光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021092501

用光电导天线产生太赫兹电磁波的饱和效应研究

薛　红*，席彩萍

（渭南师范学院 物理与电气工程学院，陕西 渭南 714099）

摘　要： 根据半导体光电子学理论，分析了光注入非平衡载流子（电子-空穴对）的瞬态输运机理，研究了不同条件下的SI-GaAs光电导偶极天线太赫兹波辐射功率和辐射强度的饱和效应。结果表明其主要原因是在外加偏置电场作用下，光注入载流子出现了空间电荷电场屏蔽和辐射电场屏蔽现象，对提高太赫兹波辐射功率和辐射强度起到了遏制作用。对于电极间隙大小不同的天线，两种屏蔽效应的作用不同；在触发光能一定的情况下，照射光斑较大时屏蔽效应较小。

关键词： 光电导天线；太赫兹波；载流子；饱和效应

中图分类号：TN820　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0936－04

Research on Saturation Effect of THz Electromagnetic Wave Generated from Photoconductive Antenna

XUE Hong, XI Caiping

(School of Physics and Electrical Engin., Weinan Teachers University, Weinan 714099, CHN)

Abstract: According to the theory of semiconductor optoelectronics, the transient transport mechanism of light-injected non-equilibrium carriers (electron-hole pairs) was analyzed, the saturation effect of THz wave radiation power and radiation intensity in SI-GaAs photoconductive dipole antenna under different conditions was studied. The main reason is that, under the action of DC bias electric field, the space charge electric field shielding and radiation electric field shielding will appear in optical injected carriers, thus the radiation power and intensity of THz wave are contained. The two shielding effects are different for antennas with different electrode gaps, the shielding effect is small when the light spot is large under the triggering light energy is certain.

Key words: photoconductive antenna; THz electromagnetic wave; carrier; saturation effect

0　引言

随着超快激光技术的迅速发展，利用超快光电子技术产生太赫兹脉冲（THz电磁波）的方法越来越受到重视，用光电导开关作为天线产生太赫兹电磁波已在太赫兹时域光谱分析和太赫兹成像等方面发挥着重要的作用[1-3]。太赫兹电磁波的产生方法很多，按照产生机理可分为基于光学效应的太赫兹波辐射和基于电子学方法的太赫兹波辐射[4-5]。利用超短激光脉冲激发光导天线产生太赫兹波是基于光学效应简单易行的主要方法，近几年来在辐射波长、工作温度及输出功率等方面均获得了较大的进步，在相关应用方面也取得了迅速发展。因此，研制功率大、强度高的太赫兹波辐射源是太赫兹技术能否转化为实际生产力的关键。大量文献都报道了可以通过增大开关电极间隙和增强直流偏置电压等方法，来提高光电导天线太赫兹波的辐射强度和功率[6-9]。然而，用光电导方法产生太赫兹波辐射会受到空间电荷电场屏蔽和辐射电场屏蔽的影响，对提高其辐射功率产生阻碍，使太赫兹波辐射存在饱和。本文根据电磁学理论对光电导天线中非平衡载流子的微观运动状态进行分析，从理论和实验两个方面研究屏蔽对太赫兹波辐射饱和的影响。

收稿日期：2021－09－25.

* **通信作者：**薛　红

1　光电导天线的结构及原理

1.1　天线结构

光电导方法是 20 世纪 80 年代末发展起来的一种基于光电导和天线机制产生太赫兹电磁脉冲的方法[10-11]。一般采用结构比较简单的光电导偶极天线，如图 1 所示，光电导偶极天线由沉积在半绝缘半导体表面上的两个金属电极组成，当超短激光脉冲照射到两个金属电极间隙的光电半导体表面时，便会在其表面附近产生交替变化的电磁场，从而向外辐射出太赫兹波段的电磁波，并且在两个电极上施加直流偏置电压，能够通过天线获得更大的发射功率以及更好的方向特性。

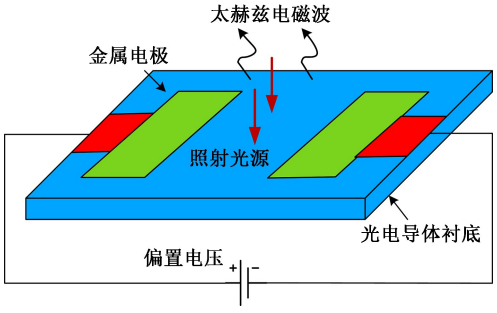


图 1　光电导天线结构示意图

1.2　THz 辐射原理

利用超快激光脉冲触发两电极之间的光电半导体芯片材料(SI-GaAs)，将会在半导体芯片表面附近瞬态地产生大量的非平衡载流子(自由电子-空穴对)(10^{-14} s 量级)，这些自由的非平衡载流子在外加直流偏置电压和内部电场的共同作用下加速，并在芯片材料表面附近产生瞬态变化的光电流，产生向外辐射的太赫兹波段电磁脉冲[12]，如图 2 所示。

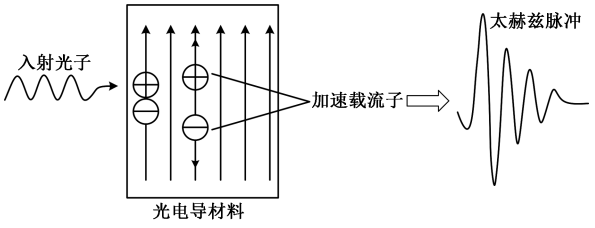


图 2　光电导方法产生太赫兹波示意图

在考虑有限载流子寿命、瞬变载流子迁移率等因素的基础上，忽略空穴载流子对表面光电导的影响，根据光电子理论和欧姆定律得到太赫兹辐射的近场和远场表达式：

$$E_{\mathrm{sur}}(t)=-\frac{\eta_0 J(t)}{1+\sqrt{\varepsilon_0}} \tag{1}$$

$$E_{\mathrm{rad}}(t)\approx-\frac{A}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r}\cdot\frac{\mathrm{d}J(t)}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中表面电流密度随时间变化为

$$J(t)=\frac{(1+\varepsilon_0)\sigma(t)E_{\mathrm{b}}}{\sigma(t)\eta_0+(1+\sqrt{\varepsilon_0})} \tag{3}$$

表面光电导为

$$\sigma(t)=\frac{\beta e\mu_{\mathrm{e}}(1-R)}{h\nu}\int_{-\infty}^{t} I_{\mathrm{opt}}(t')\exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_{\mathrm{n}}}\right)\mathrm{d}t' \tag{4}$$

若激光脉冲为高斯脉冲，则时变脉冲强度为

$$I_{\mathrm{opt}}(t)=\frac{F_{\mathrm{opt}}}{2\sqrt{\pi}\,\Delta t}\exp\left(-\frac{t^2}{\Delta t^2}\right) \tag{5}$$

其中，F_{opt} 为总的光通量，e 为基本电荷量，R 为光电导体光照表面的反射率，μ_{e} 为载流子迁移率，$h\nu$ 为单光子能量，τ_{n} 为载流子寿命，A 为天线的辐射面积，r 为观察点到发射中心的距离。可见，太赫兹波的近场辐射与表面光电流密度成正比，其远场辐射与光电流密度的一阶微分成正比。因此，太赫兹波近场辐射的饱和效应将会延续到电流消失为止。

1.3　饱和效应

在电场强度较高的非线性条件下(偏量电场强度 $E_{\mathrm{b}}>4.1$ kV/cm)，欧姆定律不再适用。由式(1)～(5)可知，随着光脉冲强度的增加，天线表面的光电导率提高，电流密度随光强度的变化而变化。一般而言，载流子寿命比激光脉冲宽度大得多，同时比天线表面电导率达到最大值的时间间隔也大得多，随着表面光电导的增大，辐射场的最大值减弱，太赫兹波辐射将趋于饱和。

在外加偏置电场的作用下，当超快激光触发光电导天线时所产生的光注入载流子(电子-空穴对)会在小范围内分离形成空间电荷电场，空间电荷电场和辐射电场的方向均与外加直流偏置电场方向相

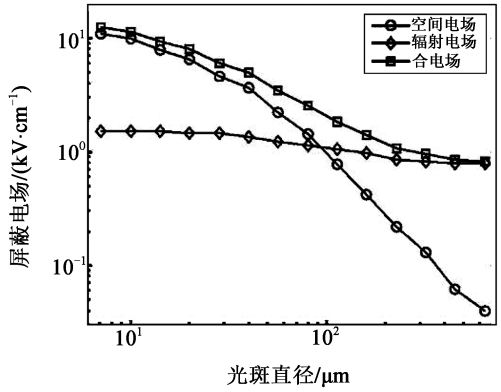


图 3　空间电场屏蔽和辐射电场屏蔽随光斑大小变化曲线

反，使合场强减小，出现空间电场屏蔽(Coulomb 屏蔽)和辐射电场屏蔽现象，使天线的太赫兹波辐射效率降低，辐射功率呈现出饱和现象。实验采用光斑覆盖触发 50 μm 电极间隙的光电导天线，如图 3 所示，随着激光脉冲光斑的增大，空间电荷电场屏蔽迅速减小，辐射电场屏蔽则变化缓慢；在光能一定的情况下，大光斑照射时屏蔽效应减弱。

2 太赫兹波辐射实验与分析

2.1 不同间隙天线的太赫兹辐射

实验采用钛宝石飞秒激光器为光源，其输出光脉冲的波长为 800 nm，脉冲宽度为 140 fs，单脉冲能量为 10 nJ，重复频率为 75 MHz/82 MHz，光功率在 10～500 mW 连续可调，利用光电导偶极天线辐射和接收太赫兹电磁波。选用 SI-GaAs 材料作为天线的光电导体，其暗态电阻率 $\rho>5\times10^7$ Ω·cm，载流子浓度 $n=10^{14}$ cm^{-3}，电子迁移率 $\mu>5\,500$ cm^2/(V·s)，芯片厚度为 0.6 mm。在天线的结构、材料和制作工艺均相同的情况下，对电极间隙分别为 50，100 和 150 μm 的三个不同的光电导天线，在 200 V 的外加偏置电压作用下的太赫兹辐射波形和频谱分布进行测量，结果如图 4 所示。

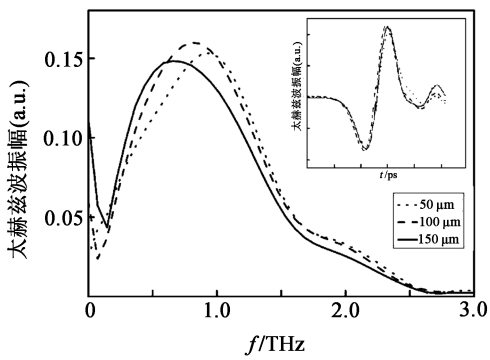


图 4 不同电极间隙天线的太赫兹波频域谱和时域谱(插图)

三种不同间隙的天线辐射的太赫兹波频域均在 0.2～3 THz，但峰值频率有所差异，分别为 0.6，0.8 和 1.0 THz，峰值频率随天线电极间隙的减小而增大。可见，在天线材料一定的情况下，小间隙天线产生的太赫兹辐射具有更高的中心频率。

进一步对上述三种天线在不同偏压下的太赫兹波辐射强度进行测量，结果如图 5 所示。在外加偏置电压低于 100 V 时，电极间隙为 150 μm 的天线辐射强度几乎为零，对天线间隙的电场强度进行分析可知，间隙为 150 μm 的天线电极之间的电场强度小于 6 kV/cm，其余两个较小间隙的天线电极间偏置电场接近 10 和 20 kV/cm。当偏置电场较低时，光生载流子的漂移能量非常小，因而实验中几乎观察不到太赫兹波；随着外加偏置电压的增加，太赫兹波的辐射强度与外加偏置电场成正比。结构和制作工艺相同的光电导天线，能够辐射出相同频带宽度的太赫兹电磁波，而大间隙天线比小间隙天线的耐压能力更强，因此设计使用大间隙天线将是获得较强太赫兹波辐射的有效途径之一。

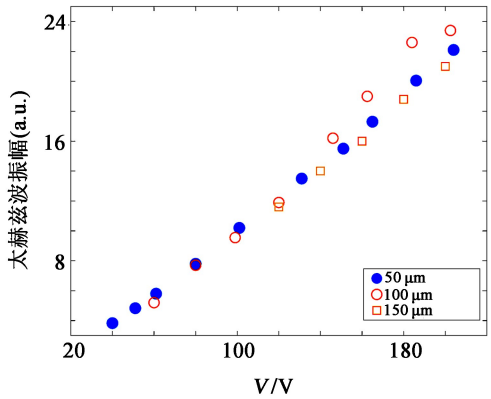


图 5 三种不同电极间隙天线太赫兹波幅值随偏置电压的变化曲线

2.2 输出功率的饱和现象

2.2.1 不同电极材料的实验结果

实验分别选择 Au/Ge/Ni 合金和 Ti/Au 合金作为光电导天线的电极，辐射功率谱如图 6 所示。Au/Ge/Ni 电极天线比 Ti/Au 电极天线的太赫兹波辐射功率大，在 1.2 THz 频谱范围，Au/Ge/Ni 电极天线在 0.25 THz 附近输出功率最大；Ti/Au 电极天线可在 0.18，0.25，0.32 THz 三个频率处达到最大辐射功率。

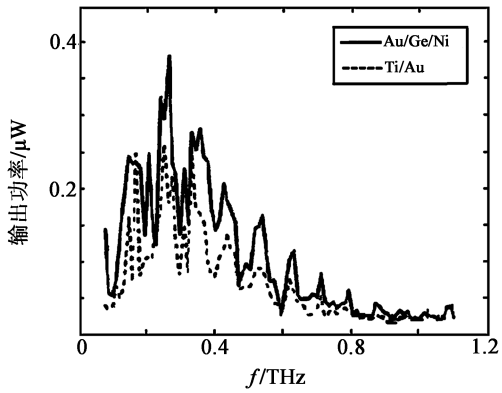


图 6 两种电极光电导天线的太赫兹波辐射功率谱

进一步改变电极两端的外加直流偏置电场，得到太赫兹波的辐射结果如图 7 所示。两种天线的输出功率随直流偏置电场的增加而增大；在偏置电场小于 30 kV/cm 的情况下，两种天线均表现为辐射功率随偏置电场按二次方增长的关系变化；在偏置电场大于 50 kV/cm 的高电场作用下，两种天线的辐射功率逐渐出现饱和效应。

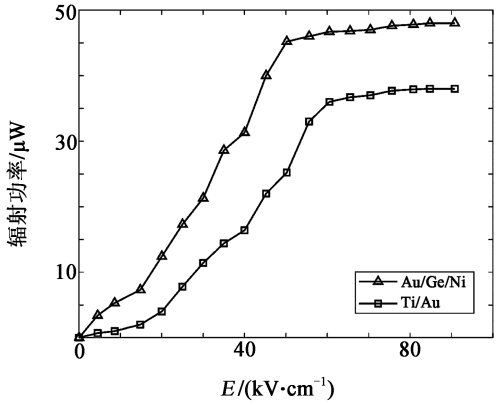


图 7　两种电极光电导天线的辐射功率与偏置电场关系

实验结果显示，选用 Au/Ge/Ni 材料作为光电导偶极天线的电极，在相同的实验条件下产生的太赫兹波输出功率更大，而 Ti/Au 电极却具有更高的接触热稳定性。

2.2.2　触发光强度的影响

触发激光强度对太赫兹波辐射强度的影响如图 8 所示，可以看出，随着触发光强的增加，太赫兹波的辐射强度也随之增强，并且逐渐趋于饱和。其主要原因是随着触发光强度的增加，光注入非平衡载流子浓度增大，在外加直流偏置电场作用下的空间电荷屏蔽作用也增强。在触发光强度较小时，天线内部的光注入载流子浓度较低，空间电荷屏蔽不显著，这种情况导致太赫兹波辐射饱和的主要原因是辐射场屏蔽；而当触发光强度增加到一定程度时，载流子浓度增加，空间电荷电场屏蔽迅速增强，致使太赫兹波辐射强度不再随触发光强继续增大，而是逐渐达到饱和。

分析可见：光电导天线在较低能量光脉冲触发下，空间电荷电场屏蔽对太赫兹波辐射的影响较小；在能量较高的激光脉冲触发下，空间电荷电场屏蔽明显，造成小间隙光电导偶极天线的太赫兹波强度达到饱和；对于大间隙（大孔径）光电导偶极天线而言，空间电荷电场屏蔽对太赫兹波强度的影响减小，此时辐射场屏蔽则是太赫兹波强度出现饱和的主导因素。所以要有效地提高太赫兹电磁波的发射强度及功率，普遍使用大孔径光电导天线，并采用全间隙光斑覆盖触发方式。

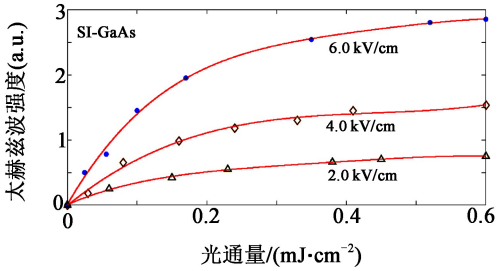


图 8　太赫兹波强度随触发光强度变化曲线

3　结论

利用 SI-GaAs 光电导偶极天线产生太赫兹电磁波，存在空间电荷电场屏蔽和辐射电场屏蔽现象。对于结构和制作工艺相同的光电导天线，能够辐射出频带宽度相同的太赫兹电磁波；而太赫兹波的辐射功率和辐射强度则受到偏置电场、电极间隙、触发光能量和光斑大小等因素的影响，随着直流偏置电场或触发激光脉冲强度的增大，辐射功率和辐射强度逐渐增大并且呈现出饱和效应；在光能一定的情况下，大光斑照射时屏蔽效应较小，空间电荷电场屏蔽对电极间隙较小的天线的影响比较显著，而辐射电场屏蔽主要对电极间隙较大的天线产生影响。因此，在综合考虑触发激光能量和光斑大小的情况下，通常选用较大电极间隙的天线来提高太赫兹波辐射功率，以最大限度地减小屏蔽效应。

参考文献：

[1] Shen Y C, Upadhya P C, Linfield E H, et al. Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(15): 3117-3119.

[2] Zhang Tongyi, Cao Juncheng. Study of the surface and far fields of terahertz radiation generated by large-aperture photo conductive antennas[J]. Chin. Phys. Soc., 2004, 13: 10.

[3] 许景周，张希成. 太赫兹科学技术与应用[M]. 北京：北京大学出版社，2007.
Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. THz Science Technology and Application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007.

[4] Darrp W J T, Zhang X C, Austom D H, et al. Saturation properties of large-aperture photo conducting antennas[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1992, 28(6): 1607-1616.

（下转第 946 页）

[3] 曲 刚. 基于深度学习的车道线检测技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2020.
Qu Gang. Deep learning based lane detection technology[D]. Xi'an：Xidian University，2020.

[4] Lee C，Moon J H. Robust lane detection and tracking for real-time applications [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems，2018，19(12)：4043-4048.

[5] 徐美华，张凯欣，蒋周龙. 一种实时车道线偏离预警系统算法设计和实现[J]. 交通运输工程学报，2016，16(3)：149-158.
Xu Meihua，Zhang Kaixin，Jiang Zhoulong. Algorithm design and implementation for a real-time lane departure pre-warning system[J]. J. of Traffic and Transportation Engineering，2016，16(3)：149-158.

[6] 王 杰，陈黎卿，黄莉莉，等. 基于 Retinex 的弱光条件下车道线识别方法[J]. 计算机与数字工程，2019，47(2)：451-456.
Wang Jie，Chen Liqing，Huang Lili，et al. Lane recognition method in weak light condition based on Retinex[J]. Computer and Digital Engineering，2019，47(2)：451-456.

[7] Peng Tao，Jang Youngmin，Kim Byeongwoo. A lane centerline recognition system based on improved high efficiency Hough transform[J]. Inter. J. of Engineering Research and Technol.，2020，13(11)：3913-3918.

[8] 郭艳婕. 改进的 DBSCAN 算法及其应用研究[D]. 太原：中北大学，2020.
Guo Yanjie. Research on improved DBSCAN algorithm and its application[D]. Taiyuan：North University of China，2020.

[9] Zhang Xiao，Chen Fuen. Lane line edge detection based on improved adaptive Canny algorithm [J]. J. of Physics：Conference Series，2020，1549(2)：022131.

[10] 鱼兆伟，吴晓波，沈 林. 基于动态感兴趣区域的光照无关车道线检测算法[J]. 计算机工程，2017，43(2)：43-47，56.
Yu Zhaowei，Wu Xiaobo，Shen Lin. Illumination invariant lane detection algorithm based on dynamic region of interest[J]. Computer Engineering，2017，43(2)：43-47，56.

[11] 朱院娟，郭斯羽，朱志杰，等. 结合 LTS 和 Hough 变换的直线检测算法[J]. 计算机工程，2012，38(4)：206-210.
Zhu Yuanjuan，Guo Siyu，Zhu Zhijie，et al. Line detection algorithm combining LTS with Hough transform[J]. Computer Engineering，2012，38(14)：206-210.

[12] 陈政宏，李爱娟，王希波，等. 基于改进 Hough 变换的结构化道路车道线识别[J]. 科学技术与工程，2020，20(26)：10829-10834.
Chen Zhenghong，Li Aijuan，Wang Xibo，et al. Structured road lane line recognition based on improved Hough transformation[J]. Science Technology and Engineering，2020，20(26)：10829-10834.

[13] Gong Jinliang，Chen Tao，Zhang Yanfei. Complex lane detection based on dynamic constraint of the double threshold [J]. Multimedia Tools and Applications，2021(5)：27095-27113.

作者简介：

代少升(1974—)，男，河南省潢川县人，博士，教授，主要从事红外成像技术及 SOPC 嵌入式系统设计与开发。

(上接第 939 页)

[5] Cai Y，Brener I，Lopata J L，et al. Design and performance of singular electric field terahertz photocoducting antennas[J]. Appl. Phys. Lett.，1997，71(15)：2076-2078.

[6] Dae Sin Kim，Citrin D S. Coulomb and radiation screening in photoconductive terahertz sources[J]. Appl. Phys. Lett.，2006，88：161117.

[7] 薛 红，席彩萍. GaAs 材料非平衡热电子的瞬态输运及其光电导特性[J]. 半导体光电，2019，40(6)：771-775.
Xue Hong，Xi Caiping. Characteristics of the photoconductivity and transient transport on non-equilibrium hot-electron in GaAs materials[J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(6)：771-775.

[8] 熊中刚，邓 琥，熊 亮，等. 光电导天线太赫兹辐射峰值调控研究[J]. 强激光与离子束，2020，32(3)：0330102.
Xiong Zhonggang，Deng Hu，Xiong Liang，et al. Research on terahertz radiation peak control of photoconductive antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams，2020，32(3)：0330102.

[9] 韩张华，孙开礼，蔡阳健. 微纳光学结构与太赫兹辐射产生技术的研究进展[J]. 光学学报，2021，41(8)：0823017.
Han Zhanghua，Sun Kaili，Cai Yangjian. Research progress of micro-nano optical structure and terahertz radiation generation technology[J]. Acta Optica Sinica，2021，41(8)：0823017.

[10] Mourou G，StancamPiano C V，Antonetti A，et al. Picosecond microwave pulses generate with a subpicosecond laser driven semiconductor switch[J]. Appl. Phys. Lett.，1981，39：295-296.

[11] Fattinger Ch，Grischkowsky D. Point source terahertz optics [J]. Appl. Phys. Lett.，1988，53(16)：1480-1482.

[12] Ralph S E，Grischkowsky D. Trap-enhanced electric fields in semi-insulators：The role of electrical and optical carrier injection[J]. Appl. Phys. Lett.，1991，59(16)：1972-1974.

作者简介：

薛 红(1966—)，女，陕西省渭南市人，博士，教授，研究方向为光电器件机理。