2015年12月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2015)06-0870-07

光电导天线太赫兹波辐射特性研究进展

闫兴伟,魏志强,李春化

(西安电子工程研究所,陕西西安710100)

摘 要:太赫兹科学技术已经成为当前电磁领域研究的热点,太赫兹波的产生是其关键技术, 光电导天线(PCA)是目前产生宽频太赫兹波的重要手段。根据光电导天线太赫兹波的辐射特性的文 献报道,对光电导天线产生太赫兹波的耦合输出效率、辐射场型、极化特性等研究进展做了较全 面的评述,并针对光电导天线辐射特性对光电导天线应用的意义进行了探讨和展望,以期对光电 导天线产生太赫兹波的研究和应用提供参考。

关键词:光电导天线;耦合输出;太赫兹波;极化 中**图分类号:**TN820.1 **文献标识码:**A **doi**

doi: 10.11805/TKYDA201506.0870

Progress on the terahertz wave radiation properties of Photoconductive Antenna

YAN Xingwei, WEI Zhiqiang, LI Chunhua

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Terahertz(THz) science and technology has become a hotspot in electromagnetic field recently, in which the generation of terahertz wave is the key technology, and Photoconductive Antenna(PCA) is currently the typical approach for terahertz wave generation. The recent progresses of output coupling properties of THz wave generated by PCA are reviewed, including the output coupling efficiency, radiation patterns, as well as polarization properties. The significance of photoconductive antenna radiation characteristics research on photoconductive antenna application is discussed and prospected, which gives a guide for the research and applications of the THz wave generated by PCA.

Key words: Photoconductive Antenna; output coupling; terahertz wave; polarization

近年来,太赫兹(THz)波的研究和应用在世界范围内受到了极大关注^[1],太赫兹波是指频率范围为 0.1 THz~ 10 THz,即波长范围在 30 μm~3 mm 的电磁波,介于微波与红外之间,是电磁波谱中唯一没有获得全面研究并加 以很好利用的最后一个波谱区间。太赫兹辐射源是太赫兹技术研究的关键,也是太赫兹技术应用的基础,太赫兹 源的性能很大程度上决定了太赫兹波的应用前景和发展潜力。太赫兹波的产生可以采用全电子学方法,例如倍频 和振荡器等;也可以采用光学方法,例如光混频、光整流和光电导天线(PCA)^[2]等;相比其他太赫兹源,利用光 电导天线可获得具有相干性的超宽带太赫兹脉冲,但同时也具有太赫兹波不可调谐、平均功率低和光-太赫兹转 换效率低的缺点,目前报道的光电导天线辐射的太赫兹波带宽可达 30 THz^[3],辐射功率为 287 μW^[4],光-太赫兹 转换效率为 7%^[5]。光电导天线广泛应用于太赫兹时域光谱系统^[6]和高分辨力成像^[7]等领域,以其良好的性能、广 阔的应用前景已经成为一个热门研究课题,因此对太赫兹光电导天线辐射特性的研究具有非常重要的意义,本文 将对光电导天线太赫兹波辐射特性的研究进展做详细的论述。

1 光电导天线工作原理

光电导天线产生 THz 脉冲的原理与传统天线有很大的不同,图 1 所示为典型光电导天线结构示意图,光电导天线由半导体基底(如 GaAs、InP 等)和制作在半导体基底上平行的 2 个金属电极构成。当使用光电导天线辐射太赫兹波时,在 2 个金属电极上加偏置电压,飞秒激光器辐射的激光脉冲辐照在光电导天线的 2 个电极之间,当光子能量大于半导体禁带宽度时,半导体基底材料中的电子从价带跃迁到导带,从而在半导体基底材料表面激发

出自由载流子(电子空穴对),在金属电极施加的偏置电压驱动下,2种载流子向相反的方向作加速运动,产生瞬态光电流,辐射出皮秒脉宽的太赫兹波脉冲。光电导天线也可用来探测太赫兹波,其物理过程为其产生太赫兹波的逆过程,将图1中的偏置电源改成电流表,入射的太赫兹波在金属电极间形成电场,飞秒激光脉冲在半导体衬底上产生的自由载流子在太赫兹电场作用下形成电流,测得的电流强度与太赫兹电场成正比。通过改变飞秒激光和太赫兹波之间的延迟,可获得完整的太赫兹脉冲波形。



2 光电导天线辐射特性

光电导天线的辐射特性类似于自由空间中振荡偶极子的辐射特性,但是由于光电导天线需要制作在基底上, 受到基底/空气界面的影响^[8],光电导天线的辐射特性会发生很大变化,主要表现为其辐射方向图具有强指向性。 图 2 为在介电基底上制作的偶极子天线的运场辐射方向图,基底材料的介电常数分别为 1,4 和 12,其中介电常 数为 1 时对应的辐射场为自由空间中偶极子天线的辐射场,图 2(a)和图 2(b)分别为偶极子天线 H 面(垂直于偶极 子电流传输方向的平面)和 E 面(平行于偶极子电流传输方向的平面)的辐射方向图。随着介电常数 ε 的增加,在基 底/空气界面处辐射场降为 0,在基底介质的临界角处,H 面辐射场达到最大值,而在 E 面,在临界角处辐射场 为 0,并且辐射进入空气的太赫兹波和进入基底介质的太赫兹波的功率比约为 1: ε^{3/2}或 1:n³,其中 ε 和 n 分别为 基底介质的介电常数和折射率。对于砷化镓基底,其折射率为 3.6^[9],对应的功率比为 1:46.7,说明光电导偶极 子天线的辐射功率大约 98%进入到基底中。图 3 为实验测试和理论计算得到的 E 面和 H 面偶极子天线的远场辐 射方向图,理论计算的结果和实验测试结果符合得很好。辐射进入基底的太赫兹波在另一基底/空气界面将发生 全反射的现象,根据菲涅尔定律,只有在临界角内(对砷化镓基底,临界角约为 16°,对于硅基底,其折射率为 3.42^[9],临界角约为 17°)的辐射可以从基底耦合到空气中,而其他角度的辐射会由于全反射的原因陷入基底。

air





Fig.2 Far field radiation pattern of dipole antenna on a dielectric substrate 图 2 制作在介电基底上的偶极子天线远场辐射方向图



Fig.3 Far field radiation pattern of dipole antenna as measured experimentally(crosses) and computed theoretically(line)
图 3 偶极子天线远场辐射方向图的实验测试结果(十字点)和 理论计算结果(实线)

3 光电导天线耦合输出辐射特性

为了提高辐射进入基底的太赫兹波束的耦合输出和改善太赫兹辐射的方向性,目前最常用的方法是通过基底上贴合透镜来改善其性能。制作透镜的材料通常选用高阻硅,因为其折射率(3.4)与基底材料折射率相近,可以减小基底和透镜界面之间的反射,并且这种材料对太 赫兹波透明且几乎没有吸收和色散。

目前主要使用的透镜种类有准直透镜^[10](图 4(a))和 超半球透镜^[11](图 4(b)),对于准直透镜,发射体的位 置在透镜的焦点处,因此辐射出透镜的波束近似于准 直波束,但是当入射角度接近临界角时会有强衍射现 象和波前畸变现象,当入射角度大于临界角时,波束 由于全反射现象陷入到透镜里不能辐射出去,图 4(a)





中虚线为全内反射光线。对于准直透镜,发射体到透镜 顶端的距离 d 为:

$$d = R(\frac{n}{n-1}) \tag{1}$$

式中: R 为透镜球面的半径; n 为透镜材料的折射率。

而对于超半球透镜,发射体位于使得陷入透镜内的 波束最少的位置,超半球透镜为等光程透镜,在这种设 计中发射体到透镜顶端的距离 *d* 为:

$$d = R\left(\frac{n+1}{n}\right) \tag{2}$$

P U Jepsen 等人研究了在光电导天线基底贴合准直 透镜时耦合输出的太赫兹波辐射特性^[12],由于太赫兹波 的波长与透镜尺寸相比不能忽略,因此透镜的衍射效应 对辐射特性产生很大影响。根据入射到透镜内表面的太 赫兹波只有小于临界角的部分可以耦合出透镜进入空 气,通过理论计算入射到透镜内表面的电磁能量和辐射 到透镜外表面的电磁能量,可以得出仅有 21%的太赫兹 波功率可以通过透镜耦合输出到空气中。实验测试了透 镜耦合输出太赫兹波辐射的方向图,图5为透镜耦合太 赫兹波辐射测试系统,探测器与准直透镜顶端的垂直距 离为 35 mm, 通过位移台来移动探测器的位置以获得不 同位置测得的太赫兹波辐射强度。为了提高探测空间分 辨力,探测光电导天线未加耦合透镜,与加透镜时相比, 由于接收太赫兹波面积减小,空间分辨力有所提高,但 是接收信号强度减小了约 1000 倍。实验测试的结果与 理论计算的结果如图 6 所示,可以发现,由于透镜衍射 效应的影响,从透镜耦合输出的太赫兹波主瓣的远场辐 射方向图可以看作以透镜有效孔径作为束腰尺寸的高斯 波束,其辐射场型与太赫兹波的频率相关,频率越高, 太赫兹波束的主瓣宽度越小。

J V Rudd 等人研究了超半球透镜和准直透镜对光电 导天线太赫兹波辐射特性的影响^[13]。图 7 为通过理论计 算得到的不同尺寸透镜正向耦合输出的太赫兹波(*θ*=0°) 各频率分量的幅度,随着透镜半径的增加,太赫兹波的



Fig.5 Testing setup of lens coupled terahertz radiation measurement 图 5 透镜耦合太赫兹辐射测试装置



Fig.6 Far field radiation pattern of teraneriz waves at different frequencies as measured experimentally(symbols) and computed theoretically(lines)

图 6 不同频率太赫兹波的远场辐射图形的实验测试结果(符 号)与理论计算结果(实线)

低频分量幅度相对增加,高频分量幅度相对减小,太赫兹波的带宽减小。超半球透镜对不同的频率分量的影响差 异很大,对于准直透镜,随着透镜半径的增加其正向辐射强度增加,但透镜尺寸对各频率分量影响较小,只有当 透镜半径较大时才有明显影响。图 8 为实验测试装置图,使用光纤耦合光电导天线系统测试透镜耦合输出太赫兹 波的辐射特性,透镜的半径为4 mm,放置在接收天线前的线栅极化器滤除了太赫兹辐射的正交极化分量,通过 轨道的移动来改变接收光电导天线的位置可以获得光电导天线在 E 面和 H 面的辐射特性。图 9 和图 10 分别为在 E 面和 H 面不同角度实验测得的各频率分量的辐射强度图形,通过对角度和频率积分可以获得在 E 面和 H 面的 总辐射能量。由于准直透镜使得更多太赫兹波陷入透镜内,使用超半球透镜时在 E 面和 H 面的总辐射能量比使 用准直透镜分别高约 80%和 50%。

F Formanek 等人研究了聚焦硅透镜对光电导天线太赫兹波辐射特性的影响^[14]。由于目前在太赫兹时域光谱 成像系统中通常使用透镜和离轴抛物面反射镜的组合来聚焦太赫兹波束,而使用聚焦透镜直接聚焦太赫兹波束对 于实现紧凑的太赫兹时域成像系统具有重要意义。图 11 为半个聚焦非球面镜和聚焦球面镜的结构示意图及射线 追踪图,光电导天线辐射出的太赫兹波经聚焦透镜耦合后可直接在透镜焦点聚焦,非球面聚焦透镜和球面聚焦透 镜的全内反射角分别为 38.9°和 30.3°,图中同时给出了透镜内部光电导天线的辐射方向图。当时域光谱系统的发 射光电导天线和接收光电导天线使用非球面聚焦硅透镜时,探测到的时域信号幅度为使用球面硅透镜的 4.6 倍,信 噪比改善大约 12 dB,同时减小了在焦平面上的太赫兹波束直径。图 12 为聚焦透镜耦合光电导天线辐射的太赫 兹波在焦平面上辐射强度的实验测试结果与理论计算结果,可以发现,考虑了光电导天线辐射方向图和像差时的 理论计算结果与实验测试结果能很好地符合,说明在设计用于光电导天线的硅透镜时考虑像差和发射体辐射方向 图的重要性。



与理论计算结果(虚线和实线)

除了使用透镜耦合的方法,LID等人提出了将光电导天线和圆锥喇叭集成在一起(光电导喇叭天线)的方法来 提高光电导天线辐射太赫兹波的方向性^[15]。图 13为光电导喇叭天线结构示意图,图 14为光电导喇叭天线太赫 兹波辐射方向图的模拟结果,其在特定设计方向的功率增益为 18.7 dBi,半功率波瓣宽度(Half Power Beam Width,

(3)

HPBW)约为16°,模拟结果表明通过此结构可以改变光电导天线的辐射特性,可产生具有强指向性的太赫兹波,并使得光电导天线辐射的太赫兹波功率沿着设计的方向传播,这为提高光电导天线辐射太赫兹波的方向性研究开拓了一个新的发展方向。





100%

100%

 Fig.15 Polarization characteristics of the THz emission from stripline, conventional dipole, and offset dipole emitters
图 15 带状线、传统的偶极天线和偏馈偶极天线辐射太赫兹

波的极化特性

100%

4 光电导天线辐射太赫兹波正交极化特性研究

图 14 光电导喇叭天线辐射方向图

理想情况下,可以把光电导天线的辐射近似为理想的偶极子天线的辐射,产生线极化电磁波,极化方向为 偶极子电流传输的方向(垂直于组成光电导天线的金属线)。但实际的太赫兹波辐射系统可能并不是理想的,其辐射的极化态也不是纯线性的,会产生正交极化分量。

Y CAI 等人通过在探测器前面放置线栅极化器测试了不同结构光电导天线辐射太赫兹波的主极化分量和正 交极化分量的电场强度值^[16],图 15为带状线偶极天线、传统的偶极天线和偏置偶极天线的结构图,以及对应的 主极化分量和正交极化分量的强度比值,同时也给出了飞秒激光触发脉冲在光电导天线上的辐照位置。结果表明, 与主极化分量太赫兹波的电场强度相比,带状线偶极天线正交极化电场强度分量为 0,传统的偶极天线为 7%,偏置偶极天线可达到 25%。这个结果说明太赫兹波辐射的极化方向和载流子传输的方向相关,同时也说明可以通 过改变光电导天线结构来控制太赫兹波辐射的极化方向。



F Gare 等人研究了太赫兹波系统的对称性对极化的影响^[17],图 16 所示为实验测试装置示意图及测试原理图, 研究人员在发射光电导天线和接收光电导天线之间加入 2 个相同的双折射 LiNbO3 晶体,其中第一个晶体作为极 化器,第 2 个晶体作为分析器。设发射光电导天线的极化角为 θ ,极化器的角度为 ψ ,分析器的角度为 α ,根据 双折射晶体的特性,在接收天线测得的太赫兹波强度 $E(\omega)(\omega)$ 为太赫兹脉冲的角频率)成比例于:

 $\left|\cos(\psi-\theta)\cdot\cos(\alpha-\psi)\right|$

由式 3 可知,由于 3 个角度中只有光电导天线的极化角 θ 未知,因此可以通过改变极化器的角度 ψ 来得到 太赫兹波的强度 *E*(ω)和 ψ 的关系曲线。将在极化器不同角度时实验测得的沿晶体快轴方向传播的太赫兹波通过 傅里叶变换得到其频谱,可以得到各频率分量的幅度和极化器的角度 ψ 的关系。通过数值计算(式 3)得到的曲线 与实验获得的 *E*(ω)和 ψ 关系的曲线进行拟合可以得到光电导天线极化角度 θ 的值。图 17 为频率为 344 GHz 时实 验数据和理论拟合所得的曲线,根据拟合的结果可以得到光电导天线极化角 θ 的值约为77.9°。

文中还研究了透镜相对天线位置对太赫兹波极化特性的影响,如图 18 所示,沿着正方形(边长 350 μm)的 4 个顶点改变透镜的位置,测得透镜在 4 个位置时太赫兹波的不同频率分量和极化角度的关系曲线,可以发现对不 同的位置,其频率-极化角度曲线也不同,虽然移动的距离仅仅为透镜直径的 2%,但是对于极化角的影响是非 常明显的,例如在频率 600 GHz 和 700 GHz 之间,在位置 1 和位置 2 时极化角度的差异可达 40°。



J V Rudd 等报道了透镜耦合输出太赫兹波的正交极 化分量辐射特性^[18]。使用光纤耦合太赫兹系统测试了光 电导天线 E 面辐射的正交极化分量,其中发射光电导天 线和接收光电导天线都使用超半球透镜耦合传输太赫兹 波,使用线极化栅滤除太赫兹波的主极化振动分量。图 19 为不同频率太赫兹波辐射强度随测试角度的变化曲 线,其中空心圆线为实验测得的数据,实线为理论计算 的结果,研究结果表明光电导偶极天线正交极化辐射表 现为四极发射。









图 19 不同频率太赫兹波正交极化辐射的实验测试结果(空心圆 线)与理论计算结果(实线)

5 结论

光电导天线太赫兹波的辐射特性研究对于光电导天线的应用具有重要意义,例如:光电导天线太赫兹波的辐射特性研究有助于太赫兹极化雷达的研制,太赫兹极化雷达利用目标的极化信息进行目标识别,由于雷达探测的目标具有改变探测信号极化方式的特性,即对不同极化方式的电磁波有不同的极化散射,因此可以通过控制发射电磁波的极化来获得目标的极化信息,达到目标识别的目的。鉴于目前光电导天线辐射的太赫兹波的功率较低,因此光电导天线应用在太赫兹雷达目标雷达横截面(Radar Cross-Section, RCS)测试是很好的应用方向^[19]。

太赫兹时域光谱技术是在太赫兹频率范围内测试材料光学常数(折射系数和吸收系数)最常用的方法,各向同性的材料可以通过非线极化的太赫兹波测试,但值得注意的是,研究各向异性的材料的光学常数则要求线极化波,并且各向异性材料光轴与太赫兹波极化方向的夹角直接影响测试得到的光学常数的结果^[20]。

光电导天线太赫兹波的耦合输出研究对设计太赫兹光学系统具有指导意义。例如,不同透镜耦合输出的太赫 兹波具有不同的特征,超半球透镜可以耦合输出更多的太赫兹能量,但是其正向辐射带宽较小,且对不同频率影 响不同;使用准直透镜耦合输出的太赫兹波正向辐射具有更大的带宽,但输出太赫兹能量相对小,因此可以根据 应用选用不同的透镜以获得不同辐射特征的太赫兹波^[13]。

本文对光电导天线产生太赫兹波的辐射特性研究进展做了较为全面的评述,光电导天线基底材料的折射率、 太赫兹波的耦合输出方式、太赫兹系统的对称性等因素都可以影响光电导天线产生太赫兹波的辐射特性,光电导 天线太赫兹波的辐射特性的研究对光电导天线的应用具有指导意义。相信随着研究人员对光电导天线研究的不断 深入,光电导天线在太赫兹领域将有越来越广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [2] Mourou G A,Stancampiano C V,Antonetti A,et al. Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser driven semiconductor switch[J]. Applied Physics Letters, 1981,39(4):295-296.
- [3] SHEN Y C, Upadhya P C, Linfield E H, et al. Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters[J]. Applied Physics Letters, 2003,83(15):3117-3119.
- [4] Suen J Y,LI W,Taylor Z D,et al. Characterization and modeling of a terahertz photoconductive switch[J] Applied Physics Letters, 2010,96:141103.
- [5] YANG S H,Hashemi M R,Berry C W,et al. 7.5% optical-to-terahertz conversion efficiency offered by photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(5):575-581.
- [6] 刘乔,李泽仁,孟坤. 太赫兹时域光谱技术用于药品检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(3):283-286. (LIU Qiao,LI Zeren,MENG Kun. Medicine inspection by the terahertz time domain spectroscopy technique[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):283-286.)
- [7] 郭澜涛,牧凯军,邓朝,等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013,42(1):51-56. (GUO Lantao,MU Kaijun, DENG Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(1):51-56.)
- [8] Brewitt-Taylor C R,Gunton D J,Rees H D. Planar antennas on a dielectric surface[J]. Electronics Letters, 1981,17(20): 729-731.
- [9] Grischkowsky D,Keiding S R,Van Exter M.et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990,7(10):2006-2015.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press, 1965.
- [11] Rutledge D B,Neikirk D P,Kasilingam D P,et al. Integrated circuit antennas in infrared and millimeter waves[J]. Academic, 1983,76(1):1-24.
- [12] Jepsen P U, Keiding S R. Radiation patterns from lens-coupled terahertz antennas [J]. Optics Letters, 1995,20(8):807-809.
- [13] Rudd J V,Mittleman D M. Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002,19(2):319-329.
- [14] Formanek F,Brun M A,Umetsu T,et al. Aspheric silicon lenses for terahertz photoconductive antennas[J]. Applied Physics Letters, 2009,94:021113.
- [15] LI D,HUANG Y,SHEN Y,et al. Development of a THz photoconductive horn antenna[C]// Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona, Spain: [s.n.], 2010:1-4.
- [16] CAI Y,Brener I,Lopata J,et al. Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas[J]. Applied Physics Letters, 1997,71(15):2076-2078.
- [17] Gare F,Duvillaret L,Coutaz J L. Evidence of frequency dependent THz beam polarization in time-domain spectroscopy [C]// Terahertz Spectroscopy and Applications. Santa Barbara,CA,USA:[s.n.], 1999,30-37.
- [18] Rudd J V, Johnson J L, Mittleman D M. Quadrupole radiation from terahertz dipole antennas[J]. Optics Letters, 2000, 25(20):1556-1558.
- [19] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements [J]. Optics Express, 2010,18(25): 26399-26408.
- [20] Pastol Y, Arjavalingam G, Halbout J M, et al. Dielectric properties of uniaxial crystals measured with optoelectronically generated microwave transient radiation[J]. Applied Physics Letters, 1989,55(22):2277-2279.

作者简介:



闫兴伟(1982-),男,吉林省双辽市人,博士, 工程师,主要从事太赫兹技术和雷达系统设计. email:yan.xingwei@stu.xjtu.edu.cn. 魏志强(1974-),男,安徽省利辛县人,博士, 高级工程师,主要从事电磁散射与建模、SAR信 号与数据处理、雷达系统工程、太赫兹技术等.

李春化(1964-),男,陕西省扶风县人,博士, 研究员,主要从事气象雷达、太赫兹技术、信号 处理等.