光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021071602

基于双开口环型的太赫兹超材料传感器设计

潘　武，肖惠云*，马　勇，刘博文，杨龙亮

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 设计了一款可用于检测材料折射率及厚度的双开口环型太赫兹超材料传感器，其结构由双开口方环与圆环嵌套的超材料结构和聚酰亚胺衬底两部分构成。当太赫兹波垂直入射超材料表面时，该传感器结构在0.8～1.8 THz范围内形成三个高Q值谐振峰（中心频率分别为f_1，f_2和f_3）。通过探讨超材料结构表面电流分布与三个谐振峰形成的关系，观察到超材料结构对入射太赫兹波的不同响应特性导致产生不同的表面电流分布。此外，还对该传感器在折射率传感和厚度传感方面的应用进行了探究。在待测物厚度一定的情况下，该传感器在谐振频率f_1，f_2和f_3处的传感灵敏度分别可达170，103和119 GHz/RIU，均具有优越的传感特性，可利用其多谐振峰进行高灵敏度折射率传感。这种高灵敏度的多谐振峰折射率传感器可以检测到待测分析物的微小变化，在生物化学检测领域具有广阔的应用前景。

关键词： 太赫兹；超材料传感器；灵敏度；折射率

中图分类号： TP212；TB34　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0803－06

Design of Terahertz Metamaterial Sensor Based on Double Opening Square Ring

PAN Wu，XIAO Huiyun，MA Yong，LIU Bowen，YANG Longliang

（College of Photoelectronic Engin.，Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，CHN）

Abstract： A terahertz metamaterial sensor based on double opening ring is proposed，which can be used to detect the refractive index and thickness of materials. The structure of the sensor consists of two parts：a metamaterial structure with two open square rings and a ring nested inside，and a polyimide substrate. When the terahertz wave is perpendicular to the surface of the metamaterial，three high-Q resonance peaks are formed in the range of 0.8～1.8 THz. By discussing the relationship between the surface current distribution and the formation of three resonance peaks，it is observed that the different response characteristics of the metamaterial structure to the incident terahertz wave lead to different surface current distribution. In addition，the applications of the sensor in refractive index sensing and thickness sensing are also explored. The sensing sensitivities of 170，103 and 119 GHz/RIU can be realized for the resonant frequencies f_1，f_2 and f_3，respectively，at a given thickness，all of which have superior sensing characteristics and can be used for high-sensitivity refractive index sensing with their multiple resonant peaks. This highly sensitive refractive index sensor can detect small changes in the analyte to be measured and has promising applications in the field of biochemical detection.

Key words： terahertz；metamaterial sensors；sensitivity；refractive index

收稿日期：2021－07－16.

*通信作者：肖惠云

0 引言

太赫兹(Terahertz,THz)波是指频率在 0.1～10 THz,波长介于 0.03～3 mm 范围内的电磁波,其光子能量低,不会对生物样品的成分造成破坏,且对生物分子具有特殊的"指纹效应",被看作生物医疗领域的最佳光源[1]。对于大部分生物大分子而言,其在太赫兹波段都具有特征吸收峰,根据其太赫兹光谱的差异,可以对样品的种类进行区分。在自然界中,许多生物大分子的振动能级、超导体的能量间隙和半导体的等离子频率都在太赫兹波段[2]。太赫兹波的低能量特性能够激发出生物分子的集体振动模式,增强生物分子检测的灵敏度,因此太赫兹波在传感检测领域有着巨大的应用前景[3]。目前,随着人们对太赫兹频段的广泛关注,利用太赫兹时域光谱(Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDs)对物质进行检测的方法逐渐形成潮流,这种方法能够直观地从光谱上获取物质的特征信息,从而对样品的种类和含量进行判定。但是,此类方法也存在一定的局限性,如需要的测试样品量大、灵敏度较低、光谱特征量大以及处理难度大等问题。

苏联理论物理学家菲斯拉格提出的超材料(Metamaterial)为此提供了一种解决方案。超材料是由人工设计的亚波长微结构单元按一定的周期性排列方式构成的电磁材料[4-5]。通过对超材料结构单元及排列组合的精确设计,可使其拥有天然材料所不具备的电磁特性,而与材料结构的原子或分子无关[6-7]。近年来,基于超材料的太赫兹功能器件的研究报道逐渐增多,例如,太赫兹传感器[8]、太赫兹滤波器[9]和太赫兹调制器[10],超材料的广泛应用使得此类器件得到了发展。超材料对其结构表面环境或覆盖物的介电常数变化非常敏感,当其表面环境或覆盖物发生变化时,超材料结构局部电磁场增强,而使超材料结构的太赫兹谐振峰频率位置和振幅发生变化,有助于提高太赫兹传感器的检测灵敏度。

2004 年,Yen 等[11]研制出了由两个开口方型谐振环嵌套结构组成、应用于太赫兹波段的超材料,证明了非磁性导电谐振元件组成的平面结构中可以实现太赫兹的磁响应,表明这些磁性超材料在太赫兹设备中发挥着关键作用。2014 年,Miyamaru 等[12]对覆盖于超材料表面的水-甘油混合物进行了高灵敏度太赫兹(THz)传感研究,与没有超材料结构的情况相比,检测灵敏度提高了约 8 倍。2017 年,Park 等[13]研究了不同电容间隙宽度的太赫兹开口环谐振器对病毒的高灵敏度检测,灵敏度最高可达 80 GHz/RIU。同年,Shawky 等[14]设计了一种由宽边耦合开口环谐振器(DSRR)组成的传感器,它可同时进行单面和双面传感,进一步提高了灵敏度。

目前,在实际生物检测过程中还存在灵敏度不够高的问题,利用超材料开发具有高灵敏度的太赫兹传感器成为一种可能。本文提出了一种由两个双开口谐振环组合而成的超材料单元结构,其内部为双开口圆环,外部为双开口方环,内圆环和外方环的开口方向相互垂直。采用 CST Microwave Studio 2018 电磁仿真软件对该超材料结构单元进行电磁仿真分析,可以看到其在 0.8～1.8 THz 范围内有三个透射谐振峰,通过 CST 软件的场监视器观测三个谐振峰的超材料结构表面的电流分布,分析三个谐振峰的形成机理以及将其用于传感的基本原理。通过仿真计算,对覆盖于超材料表面的有机物的折射率传感进行了模拟分析,结果表明,与已有的超材料开口环型传感器结构相比,本文所提出的超材料结构对覆盖于表面有机物的折射率检测具有更高的 Q 值和灵敏度,传感性能更佳。

1 结构设计与仿真

本文设计的太赫兹超材料结构单元由两个双开口谐振环和介质基底组成。其中,谐振环的材料采用金属金,其电导率 $\sigma=4.09\times10^7$ S/m,厚度设为 0.02 μm;基底介质采用无损柔性聚酰亚胺(Polyimide)材料,其相对介电常数 $\varepsilon_r=3.5$,损耗角正切 $\tan\delta=0.0027$,电导率为 0,磁导率为 1。将该金属-介质结构沿着 x 轴和 y 轴方向周期排列,y 极化方向的电磁波沿着 z 轴方向垂直入射到结构表面。

太赫兹超材料结构单元如图 1 所示,其具体结构参数为:单元结构周期 $P=150$ μm,介质层厚度 $h=25$ μm,方环外环边长 $a=100$ μm,方环内环边长 $b=80$ μm,线宽 $w=10$ μm,开口大小 $g_2=5$ μm,圆环内环开口大小 $g_1=5$ μm,圆环外环半径 $R_1=50$ μm,圆环内环半径 $R_2=30$ μm。该单元结构在水平方向上和垂直方向上均呈现出对称性。

利用 CST Microwave Studio 2018 的频域求解器对所设计超材料结构的电磁特性进行建模仿真。如图 2 所示,该超材料结构单元在 0.8～1.8 THz

范围内出现三个谐振峰，中心频率分别为 $f_1=1.146$ THz，$f_2=1.483$ THz 和 $f_3=1.772$ THz。

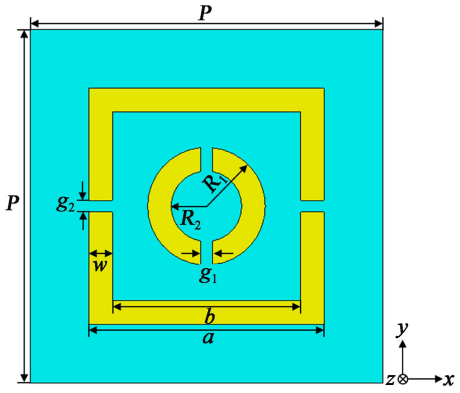


图 1　太赫兹超材料单元结构示意图

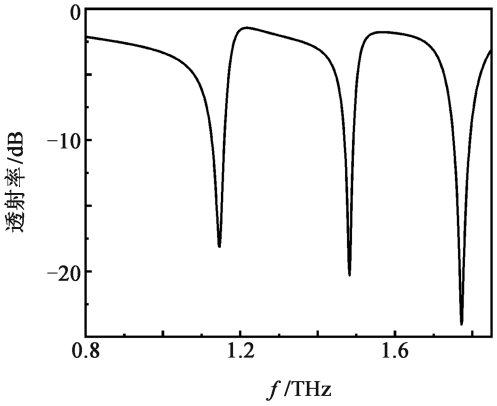


图 2　太赫兹超材料传感器透射谱

2　超材料传感器的电磁谐振机理

弄清楚超材料结构对外加电磁场产生的电磁响应是设计超材料的关键。超材料的电磁谐振可分为低频谐振和高频谐振，其中低频谐振可理解为电容和电感的耦合，产生所谓的 LC 谐振，其谐振频率可表示为[15]

$$f=(2\pi\sqrt{LC})^{-1} \tag{1}$$

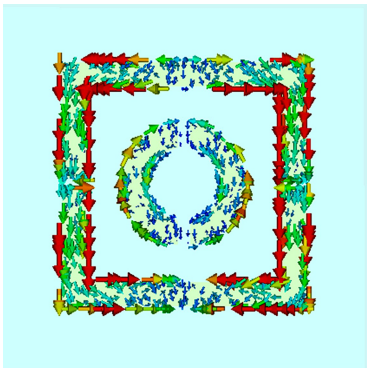
可以看出，此谐振频率主要由电容 C 和电感 L 共同决定。在如图 1 所示的超材料结构单元中，金属环可以看作电感，开口处可视为电容，而电容 C 由周围介质的介电常数和电场决定。

对于超材料的高频谐振，可将其等效为等离子体共振，其中心谐振频率可表示为[16]

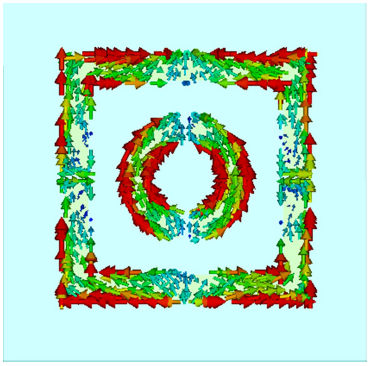
$$\omega_d \propto (2d\varepsilon_{eff}^{1/2})^{-1} \tag{2}$$

其中，d 为超材料结构单元的尺寸，ε_{eff} 为超材料结构单元周围介质的有效介电常数。当超材料结构单元表面附着某待测物时，超材料结构单元中的间隙将会被待测物填充，影响 ε_{eff}，实际使周围环境介电常数增大，即使 ε_{eff} 增大，从式(2)可知，此情况会导致超材料结构单元的中心谐振频率发生红移。

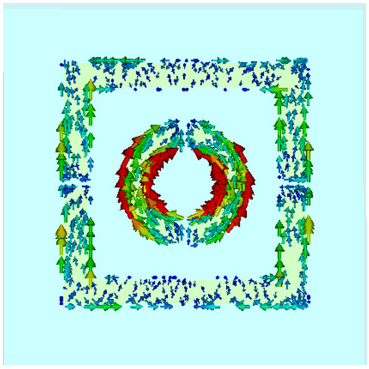
为了进一步分析所设计超材料结构单元的电磁谐振机理，可通过场监视器观察在谐振频率处此结构单元的表面电流分布情况，如图 3 所示。



(a)　$f_1=1.146$ THz



(b)　$f_2=1.483$ THz



(c)　$f_1=1.772$ THz

图 3　谐振频率 f_1，f_2 和 f_3 分别对应的超材料结构单元的表面电流分布

从图 3(a)可知，当 y 极化电磁波垂直照射到结构上时，其入射电磁波极化方向与外部方环开口方向一致，外部方环的表面电流呈反向流动的特点。在谐振点 f_1 处，其表面电流主要在外部方环左右臂振荡，主要是由外环的偶极子谐振产生。如图 3(b)所示，谐振频率 f_2 是由外方环和内圆环上的

偶极子谐振，以及内外环之间的近场耦合共同产生。如图 3(c)所示，谐振频率 f_3 处的表面电流主要在内部圆环振荡，产生典型的偶极子谐振。可以看出三个谐振频率产生机理各不相同，该结构不同的谐振方式，形成了不同的表面电流分布。当该超材料结构单元的表面覆盖不同的物质时，介电常数的改变使得各谐振的电磁响应特性也随之发生改变，因此可应用于传感研究。

3 超材料太赫兹传感器性能分析

3.1 性能指标

超材料太赫兹传感器主要是通过检测其谐振频率的偏移来进行物质识别和定量分析，其本质是将介电常数的差异转化成电磁信号的差异来实现检测。基于超材料传感器的传感机理，不同被检测物对超材料结构单元的谐振频率变化响应程度决定了传感器的性能。通常用灵敏度和品质因子对超材料太赫兹传感器的传感性能进行评价，其品质因子 Q 可表示为

$$Q = f/FWHM \tag{3}$$

其中，f 为中心谐振频率，$FWHM$ 为其对应透射谐振峰的半高宽；Q 值越大，谐振峰越尖锐。在实际传感检测过程中，若被测物对超材料结构单元的谐振频率的影响越明显，则其传感性能越好。

而超材料结构单元表面覆盖物的介电常数或折射率变化影响谐振频率变化量，可定义灵敏度 S 为

$$S = \Delta f/\Delta n \tag{4}$$

其中，Δf 为传感器单元中心谐振频率的频移量，Δn 为被测物的折射率变化量。对于本论文设计用于太赫兹波段的超材料结构传感器而言，其灵敏度的单位为 THz/RIU。

Q 值和灵敏度 S 共同来衡量传感器的传感性能，在灵敏度相同的情况下，Q 值越高，传感器性能越好。对图 1 所示的超材料结构单元进行仿真分析，可获得 f_1，f_2，f_3 三个谐振频率处对应的传感器 Q 值分别为 31，65.6 和 55.4。可以看出，三个谐振频率对应的 Q 值均比较高，其中 f_2 的 Q 值为最高。

3.2 待测物折射率对传感器灵敏度的影响

对于超材料传感器而言，其表面介质的介电常数和厚度会对透射谱线的频移和幅度造成一定的影响。而介电常数与折射率有着密不可分的关系，通常来说可用下式来表示：

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} \tag{5}$$

其中，n 表示介质层的折射率，ε 表示介电常数，μ 表示介质的磁导率。若待测物的磁导率 $\mu=1$，则待测物的折射率表示为 $n=\varepsilon^{1/2}$。

为了研究待测物质折射率对传感灵敏度的影响，可以将一定厚度的不同待测物质覆盖在用作传感器的超材料结构的顶层金属谐振单元表面。通过观察超材料传感器的谐振频率红移量与待测物折射率之间的关系，得到其传感机理。根据电磁理论，介质微扰对超材料结构单元的谐振频率偏移可近似表示为[17]

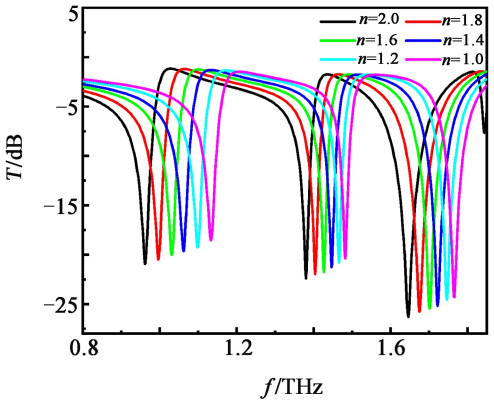
$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\int_{\Delta V}(\Delta\varepsilon E_0^2 + \Delta\mu H_0^2)\mathrm{d}V}{\int_V(\varepsilon E_0^2 + MH_0^2)\mathrm{d}V} \tag{6}$$

覆盖在超材料传感器上的待测物折射率不同，传感器谐振单元的谐振频率偏移量也不同，从而对传感器覆盖物的折射率和厚度进行传感测量。

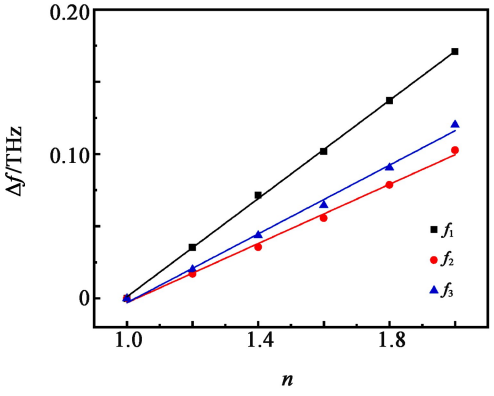
基于大部分生物大分子的折射率处在 1～2 范围内，则在仿真时可将模拟的待测物的折射率依次从 1 增加到 2(步长设为 0.2)，固定介质层的厚度为 5 μm，得到超材料结构单元的谐振频率随被测覆盖物的折射率变化的透射谱如图 4 所示。从图 4(a)可以看出，当覆盖不同折射率的待测物时，传感器的谐振频率相比较于没有覆盖待测物的传感器有不同程度的红移，谐振峰的强度也逐渐增强。为进一步探究三个谐振频率对折射率的传感灵敏度，本文统计了三个谐振峰在不同折射率下对应的谐振频率，在待测物厚度一定的情况下，对谐振频率的偏移量进行计算。图 4(b)显示了三个谐振频率在不同折射率情况下的偏移情况，其中三种颜色的离散点代表三个谐振频率在不同折射率情况下对应的频率偏移量，这里的频率偏移量 Δf 定义为 $\Delta f = f_n - f_0$，其中，f_n 代表传感器覆盖折射率为 n 时的待测物的谐振频率，f_0 代表传感器的初始谐振频率。图 4(b)中的三种颜色的直线是三个谐振频率对应的线性拟合，可知三个谐振频率的频率量均与待测物的折射率成线性关系，其拟合曲线函数分别为 $f_1 = 0.17n - 0.17$，$f_2 = 0.103n - 0.11$ 和 $f_3 = 0.119n - 0.12$。

根据式(4)，可以计算出谐振频率 f_1，f_2 和 f_3 处的折射率灵敏度分别为 170，103 和 119 GHz/RIU，由此可知三个谐振频率均有良好的灵敏度，且仅由外

方环偶极子振荡形成的谐振峰的传感灵敏度最高，内圆环次之，内外环耦合形成的谐振峰的传感灵敏度最小。



（a）　谐振频率随折射率变化的传感器透射谱



（b）　折射率与频移之间的关系

图 4　太赫兹超材料传感器的折射率传感特性

3.3　待测物厚度对传感器灵敏度的影响

保持折射率一定，改变待测物质的厚度，利用 CST 对不同厚度的待测物质进行仿真计算，将折射率固定为 1.8，得到传感器覆盖不同厚度待测物下的频率偏移。

图 5 显示了传感器覆盖 0～40 μm 厚度时，三个谐振频率的偏移量，可以看出虽然三个谐振频率显示出不同程度的频移，但其频移量均逐渐增加。对于谐振频率 f_1 而言，当待测物厚度大于 10 μm 时，频移增加量逐渐变缓，并且开始达到饱和，饱和时的频移大约在 92.5 GHz。这说明在实际测试过程中，当待测物的厚度超过饱和厚度之后，这时的厚度对传感器性能几乎不造成影响。f_2 的频移明显小于 f_1 的频移，当待测物厚度大于 10 μm 时，f_2 的频移并未出现饱和，f_2 始终保持良好的偏移规律。对于 f_3 而言，当将待测物的厚度逐渐从 1 μm 增加到 40 μm 时，f_3 的频率偏移几乎成线性增加，说明 f_3 对待测物的厚度变化比较敏感。

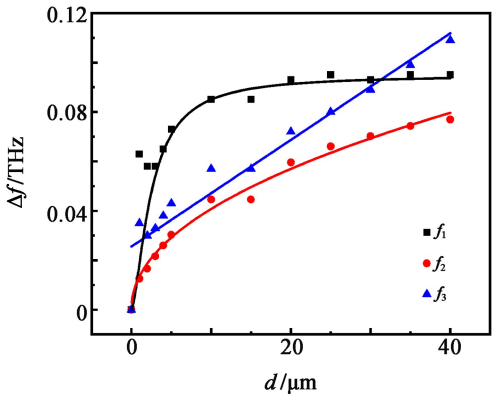


图 5　不同待测物厚度与频率偏移之间的拟合曲线

4　结论

本文设计了一款基于双开口环型组合结构且具有高 Q 值和高灵敏度的太赫兹超材料传感器。通过 CST 电磁仿真软件分析了三个谐振峰的形成机理和传感特性。在分析物厚度为 5 μm，折射率范围为 1～2 的情况下，三个谐振频率对应的折射率灵敏度分别为 170，103 和 119 GHz/RIU，而传统开口环传感器的灵敏度仅为 70 GHz/RIU。当待测物厚度逐渐从 0 μm 增加 40 μm 时，三个谐振频率的频移量均呈现增加的趋势。当分析物厚度大于 10 μm 时，f_1 的频移出现饱和，可用于测量厚度大于 10 μm 的物质。f_2 和 f_3 对待测物的厚度均比较敏感，可用于检测厚度较薄的物质。通过分析三个谐振频率的形成机理，发现仅由外部开口方环或内部开口圆环的偶极子振荡形成的传感灵敏度大于内外环相互耦合形成的传感灵敏度。该传感器的三个谐振峰均对表面待测物折射率的变化具有较高的灵敏度，并且为太赫兹波段内的多谐振峰超材料传感器应用于生物医学检测提供了方法。

参考文献：

[1]　Federici J F. Review of moisture and liquid detection and mapping using terahertz imaging[J]. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 2012, 33(2): 97-126.

[2]　Menikh A. Terahertz-biosensing technology: Progress, limitations, and future outlook[J]. Springer Ser. Chem. Sens. Biosens., 2010, 1(8): 283-295.

[3]　Chen T, Li S Y, Sun H. Metamaterials application in sensing [J]. Sensors, 2012, 12(3): 2742-2765.

[4]　Alves F, Kearney B, Grbovic D, et al. Narrowband terahertz emitters using metamaterial films[J]. Opt. Express, 2012, 20(19): 21025-21032.

[5] Sun X Y, Zheng L R, Li X N, et al. Origin of strain-induced resonances in flexible terahertz metamaterials [J]. Chin. Phys. B, 2016, 25(5): 057802.

[6] Fan K, Padilla W J. Dynamic electromagnetic metamaterials [J]. Mater. Today, 2015, 18(1): 39-50.

[7] Hashemi M R, Cakmakyapan S, Jarrahi M. Reconfigurable metamaterials for terahertz wave manipulation [J]. Rep. Prog. Phys., 2017, 80(9): 094501.

[8] Nagel M, Richter F, Haring-Bolivar P, et al. A functionalized THz sensor for marker-free DNA analysis[J]. Phys. Med. Biol., 2003, 48(22): 3625.

[9] Kaliteevski M A, Brand S, Garvie-Cook J, et al. Terahertz filter based on refractive properties of metallic photonic crystal [J]. Opt. Express, 2008, 16(10): 7330-7335.

[10] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006, 444(7119): 597-600.

[11] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5663): 1494-1496.

[12] Miyamaru F, Hattori K, Shiraga K, et al. Highly sensitive terahertz sensing of glycerol-water mixtures with metamaterials [J]. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 2014, 35(2): 198-207.

[13] Park S J, Cha S H, Shin G A, et al. Sensing viruses using terahertz nano-gap metamaterials [J]. Biomed. Opt. Express, 2017, 8(8): 3551-3558.

[14] Shawky N, Adnan Taha S A, Altan H, et al. Single-and double-sided sensor applications of metamaterials based on square-ring and diamond resonators for terahertz region[J]. Mod. Phys. Lett., 2017, 31(8): 1750072.

[15] Liu J J, Fan L L, Ku J F, et al. Absorber: a novel terahertz sensor in the application of substance identification[J]. Opt. Quantum Electron., 2016, 48(2): 80.

[16] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, et al. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(6): 062511.

[17] 张克潜. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 298.
Zhang K Q. Electromagnetic Theory for Microwave and Optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 298.

作者简介:

潘　武(1966—),男,四川省大英县人,教授,主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究;

肖惠云(1996—),女,湖南省衡阳市人,研究生,研究方向为太赫兹传感器、太赫兹光谱。

(上接第 802 页)

[5] Pan H, Larson L E. A linear-in-dB SiGe HBT wideband high dynamic range RF envelope detector[C]// Proc. of Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2010: 267-270.

[6] Wang I H, Liu S I. A 0.18 μm CMOS 1.25 Gbps automatic-gain-control amplifier [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Ⅱ, 2008, 55(2): 136-140.

[7] Hui X, Feng J. A 1.25 Gb/s high gain, wide dynamic range pre-amplifier in 0.35 &. #x00BH5; m CMOS[C]// Proc. of Inter. Conf. on Electric Information and Control Engin., 2011: 965-968.

[8] 王自强, 池保勇, 王志华. CMOS 可变增益放大器设计概述[J]. 微电子学, 2005, 35(6): 612-617.
Wang Z Q, Chi B Y, Wang Z H. Overview of CMOS variable gain amplifier design[J]. Microelectronics, 2005, 35(6): 612-617.

[9] Meyer R G, Mack W D. Monolithic AGC loop for a 160 Mb/s transimpedance amplifier[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 1996, 31(9): 1331-1335.

[10] Liao C F, Liu S I. A 40 Gb/s transimpedance-AGC amplifier with 19 dB DR in 90 nm CMOS[C]// Proc. of IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2007: 584-586.

[11] Kim J, Buckwalter J F. Bandwidth enhancement with low group-delay variation for a 40 Gb/s transimpedance amplifier [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Ⅰ, 2010, 57(8): 1964-1972.

[12] 任美辉, 赵玉梅, 梁原华. 镜像电流源原理及其应用电路[J]. 电测与仪表, 2006, 43(4): 34-36.
Ren M H, Zhao Y M, Liang Y H. The principle of mirror current source and its application circuit [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(4): 34-36.

[13] Saint C, Saint J. IC Mask Design: Essential Layout Techniques[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[14] Ray S, Hella M M. A 10 Gb/s inductorless AGC amplifier with 40 dB linear variable gain control in 0.13 μm CMOS[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2016, 51(2): 440-456.

[15] Pang G, Chen Y, Xiao J, et al. A 25 Gb/s burst mode optical receiver front-end in 0.13 μm BiCMOS technology [C]// Proc. of 2020 IEEE 5th Inter. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), 2020: 77-80.

作者简介:

曹庆珊(1997—),女,云南人,硕士研究生,主要研究方向为模拟/射频集成电路;

何　进(1975—),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向包括射频毫米波集成电路与系统、高速光通信集成电路与系统。