

基于光混频的太赫兹双频通信天线的设计和仿真

陈景源^{1,2}, 林中晞¹, 林琦^{1,2}, 苏辉^{1*}

(1. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 比较了宽带天线和窄带天线的优缺点, 设计了一种用于太赫兹无线通信的双频天线。其是由两个分层且垂直分布的偶极天线组成, 两天线处于高度不同的介质层上以避免互相干扰和短路, 并具有各自的 THz 扼流圈以提高性能。上层天线通过介质层开孔处的金属探针连接到低温砷化镓衬底, 实现了和下层天线共用一个光照区。上层和下层天线尺寸不同, 具有不同的工作频率, 在各自的偏置电压回路控制下, 不需要调整泵浦光就能实现垂直偏振的双频工作。通过调整尺寸, 还可使工作频率落在不同的大气窗口内。在 0.21 THz、0.35 THz、0.41 THz、0.68 THz、0.85 THz 和 0.93 THz 等大气窗口内, 其保持了偶极天线在单频点具有较高性能的优点: 最佳总效率分别为 14.9%、28.4%、33.9%、28.4%、21.6% 和 19.8%, 最大实际增益分别为 2.99 dB、10.6 dB、11.8 dB、18.4 dB、18.2 dB 和 18.3 dB。

关键词: 光混频; 太赫兹; 无线通信; 双层天线; 偶极天线; 双频

中图分类号: TN822+.4 **文献标识码:** A

Design and simulation of dual-frequency terahertz antenna for wireless communication by photomixing

CHEN Jing-Yuan^{1,2}, LIN Zhong-Xi¹, LIN Qi^{1,2}, SU Hui^{1*}

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: After comparing wide-band antenna and narrow-band antenna, a dual-frequency Terahertz antenna for wireless communication was designed. It consists of two dipole antennas which are located on two different layers and arranged vertically to avoid connection and interaction. The two dipoles both have THz chokes to improve performance, and different sizes to operate in two different frequencies. The upper dipole uses metal probe to connect the LT-GaAs substrate through the hole of substrate and shares the same photomixer with the lower dipole. The photomixer can be lighted by the same light for pumping, while the two dipoles can be controlled by different circuit for bias. So they can work at different frequencies and in vertical direction of polarizations. They can be adjusted for the air's low-loss frequencies by changing the size. The dual-frequency antenna has higher performance because of the two dipole antennas. At the air's low-loss frequencies of 0.21 THz, 0.35 THz, 0.41 THz, 0.68 THz, 0.85 THz and 0.93 THz, it has total efficiencies of 14.9%, 28.4%, 33.9%, 28.4% and 21.6% respectively, and max realized gains of 2.99 dB, 10.6 dB, 11.8 dB, 18.4dB, 18.2 dB and 18.3 dB respectively.

Key words: photomixing, THz, wireless communication, dual-layer antennas, dipole antenna, dual-frequency

PACS: 84.40. Ba, 84.40. Ua, 87.50. U-

引言

太赫兹波是频率为 0.1 ~ 10 THz 的电磁波,在无线通信领域潜力巨大,具有容量大、速度快、保密性强等优点,是未来 6 G 无线通信中极具优势的技术途径之一. 基于光混频器的太赫兹器件对振幅、相位、频率的调制,具有体积小、价格低、室温工作等优点,是一种潜在的太赫兹无线通信辐射源^[1]. 其工作原理是将两束差频为太赫兹的激光束照射到半导体材料制成的光混频器上,光混频器产生太赫兹频率的光生电流,再通过加有偏压的天线转化为连续太赫兹辐射^[2]. 目前的光混频器多使用低温砷化镓等半导体材料,在工作时的电阻通常在 10 k Ω 以上,而天线的输入电阻却远低于 10 k Ω ,两者之间存在着严重的阻抗失配,导致电信号大部分被反射而很难传输进天线,总效率和辐射功率都很低^[3-10]. 为了提高匹配效率,需要提高天线的输入电阻,有效方法之一是在偶极天线和偏压源之间的传输线上增加 THz 扼流圈^[6-11]. 但是,增加 THz 扼流圈的方法会牺牲天线的频率带宽,导致天线基本上只能单频输出,这就限制了太赫兹天线的实际应用范围:无线通信的上下行、频分复用等,都需要双频、多频天线. 为了扩展天线的工作频段,徐英等^[11]设计了工作波段分别为 0.2 THz 和 0.65 THz 的双频通信天线,但该天线在这两个波段的输入电阻都只有约 150 Ω ,远低于 10 k Ω ,阻抗失配严重. 为了提高双频太赫兹天线的输入电阻,本文将两个不同尺寸的偶极天线整合到一起,无需改变泵浦光的光路,只需在两天线间切换施加的偏压就能分别让不同的天线进入工作状态,从而辐射出两种不同频率的太赫兹波.

1 天线结构

太赫兹光电导天线需要很高的输入电阻才能获得较高的输出功率,而单个天线里很难同时兼具高输入电阻和高带宽两种特性,若将两个天线整合到一起则提供了这种可能性. 另外,由于天线需要用泵浦光激发光混频器,如果将多个天线的光照区分开,则需要额外的微透镜阵列,会增加系统装配难度,也会分散泵浦光的能量. 基于此,本文设计了如图 1 所示的双频天线,其由 Dipole 1 和 Dipole 2 这两个偶极天线组成. 在几何结构上,两偶极天线的阵子臂互相垂直,并分别处于不同的高度: Dipole 1 位于 LT-GaAs 衬底上; Dipole 2 位于厚度为 $d = 12 \mu\text{m}$ 的 Arlon AD 320 衬底 ($\epsilon_{r1} = 3.2$) 上,并且用金属探针连

接到 LT-GaAs 衬底. Arlon AD 320 衬底具有较大的厚度,用于避免两层天线之间的相互影响,其加工方式可参考文献[10]. Arlon AD 320 衬底中间开一个倾角 $\alpha = 80^\circ$ 的方形孔,用于供泵浦光通过. Dipole 1 和 Dipole 2 使用同一个宽度为 g 的光照区,通过分处于不同的高度以避免连上传输线后相互短路. 图 2 为 Dipole 1 天线及其所属传输线结构的俯视图: 两根传输线分别连接到偶极天线两臂,在传输线上加入了多对 THz 扼流圈以提高谐振频率处的输入电阻. Dipole 2 具有和 Dipole 1 相似的结构,只是在中间开孔处通过探针斜向下接到 LT-GaAs 衬底. 经过仿真优化后天线的参数设计为: $e_1 = e_2 = 4 \mu\text{m}$, $w_1 = w_2 = 4 \mu\text{m}$, $g_1 = g_2 = 10 \mu\text{m}$, $c_1 = c_2 = 2 \mu\text{m}$, $A_1 = 55 \mu\text{m}$, $A_2 = 42 \mu\text{m}$, $B_1 = 30 \mu\text{m}$, $B_2 = 30 \mu\text{m}$, $M_1 = 70 \mu\text{m}$, $M_2 = 42 \mu\text{m}$, $T_1 = 80 \mu\text{m}$, $T_2 = 100 \mu\text{m}$. LT-GaAs 和 GaAs 衬底的厚度分别为 3 μm 和 100 μm . 两个天线的金属部分都由厚度 0.5 μm , 导电率 $1.6 \times 10^7 \text{ S/m}$ 的金薄膜构成. 在 LT-GaAs 衬底底部贴合一个半径为 $R = 1.5 \text{ mm}$, 延伸高度 $T = 0.3R$ 的子弹形高阻硅透镜^[8,12],以利于太赫兹辐射波耦合到自由空间. 由于结构中的两个天线没有短接到一起,因此可以通过不同的偏压源进行独立控制. 泵浦光照射到光照区时,将偏压加到其中一个天线上就可以让该天线进入工作状态.

本文使用 CST 微波工作室软件对所设计天线进行仿真模拟,将光照区部分设置为内阻 $R_p = 10 \text{ k}\Omega$ 的离散端口,使用默认的高斯形脉冲激励. 每次只激励一个天线,以模拟单个天线工作的状态,并分别算出两个天线的特征参数. 太赫兹天线和传统微波天线差别较大^[13],如果只重点关注参数回波损耗 S_{11} 会很全面. 本文对以下特征参数进行了综合考虑,包括:输入电阻、匹配效率、辐射效率、总效率、方向性和实际增益 (realized gain 或 absolute gain). 其中匹配效率用于观察阻抗匹配的程度,和微波天线中的回波损耗 S_{11} 具有相似的作用^[14].

天线的总效率 η_t 等于^[15]

$$\eta_t = \eta_r \times \eta_m \quad (1)$$

其中 η_r 为辐射效率, η_m 为匹配效率.

匹配效率又可表示为

$$\eta_m = 1 - \left(\frac{Z_a - Z_p}{Z_a + Z_p} \right)^2 \quad (2)$$

其中, Z_a 为天线的输入阻抗, Z_p 为光照区的阻抗. Z_p 设为纯电阻,大小为 10 k Ω .

由式 1 可知,只有当辐射效率和匹配效率都较

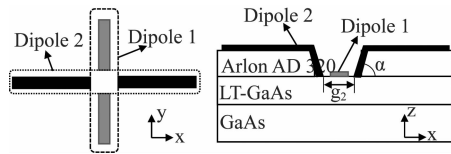


图1 双频天线结构示意图
Fig. 1 Geometry of the dual-frequency antenna

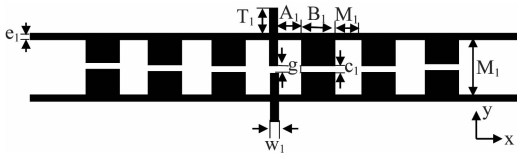


图2 Dipole 1 天线及其传输线的俯视图
Fig. 2 Top view of Dipole 1 and it's coplanar strip line

高时,才能得到较高的总效率.理想偶极天线的辐射效率正比于天线长度和工作波长的比值的平方^[14],虽然加上 THz 扼流圈后会有变化,但仍可以通过仿真来调整优化.由于天线光照区的电阻远高于输入电阻,由式 2 可知天线的输入电阻越高,越接近光照区电阻,匹配效率就越高.为了获得较高的输入电阻,我们设计天线的工作频段位于共振频率上,此时计算匹配效率也只需考虑阻抗的实部电阻.微波天线常使用增益系数 (gain) 来表征天线性能,但这个参数没有将匹配效率计算在内,并不适用于阻抗严重失配的太赫兹天线.实际增益系数包含了总效率和方向性系数,也等效于同时考虑了增益系数和匹配效率,该参数比增益更能准确表征太赫兹天线将输入电场能量转化为定向辐射的能力^[14].太赫兹天线辐射功率低,将越多的输入功率定向辐射越有利于提高通信距离.因此最大实际增益系数是太赫兹通信天线很重要的一个参数,可用于比较不同天线之间的性能.另外,太赫兹在空气中传输的低损耗透明窗口主要有 0.21 THz、0.35 THz、0.41 THz、0.68 THz、0.85 THz 和 0.93 THz 等频率^[16],在设计时还需要保证天线工作频率落在这些大气窗口中.

2 仿真结果和分析

2.1 偶极天线和蝶形天线

本文首次提出了纵向高度错位的天线设计方案,并对天线的辐射特性进行了比较研究.由于我们设计的是双频天线,为了有合适的对比标准,本文分别利用具有窄带和宽带辐射特性的偶极与蝶形天线

作为参照物,比较天线在不同大气窗口的辐射性能.这里先建立常见的单层天线模型并仿真计算其性能.由于砷化镓衬底厚度对天线性能影响很大,这里使用的单层天线模型都以上述双层天线模型为基础,去掉 Arlon AD 320 材料和上层天线 Dipole 2,再改变底层天线形状和尺寸.窄带天线以偶极天线为代表,其天线形状和图 2 中 Dipole 1 相似,只是改变了参数大小: $A_1 = B_1 = M_1 = 50 \mu\text{m}$, $T_1 = 130 \mu\text{m}$.宽带天线有螺旋、蝶形、对数周期天线等,单个天线即可覆盖上述的各大气窗口的工作频段,本文以蝶形天线为参照标准之一,其天线形状如图 3 所示: $g = 10 \mu\text{m}$, $L = 500 \mu\text{m}$.

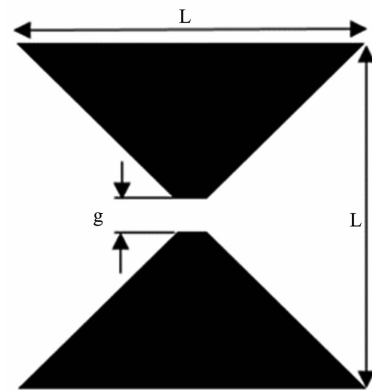


图3 蝶形天线结构图
Fig. 3 Geometry of the bowtie antenna

经仿真计算得到图 4 中蝶形天线的输入电阻、辐射效率和总效率.表 1 为各大气窗口处的各项性能指标的具体数值.从图和表中可以看出:该蝶形天线的输入电阻、辐射效率和总效率对频率变化不敏感,工作频段很宽;辐射效率基本在 50% ~ 80% 之间,但总效率都只在 2% 以下;输入电阻还不到 80Ω ,导致匹配效率很低,是引起总效率低下的主要原因.螺旋、对数周期等形状的宽带天线输入电阻也很低^[17],都会存在类似的问题.因此,对天线进行优化时,需优先考虑天线的输入电阻.相较之下,偶极天线虽然输出的是窄带信号,但是其总效率却远高于上述天线.如图 5 所示,偶极天线工作频率在 0.41 THz,总效率达到 20.5%.改变几何尺寸,参数 A_1 (B_1 、 M_1) 分别取 $110 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ 、 $31 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $23 \mu\text{m}$, T_1 分别取 $210 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、 $70 \mu\text{m}$ 、 $55 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 时,得到其他工作频率时的性能,如表 2.总体而言,偶极天线虽然只能在单一频率上工作,但是总效率都在 15% 以上,比蝶形天线高了一个数量级.宽带天线被广泛用在太赫兹时域系统 (THz-

TDS)上,是利用了其在很宽的工作频段内具有相似辐射性能的特点,能在一个脉冲内把各种频率的太赫兹波都辐射出去.然而如果作为太赫兹通讯天线,空气中的大气窗口有限,宽带天线在这几个有限的频段内性能反而远远不如单频工作的偶极天线.

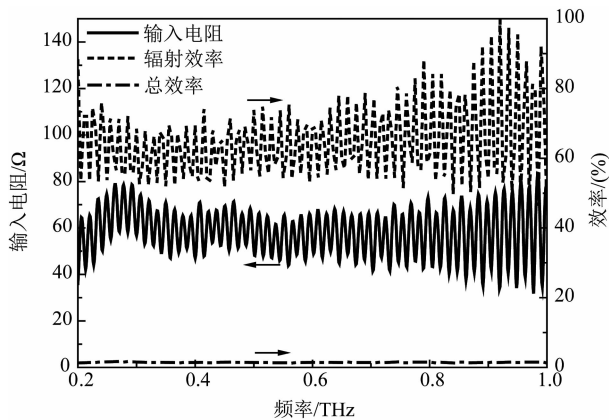


图4 蝶形天线的输入电阻、辐射效率和总效率
Fig. 4 Input resistance, radiation efficiency and total efficiency of the bowtie antenna

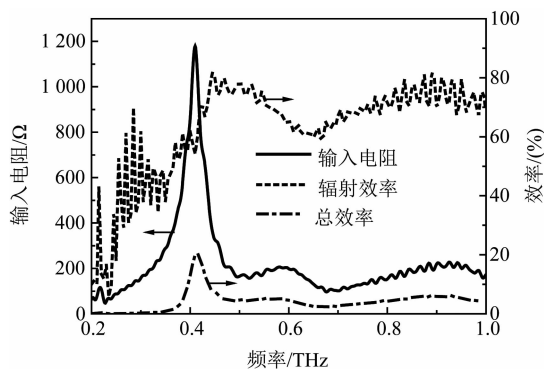


图5 偶极天线的输入电阻、辐射效率和总效率
Fig. 5 Input resistance, radiation efficiency and total efficiency of the dipole antenna

表1 蝶形天线的性能参数

频率/THz	0.21	0.35	0.41	0.68	0.85	0.93
输入电阻/ Ω	53.2	70.9	66.8	63.8	53.8	63.9
匹配效率/(%)	2.11	2.80	2.64	2.52	2.13	2.52
辐射效率/(%)	77.3	52.2	55.8	55.5	78.4	60.8
总效率/(%)	1.33	1.45	1.45	1.38	1.52	1.53
最大方向性系数/dBi	16.5	20.7	21.7	25.4	26	25.6

2.2 双频天线

基于偶极天线的优异单频辐射特性,再考虑扩展工作频段的要求,我们设计了可以工作在不同大气窗口的双频天线.如图1和图2给出的天线几何结构, Dipole 1和 Dipole 2分别工作在0.41 THz和

表2 偶极天线的性能参数

Table 2 Characters of the dipole antenna

频率/THz	0.21	0.35	0.41	0.68	0.85	0.93
输入电阻/ Ω	1394.4	1138.6	1051.5	970.2	930.9	897.9
匹配效率/(%)	42.9	36.7	34.4	32.2	31.2	30.2
辐射效率/(%)	38.1	53.1	60.2	61.6	59.1	58.2
总效率/(%)	15.9	19.3	20.5	19.8	18.3	17.4
最大方向性系数/dBi	14.5	16.6	18.6	21.3	21.9	24.3

0.68 THz处.图6和图7分别是 Dipole 1和 Dipole 2的输入电阻、辐射效率和总效率.两个天线的总效率峰值和输入电阻的峰值相重合,这是因为提高输入电阻对提高总效率起了主要作用.在0.41 THz处, Dipole 1的输入电阻为1631.2 Ω ,匹配效率、辐射效率和总效率分别为48.2%、34.2%和16.5%.在0.68 THz处, Dipole 2的输入电阻为1927.5 Ω ,匹配效率、辐射效率和总效率分别为54.2%、52.5%和28.4%.相比于蝶形天线, Dipole 1和 Dipole 2的辐射效率有所下降,但是因输入电阻较高而显著提高了匹配效率,所以总效率分别提高了11.4倍和20.6倍.相比于单频的单层偶极天线,本文的双频天线多了一个工作频率,同时也保持了其总效率较高的优点.

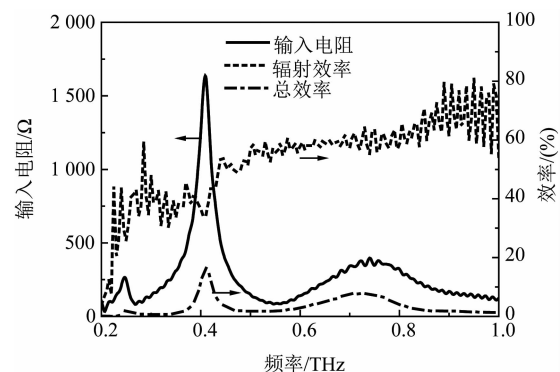


图6 Dipole 1的输入电阻、辐射效率和总效率
Fig. 6 Input resistance, radiation efficiency and total efficiency of Dipole 1

Dipole 1和 Dipole 2在谐振频率处的方向图分别如图8和图9所示,主瓣方向都朝着硅透镜方向,最大方向性系数分别为16 dBi和23.9 dBi.太赫兹光电导天线中,更高介电常数的衬底对辐射能量的引导作用更强,进入空气一侧的辐射能量较少^[18].由于 Dipole 1夹在 Arlon AD 320和低温砷化镓两层衬底材料之间,部分辐射能量会被引导向 Arlon AD 320衬底方向,而减少了辐射向硅透镜的能量.而 Dipole 2一侧为空气,一侧为 Arlon AD 320衬底,有更大比例的能量进入硅透镜方向.因此 Dipole 1的

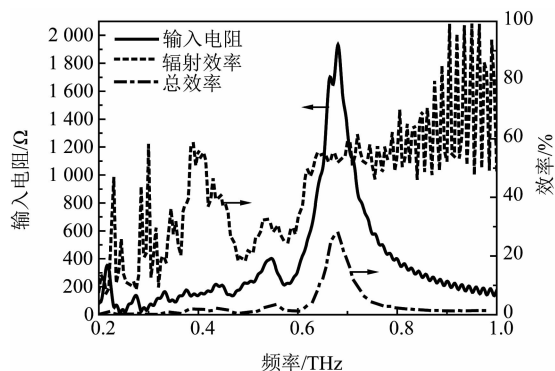


图7 Dipole 2 的输入电阻、辐射效率和总效率
Fig. 7 Input resistance, radiation efficiency and total efficiency of Dipole 2

最大方向性系数比 Dipole 2 的小,也比不上偶极天线和蝶形天线.虽然 Dipole 1 的最大方向系数较小,但是总效率依然较高,同时考虑这两个参数,可用最大实际增益系数来比较不同天线的性能差别.在文末对不同天线在各个大气窗口的最大实际增益系数进行了比较.

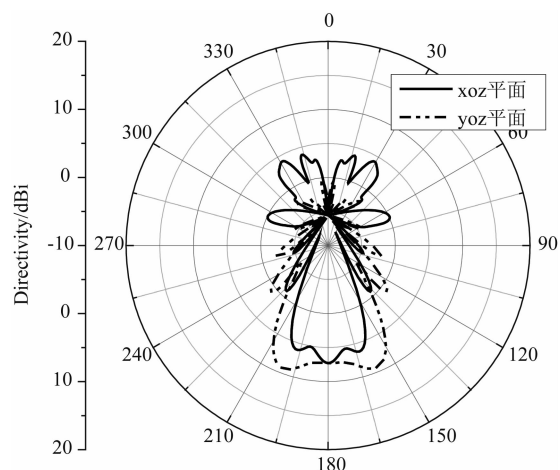


图8 Dipole 1 在 0.41 THz 的方向图
Fig. 8 Radiation patterns of Dipole 1 at 0.41 THz

微波段的偶极天线的工作(共振)频率和天线长度有关^[14],而适用于太赫兹波段的偶极天线还与传输线和扼流圈的尺寸有关^[3,15].为了满足不同大气窗口应用的需要,本文设计采用选择性等比例缩放的手段来调节天线的结构参数,以获得最佳的辐射特性.对于本文所设计的双频天线,Dipole i ($i = 1$ 和 2) 共振频率主要与 A_i 、 B_i 、 M_i 、 T_i 这四个参数有关,等比例缩放这四个参数的大小,可近似等效于对整个天线、传输线和扼流圈都进行几何尺寸的缩放.对于诸如 c_i 、 e_i 、 g_i 、 w_i 等其他参数,考虑到工艺角度

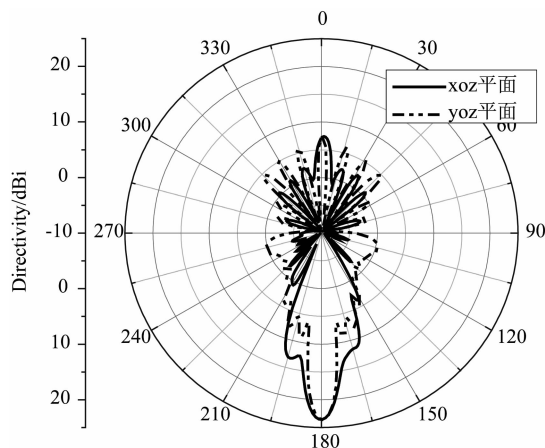


图9 Dipole 2 在 0.68 THz 的方向图
Fig. 9 Radiation patterns of Dipole 2 at 0.68 THz

和光斑等因素,维持不变.两个天线几何尺寸的缩放比例和工作频率及总效率的关系如图 10 所示. Dipole 1 的尺寸从缩小 60% 变化到放大 100% 的过程中,其工作频率从 0.97 THz 减小到 0.21 THz,并且其减小速度在高频时快,低频时慢.总效率的范围在 23.1% 到 7.6% 之间,在高频时较高,低频时较低. Dipole 2 的尺寸从缩小 30% 变化到放大 120% 的过程中,其工作频率从 0.95 THz 减小到 0.33 THz,其减小速度也是在高频时快,低频时慢.总效率的范围在 33.5% 到 19.3% 之间,在中频时较高,高频和低频时较低.根据这个变化规律,Dipole 1 和 Dipole 2 就可以分别取合适的尺寸大小,组合出 0.21 THz、0.35 THz、0.41 THz、0.68 THz、0.85 THz 和 0.93 THz 中的任意两个工作频率,其具体性能参数分别如表 3 和表 4 所示.表 5 列出了各天线的最大实际增益系数,用于比较各天线的性能.综合比较五个表格中的不同天线的性能,可以总结为:双频天线只有在 0.21 THz 处性能较差,在其他频率处都保持了单频偶极天线的高性能.相比于蝶形天线,双频天线在各频率处都具有显著的性能提升.相比于文献 8 所设计的太赫兹双频通信天线,本文所述天线对输入电阻有 6 到 16 倍的提高,并且其相互垂直的偏振方向也有助于减小信号干扰.

表 3 Dipole 1 的性能参数
Table 3 Characters of Dipole 1

频率/THz	0.21	0.35	0.41	0.68	0.85	0.93
输入电阻/ Ω	1395.5	1602.4	1631.2	1369.5	1176	1209.9
匹配效率/(%)	42.9	47.6	48.2	42.4	37.7	38.5
辐射效率/(%)	18.6	28.4	34.2	50.1	54.7	51.1
总效率/(%)	7.59	13.4	16.5	20.9	20.5	19.7
最大方向性系数/dBi	10.9	14.9	18	24.3	25.1	25.4

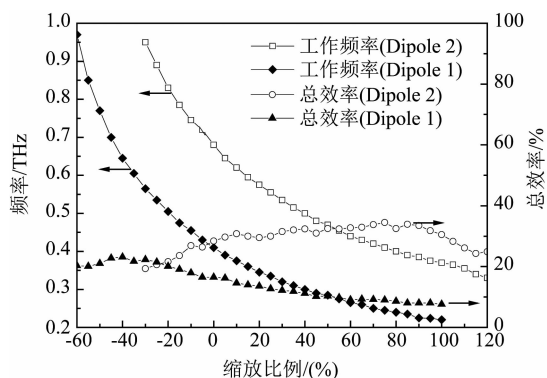


图 10 天线尺寸与天线特性的关系

Fig. 10 The relationship between the antenna's size and character

表 4 Dipole 2 的性能参数

Table 4 Characters of Dipole 2

频率/THz	0.21	0.35	0.41	0.68	0.85	0.93
输入电阻/ Ω	910.1	1549.3	2407.7	1927.5	1272.6	1155.7
匹配效率/(%)	30.5	46.5	62.6	54.2	40.1	37.1
辐射效率/(%)	49.1	61.7	54.7	52.5	55.2	53.4
总效率/(%)	14.9	28.4	33.9	28.4	21.6	19.8
最大方向性系数/dBi	11.2	16.1	16.5	23.9	23.9	23.7

表 5 各天线最大实际增益系数

Table 5 Realized maximum gains of different antennas

频率/THz	0.21	0.35	0.41	0.68	0.85	0.93
蝶形天线/dB	-2.31	2.36	3.3	6.77	7.8	7.49
偶极天线/dB	6.56	9.42	11.7	14.3	14.5	16.7
Dipole 1/dB	-0.295	6.12	9.79	17.5	18.2	18.3
Dipole 2/dB	2.99	10.6	11.8	18.4	17.2	16.7

3 结论

本文比较了宽带天线和窄带天线各自的优缺点,设计了一种适用于无线通信的太赫兹双频天线.其结构由两个偶极天线垂直分布组成,并且尺寸大小不同,对应着不同的工作频率.两天线处于高度不同的衬底上以避免互相干扰和短路,并具有各自的 THz 扼流圈以提高输入电阻、匹配效率和总效率等辐射性能.下层天线和传统单层天线相似,而上层天线通过金属探针连接到底部的 LT-GaAs 衬底,以实现两个天线共享一个光照区.通过选择在不同天线上施加偏压,就能辐射出两种频率的垂直偏振的太赫兹波.两天线可选择不同的尺寸大小,从而具有 0.21 THz、0.35 THz、0.41 THz、0.68 THz、0.85 THz 和 0.93 THz 等大气窗口中的任意两个.该双频天线在这些频率处的最佳性能可达到:总效率分别为 14.9%、28.4%、33.9%、28.4%、21.6%,最大实际增益分别为 2.99 dB、10.6 dB、11.8 dB、18.4 dB、

18.2 dB、18.3 dB.双频天线在 0.21 THz 以外的在各频率处都保持了单频偶极天线的高性能.相比于蝶形天线,双频天线在各频率处都具有显著的性能提升.

References

- [1] YAO Jian-Quan, CHI Nan, YANG Peng-Fei, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology[J]. *Chinese Journal of Lasers* (姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等.太赫兹通信技术的研究与展望.中国激光),2009, **09**: 2213-2233.
- [2] Matsuura S, Ito H. *Generation of CW terahertz radiation with photomixing, terahertz optoelectronics* [M], Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 157-202.
- [3] Ezdi K, Kleine-Ostmann T, Koch M. Numerical simulation of photoconductive Dipole antennas; the effect of the DC bias striplines [C]. *16th International Symposium on Space Terahertz Technology*, 2005: 305-308.
- [4] Celik S B, Demir K, Sahin A B, *et al.* Design of a phase shifting impedance tuner for terahertz photomixers arrays [C]. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting*, 2017: 1281-1282.
- [5] 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.
- [6] CHEN Jing-Yuan, LIN Zhong-Xi, LIN Qi, *et al.* Numerical analysis of high radiation intensity Dipole antenna arrays with terahertz chokes[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (陈景源,林中晞,林琦,等.高辐射强度的带 THz 扼流圈的偶极天线阵列模拟分析.红外与毫米波学报), 2018, **37**(06): 657-662.
- [7] Duffy S M, Verghese S, McIntosh A, *et al.* Accurate modeling of dual dipole and slot elements used with photomixers for coherent terahertz output power[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(6): 1032-1038.
- [8] Nguyen T K, Han H, Park I. Full-wavelength Dipole antenna on a hybrid GaAs membrane and Si lens for a terahertz photomixer[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, **33**(3): 333-347.
- [9] Woo I, Nguyen T K, Han H, *et al.* Four-leaf-clover-shaped antenna for a THz photomixer[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(18): 18532-18542.
- [10] Yin W, Kennedy K, Sarma J, *et al.* A photomixer driven terahertz Dipole antenna with high input resistance and gain [J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2015, **44**: 13-20.
- [11] XU Ying, HONG Zhi. Optimization design of dual-frequency dipole antenna for continuous-wave THz radiation [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*. (徐英,洪治.连续 THz 波双频偶极天线优化设计.浙江大学学报(工学版)) 2012, **04**: 734-738.
- [12] Filipovic D F, Rebeiz G M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical quartz dielectric lenses [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1993, **14**(10): 1905-1924.

(下转第 507 页)