhang W L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 171107
- [31] Heyes J E, Withayachumnankul W, Grady N K, Chowdhury D R, Azad A K, Chen H T 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 181108
- [32] Tian W, Wen Q Y, Chen Z, Yang Q H, Jing Y L, Zhang H W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 28401 (in Chinese) [田伟, 文岐业, 陈智, 杨青慧, 荆玉兰, 张怀武 2015 物理学报 **64** 28401]
- [33] Xie Z, Wang X, Ye J, Feng S, Sun W, Akalin T, Zhang Y 2013 *Scientific Reports* **3** 3347
- [34] Goldstein D 2011 *Polarized Light, Revised and Expanded* (CRC Press) pp119–124
- [35] Liu W W, Chen S Q, Li Z C, Cheng H, Yu P, Li J X, Tian J G 2015 *Opt. Lett.* **40** 3185

Multifunctional metasurfaces for terahertz polarization controller^{*}

Yang Lei Fan Fei[†] Chen Meng Zhang Xuan-Zhou Chang Sheng-Jiang[‡]

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 8 December 2015; revised manuscript received 7 January 2016)

Abstract

Polarization is one of the basic properties of electromagnetic wave conveying valuable information about signal transmission and sensitive measurements. Manipulations of polarization state and amplitude have aroused a lot of research interest in many different fields, especially in the terahertz (THz) regime. Although many researches on THz polarization controller have been carried out, their transmission losses are still difficult to lower in a broad bandwidth. And there are few reports on THz polarization controller which can rotate the polarization state and split beams at the same time. Multifunctional THz devices are required to meet the needs of the progress of THz technology and its applications. In order to overcome this constraint, semiconductor silicon is integrated into the proposed structure to manipulate the polarization state and the amplitude, because of its optical properties with the external pump light. Here, according to the electromagnetic resonance between split rings and silicon rings in Fabry-Pérot-like cavity, we propose a metasurfaces-based terahertz polarization controller. The unite cell structure is composed of metal grids-split ring/Si ring-metal grids spaced by silica layers. By using the finite element method in CST Microwave Studio, we simulate the transport and polarization properties under different conditions. The results show that a linear polarization state can be nearly perfectly converted into its orthogonal one from 0.39 to 1.11 THz with a transmission loss of 1 dB, which fits well to the one of multiple-beam interference theory. Then we study the properties of the proposed metasurface structure for oblique incidence. The property of rotating polarization basically keeps stable even at an incident angle of 60° from 0.52 to 1.05 THz. At the end of the paper, the polarization splitting feature of the device is discussed in the THz regime. The results demonstrate that the transmitted and reflected beam power of the device can be tuned by changing the pump light power. The modulation depths of two beams reach more than 90% at 0.5 THz. It is worth noting that the proposed structure can not only rotate the polarization state of transmitted light in a broad bandwidth of 0.72 THz, but also modulate the transmitted and reflected beam power with a wide modulation depth. It can be used as a broad-band, low-loss and tunable terahertz polarization controller which is also insensitive to the incident angle. So it meets the requirements in THz communication, spectrum detection and imaging systems.

Keywords: terahertz, metasurfaces, polarization conversion, polarization splitting

PACS: 07.57.Pt, 78.67.Pt, 42.79.Fm

DOI: 10.7498/aps.65.080702

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61171027, 61505088), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 15JCQNJC02100), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA010205).

[†] Corresponding author. E-mail: fanfei@nankai.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: sjchang@nankai.edu.cn