

## 频率可调太赫兹微结构光电导天线

夏祖学<sup>1,2</sup>, 刘发林<sup>1</sup>, 邓 琥<sup>2</sup>, 陈俊学<sup>3</sup>, 刘泉澄<sup>2</sup>

- (1. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027;
2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;
3. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 太赫兹波低频段辐射计在地球大气和分子探测中的需求不断增加。在微波电开口谐振环等效电路模型及其谐振特性仿真设计的基础上, 将微波谐振结构和传统带状线偶极子光电导天线结合, 提出了新型微结构光电导天线, 具有频率调节灵敏度高、谐振特性明显的优点。加工了不同尺寸的新型光电导天线和常规的带状线偶极子光电导天线实物, 并进行了实验对比研究。两种类型的太赫兹辐射频谱明显不同, 新型光电导天线由于微结构电开口谐振环的双频谐振特性出现了两个谐振峰, 3 dB 相对带宽约为 50%, 得到了窄带特性; 而传统光电导天线只有单峰, 3 dB 相对带宽为 93.07%, 显然为宽谱特性。对于新型光电导天线的仿真和实测吻合较好, 调节微结构天线的谐振环臂长可以获得较大的峰值频率移动相对值, 从而也验证了理论模型、谐振单元仿真结果的有效性。

**关键词:** 电开口谐振环; 微结构光电导天线; 太赫兹; 高调谐灵敏度; 谐振特性

**中图分类号:** TN201 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0520002

## Frequency adjustable THz microstructured photoconductive antennas

Xia Zuxue<sup>1,2</sup>, Liu Falin<sup>1</sup>, Deng Hu<sup>2</sup>, Chen Junxue<sup>3</sup>, Liu Quancheng<sup>2</sup>

- (1. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
3. School of Science, Southwest University of Science, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** There are increased application requirements of Terahertz wave low frequency radiometers in Earth atmosphere and molecular detection. Based on the equivalent circuit model and their resonant characteristics' simulation design of the microwave electrical split ring resonators (eSRR), novel microstructured photoconductive antennas (PCAs) were proposed by combining the microwave resonant structure with the traditional stripline dipole PCA. The new PCAs were with high frequency adjustment sensitivity and obvious resonance characteristics. The novel PCAs with different dimensions were fabricated and experimentally compared with a conventional stripline dipole PCA. The terahertz radiation spectrum of the two types PCAs are significantly different: the novel PCAs have dual resonant peaks and

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11176032/A06); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(CAEP THZ2012096)

作者简介: 夏祖学(1975-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事太赫兹光电导天线研究及微波器件、天线方面的研究。

Email: xiazuxue@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 刘发林(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术、微波通信等方面的研究。 Email: liufl@ustc.edu.cn

narrowband resonating characteristics owing to the dual-frequency resonant characteristics of the microstructured eSSRs, and the 3 dB relative bandwidth is about 50%; while the conventional PCA has only a single peak with broad spectrum radiations, whose the 3 dB relative bandwidth is 93.07%. The simulation and test results of the new PCAs agree well. It is demonstrated that adjusting the resonant ring's arm length of the new PCAs can obtain a relatively larger peak frequency shift. Thus the theoretical model and the simulation results are all verified.

**Keywords:** eSRR; microstructured PCA; THz; high tuning sensitivity; resonant characteristics

## 0 引言

由于太赫兹波具备穿透大多数非极性电介质的透视性,满足环境监测与保护的要求,地球大气和分子等的探测和检测都对高功率、低频段的太赫兹波辐射计<sup>[1]</sup>(如:0.19 THz、0.24 THz 附近)有不断增长的应用需求。

太赫兹系统从原理上可以分为典型的两类:一类是基于低频微波源向高频扩展得到的太赫兹波系统,由于采用了放大、倍频、混频等使得系统较为复杂,存在成本较高的问题。另一类是激光下变频的太赫兹系统,其中应用广泛的一种是太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)<sup>[2]</sup>,而作为其关键部件的光电导天线,由于结构简单、外围电路要求不太复杂,得到了广泛的研究。传统光电导天线的辐射源是宽频带脉冲源,从而太赫兹波的品质因素低,辐射效率低<sup>[3-4]</sup>。通过改变光斑大小、形状、位置,提高泵浦光光脉冲能量、偏压,以及改变传统光电导天线结构(如:圆形、碟型)等都可以提高太赫兹辐射功率<sup>[5]</sup>,但是上述方法都不能有效调节光电导天线辐射的太赫兹波的峰值频率和相对带宽,不能满足峰值频率可调的低频、较窄频带的太赫兹辐射的应用需求。

I型、II型偶极子光电导天线是最常用的天线结构,在此类传统光电导天线上引入新的结构,可以有效改善太赫兹频谱,提高辐射效率,成为了研究热点。目前,超材料结构在太赫兹频段的调制器的动态调制和调控有了很多实际的应用<sup>[6-8]</sup>,超材料结构也已经用在了传统光电导天线结构上,用以改变辐射频谱和增强特定频点上的辐射特性。2007年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Hara 等人<sup>[9]</sup>在传统 II 型偶极子天线的电极引入一个电开口谐振环

结构(electrical split ring resonators, eSRR)结构,实验发现在 eSRR 结构谐振频率附近的太赫兹输出功率有所增强,但没有研究双频峰值频率形成机理,也未研究峰值频率调整问题。2011年,日本大阪大学的 Takano 等人<sup>[10]</sup>在传统工型偶极子天线的电极引入了一个开口谐振环结构(SRR)结构,通过附加光脉冲诱导光导材料的变化,从而改变 SRR 结构的共振特性,通过实验的方法实现了对太赫兹辐射脉冲光谱和偏振的动态调控。

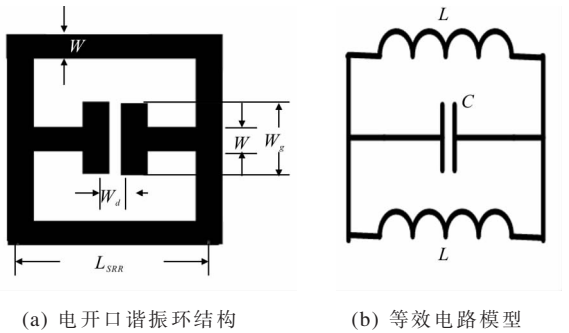
目前,太赫兹天线尺寸小,对加工制作带来了挑战,微纳加工工艺存在着许多技术难点<sup>[11]</sup>,难于加工微米量级的光电导天线,又没有可供光电导天线仿真设计的成熟商业软件。国内外近年来传统工型、II型偶极子光电导天线的实测和仿真结合的文章<sup>[12]</sup>少有报道。前述的微结构光电导天线的文章也都是基于 THz-TDS 系统实验研究 THz 辐射特性。可调节辐射峰值频率的微结构光电导天线的文章鲜有报道。针对太赫兹波低频较窄频段的太赫兹辐射波的需求,文中拟在传统的 II 型偶极子光电导天线的电极中引入多个电开口谐振环微结构,基于等效电路模型和单元谐振特性仿真研究,可实现可调节峰值频率和窄带辐射的太赫兹辐射。制作了系列微结构光电导天线,并进行了测试,验证了该结构的上述优势。

## 1 电开口谐振环微结构单元及谐振特性

传统光电导天线调谐灵敏度太差,谐振不突出;即在峰值频率移动一定的条件下,调节长度过大,也有相对带宽过大的问题。文中拟在传统 II 型光电导天线的电极中引入电开口谐振环微结构,有效克服上述问题。

1.1 电开口谐振环结构和等效电路

电开口谐振环结构紧凑。微结构光电导天线拟采用的电谐振开口谐振环结构如图 1(a)所示,简化了参考文献[13]的等效电路如图 1(b)所示,上下半方环分别等效成电感,中间的平行板的间隙等效成电容。



(a) 电开口谐振环结构 (b) 等效电路模型  
(a) Structure of eSRR (b) Equivalent circuit model

图 1 电开口谐振环结构及等效电路

Fig.1 Structure and equivalent circuit of the eSRR

LC 等效电路谐振频率公式为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C}} \quad (1)$$

式中: $L_p$ 为两个  $L$  并联得到的电感值。通过改变电开口谐振环的金属贴片宽度  $W_g$ 、间隙  $W_d$  大小改变电容  $C$ ,或调整臂长  $L_{SRR}$  改变电感的大小,从而调节该结构的谐振频率。

1.2 电开口谐振环结构双频特性和模式分析

基于时域有限差分(FDTD)方法,得到了电开口谐振环结构单元的双频频率响应特性,典型的双频谐振特性如图 2 所示。

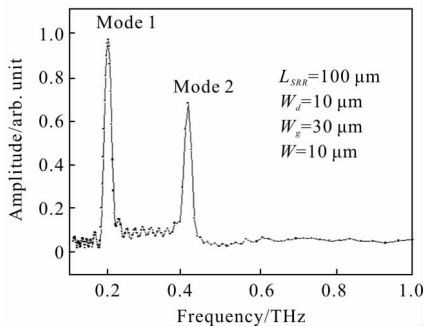
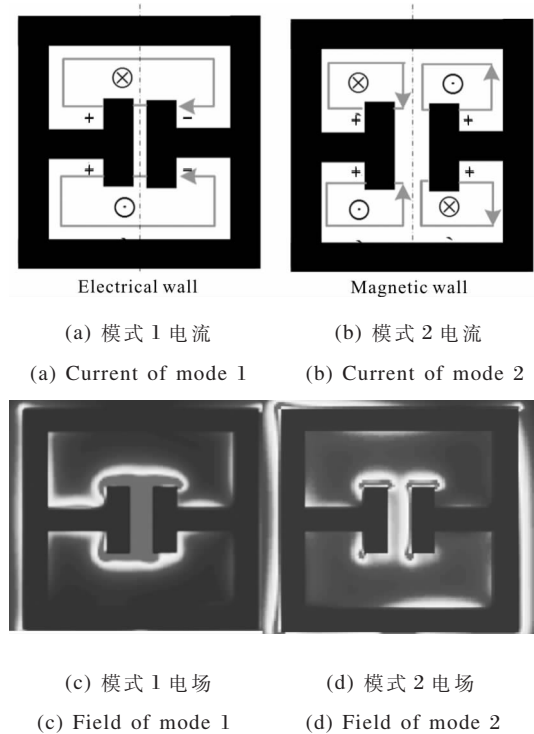


图 2 典型的电开口谐振环结构双频谐振特性

Fig.2 Typical dual frequency resonant characteristics of the eSRR

不同的峰值/模式的空间电流分布可以用来校

验双频谐振特性。不同模式电流分布和电场分布如图 3 所示。



(a) 模式 1 电流 (b) 模式 2 电流  
(a) Current of mode 1 (b) Current of mode 2  
(c) 模式 1 电场 (d) 模式 2 电场  
(c) Field of mode 1 (d) Field of mode 2

图 3 不同模式的电流和电场分布

Fig.3 Current and field distributions of different modes

从图 3 可知,低频共振峰(模式 1)处在对应于结构共振的基模(即奇模,对称面等效为“电壁”),而磁场被局域在环的上下半周,且方向相反,如图 3(a)所示。而高频共振峰(模式 2)处在对应于结构共振的高阶模式(即偶模,对称面等效为“磁壁”),磁场被局域在环的四角,具体如图 3(b)所示。对应于基模和高次模的电场能量主要都被局域在开口环间隙,模式 1 较模式 2 有较大电场。

1.3 电开口谐振环结构参数对频响特性影响

(1) 不同间隙条件下的归一化频响比较

在  $W=10 \mu\text{m}$ ,  $W_g=30 \mu\text{m}$ , 臂长  $L_{SRR}=100 \mu\text{m}$  尺寸下,eSRR 单元结构在不同间隙  $W_d$  的归一化频响如图 4 所示。

从图 4 可以看到,电开口谐振环结构单元都表现了双频特性,随着电容间隙  $W_d$  的减少,对应的模式 1 增强,模式 2 也随之减弱,双频的谐振频率都向低频移动,这和 LC 等效电路吻合。调整金属贴片宽度  $W_g$  也可以改变电容,从而调节该结构的谐振频率,这里不再给出具体分析。

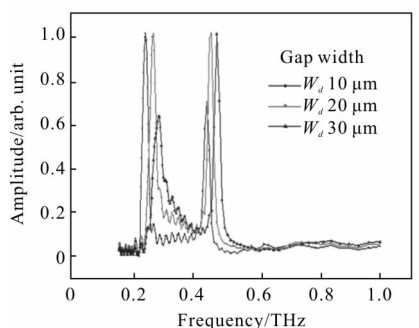


图 4 不同间隙下的归一化频响

Fig.4 Normalized frequency responses with different gaps

(2) 不同谐振环臂长的归一化频响比较

在  $W=10 \mu\text{m}$ ,  $W_g=30 \mu\text{m}$ ,  $W_d=10 \mu\text{m}$  尺寸下, eSRR 单元结构在不同谐振环臂长的归一化频响如图 5 所示。

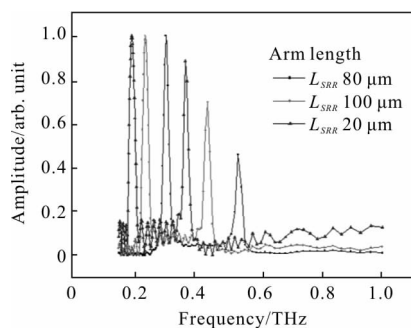


图 5 不同谐振环臂长的归一化频响

Fig.5 Normalized frequency responses with different arm lengths

从图 5 可以看到, 随着谐振环结构的臂长  $L_{SRR}$  的增大, 对应的模式 1 减弱, 模式 2 也随之增强; 谐振的双频频率都向低频移动, 这也和 LC 等效电路吻合。通过调节谐振环结构的臂长, 可灵敏地在较大范围内调节模式 1 和模式 2 的谐振频率。当谐振环臂长为  $120 \mu\text{m}$  时, 双频的峰值频率分别为  $0.1940$ 、 $0.3563 \text{ THz}$ ; 当谐振环臂长为  $100 \mu\text{m}$  时, 双频峰值频率分别为  $0.2375$ 、 $0.4377 \text{ THz}$ 。

## 2 具有电开口谐振环的微结构光电导天线 THz 辐射特性

### 2.1 新型微结构光电导天线结构

将在电开口谐振环单元结构谐振特性的仿真基础上, 将电开口谐振环结构和传统带状线偶极子光电导天线结合, 提出了新型的微结构光电导天线, 并

制作了不同尺寸的微结构光电导天线, 其结构示意图如图 6 所示。

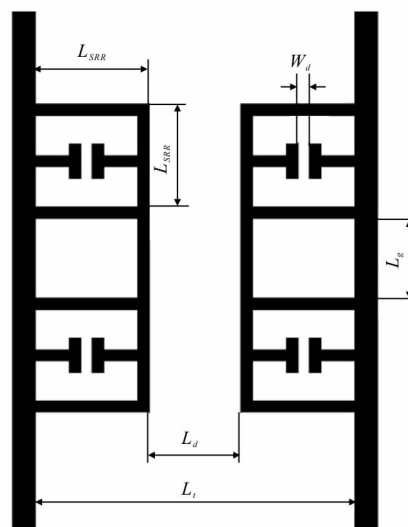


图 6 微结构光电导天线结构示意图

Fig.6 Structure diagram of microstructured photoconductive antenna

不同尺寸的新型光电导天线和参考的传统光电导天线实物图如图 7 所示。

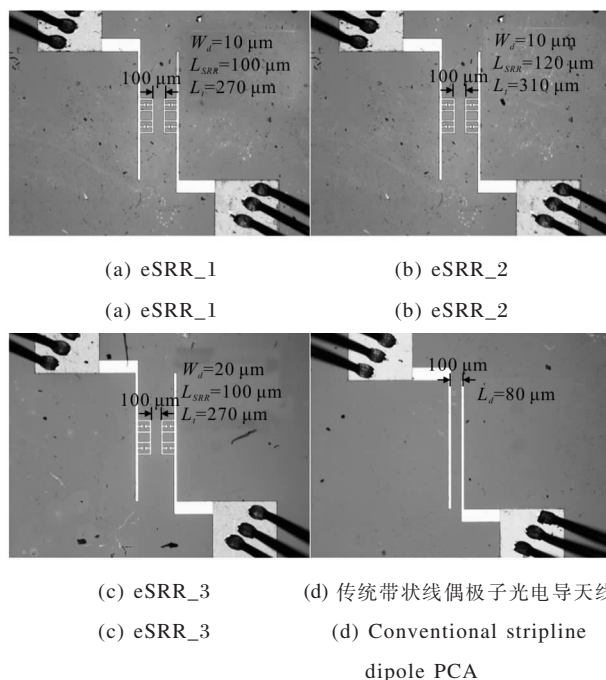


图 7 不同尺寸的新型天线和传统带状线偶极子光电导天线实物图  
Fig.7 Pictures of the novel PCAs with different dimensions and the conventional stripline dipole PCA

天线长度单位  $\mu\text{m}$ , 微结构天线内部  $L_d$  间距不变, 均为  $80 \mu\text{m}$ , 也是图 7(d) 参考的传统带状线偶



极子天线的孔径间距,上下 eSRR 结构  $L_g$  间距不变,为  $70 \mu\text{m}$ 。

### 2.2 新型光电导天线辐射特性时域波形分析

通过 THz-TDS 系统,相同实验条件下实测了不同尺寸的微结构 SI-GaAs 光电导天线,以及对比的传统带状线偶极子光电导天线。实验所使用的 Maitai 飞秒激光器的基本性能参数如下:中心波长  $800 \text{ nm}$ ;脉冲宽度  $100 \text{ fs}$ ;扫描时间间隔  $66.7 \text{ fs}$ ;重复频率  $80 \text{ MHz}$ ;激光正入射到孔径  $L_d$  的中间,入射波光功率  $100 \text{ mW}$ ,外加的偏压都为  $55 \text{ V}$ 。实测的不同结构光电导天线辐射的 THz 波时域波形如图 8 所示。

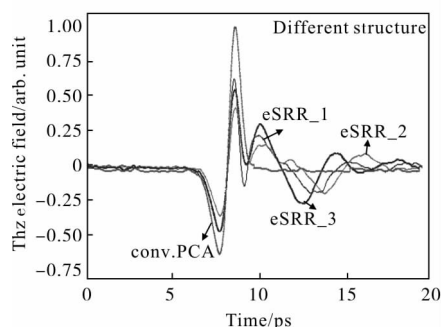


图 8 新型和传统光电导天线辐射的 THz 归一化时域波形  
Fig.8 Normalized time-domain waveforms of the radiated THz field of the novel PCAs and conventional PCA

从图 8 可以看到,8 ps 以前具有 eSRR 微结构的光电导天线和传统带状线偶极子光电导天线的 THz 波时域波形的形状几乎一样,其中,脉冲前沿基本一致的原因是具有相同泵浦光脉宽,而泵浦光脉宽决定了光电导天线辐射脉冲的前沿;辐射的太赫兹脉冲下降沿时间也基本相同,下降沿主要由半导体材料载流子寿命、弛豫时间以及偶极子天线的结构决定。

8 ps 以后,微结构光电导天线和传统带状线偶极子光电导天线时域波形明显不同,前者出现不同振荡周期,而后者没有明显振荡。

### 2.3 光电导天线频谱及峰值形成机理分析

通过对图 8 的时域波形进行快速傅里叶变换,得到了不同结构光电导天线的频谱,如图 9 所示。

从图 9 可以看到,具有 eSRR 微结构的光电导天线的辐射频谱和传统 II 型偶极子光电导天线频谱宽大体相同,但是频谱的幅频特性明显不同。前者

由于具有电开口谐振环微结构,出现了两个谐振频率,0.4~0.6 THz 的宽谱为微结构谐振后的传统光电导天线的频谱抑制残留,主峰的 3 dB 相对带宽降到了 50%左右;而后者辐射频谱只有单峰,3 dB 相对带宽达 93.07%,显然是宽谱特性。

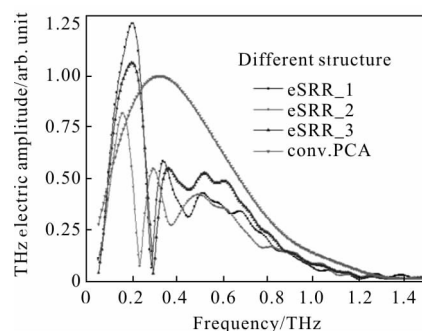


图 9 实测新型和传统光电导天线辐射的归一化频谱  
Fig.9 Experimental normalized spectrum radiated by the novel PCAs and conventional PCA

从图 9 可以看到,具有 eSRR 微结构的光电导天线的辐射频谱和传统 II 型偶极子光电导天线频谱宽大体相同,但是频谱的幅频特性明显不同。前者由于具有电开口谐振环微结构,出现了两个谐振频率,0.4~0.6 THz 的宽谱为微结构谐振后的传统光电导天线的频谱抑制残留,主峰的 3 dB 相对带宽降到了 50%左右;而后者辐射频谱只有单峰,3 dB 相对带宽达 93.07%,显然是宽谱特性。

对于传统的 II 型偶极子光电导天线而言,光生电流在沿着天线传播时具有较大的辐射损耗和介质损耗,使其只能传播较短的距离,导致光电导天线的  $Q$  值很低,所以根据下述电路相关理论公式(2),相应的带宽较大,实际得到的光电导天线频谱是宽谱特性,而不是微波驻波天线的窄带特性,也就不具有明显的谐振特性,这与 Hughes 等人<sup>[14]</sup>观点吻合。

$$Q = BW/f \quad (2)$$

从图 9 可以看到:eSRR\_3 较 eSRR\_1 的耦合距离  $W_d$  从  $20 \mu\text{m}$  减少到了  $10 \mu\text{m}$  (谐振环臂长尺寸一致,均为  $100 \mu\text{m}$ ),前两个峰值频率均向低频移动,这和前述的仿真结果一致。即单元结构随着电容间隙  $W_d$  的减少,等效电容随之增大,对应的模式 1 增强,模式 2 也随之减弱。

新型天线的主峰的 3 dB 相对带宽较传统天线的减少了近一倍,理论上,整体信噪比应该有明显提

升。而新型天线的整体信噪比的低频处的实测结果只有一定的体现, 谐振环臂长 100  $\mu\text{m}$  的两个天线较同尺寸传统光电天线的信噪比有所提高, 而臂长 120  $\mu\text{m}$  的天线信噪比则还较差。综合分析实测新型微结构天线信噪比不高的原因: 可能是太赫兹电场的探测手段有一定局限性, 即未加载硅透镜而未能有效收集探测介质的正后方同一位置处平面的太赫兹电场; 微结构光电导天线可能存在不同于传统光电导天线的辐射方向图<sup>[15]</sup>, 即微结构天线的辐射的最大方向可能不是偶极子天线的最大辐射方向, 也就不在实测天线探测方向(介质的正后方); 或最大辐射方向即使在探测方向, 也存在其他方向有较大的太赫兹辐射电场。

考虑到不同天线实验条件微小变化(如光斑大小、位置、光强大小等), 实验探测手段对光电导天线辐射频谱的幅度有一定的影响, 而微结构光电导天线的双频特性, 特别是低频与高频的峰值频率及双频峰值频率对应的相对峰值幅值比, 随着结构参数变化的趋势不会改变。也注意到了调节谐振环臂长引起的电感作用较调节电容缝隙间距对谐振频率影响较大。这里给出了文中仿真微结构单元和实测微结构天线的臂长尺寸对辐射特性的相关比较, 具体见表 1。

表 1 单元仿真与新型光电导天线实测比较

Tab.1 Comparison between unit simulation and novel PCAs measurement

Source	Arm length/ $\mu\text{m}$	Peak frequency /THz	RPFS	Peak amplitude ratio
Simulation	120	0.192 6/0.356 3	18.91%	1/0.885 2
	100	0.237 5/0.437 7	18.59%	1/0.697 0
Measure-ment	120	0.159 3/0.290 5	18.60%	1/0.668 9
	100	0.195 7/0.334 2	13.08%	1/0.464 7

这里, 双频的相对峰值频率移动值定义为:

$RPFS = (\text{结构变化后第一峰值频率} - \text{结构变化前的第一峰值频率}) / \text{结构变化后第一峰值频率} \times 100\%$ ; 第二峰值频率移动相对值定义类似。

从表 1 可以看到: 文中仿真微结构单元的辐射特性和实测的具有微结构光电导天线的谐振频率趋势一致, 具有正相关性, 这说明微结构单元的辐射特性在很大程度上决定了微结构光电导天线的辐射特

性。随着谐振环臂长的减小, 等效电感也随之减小, 双频峰值频率均向高频移动。实测天线的臂长从 120  $\mu\text{m}$  变化到了 100  $\mu\text{m}$ , 实测天线的第一、第二峰值频率移动相对值分别达到了 18.60% 和 13.08%, 实测的第一峰值频率移动相对值和单元仿真更为接近, 说明第一峰值频率对应的模式 1 在光电导天线的太赫兹波辐射中占据了主要作用。这也可以从实测微结构天线的双频峰值幅度比可以看出: 实测 eSRR\_2 的双频峰值幅度比 1/0.668 9 较 eSRR\_1(电开口谐振环的电容间隙尺寸一样)的 1/0.464 7 低一些, 这和前述微结构单元仿真的趋势也一致, 即随着微结构臂长减少, 对应的模式 1 增强, 模式 2 也随之减弱, 也即是第一峰值幅度明显高于第二峰值幅度。此外, 实测峰值频率均低于仿真值, 主要原因是仿真参数(如: 光电导材料的介电常数、介质实际厚度等不同, 也体现在等效介电常数不同)和实测参数存在一定误差。

对比参考文献[16]的偶极子天线, 调节偶极子长度从 20~200  $\mu\text{m}$ , 峰值频率仅从 0.35 THz 移动到了 0.25 THz, 也即是增加了 10 倍几何长度, 相对峰值频率仅向低频移动了 28%。而文中提出的 eSRR 微结构光电导天线的谐振臂长仅增加 20%, 相对第一峰值频率就移动了 18.60%, 说明通过调节微结构 eSRR 的光电导天线的谐振臂长, 可以获得较大的峰值频率调谐范围。实测谐振环臂长为 100  $\mu\text{m}$  时, 第一峰值频率 0.195 7 THz, 也恰好在太赫兹波辐射计的低频段的 0.19 THz 附近, 第二峰值频率为 0.334 2 THz。通过对微结构光电导天线的 eSRR 结构的个别参数调整, 可以有效调节光电导天线的太赫兹峰值频率, 并能实现较窄的频带特性, 从而满足太赫兹波低频段辐射计对非极性电介质探测的应用需求。

### 3 结 论

针对太赫兹波低频段辐射计在地球大气和分子探测的应用, 文中在电开口谐振环单元仿真分析基础上, 提出了基于电开口谐振环的新型可调的微结构太赫兹天线。加工了不同尺寸的具有电开口谐振环的微结构光电导天线, 并和传统的带状线偶极子光电导天线进行实验比对。基于太赫兹时域系统进

行了实际测试验证。结果表明:单元仿真和天线测试结果趋势一致,和等效的 LC 谐振理论模型吻合较好。仿真和实测结果综合表明:电开口谐振环微结构光电导天线较传统 II 型偶极子光电导天线的 3 dB 带宽的 93.07%减少了接近一倍,因此谐振特性更为明显;调节电开口谐振环参数少,调节其谐振频率方便,特别是谐振臂长仅增加 20%,实测频谱的相对第一峰值频率就移动了 15.45%,也就是说调节微结构谐振环的长度,可以获得较大的峰值频率调谐范围。也注意到了文中实测的微结构光电导天线较传统天线的信噪比改善并不显著,在太赫兹电场的探测方法,以及天线结构设计等方面都是以后需要注意和改进的地方。

参考文献:

[1] Lee Y S. Principles of Terahertz Science and Technology [M]. US: Springer, 2009.

[2] Zhang Xutao, Sun Jinhai, Cai He, et al. Quiet zone measurements and data processing of THz\_TDS experiment system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1125003. (in Chinese)  
张旭涛, 孙金海, 蔡禾, 等. 太赫兹时域光谱系统静区测试及数据处理[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1125003.

[3] Zuo Jian, Zhang Liangliang, Gong Chen, et al. Terahertz system on chip and research progress of terahertz ultra wide spectrum source based on micro nano structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 010704. (in Chinese)  
左剑, 张亮亮, 巩辰, 等. 太赫兹片上系统和基于微纳结构的太赫兹超宽谱源的研究进展[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 010704.

[4] Xia Zuxue, Liu Falin, Chen Junxue, et al. Impact of dipole photoconductive antenna structure on the THz radiation characteristics [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2429–2434. (in Chinese)  
夏祖学, 刘发林, 陈俊学, 等. 偶极子光电导天线结构对 THz 辐射特性影响的研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2429–2434.

[5] Khiabani N, Huang Y, Shen Y. Discussions on the main parameters of THz photoconductive antennas as emitters[C]// Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on IEEE, 2011: 462–466.

[6] Li Chenyu, Yang Zhou, Zhou Qingli, et al. Influence of structures on optical modulation in terahertz metamaterials[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0703002. (in Chinese)  
李晨毓, 杨舟, 周庆莉, 等. 结构对太赫兹超材料光调控特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0703002.

[7] Chen Xieyu, Tian Zhen. Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 86–97. (in Chinese)  
陈颢宇, 田震. 石墨烯太赫兹波动态调制研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 86–97.

[8] Zhang Lei, Liu Shuo, Cui Tiejun. Theory and application of coding metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 1–12. (in Chinese)  
张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 1–12.

[9] O’Hara J F, Chen H T, Taylor A J, et al. Split-ring resonator enhanced terahertz antenna [C]//Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications, Optical Society of America, 2007: TuB2.

[10] Takano K, Chiyoda Y, Nishida T, et al. Optical switching of terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 161114.

[11] Liu Minzhe, Wang Taisheng, Li Hefu, et al. Electrostatic field assisted micro imprint lithography technology[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(3): 663–671. (in Chinese)  
刘民哲, 王泰升, 李和福, 等. 静电场辅助的微压印光刻技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 663–671.

[12] Nguyen T K, Kim W T, Kang B J, et al. Photoconductive dipole antennas for efficient terahertz receiver [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 50–56.

[13] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial Devices[J]. *Nature*, 2007, 444(6): 597–600.

[14] Hughes S, Tani M, Sakai K. Vector analysis of terahertz transients generated by photoconductive antennas in near- and far-field regimes [J]. *Applied Physics*, 2003, 93(8): 4880–4884.

[15] Zhu N, Ziolkowski R W. Photoconductive THz antenna designs with high radiation efficiency, high directivity, and high aperture efficiency[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(6): 721–730.

[16] Miyamaru F, Saito Y, Yamamoto K, et al. Dependence of emission of terahertz radiation on geometrical parameters of dipole photoconductive antennas [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(21): 211104.