

基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究

付亚男 张新群 赵国忠 李永花 于佳怡

A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region

Fu Ya-Nan Zhang Xin-Qun Zhao Guo-Zhong Li Yong-Hua Yu Jia-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 180701 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.180701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.180701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

γ - α 相变中不同晶界特征下铁素体生长形貌的相场模拟

Phase-field modeling of ferrite morphology in austenite-to-ferrite transformation with considering anisotropic effects

物理学报.2017, 66(7): 070701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070701>

CH 基团与金刚石 (111) 面的碰撞反应及其对碳膜生长的影响

Collision reactions of CH radical on diamond and their effects on the carbon film growth

物理学报.2016, 65(3): 030701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030701>

基于电磁拓扑的多腔体屏蔽效能快速算法

Electromagnetic topology based fast algorithm for shielding effectiveness estimation of multiple enclosures with apertures

物理学报.2016, 65(3): 030702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030702>

一种基于 BLT 方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法

A BLT equation-based approach for calculating the shielding effectiveness of enclosures with apertures

物理学报.2015, 64(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010701>

一种考虑小孔尺寸效应的孔阵等效建模方法

An equivalent approach to modeling aperture array with considering size effect of apertures

物理学报.2014, 63(12): 120701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.120701>

基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究*

付亚男¹⁾²⁾³⁾ 张新群¹⁾²⁾³⁾ 赵国忠¹⁾²⁾³⁾† 李永花¹⁾²⁾³⁾ 于佳怡¹⁾²⁾³⁾

1)(首都师范大学物理系, 北京 100048)

2)(北京市成像技术高精尖创新中心, 北京 100048)

3)(太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2017年4月12日收到; 2017年6月1日收到修改稿)

提出了一个基于谐振环结构的宽带且高效的太赫兹线偏振转换器. 该结构由金属-电介质-金属三层构成, 位于顶层的是基于开口谐振环的超表面, 中间为介质层, 底部为金属板. 实验结果表明, 该结构可以在0.59—1.24 THz 频率范围内将线偏振的太赫兹波偏振方向旋转 90° , 转换率超过80%. 通过计算该结构在所研究的频率范围内反射光的偏振角和椭圆角, 证实了该结构可以在较宽的频率范围内实现高效的线偏振转换. 对该结构在偏振转换率高的频率下表面电流和电场进行仿真, 分析了高偏振转换率和宽带的机理. 同时, 研究了该结构的偏振转换率对入射角以及偏振角的依赖性, 结果表明该结构在 0° — 30° 入射角范围内、 -10° — 10° 偏振角范围内均有很好的偏振转换性能.

关键词: 谐振环, 宽带, 太赫兹, 偏振转换

PACS: 07.05.Tp, 07.60.-j, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.66.180701

1 引言

太赫兹波具有安全性、透视性、吸水性、高分辨等诸多优越特性, 在光谱^[1-6]、成像^[7-10]、无损检测^[11-13]等领域具有非常重要的应用价值, 受到了学术界的广泛关注. 偏振作为光波的一个重要的物理性质, 在很多实际应用中都很重要. 太赫兹波偏振转换器件在太赫兹成像和光谱上都有重要的应用价值, 例如在探测霍尔效应时的椭圆磁光度法^[14]、研究蛋白质和DNA的手性结构^[15,16]、太赫兹偏振成像^[17]和三维分子结构的测定^[18]等都需要有效的太赫兹偏振转换器件. 超材料^[19-23]是人工设计加工的复合材料, 具有很多自然材料所没有的功能, 能够对太赫兹波产生独特的电磁响应, 实现对太赫兹波振幅、相位、传输等多样性的控制, 是实现太赫兹调控器件的有效途径. 例如, 通过超

材料结构可以实现左旋和右旋圆偏振光的不对称传播^[24], 利用超材料结构在0.62—0.65 THz频段实现了线偏振到圆偏振的转换^[25]. 近年来, 使用超材料结构已经实现了双带以及多带^[26]圆偏振转换器, 基于手性图形的单频太赫兹线偏振转换器件^[27]和利用双层弯曲的劈裂谐振环双频太赫兹偏振转换器件^[28]也已经提出. 太赫兹波段的宽带高效偏振转换器件多通过多层结构以及复杂的图形实现. 如2013年, Cong等^[29]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; 2016年, Tang等^[30]提出了利用双螺旋手性结构, 在太赫兹波段实现了宽带高效的偏振转换; 杨磊等^[31]提出了一种多功能太赫兹超表面控制器, 结构由光栅-金属栅-开口环/硅环-金属栅组成, 研究结果表明, 当线偏振太赫兹波垂直入射时, 可对

* 国家自然科学基金(批准号: 61575130, 61575131, 50971094)和北京市自然科学基金-北京市教育委员会科技计划重点项目(批准号: KZ201310028032)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guozhong-zhao@126.com

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%. 但是复杂的图形和多层结构都存在制备困难和成本高等问题, 太赫兹波段结构简单、宽带、高效的偏振转换器件的设计仍是研究的热点问题. 本文提出了一种基于谐振环结构的太赫兹线偏振转换器件, 该结构由金属-介质-金属三层结构组成, 该结构与金属条和 L 型等简单的结构相比可以在超材料图形上激发更复杂的偶极共振, 在顶层超材料图形和底层金属板之间激发三阶电磁谐振, 因此可以在较宽的频率范围内实现较高的偏振转换率, 带宽与中心频率的比值可以达到 75%, 偏振转换率保持在 80% 以上, 并且在太赫兹波入射角度 0°—30° 范围内都可以实现高效

的偏振转换, 有望成为一款实用化的太赫兹偏振转换器件.

2 设计与仿真

2.1 结构设计

本文所设计的结构由金属-电介质-金属三层结构构成, 顶层为谐振环阵列结构, 中间层为介质层, 材料为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET), 底层为金属板, 结构的组成和几何结构参数定义如图 1 所示. 入射电磁波为电场沿着 y 方向的线偏振光, 波矢 \mathbf{k} 沿着 z 轴负方向.

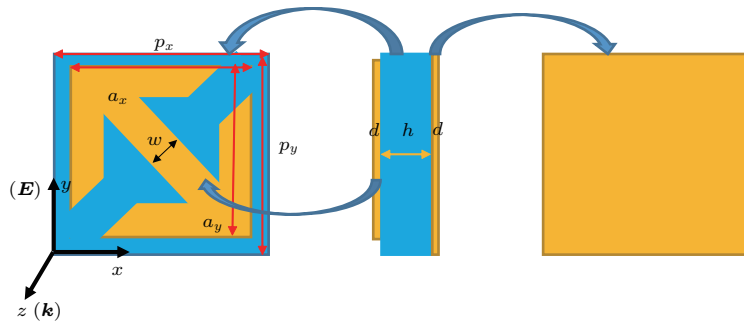


图 1 谐振环偏振转换结构示意图

Fig. 1. Diagram of polarization converter based on the split resonant ring.

2.2 结构优化与仿真

利用 CST microwave studio 软件对该结构进行仿真, 同时考虑到器件制备方面的条件, 经优化后最终选择的几何结构参数列于表 1.

表 1 谐振环结构仿真优化后的结构参数

Table 1. Optimized parameters of structure based on the split resonant ring.

结构参数	结构参数意义	优化值/ μm
a_x	谐振环偏振转换结构	84
	第一层金属图形水平方向周期	
a_y	谐振环偏振转换结构	84
	第一层金属图形垂直方向周期	
p_x	谐振环偏振转换结构水平方向周期	128
p_y	谐振环偏振转换结构垂直方向周期	120
h	谐振环偏振转换结构介质层的厚度	36
d	谐振环偏振转换结构金属层的厚度	0.2
w	谐振环偏振转换结构金属线宽	20

我们定义 $r_{yy} = \left| \frac{E_{yr}}{E_{yi}} \right|^2$, $r_{xy} = \left| \frac{E_{xr}}{E_{yi}} \right|^2$, r_{yy} 代表 y 偏振到 y 偏振的反射率, 即同偏振反射率, r_{xy} 代表 y 偏振到 x 偏振的反射率, 即交叉偏振反射率. 其中 E_{xr} 代表偏振方向沿着 x 轴的反射太赫兹波的振幅, E_{yi} 代表偏振方向沿着 y 轴的入射太赫兹波的振幅, E_{yr} 代表偏振方向沿着 y 轴的反射太赫兹波振幅. 谐振环结构的偏振转换率 (PCR) 定义如下:

$$PCR = \frac{r_{xy}}{r_{yy} + r_{xy}}. \quad (1)$$

基于优化后的谐振环结构的几何结构参数, 对谐振环偏振转换结构进行了全波仿真, 得到了 r_{xy} 和 r_{yy} , 依据 (1) 式对结果进一步处理, 得到了谐振环偏振转换结构的偏振转换率 PCR, 结果如图 2 所示. 其中, 图 2(a) 为谐振环结构的反射率曲线, 红色实线代表 y 偏振到 x 偏振的反射率, 黑色虚线代表 y 偏振到 y 偏振的反射率. 图 2(b) 为谐振环结构的偏振转换率曲线.

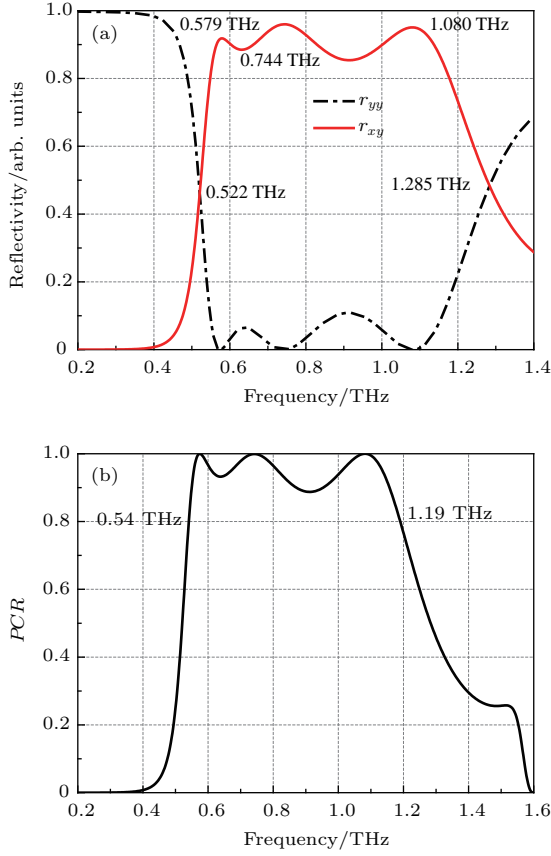


图2 谐振环结构偏振转换器的 (a) 反射率和 (b) 偏振转换率

Fig. 2. (a) Reflectivity and (b) polarization conversion rate of polarization converter based on split resonant ring.

从仿真结果可以看出, 该结构在0.54—1.19 THz 范围内将线偏振的太赫兹波偏振方向旋转 90° , 即将偏振方向沿着 y 轴入射的太赫兹波转换为偏振方向沿着 x 轴的太赫兹波, 偏振转换率在80%以上. 在0.579, 0.744, 1.08 THz 处偏振转换率最高. 同时可以看出, 在0.522和1.285 THz 处可以将入射的线偏振太赫兹波转换为圆偏振的太赫兹波.

2.3 反射太赫兹波偏振状态分析

我们使用斯托克斯参数, 讨论反射太赫兹波的偏振状态. 斯托克斯参数的定义如下^[32]:

$$I = |r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2, \quad (2a)$$

$$Q = |r_{yy}|^2 - |r_{xy}|^2, \quad (2b)$$

$$U = 2|r_{yy}||r_{xy}|\cos\varphi_{\text{diff}}, \quad (2c)$$

$$V = 2|r_{yy}||r_{xy}|\sin\varphi_{\text{diff}}, \quad (2d)$$

其中 $\varphi_{\text{diff}} = \phi_{xy} - \phi_{yy}$, 表示 y 偏振到 x 偏振和 y 偏振到 y 偏振的反射太赫兹波的相位差, ϕ_{xy} 为 y 偏

振到 x 偏振的反射太赫兹波相位, φ_{yy} 为 y 偏振到 y 偏振的反射太赫兹波相位. 按照图3(a)定义, 反射太赫兹波的偏振角 ψ 和椭圆角 χ 在所研究的频率范围内, 依据如下公式:

$$\tan(2\psi) = \frac{U}{Q}, \quad (3a)$$

$$\sin(2\chi) = \frac{V}{I}, \quad (3b)$$

计算了反射太赫兹波的偏振角 ψ 和椭圆角 χ 随着频率的变化, 结果如图3(b)所示, 其中蓝色实线代表反射太赫兹波的偏振角 ψ , 黑色虚线代表反射太赫兹波的椭圆角 χ .

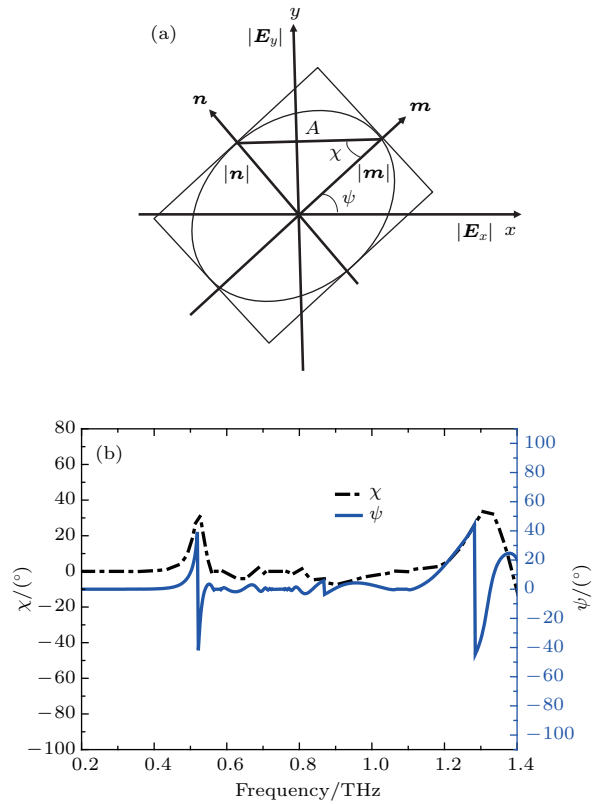


图3 (网刊彩色) (a) 反射太赫兹波的极化椭圆; (b) 反射光的偏振角以及椭圆角

Fig. 3. (color online) (a) Polarized ellipsoid of terahertz wave reflected by polarization converter; (b) polarization angle and elliptical angle of terahertz wave reflected by polarization converter.

从图3可以看出, 该结构在0.54—1.19 THz 范围内, 椭圆角 $\chi < 5^\circ$, 偏振角 $\psi \approx 0^\circ$, 所以反射光近似为与入射光垂直的线偏振光. 在0.5276和1.2872 THz 处, 椭圆角 $\chi > 35^\circ$, 经过优化, 完全可以使椭圆角达到 45° , 实现线偏振光到圆偏振光的转换.

3 偏振转换分析

3.1 理论分析

为了理解和解释该偏振转换器的工作机理,我们将坐标轴进行旋转,得到 u, v 轴,如图 4(a) 所示,偏振方向沿着 y 方向的太赫兹波可以分解为沿着 u, v 轴的两个分量,入射的太赫兹波可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{jkz} \hat{\mathbf{u}} + \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{jkz} \hat{\mathbf{v}}. \quad (4)$$

入射波经谐振环偏振转换结构反射后,反射的太赫兹波可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r = & \frac{\sqrt{2}}{2} \left[r_{uu} E_i e^{j(-kz+\varphi_{uu})} + r_{vu} E_i e^{j(-kz+\varphi_{vu})} \right] \hat{\mathbf{u}} \\ & + \frac{\sqrt{2}}{2} \left[r_{vv} E_i e^{j(-kz+\varphi_{vv})} + r_{uv} E_i e^{j(-kz+\varphi_{uv})} \right] \hat{\mathbf{v}}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 r_{uu} 表示 u 偏振到 u 偏振的反射率, r_{vu} 表示 u 偏振到 v 偏振的反射率, r_{vv} 表示 v 偏振到 v 偏振的反射率, r_{uv} 表示 v 偏振到 u 偏振的反射率; φ_{vv} 表

示 v 偏振到 v 偏振的反射相位, φ_{uu} 表示 u 偏振到 u 偏振的反射相位, φ_{uv} 表示 v 偏振到 u 偏振的反射相位, φ_{vu} 表示 u 偏振到 v 偏振的反射相位。

我们对入射太赫兹波的偏振方向沿着 u, v 轴情况下谐振环偏振转换器件的反射率进行了仿真,经谐振环偏振转换结构反射后,反射太赫兹波的交叉偏振反射率如图 4(b) 所示,其中黑色虚线代表 u 偏振到 v 偏振的反射率,红色实线代表 v 偏振到 u 偏振的反射率. 反射太赫兹波的同偏振反射率如图 4(c) 所示,黑色虚线代表 u 偏振到 u 偏振的反射率,红色实线代表 v 偏振到 v 偏振的反射率. 对偏振沿着 u, v 轴入射的太赫兹波同偏振反射位相差进行了计算,如图 4(d) 所示。

从图 4(b) 可以看出,在所研究的频率 0.2—1.4 THz 范围内,入射太赫兹波的偏振方向沿着 u, v 方向时,谐振环偏振转换结构的交叉偏振反射率近似为 0,谐振环结构没有偏振转换效果,所以反射太赫兹波可以用同偏振反射率和相位来表示:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r = & \frac{\sqrt{2}}{2} r_{uu} E_i e^{j(-kz+\varphi_{uu})} \hat{\mathbf{u}} \\ & + \frac{\sqrt{2}}{2} r_{vv} E_i e^{j(-kz+\varphi_{vv})} \hat{\mathbf{v}}. \end{aligned} \quad (6)$$

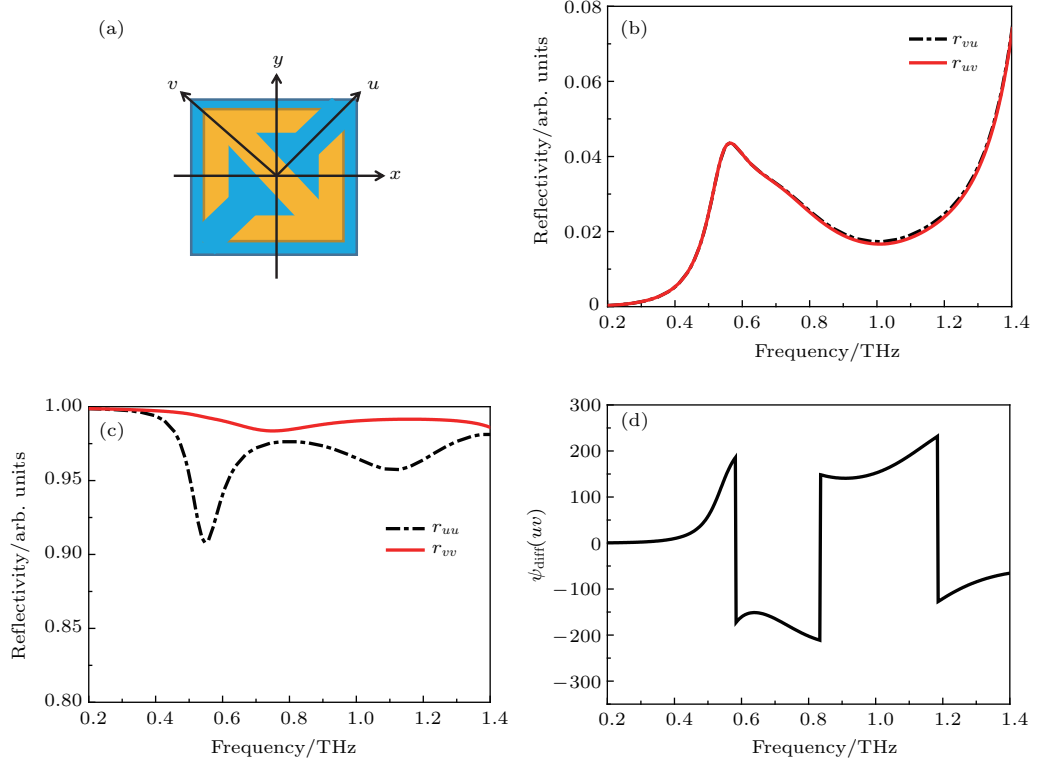


图 4 (网刊彩色) 当入射太赫兹波的偏振方向沿着 u, v 轴时, (a) u, v 轴的定义, (b) 交叉偏振反射率, (c) 同偏振反射率, (d) 同偏振反射相位差

Fig. 4. (color online) (a) Definition of u, v axis, (b) reflectivity of cross-polarization, (c) reflectivity of co-polarization, (d) phase difference of co-polarization for electric field along u, v axis.

从图4(c)可以看出, 电场沿着 u, v 方向同偏振反射率都在90%以上, 在0.5504, 0.7496, 1.112 THz处出现谐振峰. 从图4(d)可以看出, 在0.5840—0.8336 THz范围内, 沿着 u, v 两个方向极化的太赫兹波经反射后相位差在 $-180^\circ \pm 20^\circ$ 之间, 而在0.5428—0.5840 THz以及0.8360—1.1816 THz范围内该相位差在 $180^\circ \pm 20^\circ$ 之间, 同时在谐振点附近存在相位突变. 根据(6)式可以看出, 当 $\psi_{\text{diff}} = \varphi_{vv} - \varphi_{uu} = \pi + 2k\pi$ ($k \in Z$) 时, 反射太赫兹波的方向变为 $\hat{u} - \hat{v}$, 这与入射的太赫兹波偏振方向 $\hat{u} + \hat{v}$ 垂直, 这说明太赫兹波的偏振方向能够旋转 90° , 所以该谐振环结构可以在0.54—1.18 THz范围内实现偏振转换率超过80%.

3.2 根据表面电流分析谐振环结构的宽带偏振转换

从图4(c)可以看出, 偏振方向沿着 u, v 轴入射的太赫兹波, 经谐振环偏振转换结构反射后, 同极化反射存在三个谐振点, 其中太赫兹波偏振方向沿着 u 轴时同偏振反射率存在两个谐振点, 分别在

0.5504和1.112 THz, 太赫兹波偏振方向沿着 v 轴时存在一个谐振点, 在0.7496 THz. 为了分析谐振环偏振转换器件高偏振转换率的机理, 我们对三个频率下谐振环图形和金属背板的表面电流分布进行了仿真, 结果如图5所示, 图5(a)—(c)分别为0.5504, 0.7496, 1.112 THz处谐振环偏振转换结构的表面电流和金属背板上的电流分布, 黑色箭头代表金属背板上的电流分布, 蓝色箭头代表谐振环图形上的电流分布.

从表面电流的分布可以看出, 当入射太赫兹波偏振方向沿着 u 轴时, 在谐振频率0.5504 THz附近, 谐振环上发生偶极共振, 谐振环上的电流与背板金属上的电流反向, 构成等效磁谐振器. 在1.112 THz附近, 谐振环上发生四极化共振, 谐振环上的电流与背板金属上的电流同向, 构成等效电谐振器. 当入射太赫兹波偏振方向沿着 v 轴时, 在0.7496 THz附近产生了两对同相的偶极共振, 金属背板上的电流与谐振环上的电流反向, 构成等效磁谐振器. 所以宽带的偏振转化效果源于该结构的三阶电磁谐振.

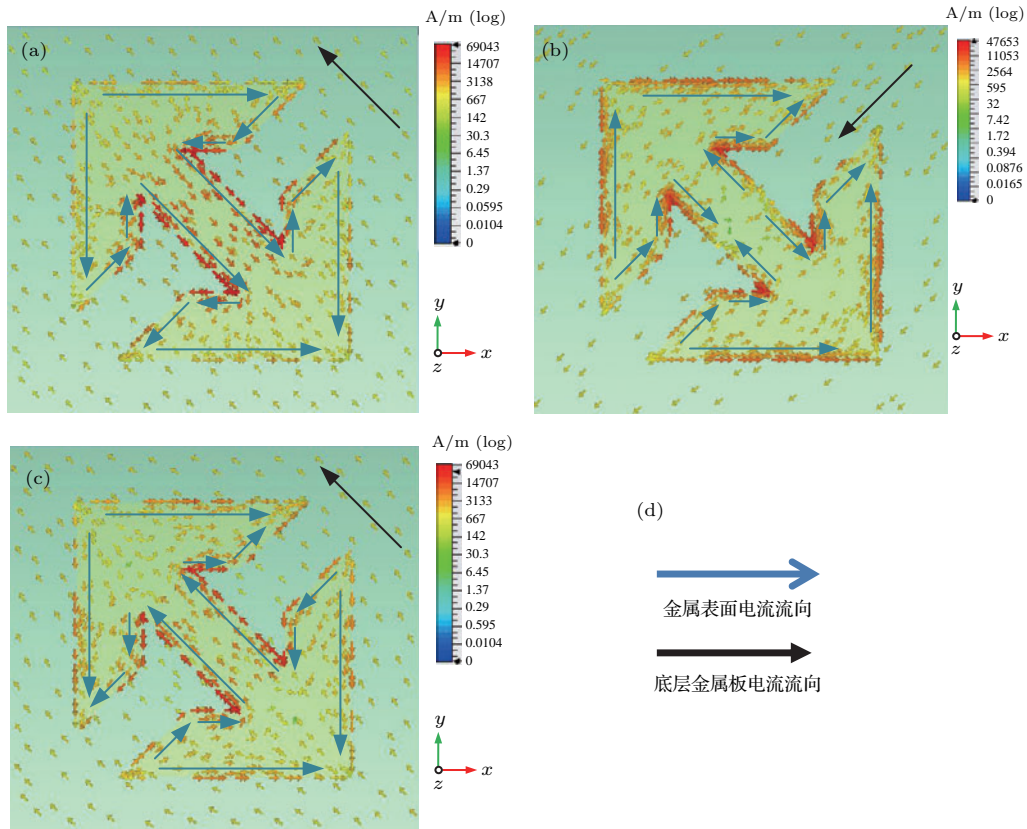


图5 在 $f =$ (a) 0.5504, (b) 0.7496, (c) 1.112 THz 频率处金属表面电流和金属板上的电流分布; (d) 图示说明
 Fig. 5. Distribution of surface current on split resonant ring pattern and metal slab in frequency of (a) 0.5504, (b) 0.7496, (c) 1.112 THz; (d) illustration of diagram.

4 谐振环偏振转换结构的偏振转换效率对入射角和偏振角的依赖性

4.1 谐振环偏振转换结构的偏振转换率对入射角度的依赖性

在太赫兹波段, 对于反射式偏振转换器件而言, 对入射角度的依赖性越小, 在实际应用以及测量中就越实用, 所以偏振转换器件的转换效率对入射角度的依赖性是一个重要的性能指标. 我们对谐振环结构的偏振转换效率对入射角度的依赖性进行了仿真分析, 结果如图 6 所示.

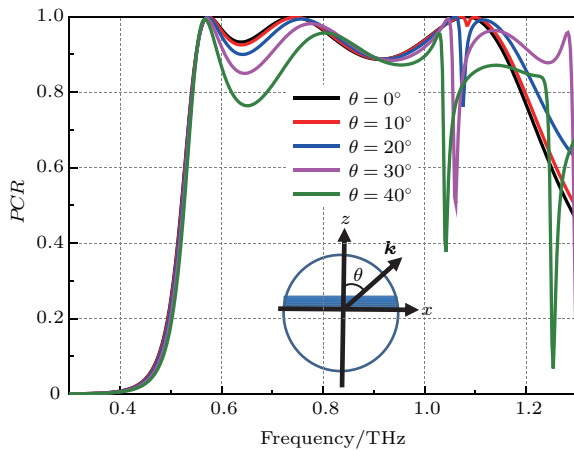


图 6 谐振环结构偏振转换率与入射角度的关系和 θ 角定义

Fig. 6. Relationship between PCR with incident angle.

从图 6 可以看出, 当太赫兹波入射角在 0° — 30° 范围内时, 谐振环偏振转换结构在 0.54 — 1.02 THz 范围均可实现将偏振方向沿着 y 轴的太赫兹波经结构反射后, 偏振方向旋转 90° . 同时, 随着偏振角度的变化, 在所研究的频率范围内出现了一个偏振转换率的凹点, 该点的偏振转换率对入射角度很敏感, 在实际应用中, 有望用于鉴别太赫兹波的入射角度和方向性. 为了解释该偏振转换率凹点出现的原因, 我们对偏振方向沿着 u, v 轴的太赫兹波在 30° 入射角的情况下同极化反射率和相位进行了仿真, 结果如图 7 所示, 红色实线代表偏振方向沿着 u 轴、入射角为 30° 的太赫兹波经谐振环偏振转换结构反射后的同偏振反射率, 黑色虚线代表偏振方向沿着 v 轴、入射角为 30° 的太

赫兹波经谐振环偏振转换结构反射后的同偏振反射率.

从图 7 可以看出, 当入射角为 30° 时, 对于沿着 u 极化的入射电场, 在 1.05 THz 处同偏振反射率很低, 接近于 0, 但是对于沿着 v 极化的入射电场, 同偏振反射率很高, 接近于 1, 所以此时对于沿着 y 方向偏振的太赫兹波入射的情况下, 该频率点的反射太赫兹波可以近似表示为

$$\mathbf{E}_r = r_{vv} E_i e^{j(-kz + \phi_{vv})} \hat{v}, \quad (7)$$

其中, ϕ_{vv} 表示偏振方向沿着 v 轴的同极化反射相位. 所以沿着 y 方向偏振的太赫兹波入射情况下, 当 $\theta = 30^\circ$ 时, 偏振转换率近似为 50%.

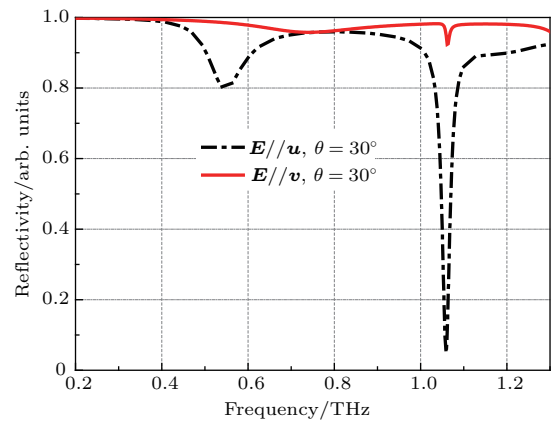


图 7 入射角为 30° 时, 沿着 u, v 轴极化的太赫兹波的同极化反射率

Fig. 7. The co-polarization reflectivity of terahertz wave along u, v axis when the incident angle is 30° .

4.2 谐振环偏振转化结构的偏振转换率对偏振角度的依赖性

我们对谐振环结构的偏振转换效率对入射太赫兹波的偏振角的依赖性进行了仿真计算, 入射太赫兹波的偏振 φ 的定义和和谐振环偏振转换结构的偏振转换率随着入射太赫兹波偏振角度的变化如图 8 所示. 粉色线代表入射太赫兹波的偏振角度为 0° 时, 谐振环结构的偏振转换效率, 绿色线和蓝色线分别代表入射太赫兹波的偏振角度为 10° 和 -10° 时谐振环结构的偏振转换率. 从图 8 可以看出, 谐振环结构的偏振转换效率对入射波的偏振依赖是比较敏感的, 当 φ 在 -10° — 10° 之间时, 该结构可以在较宽的频率范围内实现偏振转换率大于 80% 的转换效果.

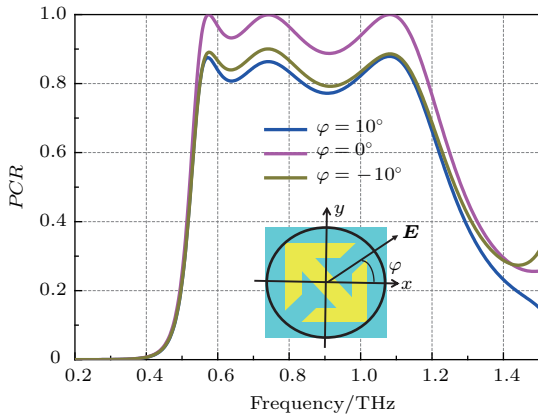


图8 谐振环结构的偏振转换率与入射太赫兹波偏振角度的关系

Fig. 8. Relationship between polarization conversion rate of polarization converter based on split resonant ring and polarization angle of incident terahertz wave.

5 实验

为了验证所设计的结构的实用性,我们对样品进行了制备和测量,采用光刻、湿法刻蚀的方法进行了样品的制备,所制备的样品在显微镜下观察结果如图9所示。

因为实验时很难测量垂直入射情况下谐振环偏振转换结构的同极化和交叉极化反射率,考虑到测量的方便性和准确性,实验时太赫兹波的入射角是 20° 。实验测量所使用的太赫兹时域光谱系统如图10所示。光电导天线产生太赫兹波,并通过聚乙烯透镜进行聚焦,在聚乙烯透镜后安装起偏器得到 y 轴方向的线偏振光,该束线偏振光打到平整的铝板上,在铝板表面全部反射,通过偏振方向为 y 方向的偏振片和聚乙烯透镜,到达检测信号的光电导天线,可以测得参考反射信号。然后,将铝板换成所设计的偏振转换器件,保持其他偏振片和光电导

天线与测量参考信号时的状态一致,这时就可以测得该器件的同极化反射信号。旋转探测信号的光电导天线前的偏振片,使其偏振方向为 x 轴方向,同时旋转该光电导天线,使其探测到的信号为偏振方向沿 x 轴的太赫兹波,这时就可以得到该器件的交叉极化反射信号。然后根据公式 $r = P_{\text{sam}}/P_{\text{ref}}$ 计算即可得该器件的同偏振和交叉偏振反射率。

我们将测量所得的太赫兹波经谐振环偏振转换器件反射的同偏振和交叉偏振反射率的结果和仿真结果进行了对比,如图11所示,黑色虚线代表实验测量的谐振环偏振转换结构的同偏振反射率,红色虚线代表实验测量的谐振环偏振转换结构的交叉偏振反射率,蓝色实线代表仿真的同极化反射率,紫色实线代表仿真的交叉极化反射率。

从实验结果中可以看出,在0.568—1.06 THz范围内太赫兹波经过偏振转换器件反射后,交叉偏振反射率在60%以上,并且在0.568—1.06 THz范围内太赫兹波经谐振环偏振转换器件反射后,同极化反射出现了三个谐振点。另外,在1.076 THz处,

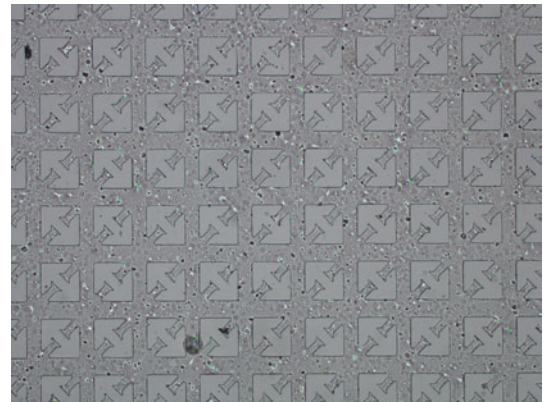


图9 显微镜下制备的样品的图像

Fig. 9. An image of a sample prepared under a microscope.

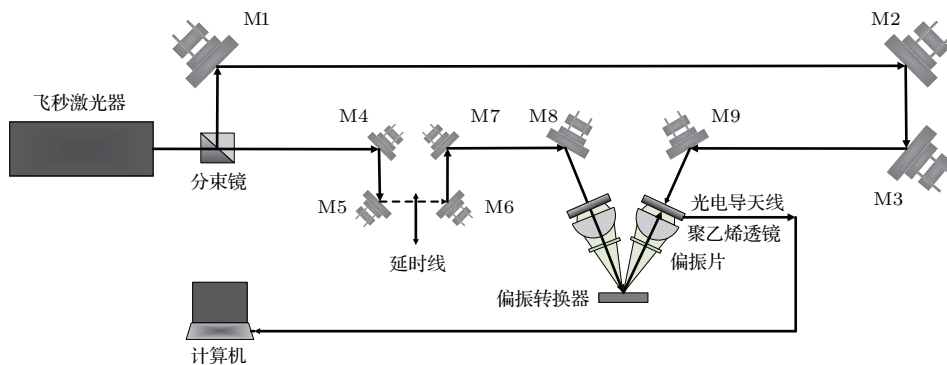


图10 测量系统示意图

Fig. 10. The schematic of measurement system.

仿真结果有一个很窄的谐振峰,但是实验测量结果没有,这种偏差是实验测量系统分辨率不够高造成的,同时我们将实验测量数据进行处理得到了谐振环偏振转换结构的偏振转换率,并与仿真数据处理的结果进行了对比,如图12所示,红色实线代表仿真数据处理所得的谐振环偏振转换结构的偏振转换率,黑色虚线代表实验测量数据处理所得的结构的偏振转换率。

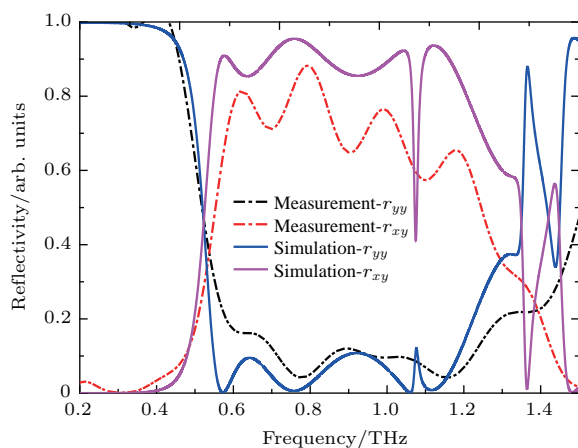


图11 (网刊彩色)同极化和交叉极化反射率仿真和实验数据的对比

Fig. 11. (color online) The comparison of reflectivity between simulation and measurement.

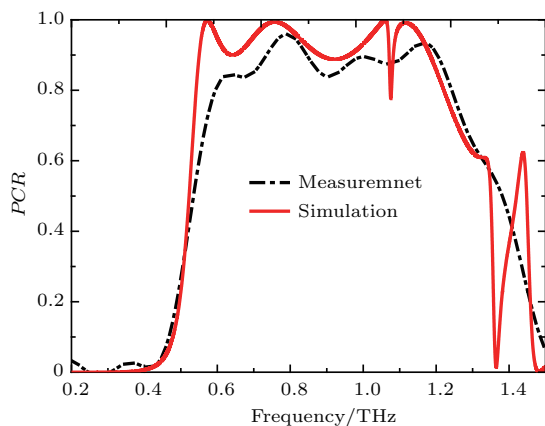


图12 (网刊彩色)谐振环偏振转换结构仿真和实验测量的偏振转换效率的对比

Fig. 12. (color online) The comparison of polarization conversion rate between experiment and simulation of polarization converter based on split resonant ring.

从图12可以看出,仿真和实验具有很好的一致性,实验测量的谐振环偏振转换结构在入射角为 20° 时能在0.59—1.25 THz范围内实现偏振转换效率在80%以上。但是实验测量的太赫兹波经谐振环偏振转换结构反射后的交叉极化反射率比仿真值要低,我们认为造成这种现象的原因如下: 1)实际

制备的样品边缘部分比较粗糙,不像仿真时那么理想; 2)实际制备的样品大小为 $280\text{ mm} \times 280\text{ mm}$,但是仿真时样品是无限大; 3)实际样品中介质有一定的损耗; 4)测量时照射到样品上的光不是完全的线偏振光; 5)样品制备过程中不能保证完全平整,有一部分反射光没有被探测器探测到。

6 结 论

本文设计并制备了一种谐振环偏振转换器件,通过仿真和实验两个方面的研究,说明该器件可以在太赫兹波段实现宽带的高效率的偏振转换。同时,引入斯托克斯参量对反射光的偏振状态进行仿真分析,利用表面电流分布所对应的图像,说明了引起高偏振转换效率的物理机理。本文的结果为太赫兹波段宽带高效的偏振转换器件研制和表征提供了参考。

参考文献

- [1] Liu K, Brown M G, Saykally R J 1997 *J. Phys. Chem. A* **101** 8995
- [2] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 7146
- [3] Vieweg N, Fischer B M, Reuter M, Kula P, Dabrowski R, Celik M A, Frenking G, Koch M, Jepsen P U 2012 *Opt. Express* **20** 28249
- [4] Janek M, Zich D, Naftaly M 2014 *Mater. Chem. Phys.* **145** 278
- [5] Qin J Y, Xie L Y, Ying Y B 2016 *Food Chem.* **211** 300
- [6] Xu W D, Xie L Y, Zhu J F, Wang W, Ye Z Z, Ma Y G, Tsai C Y, Chen S M, Ying Y B 2017 *Food Chem.* **218** 330
- [7] Hu B B, Nuss M C 1995 *Opt. Lett.* **20** 1716
- [8] Mittleman D, Gupta M, Neelamani R, Baraniuk R, Rudd J, Koch M 1999 *Appl. Phys. B* **68** 1085
- [9] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [10] Hara J F O, Singh R, Brener I, Smirnova E, Han J, Taylor A J, Zhang W L 2008 *Opt. Express* **16** 1786
- [11] Zhang Z W, Zhao Y M, Li C Y, Zhang C L 2015 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **58** 124202
- [12] Sibik J, Axel Zeitler J 2016 *Adv. Drug Deliv. Rev.* **100** 147
- [13] Huang Z, Park H, Parrott E P J, Chan H P, Pickwell-MacPherson E 2013 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **25** 81
- [14] Hofmann T, Schade U, Herzinger C, Esquinazi P, Schubert M 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 063902

- [15] Brucherseifer M, Nagel M, Bolivar P H, Kurz H, Bosserhoff A, Büttner R 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 4049
- [16] Bolivar P, Brucherseifer M, Nagel M, Kurz H, Bosserhoff A, Büttner R 2002 *Phys. Med. Biol.* **47** 3815
- [17] Wang X, Cui Y, Sun W, Ye J, Zhang Y 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 2387
- [18] Chen H, Bian H, Li J, Guo X, Wen X, Zheng J 2013 *J. Phys. Chem. B* **117** 15614
- [19] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C 2004 *Science* **305** 788
- [20] Chen H T, Hara J F O, Azad A K, Taylor A J, Averitt R D, Shrekenhamer D B, Padilla W J 2008 *Nat. Photon.* **2** 295
- [21] Chen H T, Hara J F O, Taylor A J, Averitt R D, Highstrete C, Lee M, Padilla W J 2007 *Opt. Express* **15** 1084
- [22] Dong J W, Zheng H H, Lai Y, Wang H Z, Chan C 2011 *Phys. Rev. B* **83** 115124
- [23] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2007 *Opt. Lett.* **32** 53
- [24] Singh R, Plum E, Menzel C, Rockstuhl C, Azad A, Cheville R, Lederer F, Zhang W, Zheludev N 2009 *Phys. Rev. B* **80** 153104
- [25] Strikwerda A C, Fan K, Tao H, Pilon D V, Zhang X, Averitt R D 2009 *Opt. Express* **17** 136
- [26] Ma X, Huang C, Pu M, Hu C, Feng Q, Luo X 2012 *Opt. Express* **20** 16050
- [27] Kanda N, Konishi K, Kuwata-Gonokami M 2007 *Opt. Express* **15** 11117
- [28] Huang C, Ma X, Pu M, Yi G, Wang Y, Luo X 2013 *Opt. Commun.* **291** 345
- [29] 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
- [30] Tang J G, Xiao Z Y, Xu K K, Ma X L, Liu D J, Wang Z H 2016 *Opt. Quant Electron* **48** 111
- [31] Yang L, Fan F, Chen M, Zhang X Z, Chang S J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 080702 (in Chinese) [杨磊, 范飞, 陈猛, 张选洲, 常胜江 2016 物理学报 **65** 080702]
- [32] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Zheng L, Pang Y Q, Xu Z, Zhang A X 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 044501

A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region*

Fu Ya-Nan¹⁾²⁾³⁾ Zhang Xin-Qun¹⁾²⁾³⁾ Zhao Guo-Zhong¹⁾²⁾³⁾†
Li Yong-Hua¹⁾²⁾³⁾ Yu Jia-Yi¹⁾²⁾³⁾

1) (Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

2) (Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Beijing 100048, China)

3) (Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China)

(Received 12 April 2017; revised manuscript received 1 June 2017)

Abstract

The terahertz polarization converter has potential applications in the field of terahertz spectroscopy and imaging. A broadband and high conversion rate of terahertz linear polarization converter based on the metasurface of resonant ring is proposed. The designed structure consists of three layers, i.e., the top layer, which is a metasurface of resonant ring; the bottom layer, which is a metal film of aluminum; a dielectric layer of polyethylene terephthalate, which is sandwiched in between. In order to obtain the best performance, the simulation and optimization are performed by using CST microwave studio. At the same time, the preparation conditions are also taken into account. The optimized geometric parameters of device are obtained. The samples are prepared by using the photolithography and wet etching. The performance of the designed polarization converter is demonstrated experimentally by using the terahertz time domain spectroscopy. The experimental results show that the proposed device can rotate 90° the polarization state of incident terahertz wave of linear polarization in a frequency range from 0.59 THz to 1.24 THz. The polarization conversion rate is more than 80%. The experimental result is in good agreement with the simulated one. By calculating the polarization angle and elliptical angle of the reflected terahertz wave, it is proved that this device can achieve a high-efficiency linear polarization conversion in a wide frequency range. The distributions of surface currents and electric fields are simulated at the frequency with the high polarization conversion rate. The mechanism of high polarization conversion rate is analyzed based on the distribution of surface currents. The performances of broadband and high conversion rate of the designed structure are derived from the third-order electromagnetic resonance. At the same time, the dependence of the polarization conversion rate on incident angle and polarization angle is stimulated and analyzed. The results show that this device has a good polarization conversion performance in an incidence angle range of $0^\circ-30^\circ$ and a polarization angle range of $-10^\circ-10^\circ$.

Keywords: resonant ring, broadband, terahertz, polarization conversion

PACS: 07.05.Tp, 07.60.-j, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.66.180701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575130, 61575131, 50971094) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. KZ201310028032).

† Corresponding author. E-mail: guozhong-zhao@126.com