

基底对亚波长金属双环结构太赫兹透射性质的影响*

刘建丰 周庆莉 施宇蕾[†] 李磊 赵冬梅 张存林

(太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 中关村开放实验室, 首都师范大学物理系, 北京 100048)

(2011年3月25日收到; 2011年5月13日收到修改稿)

太赫兹波通过人工金属亚波长结构开口共振环(SRRs)可以产生共振吸收, 目前普遍采用 LC 振荡电路和线性振子模型来解释. 利用太赫兹时域光谱系统测得并无开口的亚波长金属双环和反双环结构阵列透射的太赫兹波, 结果仍然观察到在太赫兹透射谱中存在吸收峰. 分析得出此吸收峰的出现可以用线性振子模型解释. 此外, 研究发现若将此结构制作到石英基底上, 当以样品表面法线方向为轴旋转样品时其太赫兹透射时域波形和频谱均会随旋转角度出现明显的周期性变化, 而以硅为基底并不出现此现象. 本文将其原因归结为石英基底的双折射效应对亚波长金属双环结构太赫兹透射性质的影响. 本文主要目的是分析造成这种影响的物理过程.

关键词: 双环, 太赫兹, 特异材料, 基底

PACS: 81.05.Xj, 42.81.Gs, 42.60.Da, 42.25.Bs

1 引言

太赫兹波是指波长在 $30\ \mu\text{m}$ — $3\ \text{mm}$ 波段的电磁波, 此波段介于红外和微波之间. 由于传统的手段很难制作较好的太赫兹辐射源和探测器, 因此这个波段的电磁波曾经很少被研究. 但是过去的 20 年太赫兹科学技术得到了迅猛的发展, 越来越多的人开始致力于太赫兹科学技术的研究. 太赫兹时域光谱技术^[1–3]的出现给人们研究太赫兹的特性带来了很大的方便. 另外, 上世纪末 Pendry 等人提出了一种人工亚波长结构^[4], 这种结构可以实现负介电常数和负磁导率等一些反常的物理现象^[5]. 因此这种人工亚波长材料也被称为特异材料. 由于特异材料表现出的光学特性是自然界材料所不具备的, 因此特异材料也开始成为许多科研人员关注的焦点, 各式各样的能够产生许多特殊光学现象的金属亚波长结构被设计出来. 但是, 对太赫兹波段金属亚波长结构的光学性质的认识还不是很透彻, 需要从实验和理论上给予更深入的研究. 目前研究得较多的一种典型的亚波长金属结构是开口

共振环(split ring resonator, SRRs)^[2,6–11]和其衍生结构(例如 SRRs 的一些对称组合结构). SRRs 的透射谱中出现特征吸收峰, 关于吸收峰的出现现在大多采用两种模型进行解释: 其一是 LC 振荡电路模型, SRRs 形成 LC 回路, 太赫兹入射引起开口金属环回路中的电子振荡形成低频吸收峰, 其振荡频率为

$$\omega_0 \propto \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

L 为体系的电感, C 为体系的电容; 其二是线性振子模型^[11], 入射的太赫兹使金属环中电子形成线性振荡产生高频吸收峰.

由于各向异性光学材料一般会改变太赫兹的偏振态, 从而影响到特异材料本身的太赫兹透射性质, 为了避免给特异材料光学性质的研究带来干扰, 目前大多关于特异性材料的研究都是将金属亚波长结构制作到各向同性光学材料基底上. 本文目的在于研究各向异性基底(例如石英)如何影响透射的太赫兹波. 通过实验发现石英基底的太赫兹透射性很好, 如果能够解决(或利用)石英双折射的影响, 将其作为特异材料的基底也是可以的. 根据 SRRs

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB310408, 2006CB302901), 国家自然科学基金(批准号: 10804077, 11011120242, 10904098), 北京市教委项目(批准号: KM200910028006, KM201110028004), 北京市科技新星, 北京市属市管高校人才强教计划资助项目, 国家信息功能材料重点实验室, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所资助的课题.

[†] E-mail: yulei-shi@hotmail.com

的设计思路, 我们提出了以硅或石英为基底的亚波长金属双环和反双环结构^[12], 并利用太赫兹时域光谱系统研究了此类结构的太赫兹透射性质. 本文在详细讨论了各向异性基底对特异材料太赫兹透射性质影响的基础上, 提出了如何避免由于基底产生的这种影响, 为在各向异性基底上设计特异材料提供借鉴意义. 笔者认为: 用各向异性光学材料作为特异材料基底将可以设计出更多功能的太赫兹功能器件.

2 样品设计

样品为亚波长金属双环和反双环阵列结

构^[13], 图 1(a) 所示为双环样品的结构单元, 由金制成, 同心双圆环, 小环内径 $a = 21 \mu\text{m}$, 大环外径 $b = 51 \mu\text{m}$, 金线宽度 $w = 3 \mu\text{m}$, 金厚度 $d = 2 \mu\text{m}$; 基底为石英片, 其厚度 $D = 1500 \mu\text{m}$, 其光轴平行于石英片表面. 金属结构单元周期排列于石英基底 (如图 1(b)), 水平和竖直方向周期均为 $60 \mu\text{m}$.

图 1(c) 所示为反双环样品的结构单元, 镂空部分为两个同心圆环, 其余部分由金制成, 具体尺寸为 $a' = 16 \mu\text{m}$, $b' = 56 \mu\text{m}$, $w' = 8 \mu\text{m}$, $d' = 2 \mu\text{m}$; 基底为石英片, 其厚度 $D' = 1500 \mu\text{m}$, 其光轴平行于石英片表面. 金属结构单元周期排列于石英基底 (如图 1(d)), 水平和竖直方向周期均为 $60 \mu\text{m}$.

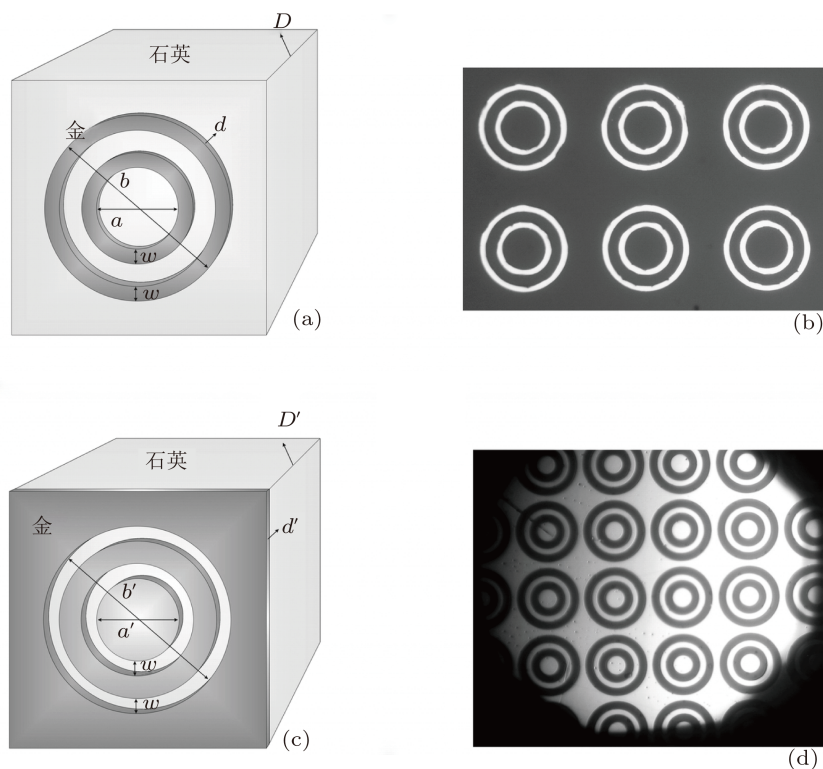


图 1 实验样品 (a) 以石英为基底的双环结构; (b) 显微镜下拍摄的双环样品图像; (c) 以石英为基底的反双环结构; (d) 显微镜下拍摄的反双环样品图像

3 实验及理论分析

3.1 金属双环结构太赫兹吸收峰的物理机理

我们之前的工作指出^[12] 无开口的金属双环结构的太赫兹透射谱中出现吸收峰. 关于此吸收峰的产生机理做以下讨论. 在 SRRs 结构中太赫兹电场垂直于金属环开口方向时可以使开口处发生极化, 太赫兹电场的振荡可以使开口处极化电荷的密度

发生变化进而在开口金属环中产生环形电流并且形成太赫兹透射谱的低频吸收峰, 此机理类似 LC 振荡电路, 改变 SRRs 的结构可以改变其太赫兹透射谱中吸收峰的位置^[10]. 与 SRRs 结构不同金属双环结构并无开口 (如图 1(a), (b)), 因此金属双环结构在太赫兹范围的吸收峰并不能利用 LC 振荡电路模型来解释. 我们利用时域有限差分方法在吸收峰频率处对金属双环的面电流进行了仿真, 其结果如图 2 所示. 虽然金属结构为环形但金属中产生

的电流并不是环形, 上下半环的电流方向是一致的, 因此对于金属双环的共振吸收可以用线性振子模型解释, 其共振频率与样品的尺寸有关^[11].

3.2 对石英基底双环样品太赫兹透射性质的研究

实验采用钛宝石正反馈放大器产生超短激光脉冲, 其脉宽为 100 fs, 中心波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz. 利用太赫兹时域光谱系统^[14,15] (如图 3), 研究了以石英为基底的金属双环结构太赫兹脉冲的透射性质. 图 3 所示, 实验中太赫兹脉冲正入射到样品表面, 发现此样品在太赫兹范围内不仅出现吸收峰^[3], 而且当以其表面法线为轴旋转样品时被探测晶体碲化锌 (ZnTe) 探测到的透射的太赫兹波时域波形和频谱均会随旋转角度出现明显的周期性变化 (如图 4).

图 4(a) 为 ZnTe 探测到的太赫兹时域波形, 可以看出旋转样品过程中时域波形的延迟随旋转角度逐渐发生变化. 从 0° 旋转至 90° 过程中, 太赫兹时域波形的时间延迟提前了约 0.25 ps. 图 4(b) 横坐标为频率, 纵坐标为经样品后探测到的太赫兹电场与无样品时探测到太赫兹电场的振幅之比, 本文称之为探测振幅比, 从中能够发现样品被旋转前对应的谱线 (0° 对应的图线) 在 1.25 THz 处出现吸收峰, 当以样品表面法线方向为轴旋转 10° 后虽然吸收峰峰位没有变化, 但谱线整体略有下降. 旋转 20° 时谱线右侧开始大幅度下降. 继续旋转样品谱线继

续下降, 直到旋转 40° 时谱线降至最低位, 此时已经看不到明显的吸收峰, 谱线在 0.8—1.25 THz 间急剧下降, 之后谱线没有明显的上升趋势而是趋于平坦. 图 4(c) 为 50° 至 90° 旋转过程中探测到的振幅谱线, 其又从低位恢复到了高位, 但峰位仍然没有变化. 为了明显看出探测振幅比随旋转角度的变化, 本文在图 4(b), (c) 两分图中 2.0 THz 处提取了各谱线对应的探测振幅比并以旋转角度为横坐标探测振幅比为纵坐标在图 4(d) 中标出各点然后按正弦函数进行拟合. 结果发现图线与各数据点与拟合得较好, 说明 2.0 THz 探测振幅比随旋转角度按正弦规律周期性变化.

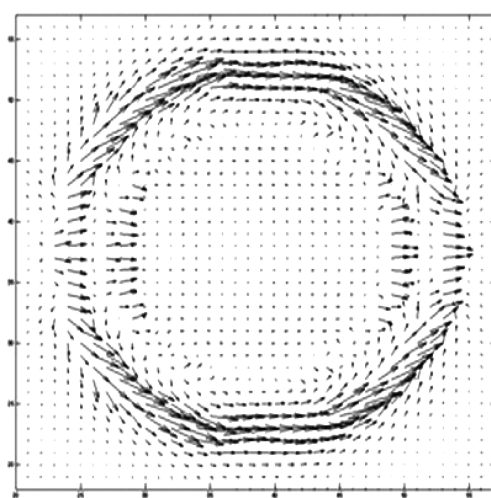


图 2 共振频率处金属双环中电流分布

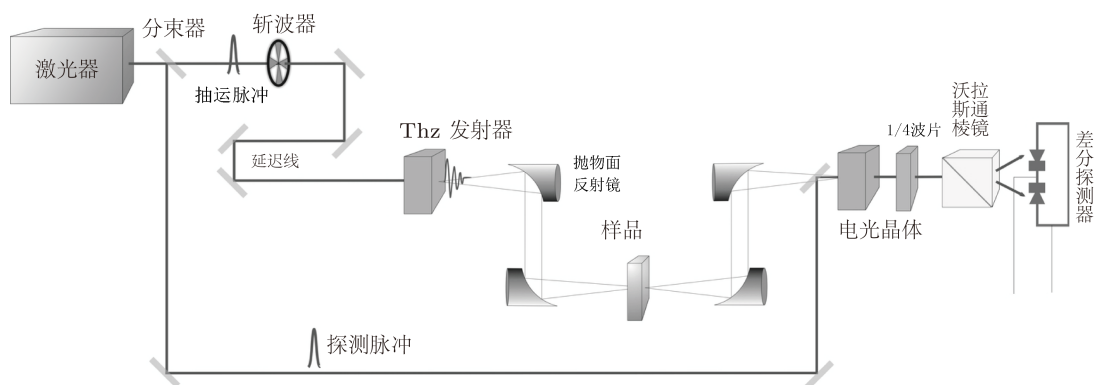


图 3 太赫兹时域光谱系统

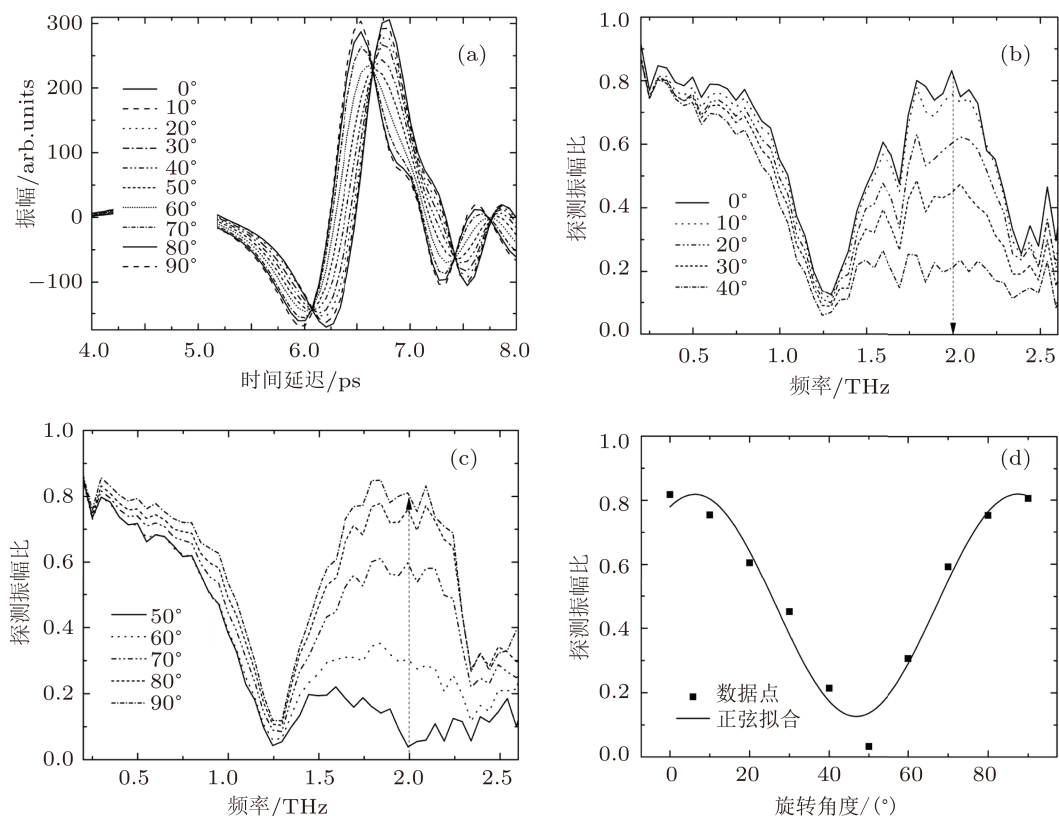


图4 旋转过程中石英基底双环样品太赫兹透射性质的变化 (a) 样品从 0° 每隔 10° 旋转至 90° 探测到的太赫兹时域波形; (b) 样品从 0° 每隔 10° 旋转至 40° 探测振幅比谱图; (c) 样品从 50° 每隔 10° 旋转至 90° 探测振幅比谱图; (d) 提取 (b), (c) 图中 2.0 THz 处各谱线数据正弦拟合出探测振幅比随旋转角度的变化

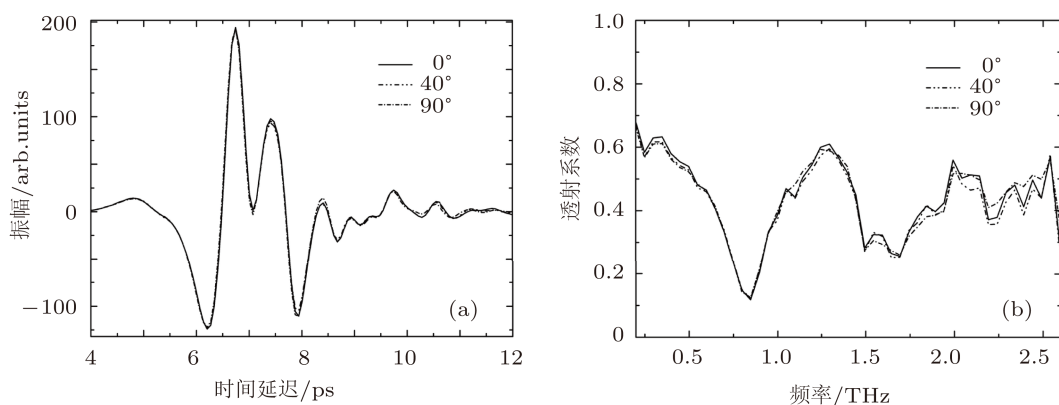


图5 硅基底金属双环时域波形和透射谱 (a) 不同角度对应的时域波形; (b) 不同角度对应的透射谱

引起以上现象的根源可能有两个: 其一, 可能源于金属结构; 其二, 可能源于石英基底. 若源于基底, 又可能有两种情况: 其一, 旋转时基底直接改变太赫兹透射系数; 其二, 太赫兹波经样品后偏振态变化导致透过的太赫兹不能被完全探测到. 下文通过实验和理论研究详细分析引起上述现象的原因. 由于金属的双环结构在样品表面是各向同性的, 其旋转时不会影响透射的太赫兹脉冲^[7], 因此旋转样品引起的变化只可能源于石英基底. 为了验证上述

判断, 我们又选择了以各项同性的硅为基底同尺寸的金属双环样品进行实验并观察其太赫兹透射性质随旋转角度的变化情况.

3.3 对以硅基底双环样品太赫兹透射性质的研究

图5是以硅为基底的金属双环样品的太赫兹时域波形和透射谱, 可以发现旋转 0° , 40° , 90° 时样品的太赫兹的时域波形和透射谱都没明显变化. 因

此可以确定图 4 中反映的石英基底金属双环样品太赫兹透射性质虽旋转角度的周期变化现象源于石英基底. 另外, 虽然金属双环的尺寸一样, 但是对比硅基底金属双环样品的透射谱 (如图 5(b)) 和石英基底金属双环样品的探测振幅比谱图 (如图 4(b)) 发现吸收峰的位置从 1.25 THz 变到了 0.8 THz, 这是因为石英与硅基底的介电常数不同使共振频率发生了变化^[11].

以各向异性材料石英为基底的样品可以使太赫兹时域波形和探测振幅比谱线随旋转角度发生周期性变化 (如图 4), 而以各项同性材料硅为基底

的样品却没有出现此现象 (如图 5). 因此图 4 所示的现象应该源自石英的各向异性性质.

3.4 石英基底对金属结构太赫兹透射性质的影响及其物理过程的分析

为了研究石英基底对金属双环结构太赫兹脉冲透射性质的影响, 实验中又选择了与金属双环样品的基底完全一样的石英片, 其光轴也平行于自身表面, 太赫兹正入射到石英片表面, 实验得到图 6 所示探测到的太赫兹时域波形和振幅比谱图^[16].

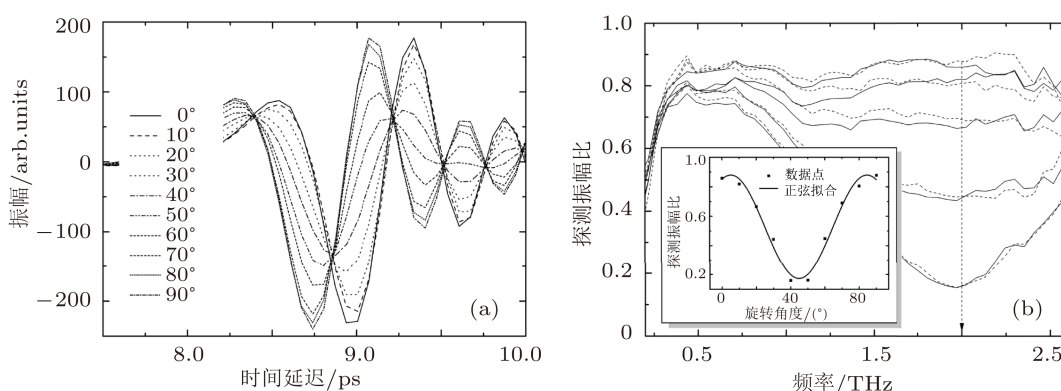


图 6 探测到的太赫兹经过石英片后时域波形和振幅比谱图 (a) 从 0° 每隔 10° 旋转至 90° 的时域波形; (b) 实线从上至下分别为石英片旋转 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 的谱线, 虚线从下至上分别为石英片旋转 $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 的谱线, 插图为 2.0 THz 时探测振幅比随旋转角度的变化

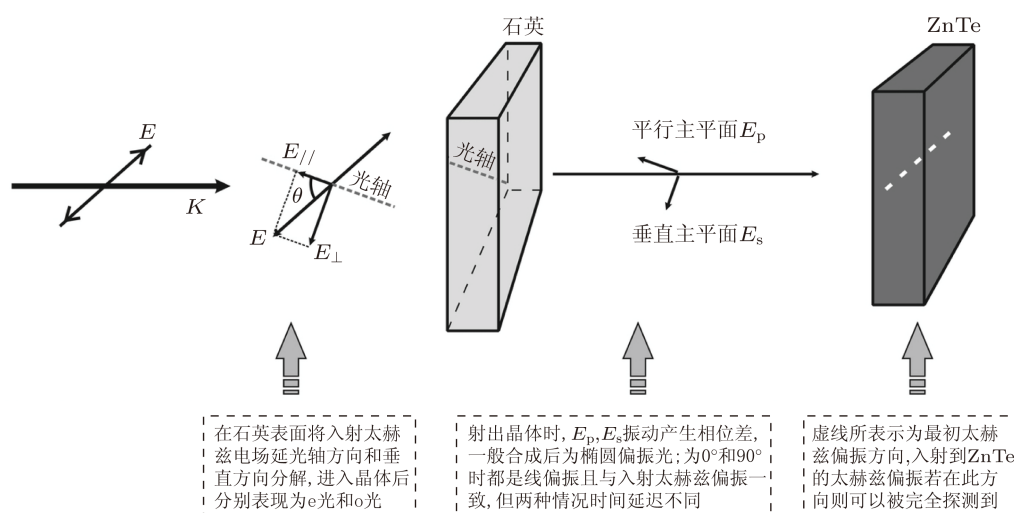


图 7 太赫兹经石英片的偏振情况

以石英片表面法线为轴旋转石英片. 从石英片透射时域波形中 (如图 6(a)) 我们可以发现与图 4(a) 的时域波形有类似之处, 从 0° 旋转到 90° 过程中都出现了时间的延迟且延迟量也近似相等. 另外,

从图 6(b) 中可以看出探测到的石英太赫兹谱中并未出现吸收峰, 而从 0° (对应图 6(b) 中最上方实线) 旋转至 40° (对应图 6(b) 中最下方实线) 过程中谱线逐渐下降, 而且高频部分下降得更快. 继续

从 50° (对应图 6(b) 中最下方虚线) 旋转样品, 在此过程中谱线开始恢复, 至 90° (对应图 6(b) 中最上方虚线) 时谱线基本恢复到了 0° 时的情况. 与图 4 的处理方法一样, 在图 6(b) 也选择 2.0 THz 处提取不同旋转角度下对应的太赫兹的探测振幅比, 将提取的数据进行正弦函数拟合 (如图 6(b) 插图), 结果发现太赫兹透射系数随旋转角度成正弦周期性变化, 其周期为 90° . 石英片在 2.0 THz 处探测振幅比随旋转角度的变化关系 (如图 6(b) 插图) 与石英基底双环样品在 2.0 THz 处探测振幅比随旋转角度的变化关系 (如图 4(d)) 很类似. 因此可以证明过石英基底双环样品探测到的太赫兹波随旋转角度的变化是由石英基底的性质导致的.

下面具体解释产生上述现象的物理机理. 各项异性光学材料石英的双折射性质使透射的太赫兹偏振改变从而影响到 ZnTe 对太赫兹的探测^[16]. 如图 7 所示, k 为太赫兹波矢、 E 为太赫兹电场、石英光轴已在石英表面标出, 入射的太赫兹脉冲电场的振动面与主截面的夹角为 θ (此处就是入射的太赫兹偏振方向与光轴方向夹角, 图 7 中已标出). 石英晶体绕其表面法线旋转时 θ 改变. 当光轴方向与入射的太赫兹偏振方向平行时, 即 θ 为 0° , 太赫兹波进入石英后只有 e 光、o 光为零, 射出石英的太赫兹波与入射的太赫兹偏振方向一致, 可以完全被探测到 (因为放入石英样品前已经调整好探测晶体 ZnTe 的方位, 使之能够最大效率地探测到入射的太赫兹波); 光轴方向与入射的太赫兹偏振方向垂直时, 即 θ 为 90° , 进入石英后的太赫兹电场振动方向虽然不变, 但由于石英片的旋转主平面已经被旋转, 此时太赫兹电场振动方向垂直于主平面为 o 光, 而 e 光为零, 射出石英后 s 偏振的太赫兹波与入射的太赫兹偏振方向仍一致, 也可以被完全探测到. 上面两种情况太赫兹脉冲在进入探测晶体 ZnTe 时的振动方向都与入射的太赫兹偏振方向一致, 都可以被完全探测到, 但是这两种情况太赫兹波在石英晶体中表现出来的性质是不一样的. 第一种情况 (平行时) 表现为 e 光, 其折射率大, 传播速度慢; 第二种情况 (垂直时) 表现为 o 光, 其折射率小, 传播速度快. 因此, 这两种情况在探测时得到时域波形的时间延迟不一样: 第一种情况 (平行时) 探测到的为 p 偏振的太赫兹波, 时间延迟要靠后, 对应图 6(a) 中 0° 时域波形图线; 第二种情况 (垂直时) 探测到的为 s 偏振的太赫兹波, 时间延迟要靠前, 对应图 6(a) 中 90° 时域波形图线. 另外, 当入射的太赫兹偏振方向与光轴方向既不垂直也不平行时, 在

石英中 o 光、e 光同时存在且他们在石英中的折射率不同导致射出时产生了位相差, 进而使得出射的太赫兹波一般为椭圆偏振光. 此后入射到探测晶体上不会被完全探测到, 因此探测到的时域波形的幅度要小于前两种情况 (如图 6(a) 中 20° — 80° 对应的图线). 在振幅频谱图中 (如图 6(b)) 我们能够很清楚的看到透射系数随旋转角度变化, 其原因也正是因为 0° 和 90° 时透射的太赫兹波被完全探测到, 而其他角度一般为椭圆偏振光不能被完全探测到. 严格地讲, 图 6(b) 并不能说明太赫兹脉冲经过石英的透射系数随旋转角度变化情况 (因为 20° — 80° 透射的太赫兹脉冲并未完全探测到), 其描述的是探测到的太赫兹与入射到石英上的太赫兹的振幅比随旋转角度发生变化.

由于 0° 和 90° 时探测到的时域波形分别对应于 p 偏振和 s 偏振, 因此我们可以提取石英中 e 光和 o 光的折射率. 根据

$$n(f) = \Delta\phi(f) \frac{c}{2\pi f D} + 1 \quad (2)$$

得到了 e 光 (对应 0° 情况) 和 o 光 (对应 90° 情况) 的折射率谱图 (如图 8). (2) 式中 n 为折射率, $\Delta\phi$ 为太赫兹脉冲经过石英片与经过空气的位相差, f 为太赫兹波频率, c 为真空中光速 3×10^8 m/s, D 为石英片的厚度 1500 μm .

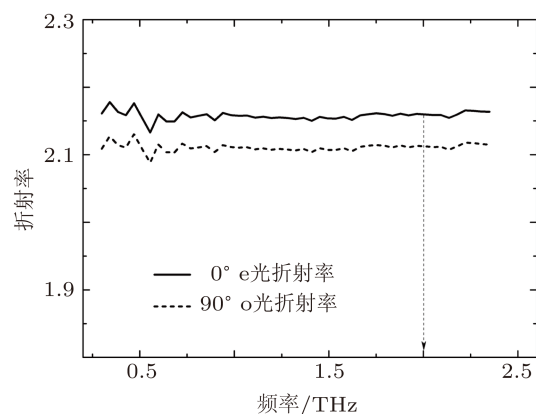


图 8 石英片处于 0° 和 90° 度时其折射率谱图

图 8 中实线为 0° 时对应 e 光折射率谱线, 虚线为 90° 时对应 o 光折射率谱线. 可以看出在 2.0 THz 处 e 光和 o 光折射率分别为 2.16 和 2.11 相差 0.05, 而在可见光范围内石英晶体的 o 光、e 光主折射率差值仅为 0.009 左右, 因此可以判断石英晶体在太赫兹波段的双折射现象比可见光波段明显得多.

总之, 探测到的经过石英基底双环样品的太赫兹脉冲性质随旋转角度呈周期性变化 (如图 4), 其

原因是石英晶体的双折射性质改变了太赫兹脉冲的偏振态,进而影响到了 ZnTe 对太赫兹脉冲的探测. 这种随旋转角度在频域谱和时域波形中出现的周期性变化与金属双环结构无关,而吸收峰的峰位与金属双环结构是有关的. 另外,从图 6(b) 中可以看到当样品处于 0° 和 90° 时探测到的太赫兹谱线处于最高位,透射的太赫兹脉冲可完全被探测到(此时透射系数达到约 85%);此时在 0.5—2.6 THz 范围内谱线很平,说明此频段变化很小. 而在 20° — 80° 几种情况中探测到的太赫兹谱线会出现高频下降现象. 在研究亚波长金属结构太赫兹透射性质时,太赫兹谱线出现上面所说的高频下降的现象会影响到金属结构的太赫兹透射性质,若要避免这种情况的发生可以通过实验把 0° (入射的太赫兹偏振方向平行于石英光轴方向)和 90° (入射的太赫兹偏振方向垂直于石英光轴方向)这些特殊的角度找到,在这样的角度下进行实验即可. 若要以石英为基底设计在表面内不具备各向同性的金属结构时,制作过程中就要考虑到光轴方向与金属结构方位的关系.

3.5 石英基底反双环样品太赫兹的透射性质

我们之前^[12]提出:结构互补的金属双环和反

双环结构他们的透射谱也出现互补性,即若图 1(a) 和 (c) 中的结构参数 $a = a'$, $b = b'$, $w = w'$, $d = d'$, 则双环反双环样品透射谱互补. 为了更加充分地证实:石英基底的双折射性质对样品透射性质的影响,我们选择反双环结构的金属样品,基底仍为石英(如图 1(c), (d)). 结果旋转过程中时域波形和透射谱线仍然出现了类似于图 4 中的随旋转角度周期性变化的现象(如图 9(a), (b)).

从图 4(b) 和图 9(b) 可以看出,双环结构和反双环结构在太赫兹频谱图中出现了特征峰,利用这一特点我们可以将其制作成太赫兹波段的滤波器^[17,18]. 另外,如果将金属双环结构制作到石英基底上,利用 ZnTe 晶体探测时会得到图 4(b) 所示的谱图,当然严格说这不是样品的透射谱,因为这时探测到的并非所有透射的太赫兹脉冲,但若将石英基底后方放上透振方向与入射太赫兹偏振方向相同的偏振片,图 4(b) 的谱图就是太赫兹脉冲经过样品和偏振片这二者的透射谱. 从图 4(b) 中可知:当大于 1.25 THz 时,样品旋转不同的角度透射的太赫兹衰减情况有明显差别,当旋转到 40° 时,大于 1.25 THz 的太赫兹的振幅透射比变得很小而低频范围却很高,这样相当于低通滤波. 总之,利用亚波长金属结构的特征峰和石英晶体对太赫兹偏振态的改变可以制作不同性能的太赫兹滤波器.

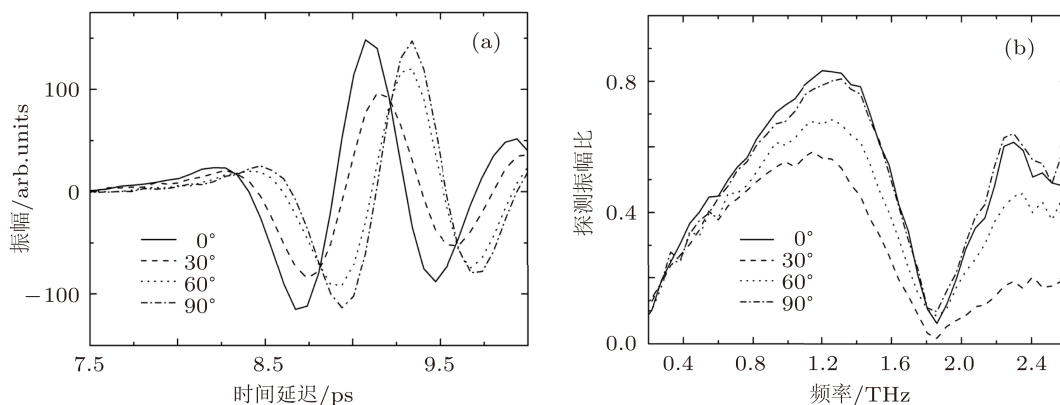


图 9 石英基底反双环样品太赫兹透射性质随旋转角度的变化 (a) 样品处于 0° , 30° , 60° , 90° 时探测到的透射太赫兹的时域波形; (b) 样品处于 0° , 30° , 60° , 90° 时探测到的透射谱

4 结论

本文通过实验研究了以硅或石英为基底金属双环和反双环样品的太赫兹脉冲透射性质. 经过研究证明:透射谱中的吸收峰源于金属样品与入射的太赫兹波形成线性振荡. 另外,相对于可见光范围,石英晶体在太赫兹频率范围内的双折射现象很

明显,而且石英晶体的双折射性质改变透射的太赫兹偏振态使得探测到的太赫兹脉冲随旋转角度出现明显的周期性变化. 而硅没有双折射性质,因此以硅为基底的样品在旋转时其太赫兹透射性质无变化. 在一些特殊的角度下(θ 为 0° 或 90°) 经过石英晶体后的太赫兹仍为线偏振且与入射的太赫兹偏振方向平行,可以被完全探测到,探测到的

太赫兹谱线很平, 而且太赫兹透射性很好, 在这些情况下石英可以用来做亚波长金属结构的基底且

不影响其太赫兹透射性质.

-
- [1] Xu J Z, Zhang X C 2007 *Terahertz Science Technology and Application* (Beijing: Beijing University Press) p69 (in Chinese) [许景周, 张希成 2007 太赫兹科学技术和应用 (北京: 北京大学出版社) 第 69 页]
 - [2] Zhang C L 2008 *Terahertz Sensing and Imaging* (Beijing: National Defence Industry Press) p69 (in Chinese) [张存林 2008 太赫兹感测与成像 (北京: 国防工业出版社) 第 64 页]
 - [3] Beard M C, Turner G M, Schmittenmaer C A 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 7146
 - [4] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor Techniq.* **47** 2075
 - [5] Gu B Y 2007 *Phys.* **36** 280 (in Chinese) [顾本源 2007 物理 **36** 280]
 - [6] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
 - [7] Li L, Zhou Q L, Shi Y L, Zhao D M, Zhang C L, Zhao K, Tian L, Zhao H, Bao R M, Zhao S Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 019503 (in Chinese) [李磊, 周庆莉, 施宇蕾, 赵冬梅, 张存林, 赵昆, 田璐, 赵卉, 宝日玛, 赵嵩卿 2011 物理学报 **60** 019503]
 - [8] Katsarakis N, Koschny T, Kafesaki M, Economou E N, Soukoulis C M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2943
 - [9] Schurig D, Mock J J, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
 - [10] Withayachumnankul W, Abbott D 2009 *IEEE Photonics Journal* **1** 99
 - [11] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Lee M, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
 - [12] Zhao M D, Shi Y L, Zhou Q L, Li L, Sun H J, Zhang C L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 093301 (in Chinese) [赵冬梅, 施宇蕾, 周庆莉, 李磊, 孙会娟, 张存林 2011 物理学报 **60** 093301]
 - [13] Zhou J 2004 *Journal of Functional Materials* **35** 125 (in Chinese) [周济 2004 功能材料 2004 年增刊 **35** 125]
 - [14] Grischkowsky D, Keiding S, Exter M, Fattinger C 1990 *J. Opt. Soc. Am. B* **7** 2006
 - [15] Wu Q, Litz M, Zhang X C 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2924
 - [16] Cha H J, Jeong Y U, Park S H, Lee B C 2006 *Journal of the Korean Phys. Soc.* **49** 354
 - [17] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
 - [18] Yang C Y, Xu X M, Ye T, Miao L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017807 (in Chinese) [杨春云, 徐旭明, 叶涛, 缪路平 2011 物理学报 **60** 017807]

The effect of substrate on terahertz transmission properties through metal subwavelength dual-ring structure*

Liu Jian-Feng Zhou Qing-Li Shi Yu-Lei[†] Li Lei Zhao Dong-Mei Zhang Cun-Lin

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

(Received 25 March 2011; revised manuscript received 13 May 2011)

Abstract

Terahertz waves through a split-ring resonator (SRR) can induce the resonant absorption, and this can be explained by using the theory of LC resonant circuit and the model of half wave resonance. However, in the dual-ring structure without the split gap, we still observe the resonant absorption in the THz frequency range. By analyzing the phenomenon, we think that it can be explained by using a the model of half wave resonance. Furthermore, it is found that if the structure is fabricated on quartz crystal substrate, we can obtain the angle-dependent terahertz waveforms using terahertz time-domain spectroscopy (TDS) when the sample is rotated in plane, as well as the frequency domain spectra. But this phenomenon does not exist in the silicon-based structure, which may be attributed to the birefringence effect of the quartz crystal substrate on the subwavelength metal dual-ring structure. The main purpose of this article is to explain the physical process of the effect.

Keywords: dual ring, terahertz, metamaterial, substrate

PACS: 81.05.Xj, 42.81.Gs, 42.60.Da, 42.25.Bs

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2007CB310408, 2006CB302901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804077, 11011120242, 10904098), the Beijing Municipal Commission of Education (Grant Nos. KM200910028006, KM201110028004), the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning under the Jurisdiction of Beijing Municipality, the State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, and the Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences.

[†] E-mail: yulei_shi@hotmail.com