DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.05.001　　**Open Access**
文献引用：何雨伦，余健雄，杜海伟．太赫兹空气相干探测技术中的电极尺寸影响规律仿真与分析[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2026，47（5）：1-7. He Yulun，Yu Jianxiong，Du Haiwei. Simulation and analysis of influences rules of electrode size in the terahertz air coherent detection technique[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47（5）：1-7.

太赫兹空气相干探测技术中的电极尺寸影响规律仿真与分析*

何雨伦[1]，余健雄[1]，杜海伟[1,2**]

（1. 南昌航空大学仪器科学与光电工程学院，江西 南昌　330063；
2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室，江西 南昌　330063）

摘要：太赫兹空气相干探测技术基于太赫兹电场与探测激光在空气（或气体）介质中的四波混频作用产生激光二次谐波，通过测量该二次谐波信号即可获得太赫兹电场信息，现已成为宽带太赫兹技术领域一项重要的探测手段。在该技术的实际应用中，通常采用金属电极连接外加调制电压形成偏置静电场。因此，电极周围电场的空间分布特征直接影响其探测性能。本文利用开源时域有限差分电磁仿真代码MEEP，系统研究了圆柱形金属电极周围的电场分布规律，详细计算了不同电极半径与间距条件下，静电场和入射太赫兹波电场空间分布特征，深入分析了电极半径和距离对电场空间分布的影响机制。结果表明：当金属电极半径为1或2 mm，电极间距为1~3 mm时，由于圆柱形电极边界为弧形结构，其产生的静电场在电极间呈非均匀分布，场强略低于平行电极板产生的场强；当入射太赫兹波频率分别为0.5、1.0和2.0 THz时，无论其偏振为水平方向或竖直方向，在电极间均有明显的衍射现象。上述结果证实，该参数范围内的电极结构可实现对太赫兹电场的良好测量，且对太赫兹波的偏振状态无约束。本文研究成果可为实验中太赫兹空气相干探测技术的性能优化、探测机制的物理理解提供重要的理论支撑与参考。

关键词：太赫兹；空气相干探测技术；时域有限差分；电极；电场分布
中图分类号：O434.3　　**文献标志码**：A

Simulation and analysis of influences rules of electrode size in the terahertz air coherent detection technique*

He Yulun[1]，Yu Jianxiong[1]，Du Haiwei[1,2**]

（1. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering，Nanchang Hangkong University，Nanchang Jiangxi　330063；2. Key Laboratory of Nondestructive Testing（Ministry of Education），Nanchang Hangkong University，Nanchang Jiangxi　330063）

Abstract：Terahertz air coherent detection technology is based on the four-wave mixing interaction between the terahertz electric field and the probe laser in an air（or gaseous）medium to generate a laser second harmonic. The terahertz electric field information is obtained by measuring the second harmonic of the laser from this process，which has now become an important detection method in the field of

收稿日期：2026-01-07
*江西省自然科学基金项目（20232BAB201045）；南昌航空大学研究生创新专项项目（YC2025-044）
**通信作者：haiweidu@nchu.edu.cn

broadband terahertz technology. In practical applications of this technology, metal electrodes are commonly used to connect external modulation voltages to generate a biased static electric field. Therefore, the spatial distribution characteristics of the electric field around the electrodes directly affects the detection performance. This study employs the open-source finite-difference time-domain (FDTD) electromagnetic simulation code MEEP to investigate the distribution pattern of electric fields around cylindrical metal electrodes. The spatial distribution characteristics of both static electric field and incident terahertz electric field under various electrode radii and distance are calculated in detail, and the influence mechanism of electrode radii and distance on the spatial distribution of the electric field was deeply analyzed. The results show that the metal electrodes with radii of 1 or 2 mm and distance within 1−3 mm, due to the cylindrical electrode geometry and their curved boundaries, the electrostatic field generated is non-uniformly distributed between the electrodes, whose strength is a slightly lower than that from parallel plate electrodes. When the incident terahertz wave frequencies are 0.5, 1.0 and 2.0 THz, regardless of whether the polarization is horizontal or vertical, there is a clear diffraction phenomenon between the electrodes. The above results confirm that the electrode structure within this parameter range can achieve good measurement of terahertz electric fields, without constraints on the polarization state of terahertz waves. The research findings presented in this paper can provide significant theoretical support and reference for optimizing the performance of terahertz air-coherent detection technology in experiments, as well as for gaining a deeper physical understanding of the detection mechanism.

Keywords: terahertz; air coherent detection technique; finite-difference time-domain; electrode; electric field distribution

CLC: O434.3 **DC**: A

0 引 言

太赫兹空气相干探测技术是一种基于空气介质的宽带太赫兹相干探测技术,其探测带宽可以覆盖整个太赫兹波段[1]。该技术核心是通过太赫兹脉冲与飞秒激光脉冲在空气中的四波混频作用产生激光二次谐波,从该二次谐波信号中提取出太赫兹电场的振幅与相位信息,并在时域对太赫兹电场进行逐步取样,从而实现对太赫兹脉冲的时域波形测量[2]。目前,最常用的3种太赫兹宽带相干探测技术分别为光电导天线、电光取样技术和空气相干探测技术[3],其中空气相干探测相较于前2种具有显著优势,该技术不依赖电光晶体或半导体材料,而是利用空气分子(或其他气体分子)的三阶非线性效应实现太赫兹信号探测。由于使用空气分子作为探测介质,所以可忽略其对太赫兹波的吸收和色散效应,从而避免固体探测介质本征声子吸收对探测带宽的限制,也不需要考虑复杂的相位匹配条件[3]。目前,太赫兹空气相干探测技术已经广泛应用于太赫兹相关的实验中,并在超快光学领域逐步展现出良好的应用潜力[4-6]。

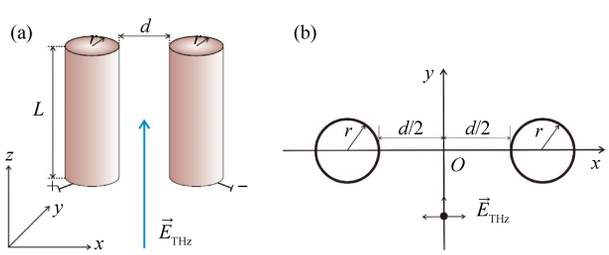
当太赫兹脉冲强度较强时,太赫兹脉冲与探测激光脉冲在空气介质中相互作用,二者的电场通过介质的三阶非线性效应激发四波混频过程,进而产生激光二次谐波,这一过程也被称为太赫兹电场诱导产生二次谐波(THz field induced second harmonic, TFISH)[7]。在太赫兹脉冲与探测激光相互作用的空气介质处加入偏置方波电场信号,此时激光二次谐波包含太赫兹电场与偏置电场共同作用的结果,使用锁相放大器以偏置电场调制频率为参考频率,即可提取出该二次谐波光强与太赫兹电场的对应关系,即 $S_{\text{lock-in}}(t) \propto I_{2\omega} \propto 4\left(E_{\omega}\right)^{4}\cdot(\chi^{(3)})^{2}E_{\text{bias}}E_{\text{THz}}(t)$[1]。在太赫兹空气相干探测技术中,电极是实现相干探测的元件之一,其通过连接外加的调制电压信号转化为偏置电场,并通过该电场与太赫兹波、探测激光的非线性相互作用实现对太赫兹信号的差分探测。在该技术的实际操作中,通常由2根圆柱形金属线充当电极,并直接连接经过调制的电压源来产生具有调制频率的偏置电场[4]。

2根圆柱形金属线连接电压后,其周围会产生相应的电场。但由于金属线间的距离无法像平行金属板那样处处相等,其弧形边界周围的电场分布不能简单视为均匀电场,而是与导线半径及距离密切相关。本文以空气相干探测技术中产生偏置电场的圆柱形金属电极为研究对象,分析其尺寸参数对空间电场的影响规律,计算电极间偏置电场和太赫兹电场的空间分布,进而讨论其对空气相干探测性能的影响机制。

1　空气相干探测技术中的电极尺寸与物理模型

空气相干探测技术中的圆柱形金属电极模型立体示意见图1(a),图1(b)是该模型的俯视图。2个完全相同的圆柱形金属线充当电极,长度设为L(L远大于入射的太赫兹波长和金属半径),半径为r,二者间的距离为d。在图中坐标系下,2个电极垂直立于xy平面,原点O位于电极连线中心,其周围空间为空气,通过在2根金属线间施加电压得到偏置电场,太赫兹波沿y轴正向入射到金属线之间。入射的太赫兹波为线偏振光,其偏振方向可分为平行于x轴方向(水平偏振)和平行于z轴方向(竖直偏振)2种。本文主要探究直流偏压在电极间产生的静电场空间分布特征,以及2种不同偏振态的太赫兹波分别入射到2个电极之间,其周围太赫兹电场的分布特点;同时,通过改变2个金属电极的半径及其间距,分析不同电极参数对电场及太赫兹波分布的影响。

麻省理工学院电磁方程传播仿真软件(MIT electromagnetic equation propagation,MEEP)是由麻省理工学院开发、基于时域有限差分法(finite-difference time-domain,FDTD)的开源电磁仿真软件。该软件采用C++语言编写,遵循GNU计划通用公共许可证(general public license,GPL)[8]。软件可处理一维、二维、三维下电磁仿真问题,被广泛应用于电磁场与电磁波、光子学、纳米光学等领域的研究与工程设计[8]。FDTD原理是将时域形式的麦克斯韦方程组离散为差分形式,在时间和空间上对连续的电磁场进行离散化采样,在空间上将计算域划分为三维网格,电场和磁场分量分别存储在Yee网格结构的不同位置。每个时间步长根据当前磁场计算电场的更新值,根据更新后的电场计算磁场的新值,使得电场和磁场在时间上交错更新,不断进行迭代直到满足收敛条件或达到指定时间步数[9]。



注:L为电极长度;r为电极半径;d为电极间距;$\vec{E}_{THz}$为入射的太赫兹波。

图1　空气相干探测技术中的圆柱形金属电极示意
(a)三维立体图;(b)xy平面坐标

Figure 1　schematic of the cylindrical metal electrodes in the air coherent detection technology
(a)three-dimensional graphic;(b)the xy-plane coordinate

本文使用MEEP程序对上述圆柱形金属电极模型建立边界条件和坐标系统并开展仿真研究。通过改变电极半径(r)与电极间距(d),计算不同参数下静电场和太赫兹波在电极附近空间分布规律,探索不同参数对空气相干探测技术的影响规律,分析静电场和不同偏振太赫兹电场在金属电极附近的空间分布特征。

2　仿真结果与分析

2.1　偏置电场空间分布规律

首先,计算单独施加直流电压的情况,该电压通过圆柱形金属电极在周围产生偏置静电场。在太赫兹空气相干探测技术中,通过对直流电压进行调制获得调制电压和电场,其调制频率一般为飞秒激光脉冲重复频率的1/2或1/4,远小于激光频率和太赫兹频率。因此,与激光脉冲和太赫兹脉冲相比,该电场可视为直流电场。在电极间施加±500 V调制电压,获得不同情况下电场空间分布规律如图2所示。电极长度取L=1.0 cm并保持不变(即远大于太赫兹波长),设置2组铝制金属电极模型参数:(1)r=1 mm,d分别为1、2和3 mm;(2)r=2 mm,d分别为1、2和3 mm。针对上述每种情况,分别计算施加直流电压与入射太赫兹波后电极区域的空间电场和电磁波的分布特性。其中,偏置电场通过向两电极施加±500 V直流电压获得,太赫兹电场由入射固定频率太赫兹波产生,其偏振方向分别沿x轴、z轴方向(即分别为水平偏振和竖直偏振)。电极间电场并非均匀分布,而是呈曲线分布。在电极附近区域,受金属表面电荷重新分布的影响,静电场强度达到最大;而在电极中间位置,电场强度最小。

与相同电压、相同间距下的平行电极板电场相比,该区域电场值略小。这是由于在电极附近区域,电场受金属表面电荷分布的影响,金属表面呈弧形不能视为平行电极板,两电极间不能简单视为均匀电场。固定电极半径分别为1、2 mm,保持偏置电压不变,逐步增加电极间距离并求解电极间电场最小值,将仿真结果与平行极板电场曲线进行对比。平行电极板间电场大小与电极距离成反比,计算公式为1 000(V)/d(mm),对比结果如图3所示。结果表明,该参数条件下圆柱形电极间的电场强度均小于平行极板间电场,且半径越小,二者差异越显著。仿真电极半径接近实验中采用的导线半径,因此计算结果能够较好地反映实际实验中的电场大小。

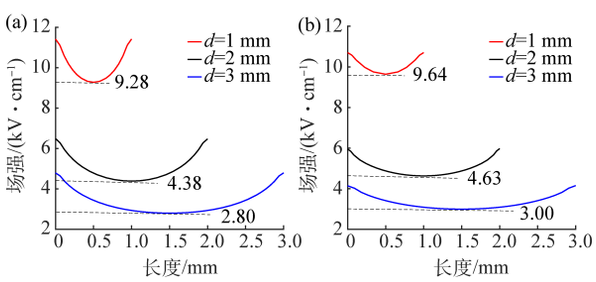


图2　±500 V直流偏置下电极间电场随间距的变化规律
(a)r=1 mm;(b)r=2 mm

Figure 2　variation of the electric field between electrodes with distance under ±500 V bias voltage
(a)r=1 mm;(b)r=2 mm

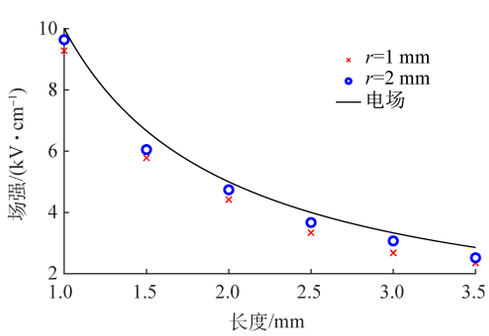


图3　不同电极半径(r)下最小电场与平行极板电场对比

Figure 3　comparison of minimum electric field under different electrode radii(r) with that of parallel-plate electrodes

当入射探测激光与静电场和太赫兹电场共同作用时,探测激光通常采用会聚入射方式,光斑尺寸接近激光波长量级,因此其在电极间的纵向分布可近似视为点光源。偏置电场呈曲线分布,但不影响四波混频作用。在利用偏置电场对入射太赫兹电场幅值进行定标时[10-11],需保证入射激光光斑位于电极中间位置,并考虑电极弧形边界带来的电场误差,从而提高太赫兹电场标定的准确性。总之,在2个圆柱形金属电极间施加偏置电压时,电极间电场的空间分布受电极半径与间距共同影响,不能简单等效为均匀静电场。

2.2　入射太赫兹波的电场空间分布规律

接下来讨论太赫兹波入射到电极间的情况。保持太赫兹电场强度为1 V/m(即0.01 V/cm),分别计算不同电极参数、不同偏振态(水平偏振和竖直偏振)及不同频率的太赫兹波入射至电极后,其电场在周围空间的分布状况,进而分析金属电极参数对入射太赫兹波的影响规律。

在太赫兹波段,金、银、铜、铝等常见金属对太赫兹波的表面反射率接近1,其光学特性可以通过Drude模型描述[12],这几类金属也常用于制作金属波导与太赫兹偏振片。金属狭缝波导由金属-介质-金属结构构成,相较于其他介质,空气作为介质层时产生的介质损耗最小。因此,这类金属狭缝波导结构可用来传输太赫兹波[13]。太赫兹波在该波导中可视为以横电磁波(transverse electric and magnetic,TEM)模的形式在空气缝隙中传输,电磁波被聚集在空气狭缝区域,波导对其具有良好的约束作用[14]。随着入射电磁波频率的增加(即波长的减小),金属的反射率逐渐减小,这直接影响金属波导结构对太赫兹的电场分布。金属线栅型太赫兹偏振片通过紧密分布的金属线栅,对不同偏振状态的太赫兹波透射特性进行控制,成为太赫兹波段成熟的偏振片。当太赫兹波入射至该器件时,偏振方向平行于金属线栅的电场分量被反射,垂直于线栅的电场分量则可透过。太赫兹波的反射率和透过率与线栅的尺寸大小、间隔距离及入射波频率密切相关[15-16]。

在实际的空气相干探测实验中,电极参数和上述计算选取参数较为接近,且太赫兹波长与电极半径、距离也比较接近(1.0 THz对应波长为0.3 mm)。因此,当太赫兹波入射到金属电极间时,金属电极表面对太赫兹波可能形成一定的约束条件[17-18],从而对空气相干探测技术产生影响。电极半径、距离、太赫兹波长及偏振态等参数不同时,约束强弱可能不同。接下来计算不同条件下太赫兹波的空间分布,并讨论金属电极对太赫兹波的约束效应。

首先,计算频率为1.0 THz、偏振方向分别为水

平和竖直方向的太赫兹波入射电极间后的空间分布情况。目前常见的宽带太赫兹脉冲中心频率为1.0 THz左右,首选其作为仿真电磁波频率。取金属半径r=1 mm,改变电极距离分别为1、2和3 mm,水平与竖直偏振态的太赫兹波在电极间的空间电场分布如图4所示。图4均采用相同色标,各图横纵坐标对应长度单位(即图1(b)的空间尺寸)。由图4可知,6种参数下电场均呈现明暗条纹分布,显示太赫兹波发生了明显的衍射现象。受电极结构影响,太赫兹波传播方向发生改变,但仍可在电极最窄处传播,表明该参数下电极对太赫兹波的偏振和传播无强约束作用,且电极间距越小,衍射现象越明显。

改变电极半径r=2 mm,重复上述计算,结果如图5所示。由图可知,其现象与图4类似,均出现明显的衍射现象。电极使太赫兹波的传播方向发生改变,不同偏振状态下,在电极最窄处均有太赫兹波传播。因此,电极半径r=2 mm时,电极对太赫兹波偏振并未形成强约束作用。

随后分别改变入射太赫兹波频率分别为0.5和2.0 THz,重复上述计算过程,得到与前文相似的结论:入射波长的变化会直接影响相邻明暗条纹的间距,间距随波长增大而变宽;电极在不同尺寸下对太赫兹波传播的影响仅产生衍射效应,并未达到类似金属线栅对太赫兹波偏振的限制状况[17-18]。仿真中仅选取3种频率,但对于其他波段的太赫兹波同样适用。本文采用平面入射连续太赫兹波为入射波源,针对会聚型宽带太赫兹脉冲,其会聚半径可通过公式$\frac{4f\lambda}{\pi D}$估算,式中:f为聚焦透镜焦距;D为入射光束直径;λ为波长。实验中采用的会聚透镜或面镜(如离轴抛物面镜)对太赫兹波的聚焦效果表明,聚焦后波束半径约为太赫兹波长的数倍。因此,聚焦后的太赫兹波束半径约为1 mm,与仿真条件中电极最短距离比较相近,表明仿真参数与实际实验条件比较吻合。

利用金属线栅可对太赫兹波偏振态进行控制[17-18]。由图(4、5)可知,当2个金属电极距离、半径与太赫兹波长接近时,该结构并未对太赫兹波传播形成偏振依赖约束,从而可消除该电极尺寸参数对空气相干探测技术测量性能的影响。太赫兹空气相干探测技术基于空气(或气体)介质的四波混

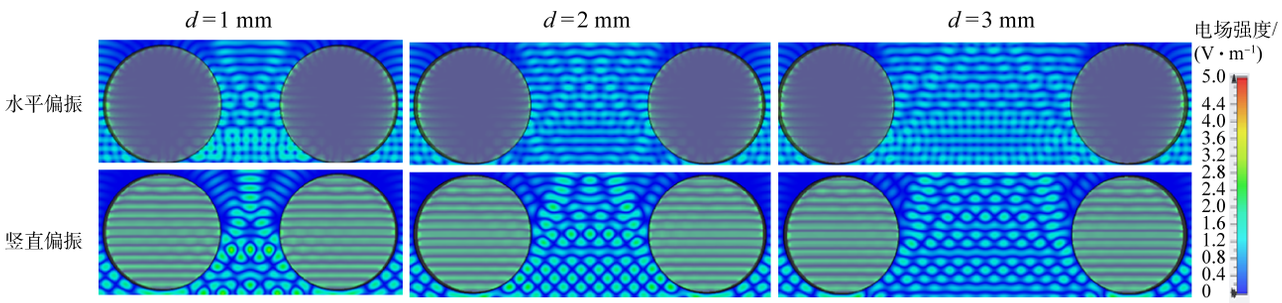


图4　金属电极半径r=1 mm时不同间距与偏振态下太赫兹波空间分布

Figure 4　spatial distribution of terahertz waves under different spacings and polarization states when the radius of the metal electrode is r=1 mm

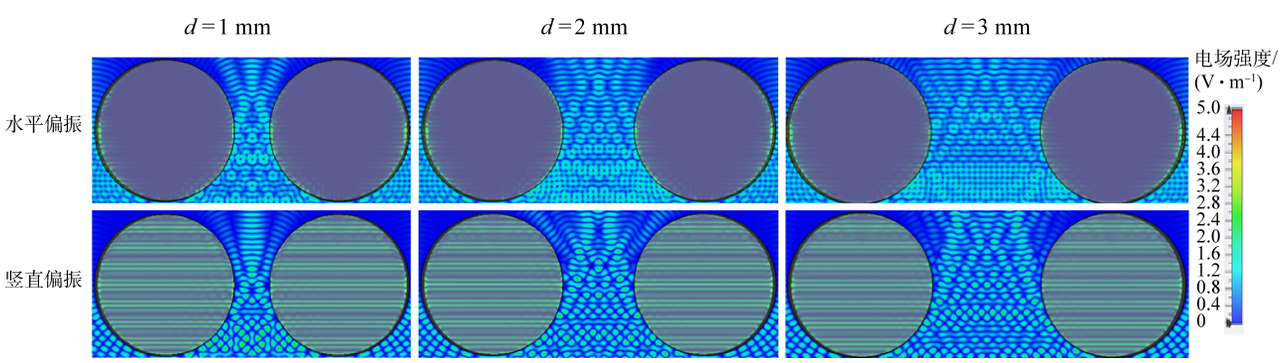


图5　金属电极半径r=2 mm时不同间距与偏振态下太赫兹波空间分布

Figure 5　spatial distribution of terahertz waves under different spacings and polarization states when the radius of the metal electrode is r=2 mm

频作用,探测激光偏振方向、太赫兹波偏振方向及静电场偏置方向均会对所产生的激光二次谐波有影响,从而影响探测性能。本文仿真结果消除了常用电极尺寸对探测性能产生影响的疑惑,可为实际实验过程优化探测性能、分析实验结果提供参考。

3 讨 论

太赫兹空气相干探测技术充分利用太赫兹电场在空气中通过四波混频产生的激光二次谐波,并借助外加偏置电场实现对太赫兹电场的差分探测。该技术自实验验证至今,仍在持续发展与不断完善。Du等[19]提出自由空间光学偏置相干探测技术(optical biased coherent detection, OBCD),即利用BBO晶体产生的激光二次谐波作为局部振荡源,与空气中太赫兹场诱导的激光二次谐波进行相干合成,从而完成对太赫兹的差分探测;Tomasina等[20]借助微纳器件制备技术,以薄层二氧化硅玻璃为作用介质,同样实现了太赫兹波的相干探测,由于该技术采用固体介质,其三阶非线性系数远大于气体介质,所需探测激光能量可低至几μJ,因此有望应用于振荡级飞秒激光系统;Huang等[21]提出一种空气辅助相干探测(air-aided coherent detection, AACD)方法,即利用薄石英晶体为倍频材料产生激光二次谐波作为局部振荡源,实现无需偏置电压、兼具高灵敏度与宽频带太赫兹相干探测;Tan等[22-23]以液体水作为探测介质,利用BBO晶体产生激光二次谐波为局部振荡源,有效降低了所需的探测激光能量。

上述技术均利用太赫兹电场在介质中通过非线性作用产生激光二次谐波,当实验设置存在差异时,探测信号所包含的太赫兹电场波形和强度波形有一定差异[24]。上述多种实验设置对完善空气相干探测技术、提高探测灵敏度、降低探测激光能量及深化对探测过程物理机制的理解具有重要意义,有助于进一步挖掘宽带太赫兹辐射的应用潜力。本文针对圆柱形金属电极尺寸对电场分布的影响进行计算与分析,以实际应用中金属导线电极的参数为仿真参数,详细计算多种参数条件下静电场和太赫兹波的空间分布特性,直观展示了不同偏振太赫兹波在电极附近的传输特点,相关结果可为该探测技术的实验条件优化、实验误差分析等提供参考。研究表明,当金属半径与电极距离相等时,为产生较均匀的激光二次谐波,应将聚焦后的探测激光光束置于电极中心位置,以保证作用区域内偏置电场分布更加均匀。

4 结 论

本文通过调控太赫兹空气相干探测技术中圆柱形金属电极的半径和距离,采用开源时域有限差分电磁仿真软件MEEP,对电极间偏置静电场及太赫兹波空间分布规律进行仿真与分析,详细计算并分析当金属电极半径分别为1和2 mm、电极距离分别为1、2和3 mm时,偏置静电场和不同偏振态太赫兹波在电极周围的空间分布规律。仿真结果表明,在施加偏置电压的情况下,由于金属电极弧形边界导致电极间电场强度分布不均匀,靠近电极位置电场较大,两电极中间区域电场值最小,且该数值略低于平行电极板模型计算所得的电场值。此外,本文还计算了0.5、1.0和2.0 THz 3种不同频率太赫兹波入射电极后的电磁波空间分布。结果显示,不依赖于太赫兹波的偏振态和频率,金属电极间均产生明显的衍射现象,这一结果验证了金属电极在上述参数条件下对太赫兹偏振无约束的定性认识。本文系统研究太赫兹空气相干探测中圆柱形金属电极尺寸对电极附近静电场和太赫兹波空间分布的影响,获得静电场和电磁波在电极附近的空间分布特点,这对实验上理解太赫兹空气相干探测技术的物理机制、优化探测性能及分析实验误差具有重要的参考价值。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] Karpowicz N, Dai J M, Lu X F, et al. Coherent heterodyne time-domain spectrometry covering the entire "terahertz gap"[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 011131. DOI: 10.1063/1.2828709.

[2] Dai J M, Clough B, Ho I C, et al. Recent progresses in terahertz wave air photonics[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 274-281. DOI: 10.1109/tthz.2011.2159550.

[3] 杜海伟. 基于超快激光技术的THz波产生和探测[J]. 量子电子学报, 2013, 30(3): 257-267. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.
Du Haiwei. Terahertz wave generation and detection based upon ultrafast laser technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(3): 257-267.

[4] 杜海伟,朱思源,吕金,等.太赫兹空气相干探测技术研究进展[J].红外,2020,41(11):1-10. DOI:10.3969/j.issn.1672-8785.2020.11.001.
Du Haiwei, Zhu Siyuan, Lü Jin, et al. Research progress of terahertz air coherent detection technique [J]. Infrared, 2020, 41(11): 1-10.

[5] Zhang Y, Li K X, Zhao H. Intense terahertz radiation: generation and application[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2021, 14(1): 4-36. DOI: 10.1007/s12200-020-1052-9.

[6] Leitenstorfer A, Moskalenko A S, Kampfrath T, et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(22): 223001. DOI: 10.1088/1361-6463/acbe4c.

[7] Cook D J, Chen J X, Morlino E A, et al. Terahertz-field-induced second-harmonic generation measurements of liquid dynamics[J]. Chemical Physics Letters, 1999, 309(3/4): 221-228. DOI: 10.1016/s0009-2614(99)00668-5.

[8] Oskooi A F, Roundy D, Ibanescu M, et al. Meep: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method[J]. Computer Physics Communications, 2010, 181(3): 687-702. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.008.

[9] 汪旺.基于FDTD方法的Casimir效应计算[D].合肥:安徽大学,2013:10-45.
Wang Wang. Calculations of Casimir effect based on FDTD[D]. Hefei: Anhui University, 2013: 10-45.

[10] Borodin A V, Esaulkov M N, Frolov A A, et al. Possibility of direct estimation of terahertz pulse electric field[J]. Optics Letters, 2014, 39(14): 4092. DOI: 10.1364/ol.39.004092.

[11] Du H W, Tang F, Zhang D Y, et al. Calibration of the field strength of broadband terahertz radiation in air coherent detection technique[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(14): 143101. DOI: 10.1063/1.5039827.

[12] Wächter M, Nagel M, Kurz H. Metallic slit waveguide for dispersion-free low-loss terahertz signal transmission[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(6): 061111. DOI: 10.1063/1.2472544.

[13] 王志辉.新型太赫兹导波结构特性研究[D].成都:电子科技大学,2012:12-65.
Wang Zhihui. Study on the characteristics of new terahertz waveguide structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 12-65.

[14] 陈燕青.金属线栅型太赫兹偏振片的制备及性能研究[D].福州:福州大学,2018:32-43.
Chen Yanqing. Process and performance study of metal wire grid terahertz polarizer [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018: 32-43.

[15] 徐娅,边捷,张伟华.局域表面等离激元纳米光学传感器的原理与进展[J].激光与光电子学进展,2019,56(20):202407. DOI:10.3788/LOP56.202407.
Xu Ya, Bian Jie, Zhang Weihua. Principles and processes of nanometric localized-surface-plasmonic optical sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(20): 202407.

[16] 任梦昕,许京军.表面等离子体激元增强非线性的原理及应用[J].激光与光电子学进展,2013,50(8):080002. DOI:10.3788/LOP50.080002.
Ren Mengxin, Xu Jingjun. Surface plasmon polariton enhanced nonlinearity and applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080002.

[17] Iwaszczuk K, Andryieuski A, Lavrinenko A, et al. Terahertz field enhancement to the MV/cm regime in a tapered parallel plate waveguide[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8344. DOI: 10.1364/oe.20.008344.

[18] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology [M]. Boston, MA: Springer US, 2009.

[19] Du H W, Dong J M, Liu Y, et al. A coherent detection technique via optically biased field for broadband terahertz radiation[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(9): 093104. DOI: 10.1063/1.5002570.

[20] Tomasino A, Mazhorova A, Clerici M, et al. Solid-state-biased coherent detection of ultra-broadband terahertz pulses[J]. Optica, 2017, 4(11): 1358. DOI: 10.1364/optica.4.001358.

[21] Huang J L, Tian D, Zhang C H, et al. Air-aided coherent detection for broadband terahertz wave[J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(16): 161101. DOI: 10.1063/5.0260971.

[22] Tan Y, Zhao H, Wang W M, et al. Water-based coherent detection of broadband terahertz pulses[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(9): 093902. DOI: 10.1103/physrevlett.128.093902.

[23] 王国阳,张明浩,肖文,等.基于液体对太赫兹脉冲进行高灵敏探测[J].中国激光,2023,50(17):1714006. DOI:10.3788/CJL230725.
Wang Guoyang, Zhang Minghao, Xiao Wen, et al. High-sensitivity detection of terahertz pulse based on liquids[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(17): 1714006.

[24] Du H W. Systematical study on the role of laser second harmonic generation in the terahertz air coherent detection[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 130: 106312. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106312.

(责任编辑:兰丽丽)