

工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究

张玉萍 李彤彤 吕欢欢 黄晓燕 张会云

Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber

Zhang Yu-Ping Li Tong-Tong Lü Huan-Huan Huang Xiao-Yan Zhang Hui-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 117801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.117801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.117801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于加权实数编码遗传算法的超材料优化设计

Optimization of metamaterial based weighted real-coded genetic algorithm

物理学报.2014, 63(8): 087804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.087804>

基于集总元件和负微分元件的有源可调谐超材料传输线

Active tunable metamaterial transmission line based on lumped elements and negative differential devices

物理学报.2014, 63(2): 027802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.027802>

基于负微分电阻碳纳米管的太赫兹波有源超材料特性参数提取

Extraction of effective constitutive parameters of active terahertz metamaterial with negative differential resistance carbon nanotubes

物理学报.2013, 62(3): 037806 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037806>

基于光子晶体马赫-曾德尔干涉仪的太赫兹开关及强度调制器

Photonic-crystal-waveguide based Mach-Zehnder interferometer for terahertz switch and modulator

物理学报.2012, 61(15): 157805 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.157805>

工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究*

张玉萍¹⁾²⁾ 李彤彤¹⁾ 吕欢欢¹⁾ 黄晓燕¹⁾ 张会云^{1)†}

1) (山东科技大学电子通信与物理学院, 青岛市太赫兹技术重点实验室, 青岛 266510)

2) (洛斯阿拉莫斯国家实验室, 洛斯阿拉莫斯 87545, 美国)

(2014年12月3日收到; 2015年1月7日收到修改稿)

利用超材料吸波体对材料参数的电磁响应, 可将其应用于传感. 本文设计了一种工字形单元结构的超材料吸波体, 基于频域算法对其在太赫兹频段的传感特性进行数值模拟, 研究了待测样品折射率、厚度及电介质隔层厚度对超材料吸波体传感器的频率灵敏度、振幅灵敏度及品质因数的影响. 研究表明: 当待测样品厚度为40 μm 时, 折射率频率灵敏度可达到153.17 GHz/RIU, 折射率振幅灵敏度可达到41.37%/RIU; 待测样品折射率一定时, 厚度频率灵敏度随其厚度的增大而线性减小; 随着待测样品厚度的增加, RFOM呈增大趋势, 但增大幅度在逐渐减小; TFOM随待测样品厚度的增加而减小.

关键词: 超材料, 吸波体, 太赫兹, 传感

PACS: 78.67.Pt, 42.81.Pa, 75.40.Mg

DOI: 10.7498/aps.64.117801

1 引言

太赫兹辐射通常指频率在0.1—10 THz范围内的电磁波. 太赫兹辐射具有非电离性, 许多复杂的分子在太赫兹频段具有自旋和振动模式, 使其在生物学、传感技术和安全监测应用中有广阔的前景^[1-4]. 然而, 光子波长和待测样品尺寸不匹配及有效光源的缺乏等问题极大限制了太赫兹技术向更加广泛的应用发展的进程^[5,6]. 由于自然界的材料对THz波缺乏响应, 研究人员尝试将超材料应用于THz器件的研究.

超材料是一种人工复合材料, 具有许多天然材料所不具备的超常物理性质, 如负折射率现象^[7]、负电磁参数^[8]、完美透镜^[9]等, 已广泛应用于化学与生物传感^[10]、超材料天线^[11]、电磁隐身^[12]及相位调制器^[13]等领域. 当入射光与超材料阵列结构相互作用时, 会激发电子的集体振荡, 导致局域电磁场的共振, 为超材料器件的传感应用提供了很

好的平台. Driscoll等^[14]提出了通过在开口环元件附近增加材料来实现磁共振频率的调谐作用, 为实现太赫兹频段的传感器件提供了可能. O'Hara等^[15]利用太赫兹时域光谱仪, 实现电响应共振频率的变化, 为发展太赫兹传感技术提供了广阔前景. Lahiri等^[16]提出了一种红外频段的非对称圆形的开口环谐振腔阵列, 双开口环谐振腔两个臂之间的不对称会产生明显的等离子体共振, 使得传感灵敏度增大. Cubukcu等^[17]报道了表面增强分子探测技术, 提出的开口环谐振腔传感器可用于单分子层的红外检测. Tao等^[18]设计了一种在超薄氮化硅基底上基于平面太赫兹超材料的开口环谐振腔, 可应用于生物传感. Withayachumnankul等提出了一种用于太赫兹频段电介质薄膜传感的平面超材料^[19]. 通过将超材料传感平台放置在亚衍射太赫兹源附近, 受激谐振腔数目会减小, 从而使得共振Q因数显著增大. 程用志等^[20]提出了两种环状微波电共振结构, 通过模拟优化得到最佳吸收效果. 鲁磊等^[21]设计并制作出极化无关双向吸收超

* 国家自然科学基金(批准号: 61001018)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2012FM011)、山东省高等学校科技计划项目(批准号: J11LG20)、青岛市创新领军人才项目(批准号: 13-CX-25)、中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(批准号: 201401)、青岛经济技术开发区重点科技计划项目(批准号: 2013-1-64)和山东科技大学科技创新基金(批准号: YC140108)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sdust_thz@126.com

材料吸波体, 并进行了仿真及实验测试, 可实现对垂直入射电磁波实现双向强吸收.

近五年来, 基于超材料的太赫兹吸波体在太赫兹与超材料领域引起了科研人员的极大兴趣等 [22-27]. Cheng [28] 数值分析了基于周期排列的正方形铜薄膜的太赫兹超材料吸波体, 通过改变结构的几何参数可以实现对吸收特性的调节作用. 如果超材料吸波体对待测材料有电磁响应, 那么可以利用这种响应对材料传感, 测量材料的折射率、厚度等参数. Weili [29,30] 课题组已经在这方面做了有益的探索.

基于以上研究背景, 本文设计了一种工字形超材料吸波体, 通过考察其对待测材料参数的响应, 验证了其作为 THz 传感应用的可行性, 并进而通过数值模拟探讨了其传感特性. 研究了待测样品折射率、厚度及电介质隔离层厚度对超材料吸波体传感器的频率灵敏度、振幅灵敏度及品质因数的影响. 该超材料吸波体传感器设计简单, 加工容易, 灵敏度较高, 具有潜在的应用价值.

2 工字形吸波体传感应用的可行性

我们设计的工字形吸波体结构单元如图 1 所示. 吸波体由四层结构组成, 由上到下依次为: 金工字形, 聚酰亚胺隔离层, 硅基底, 金基板. 材料参数为: 金的电导率为 4.561×10^7 S/m, 厚度为 200 nm; 聚酰亚胺的介电常数为 $3.1+0.217i$; 硅的介电常数为 $11.9+0.0476i$, 厚度为 $500 \mu\text{m}$. 图中结构参数分别为: 金条宽度 w 为 $15 \mu\text{m}$, a 为 $150 \mu\text{m}$, b 为 $120 \mu\text{m}$, c 为 $80 \mu\text{m}$. 利用仿真软件 CST 微波工作室的频域求解器对所设计的超材料吸波体进行全波仿真, 单元结构的 x 和 y 方向设为周期边界条件,

z 方向设为开放边界. 经优化设计, 该吸收体在常用 THz 频率 0.65 THz 处的吸收率达到 91.05%.

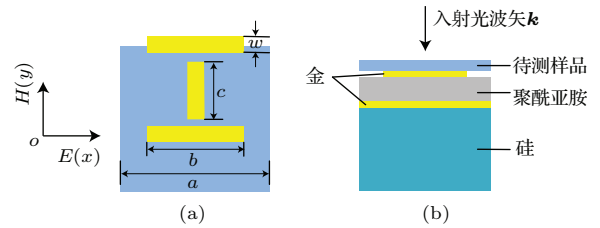


图 1 (网刊彩色) 基于工字形超材料吸波体传感器结构示意图 (a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig. 1. (color online) The schematic diagram of the structure of sensor based on I-shaped metamaterial absorber: (a) top view; (b) side view.

为研究该吸波体对材料参数的电磁响应, 我们将待测样品放置于吸波体上方, 电磁波入射方向如图 1 所示. 当待测样品参数发生变化时, 通过频域仿真可以得到不同的共振频率响应和反射振幅响应. 图 2(a) 中, 我们计算了待测样品厚度 t 一定 (为 $40 \mu\text{m}$)、折射率发生变化时, 超材料吸波体的反射谱振幅与频率的关系. 由图可以看出, 随着待测样品折射率增大, 共振频率发生红移 (由 0.651 THz 移到 0.483 THz), 反射振幅增大 (由 8.9% 增大到 53.2%). 图 2(b) 为待测样品折射率一定 ($n = 1.8$)、厚度发生变化时, 超材料吸波体的反射谱振幅与频率的关系. 由图可知, 当待测材料折射率一定时, 该吸波体对材料厚度也有明显的电磁响应, 随着厚度增大, 共振频率发生红移 (由 0.592 THz 移到 0.529 THz), 反射振幅增大 (由 13.5% 增大到 46.1%). 由此可知, 工字形超材料结构对放置在其上方的待测样品的参数能够产生电磁响应, 导致共振频率和反射振幅的变化. 在待测样品厚度一定时, 通过吸波

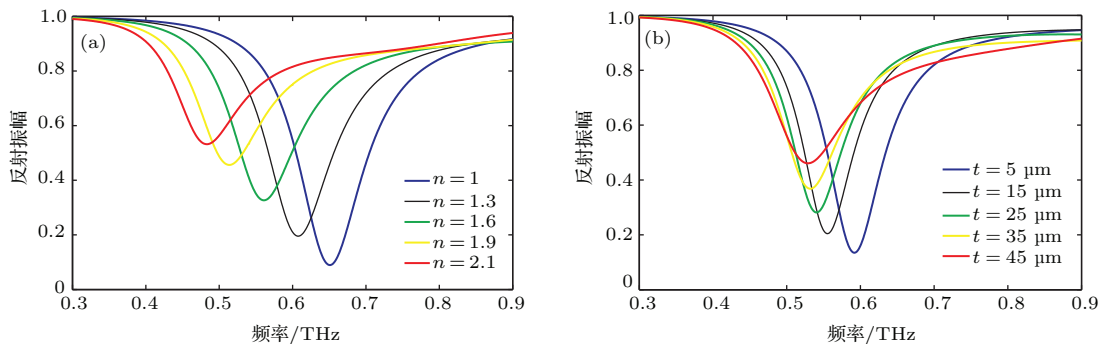


图 2 (网刊彩色)(a) 待测样品厚度不变, 折射率取不同值时反射谱随频率的变化关系; (b) 待测样品折射率不变, 厚度取不同值时反射谱随频率的变化关系

Fig. 2. (color online) (a) Reflectance spectra on the dependence of refractive indexes as a function of frequency at a fixed thickness of sample to be tested; (b) reflectance spectra on the dependence of thickness as a function of frequency at a fixed refractive index of sample to be tested.

体共振频率及反射振幅的调谐作用, 可以实现对待测样品折射率的传感; 同样, 当待测样品折射率一定时, 超材料吸波体可以实现对待测样品厚度的传感. 工字形结构各向异性, 对入射的电磁波具有极化敏感特性, 因此, 我们又研究了入射光极化方向垂直时超材料吸波体的反射谱振幅与频率的关系. 当待测样品厚度 t 一定 ($40\ \mu\text{m}$)、折射率发生变化时, 以及待测样品折射率一定 ($n = 1.8$)、厚度发生变化时, 我们均得到与上述类似的趋势, 只是不同的极化方向对应的共振频率不同. 根据这一特性, 在设计和使用传感器时, 我们可以通过设置入射波极化方向以实现其共振频率与光源频率的匹配.

3 工字形太赫兹超材料吸波体用于传感的特性研究

根据待测样品折射率或厚度的变化导致频率红移和反射振幅的调制, 我们分析了该传感器的频率灵敏度、振幅灵敏度、电介质隔层厚度对传感器灵敏度的影响以及传感器的品质因数.

3.1 待测物质折射率频率灵敏度和折射率振幅灵敏度

折射率频率灵敏度和折射率振幅灵敏度^[29]分别定义为: df/dn 和 dA/dn , 其中 df 是共振频率的变化, dn 是折射率的变化, dA 是反射振幅的变化. 由上述灵敏度定义和导数定义可知, 将共振频率相对于折射率的变化进行拟合所得的曲线的斜率即为折射率频率灵敏度. 同理, 将反射振幅相对于折射率的变化进行拟合所得的曲线的

斜率即为折射率振幅灵敏度. 待测样品厚度不变时, 通过 CST Microwave Studio 对待测样品折射率 ($n = 1\text{—}1.8$) 进行参数扫描, 扫描间隔为 0.1, 可以得到不同折射率下反射率随频率变化的曲线图, 继而知道折射率 ($n = 1.1, 1.2, \dots$) 相对于折射率 $n = 1$ 时的共振频率变化和振幅变化, 并进行拟合, 得到相应的折射率频率灵敏度和折射率振幅灵敏度. 这里, 我们分别研究了待测样品厚度为 $5\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时, 待测样品折射率改变与共振频率变化和反射振幅变化的关系, 如图 3 所示. 通过数值计算得到: 当待测样品厚度由 $5\ \mu\text{m}$ 增加到 $40\ \mu\text{m}$ 时, 折射率频率灵敏度由 $74.00\ \text{GHz/RIU}$ 增大到 $153.17\ \text{GHz/RIU}$, 折射率振幅灵敏度由 $5.72\%/RIU$ 增大到 $41.37\%/RIU$. 由此可以得出, 折射率灵敏度随样品厚度有增大的趋势, 当待测样品厚度为 $40\ \mu\text{m}$ 时, 吸波体用于传感的折射率灵敏度更高.

是否厚度越大, 折射率传感灵敏度越高呢? 随后, 我们研究了待测样品厚度变化对基于吸波体传感器的折射率频率灵敏度和折射率振幅灵敏度的影响, 如图 4. 从图 4(a) 中可以看出, 随着待测样品厚度的增加, 折射率频率灵敏度不断增大, 但是增大的幅度却在减小, 逐渐趋于饱和. 通过对数据进行拟合, 发现折射率频率灵敏度相对于待测样品厚度的走势大致满足指数函数. 从图 4(b) 中可以看出, 折射率振幅灵敏度随待测样品厚度的增加而线性增大. 然而, 这不意味着折射率振幅灵敏度可以无限制增大, 因为振幅调制会在特定待测样品厚度或折射率的条件下达到饱和. 由以上分析可知, 将样品厚度选为 $40\ \mu\text{m}$ 可以获得较高的折射率传感灵敏度.

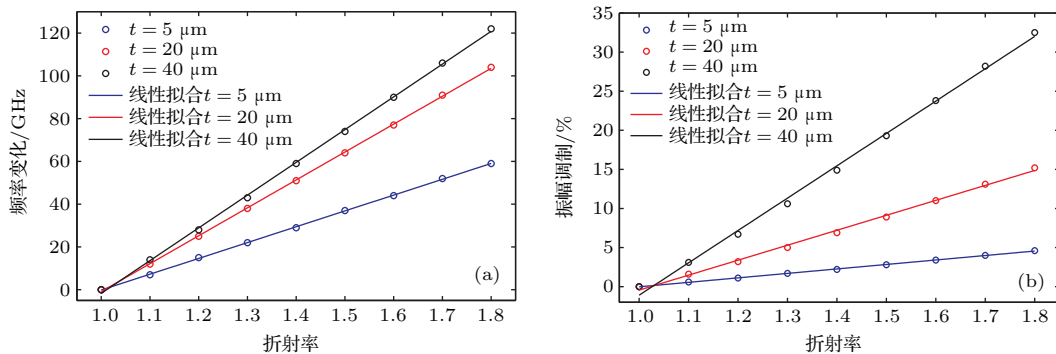


图3 (网刊彩色) (a) 待测样品厚度分别为 $5\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时对应的共振频率移动及线性拟合直线; (b) 待测样品厚度分别为 $5\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时对应的反射振幅变化及线性拟合直线

Fig. 3. (color online) (a) The resonance frequency shift and linear fitting line with varying refractive index at sample to be tested thicknesses of $5\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ and $40\ \mu\text{m}$; (b) the amplitude modulation and linear fitting line with varying refractive index at sample to be tested thicknesses of $5\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ and $40\ \mu\text{m}$.

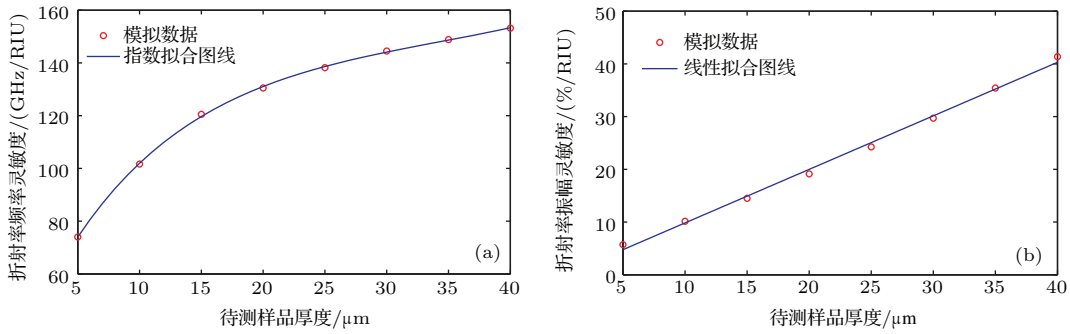


图4 (网刊彩色)(a) 折射率频率灵敏度随待测样品厚度变化关系; (b) 折射率振幅灵敏度随待测样品厚度变化关系
 Fig. 4. (color online) (a) The frequency sensitivity of refractive index with varying thickness of sample to be tested; (b) the amplitude sensitivity of refractive index with varying thickness of sample to be tested.

3.2 待测物质厚度频率灵敏度和厚度振幅灵敏度

与对折射率灵敏度的定义类似, 我们定义了厚度频率灵敏度和厚度振幅灵敏度, 分别为: df/dt 和 dA/dt , 其中 df 是共振频率的变化, dt 是厚度的变化, dA 是反射振幅的变化. 这里, 共振频率相对于厚度的变化进行拟合所得的曲线的斜率即为厚度频率灵敏度. 同理, 反射振幅相对于厚度的变化进行拟合所得的曲线的斜率即为厚度振幅灵敏度. 待测样品折射率不变时, 通过 CST Microwave Studio 对待测样品厚度 ($t = 5\text{--}45\ \mu\text{m}$) 进行参数扫描, 扫描间隔为 $5\ \mu\text{m}$, 可以得到不同厚度下反射率随频率变化的曲线图, 继而知道厚度 ($t = 10\ \mu\text{m}, 15\ \mu\text{m}, \dots$) 相对于厚度 $t = 5\ \mu\text{m}$ 时的共振频率变化和振幅变化, 并进行拟合, 得到相应的厚度频率灵敏度和厚度振幅灵敏度. 这里, 我们分别研究了待测样品折射率为 1.2, 1.5 和 1.8 时, 待测样品

厚度改变与共振频率变化和反射振幅变化的关系, 如图 5 所示. 从图 5(a) 中可以看出, 待测样品折射率一定时, 频率变化随待测样品厚度呈二次函数变化, 切线斜率, 即厚度频率灵敏度 df/dt , 也在随着样品厚度不断变化. 从图 5(b) 中看出, 厚度振幅灵敏度是不随待测样品厚度变化而变化的. 当待测样品折射率由 1.2 增加到 1.8 时, 厚度振幅灵敏度由 $0.165\%/RIU$ 增大到 $0.8153\%/RIU$. 由此可以得出, 厚度传感灵敏度随样品折射率有增大的趋势, 当待测样品折射率为 1.8 时, 吸波体用于传感的厚度灵敏度更高.

图 6 我们研究了待测样品厚度变化对基于吸波体传感器的厚度频率灵敏度的影响, 以及待测样品折射率变化对厚度振幅灵敏度的影响. 从图 6(a) 中可以看出, 待测样品折射率一定时, 随着待测样品厚度的增加, 传感器的厚度频率灵敏度不断减小. 通过对数据进行拟合, 发现厚度频率灵敏度相

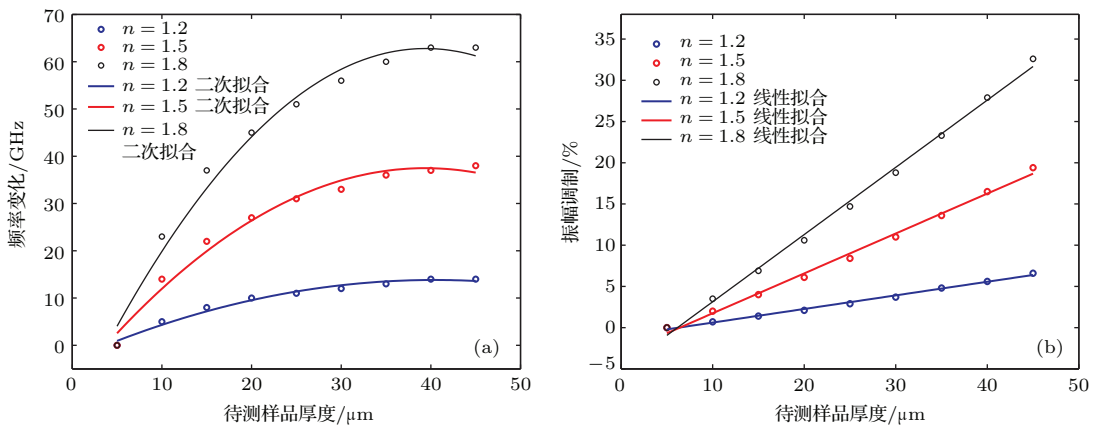


图5 (网刊彩色) (a) 待测样品折射率分别为 1.2, 1.5 和 1.8 时对应的共振频率移动及二次拟合曲线; (b) 待测样品折射率分别为 1.2, 1.5 和 1.8 时对应的反射振幅变化及线性拟合直线
 Fig. 5. (color online) (a) The resonance shift and quadratic fitting curve with varying thickness of sample to be tested at refractive index of 1.2, 1.5 and 1.8; (b) the amplitude modulation and linear fitting line with varying thickness of sample to be tested at refractive index of 1.2, 1.5 and 1.8.

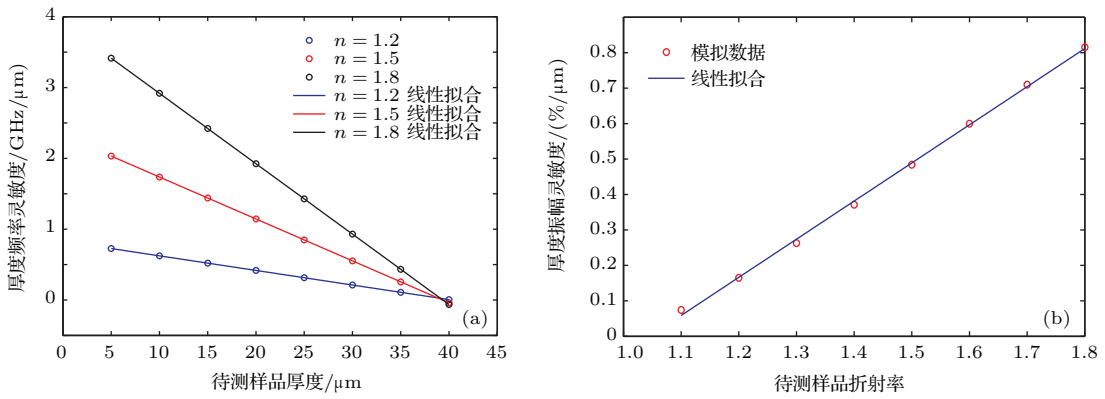


图6 (网刊彩色) (a) 厚度频率灵敏度随待测样品厚度变化关系; (b) 厚度振幅灵敏度随待测样品折射率变化关系
 Fig. 6. (color online) (a) The frequency sensitivity of thickness with varying thickness of sample to be tested at refractive index of 1.2, 1.5 and 1.8; (b) the amplitude sensitivity of thickness with varying refractive index of sample to be tested.

对于待测样品厚度线性下降, 且最终趋于零附近. 厚度太大, 则厚度频率灵敏度很低. 从图6(b)中可以看出, 厚度振幅灵敏度随待测样品折射率的增加而线性增大. 由此可以得出, 厚度振幅灵敏度随样品折射率有增大的趋势, 当待测样品折射率为1.8时, 吸波体用于传感的厚度灵敏度更高.

3.3 电介质隔层厚度对吸波体传感灵敏度的影响

图7(a)我们研究了电介质隔层厚度的变化对吸波体折射率频率灵敏度的影响. 将待测样品厚度固定为20 μm , 计算出电介质隔层厚度变化时的折射率频率灵敏度. 从图中可知, 随着电介质隔层厚度的增加, 折射率频率灵敏度不断增大, 但是在

厚度达到30 μm 时, 折射率频率灵敏度开始逐渐减小并趋于稳定, 这也说明电介质隔层的厚度并不是越大越好, 在达到一定厚度后, 吸波体调制会达到饱和.

图7(b)研究了电介质隔层厚度的变化对吸波体厚度频率灵敏度的影响. 将待测样品厚度固定为20 μm , 折射率为1.8, 计算出电介质隔层厚度变化时的厚度频率灵敏度. 从图中可以看出, 待测样品折射率一定时, 随着电介质隔层厚度的增加, 传感器的厚度频率灵敏度不断减小. 通过对数据进行拟合, 发现厚度频率灵敏度相对于电介质隔层厚度线性下降. 电介质厚度太大时厚度频率灵敏度较低. 因此, 在对厚度频率灵敏度进行传感时, 应取较小的电介质厚度.

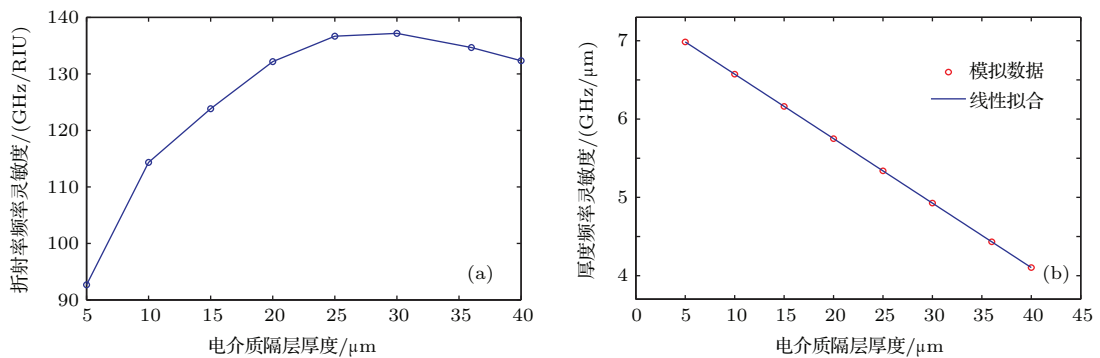


图7 (网刊彩色)(a) 折射率频率灵敏度与电介质隔层厚度的变化关系图; (b) 厚度频率灵敏度与电介质隔层厚度的变化关系图
 Fig. 7. (color online) (a) The frequency sensitivity of refractive index with varying thickness of dielectric spacer; (b) the frequency sensitivity of thickness with varying refractive index of thickness of dielectric spacer.

3.4 工字形吸波体传感器的品质因数

为了定量描述吸波体的传感特性, 我们还对

该吸波体传感器的品质因数进行了计算. 品质因数 FOM 定义为频率灵敏度与半峰全宽的比值. 我们计算了折射率频率传感灵敏度和厚度频率传感灵

敏度对应的品质因数, 分别表示为RFOM和TFOM. 图8分别给出了电介质隔层厚度为18 μm 时RFOM随待测样品厚度变化关系和电介质隔层厚度为18 μm 、待测样品折射率为1.8时TFOM随待测样品厚度变化关系. 从图中可以看出, 随着待测样品厚度的增大, RFOM逐渐增大, 但到一定厚度会趋于饱和; 而随着待测样品厚度的增大, TFOM却逐渐减小. 为得到较大的RFOM或TFOM, 应根据实际需要选择适当的待测样品厚度.

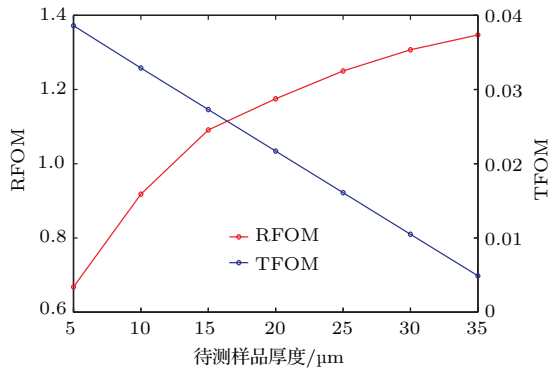


图8 (网刊彩色) RFOM和TFOM随待测样品厚度变化关系

Fig. 8. (color online) RFOM and TFOM with varying the thickness of sample to be tested.

图9分别给出了待测样品厚度为20 μm 时RFOM随电介质隔层厚度的变化关系和待测样品厚度为20 μm 、折射率为1.8时TFOM随电介质隔层厚度的变化关系. 从图中可以看出, 随着电介质隔层厚度的增大, RFOM和TFOM均逐渐减小. 且从整个电介质隔层厚度范围来看, RFOM均大于TFOM. 为得到较大的RFOM或TFOM, 应根据实际需要适当地减小待测样品厚度.

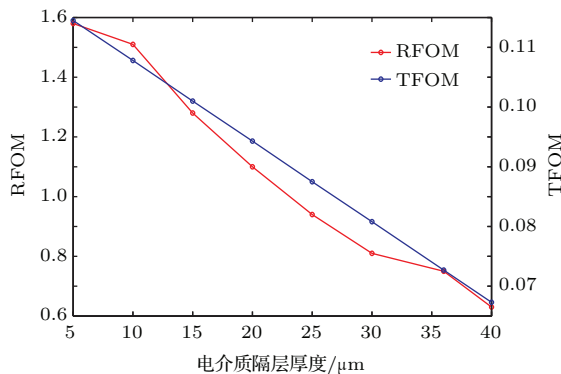


图9 (网刊彩色) RFOM和TFOM随电介质隔层厚度的变化关系

Fig. 9. (color online) RFOM and TFOM with varying the thickness of dielectric spacer.

4 工字形超材料吸波体用于传感的作用机理研究

为进一步研究工字形超材料吸波体用于传感的作用机理, 我们仿真了待测样品厚度为40 μm 、折射率为1.8、电介质隔层厚度为18 μm 的超材料吸波体在共振频率为 $f = 0.529$ THz时对应的电场分布和磁场分布, 结果如图10所示. 其中工字形结构的中心为坐标原点. 图10(a)给出了 $y = 0$ 切面处的电场分布图, 图10(b)给出了 $x = 0$ 切面处的磁场分布图. 从图10中可以看出, 在 $y = 0$ 时, 电场分布主要集中在工字形中间结构的边缘部分; 在 $x = 0$ 时, 磁场分布主要集中在整个工字形结构的边缘部分. 电场和磁场的空间范围束缚在吸波体结构中, 延伸到吸波体表面的边缘场对处于这些场附近的任何电介质的传感均会起到重要作用, 因此加上待测样品之后, 就会发生传感现象. 紧密束缚的场分布决定传感器件的灵敏度, 边缘场的空间范围决定可传感的具有特定折射率的待测样品的最大厚度. 由此, 我们通过观察电场和磁场分布了解了

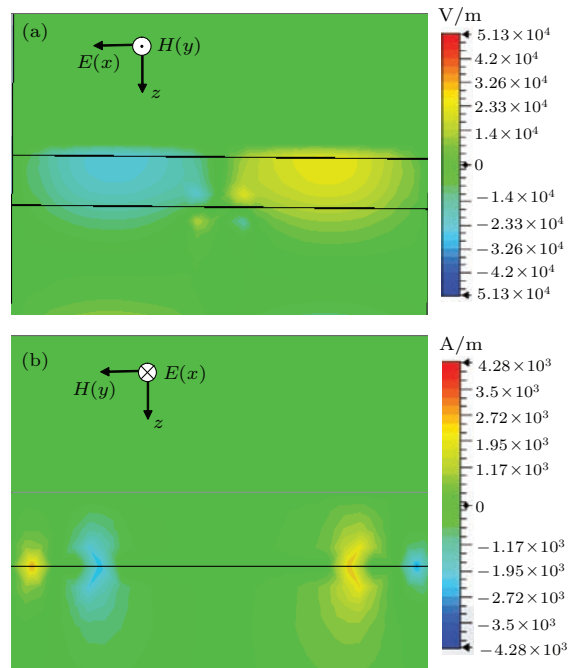


图10 (网刊彩色) (a) 共振频率为0.529 THz时, $y = 0$ 切面处的电场分布; (b) 共振频率为0.529 THz时, $x = 0$ 切面处的磁场分布

Fig. 10. (color online) (a) Electric field distribution at cross section of $y = 0$ at the resonance frequency of 0.529 THz; (b) magnetic field distribution at cross section of $x = 0$ at the resonance frequency of 0.529 THz.

工字形吸波体的传感机理及传感性能. 除了吸波体中电场和磁场共振增强外, 我们还可以利用法布里-珀罗腔中的多通道光循环原理来理解传感机理: 光通过多次反射储存在吸波体腔内由电介质隔层隔开的两个金属层之间, 与待测物质发生相互作用, 从而实现传感^[29].

5 结 论

本文对基于工字形结构的超材料吸波体的太赫兹传感进行了研究. 通过CST仿真对其在太赫兹频段的传感特性进行了数值模拟, 研究了待测样品折射率、厚度及电介质隔层厚度对超材料吸波体传感器的频率灵敏度、振幅灵敏度及品质因数的影响. 研究表明: 当待测样品厚度为40 μm 时, 折射率频率灵敏度可达到153.17 GHz/RIU, 折射率振幅灵敏度可达到41.37%/RIU; 待测样品折射率一定时, 厚度频率灵敏度随其厚度的增大而线性减小; 当待测样品折射率为1.8时, 厚度振幅灵敏度可达到0.8153%/RIU; 随电介质隔层厚度的增加, 折射率频率灵敏度先增大后减小, 厚度频率灵敏度线性减小; 随着待测样品厚度的增加, RFOM呈增大趋势, 但增大幅度在逐渐减小; TFOM随待测样品厚度的增加而减小; RFOM和TFOM均随电介质隔层厚度的增加而减小. 讨论了工字形吸波体用于传感的作用机理. 通过调节待测样品折射率、厚度及电介质隔层厚度, 可以对超材料吸波体的反射谱及灵敏度进行调节, 从而对其传感能力进行控制, 对今后超材料吸波体应用于太赫兹波段的传感具有重要的指导意义.

参考文献

- [1] Taday P F 2004 *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **362** 351
- [2] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 7146
- [3] Siegel P H 2004 *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International (Fort Worth: IEEE)* p1575
- [4] Pickwell E, Wallace V P 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** R301
- [5] Siegel P H 2002 *IEEE T. Microw Theory* **50** 910
- [6] Schmuttenmaer C A 2004 *Chem. Rev.* **104** 1759
- [7] Houck A A, Brock J B, Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [8] Veselago V G 1968 *Phys. Usp.* **10** 509
- [9] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [10] Lal S, Link S, Halas N J 2007 *Nature Photon* **1** 641
- [11] Zhu J, Eleftheriades G V 2009 *IEEE Antenn. Wirel. PR* **8** 295
- [12] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [13] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, Azad A K, Averitt R D, Taylor A J 2009 *Nature Photon* **3** 148
- [14] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, Palit S, Cho S Y, Jokerst N M, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 062511
- [15] O' Hara J F, Singh R, Brener I, Smirnova E, Han J, Taylor A J, Zhang W 2008 *Opt. Express* **16** 1786
- [16] Lahiri B, Khokhar A Z, De La Rue R M, McMeekin S G, Johnson N P 2009 *Opt. Express* **17** 1107
- [17] Cubukcu E, Zhang S, Park Y S, Bartal G, Zhang X 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 043113
- [18] Tao H, Strikwerda A C, Liu M, Mondia J P, Ekmekci E, Fan K, Omenetto F G 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 261909
- [19] Withayachumnankul W, Lin H, Serita K, Shah C M, Sriram S, Bhaskaran M, Abbott D 2012 *Opt. Express* **20** 3345
- [20] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5715 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 5715]
- [21] Lu L, Qu S B, Xia S, Xu Z, Ma H, Wang J F, Yu F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 013701 (in Chinese) [鲁磊, 屈绍波, 夏颂, 徐卓, 马华, 王甲富, 余斐 2013 物理学报 **62** 013701]
- [22] Grant J, Ma Y, Saha S, Khalid A, Cumming D R 2011 *Opt. Lett.* **36** 3476
- [23] Tao H, Bingham C M, Pilon D, Fan K, Strikwerda A C, Shrekenhamer D, Averitt R D 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 225102
- [24] Shen X, Yang Y, Zang Y, Gu J, Han J, Zhang W, Cui T J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 154102
- [25] Zou T B, Hu F R, Xiao J, Zhang L H, Liu F, Chen T, Niu J H, Xiong X M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 178103 (in Chinese) [邹涛波, 胡放荣, 肖靖, 张隆辉, 刘芳, 陈涛, 牛军浩, 熊显名 2014 物理学报 **63** 178103]
- [26] Ma Y B, Zhang H W, Li Y X, Wang Y C, Lai W E, Li J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 058102
- [27] Xu Z, Gu C, Pei Z B, Liu J, Qu S B, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
- [28] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z 2013 *OPT LASER TECHNOLOGY* **48** 415
- [29] Cong L, Singh R 2014 arXiv:1408.3711v1 [physics. optics]
- [30] Singh R, Cao W, Al-Naib I, Cong L, Withayachumnankul W, Zhang W 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 171101

Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber*

Zhang Yu-Ping¹⁾²⁾ Li Tong-Tong¹⁾ Lü Huan-Huan¹⁾ Huang Xiao-Yan¹⁾ Zhang Hui-Yun^{1)†}

1) (Qingdao Key Laboratory of Terahertz Technology, College of Electronic Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

2) (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA)

(Received 3 December 2014; revised manuscript received 7 January 2015)

Abstract

Recently, metamaterials have attracted considerable attention because of their unique properties and capability of being used in many areas of science. Among these applications, metamaterial absorber is the one researchers show much interests. On the basis of its electromagnetic responses to other material parameters, the metamaterial absorber can be applied to sensing. In this paper, a metamaterial absorber with an I-shaped unit cell is proposed and its favorable sensing characteristics in terahertz frequency range are numerically simulated in terms of frequency-domain algorithm. Influences of the thickness of the sample to be tested and the thickness of dielectric spacer of the sensing of metamaterial absorber on the frequency sensitivity, amplitude sensitivity, and the figure of merit of the refractive index, are studied in detail. Research results indicate that as the refractive index of the sample, whose thickness being fixed, increases, the resonant frequency red-shifts and the reflected amplitude increases. And when the thickness of the sample with a particular refractive index increases, the resonant frequency red-shifts and the reflected amplitude increases correspondingly. The above researches indicate that the sensing of thickness or refractive index of the sample to be tested (abbreviated as specimen) can be realized in a metamaterial absorber. The frequency sensitivity of the refractive index can reach 153.17 GHz/RIU and the amplitude sensitivity of the refractive index can reach 41.37%/RIU when the thickness of the sample is fixed at 40 μm . The frequency sensitivity of the refractive index increases as the thickness of the sample tested increases, but the increasing range gradually decreases. In addition, the amplitude sensitivity of the refractive index increases linearly with the increase of thickness of the sample tested. The frequency sensitivity of thickness decreases linearly with the increase of the thickness of the sample to be tested which is of a particular refractive index. As the thickness of dielectric spacer increases, the frequency sensitivity of the refractive index increases until the thickness reaches 30 μm . Besides, when the refractive index takes a particular value, the frequency sensitivity of thickness decreases linearly as the thickness of dielectric spacer increases. Along with the gradual increase of the thickness of the sample tested, RFOM increases but the increasing range decreases. And TFOM gradually decreases as the thickness of sample tested increases. Both the RFOM and TFOM decrease with the increase of the thickness of dielectric spacer. In the end, the sensing mechanism of metamaterial absorber is discussed in detail. The reflectance spectra and the sensitivity can be adjusted with changing the refractive index and thickness of the sample tested and the thickness of dielectric spacer, and this will provide important instructive means for terahertz sensing with metamaterial absorbers.

Keywords: metamaterial, absorber, terahertz, sensing

PACS: 78.67.Pt, 42.81.Pa, 75.40.Mg

DOI: 10.7498/aps.64.117801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61001018), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2012FM011), the Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (Grant No. J11LG20), the Qingdao city innovative leading talent plan of China (Grant No. 13-CX-25), the CAEP THz Science and Technology Foundation, China (Grant No. 201401), Qingdao Economic & Technical Development Zone Science & Technology Project, China (Grant No. 2013-1-64), and the Shandong University of Science and Technology Foundation, China (Grant No. YC140108).

† Corresponding author. E-mail: sdust_thz@126.com