

文章编号: 1005-5630(2022)01-0080-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.01.012

# 电子密度对太赫兹波在均匀非磁化等 离子体中的传输影响

蔡丽君, 袁英豪

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对地面与飞行器之间通信“黑障”问题, 采用垂直极化的太赫兹波实现了地面与飞行器的通信。利用放电装置产生等离子体来模拟飞行器表面的等离子体鞘套, 使用全光纤耦合式太赫兹时域光谱仪产生 0~1 THz 的太赫兹波, 从实验的角度研究了垂直极化太赫兹波在不同电子密度的均匀非磁化等离子体中的传输特性。实验结果表明: 电子密度越大, 垂直极化太赫兹在等离子体中的传播速度越快; 随着电子密度的增大, 衰减会越小。所进行的研究为实现地面与飞行器之间的通信互联提供了重要的实验参考。

**关键词:** 太赫兹; 均匀非磁化等离子体; 电子密度; 介质阻挡放电; 光谱仪; 传输特性  
**中图分类号:** TH 744 **文献标志码:** A

## Effect of electron densities on the transmission of terahertz waves in uniform non-magnetized plasma

CAI Lijun, YUAN Yinghao

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of communication between the ground and the aircraft, which is called “black barrier”, the vertically polarized terahertz wave is used to realize communication. Using the discharge device to generate plasma to simulate the plasma sheath on the surface of the aircraft, and an all-fiber coupled terahertz time-domain spectrometer is used to generate 0-1 THz waves. This paper studies the transmission characteristics of vertically polarized terahertz waves in uniform non-magnetized plasma with different electron densities from an experimental point of view. The experimental results show that the greater electron density, the faster propagation speed of the vertically polarized terahertz in the plasma; as the electron density increases, the attenuation becomes smaller. This research provides an important experimental reference for realizing the communication interconnection between the ground and the aircraft.

**Keywords:** terahertz; uniform non-magnetized plasma; electron density; dielectric blocking

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0810900); 上海市中央引导地方科技发展专项(YDZX20193100004960)

作者简介: 蔡丽君(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹技术的研发。E-mail: 1594755141@qq.com

通信作者: 袁英豪(1984—), 男, 副研究员, 研究方向为太赫兹频率梳精密光谱测量、超快飞秒激光技术。

E-mail: yhyuan@usst.edu.cn

discharge; spectrometer; transmission characteristics

## 引言

飞行器在进入大气的过程中, 由于飞行速度很快, 其表面会与周围空气发生剧烈摩擦。飞行器周围的电子脱离原子核的束缚, 在其表面生成一层薄等离子体鞘套, 这层等离子体鞘套在飞行器再入大气的过程中会造成通信中断、雷达追踪失效等影响, 这一现象被称为“黑障”<sup>[1-4]</sup>。针对黑障问题, 国内外的研究人员主要把注意力集中在电磁波在等离子体中传播的衰减情况上。研究发现, 黑障区的等离子体鞘套为非磁化等离子体, 大多集中于微波频段(小于 100 GHz)<sup>[3][5]</sup>, 而太赫兹波频段是大于“黑障”区的微波频段, 又由于太赫兹波波长更短、穿透性强、抗干扰等优点<sup>[5-9]</sup>, 太赫兹技术的发展如雨后春笋般迅速, 也为穿透等离子体鞘套、解决“黑障”问题做了技术铺垫。

太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 技术是测量等离子体特性的可靠技术手段之一。与朗缪尔探针法相比, THz-TDS 是一种不影响等离子体状态的非接触式测量。与汤姆逊散射法相比, THz-TDS 具有更高的信噪比和更好的稳定性和可靠性。与光发射光谱相比, THz-TDS 光谱更易于被处理并支持更快的检测<sup>[10]</sup>。

2010 年, 袁承勋等建立模型并总结理论计算方法, 讨论了非磁化低温等离子体的太赫兹在不同情况下的变化规律<sup>[11]</sup>。2012 年, 郑灵等利用频谱范围在 0~0.22 THz (<1 THz) 的太赫兹波, 以激波管产生等离子体, 研究了太赫兹波在激波管产生的非磁化等离子体中的物理现象<sup>[12]</sup>, 该方法会产生反射率振荡周期。2015 年, 李拴涛等通过数值仿真得出, 等离子体参数影响着太赫兹波在等离子体中的传播速度、透射、反射和吸收<sup>[13]</sup>。2020 年, 耿兴宁等通过散射矩阵方法建立了太赫兹波在等离子体鞘套中的传输模型, 从理论的角度提出了解决飞行器通信“黑障”问题方法<sup>[14]</sup>。同年, Ouyang、WC 等利用数值高超声速流体动力学模型和多层传输模型研究了半角对钝锥飞行器周围等离子体流和太赫兹传播特

性的影响, 结果表明, 减小钝锥体半角可以有效降低电磁波的衰减<sup>[15]</sup>。2021 年, 李郝等采用 SMM 方法仿真了太赫兹波与外加不同磁场方向冷等离子体中的相互作用, 结果表明, 降低磁化强度能一定程度地避开等离子体对右极化波的吸收, 而降低碰撞频率能缩小等离子体对右极化波的吸收频带。通过调整上述工作中的这些参数, 有望在一定程度上缓解“黑障”现象<sup>[16]</sup>。

经过大量调研, 对等离子体的研究大多数是以理论和仿真的角度来讨论太赫兹在等离子体中的传输特性, 而从实验角度研究传输特性的偏少, 实验的重要性在于对理论的验证与仿真。本文用介质阻挡放电原理产生等离子体, 并且采用大于 0.22 THz 的频谱范围太赫兹波进行实验研究, 使用自主研发的太赫兹时域光谱仪产生频谱范围在 0~1 THz 的垂直极化太赫兹波, 使太赫兹波在非磁化均匀的等离子体中传输, 并且考虑了不同电子密度下的等离子对传输特性的影响。实验结果和参考的理论结果符合性较好, 均表明: 电子密度越大, 垂直极化太赫兹在等离子体中的传播速度越快; 随着电子密度的增大, 衰减会越小。

## 1 传播特性理论

根据文献 [17] 可得到, 对于有碰撞的等离子体, 定义等离子体的折射率  $n = \beta c / \omega$ 。相位常数  $\alpha$  和衰减常数  $\beta$  分别为

$$\begin{cases} \alpha = k_0 \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left( \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \nu^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \\ \beta = k_0 \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left( \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $c$  为电磁波在真空中的速度;  $\omega$  为电磁波角频率;  $k_0 = \omega/c$  为真空中的波数;  $\omega_p$  为等离子体振荡频率;  $\nu$  为电子与中性粒子的碰撞角频率; 衰减常数  $\alpha$  的值代表着等离子体中自由电子吸收电磁波中电场能量后并以内能的形式释放到

等离子体中而导致电磁波能量被吸收的程度；相位常数 $\beta$ 的值代表着电磁波在等离子体中传播时的相位变化<sup>[17]</sup>。此时，电磁波的相速度为 $v = \omega/\beta$ 。

在高频情况下， $\omega \gg v$ 及 $\omega \gg \omega_p$ ，因此有

$$\begin{cases} \alpha \approx k_0 \frac{v\omega_p^2}{2\omega^3} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{-1/2} \\ \beta \approx k_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可以看出，相位常数 $\alpha$ 与碰撞频率无关，因此等离子体的碰撞频率的变化也不会影响电磁波的折射率。通常情况下，由于相位常数 $\beta$ 、光速 $c$ 为常量，折射率 $n$ 与电磁波角频率 $\omega$ 成反比。此时又处于高频的情况下，电磁波角频率 $\omega$ 很大，导致折射率很小。若衰减常数 $\alpha$ 的值尽可能小，即 $\beta \gg \alpha$ ，电磁波能量被吸收的程度便会大大减少，说明传播速度很快。等离子体中的电子来不及对电场变化的响应，此时在等离子体中传播损耗较小<sup>[17]</sup>。在低频情况下， $v \gg \omega$ 及 $\omega_p \gg \omega$ 。此时，等离子体是良导体，采用导电模型会更合适<sup>[18]</sup>。

## 2 实验方案

图1为本次实验的实验装置，实验装置中自主研发的全光纤耦合式太赫兹时域光谱仪(以下简称光谱仪)在发射天线产生了0~1 THz的垂直极化太赫兹波。太赫兹波经过波束整形后形成了平行光穿过等离子体腔体。太赫兹所携带的样品信息由接收天线接收并传给数据处理系统进行处理，处理后可以对太赫兹波形变化进行实时观察。

### 2.1 太赫兹产生装置

全光纤耦合式太赫兹时域光谱仪可以满足不同的延时条件，它主要分为光路系统和电学系统。图2为全光纤耦合式太赫兹时域光谱仪结构图，其中，发射天线、接收天线和光纤处于机箱外部，便于满足不同的延时条件，这样的设计提高了设备运输的便携性和应用的广泛性。

产生太赫兹波的方法有两种，分别为电学方法和光学方法<sup>[19-21]</sup>。本文采用光电导方法产生太

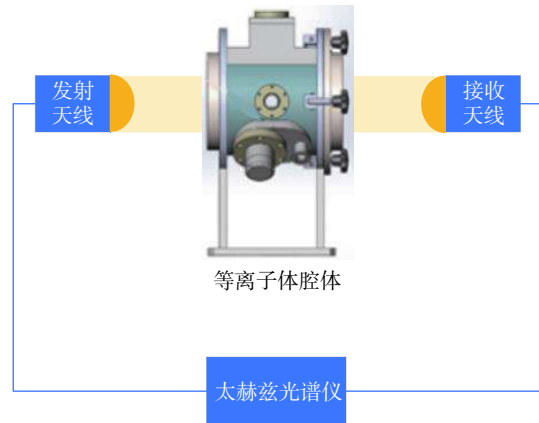


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental facility

赫兹波：使用1560 nm的光纤耦合型太赫兹天线，此天线采用InGaAs/InAlAs多层Mesa结构，并且发射器加了高偏置电压，这样保证了高功率太赫兹的稳定输出；同时，对自制的飞秒激光器的驱动进行了优化。利用实验室自制的飞秒激光器产生50 fs的超短激光脉冲对采用InGaAs/InAlAs多层Mesa结构的发射天线进行激发，产生了宽频带的太赫兹波，其光谱覆盖范围在0~1 THz。太赫兹脉冲经过准直透镜产生半径为1 inch的平行光斑。平行光斑经过样品后，由接收天线接收到含有样品信息的太赫兹信号。泵浦光路与探测光路到达接收天线的光程相等，即这两路电磁波到达接收天线的的时间相等，此时太赫兹脉冲的强度可以由接收天线输出的电流大小计算得出。另外，如果想获得太赫兹脉冲其他相位的信号强度，可以通过光学延迟线来控制两路光路的延迟量进行采样，这些采样点的数据传输给锁相板进行处理，可以还原出完整的太赫兹波形。

图3为在温度为25℃、湿度为61%的环境下，不放置任何样品测量周围环境空气时光谱仪的太赫兹时域、频域的光谱信号图，其光谱范围在0~1 THz。频谱分辨率的高低取决于光学延时扫描范围，通常小于7.5 GHz，其光谱获取速率在0.1~1 s/谱，动态范围大于70 dB。所使用的基于全光纤耦合的太赫兹时域光谱仪，相比基于自由空间的时域光谱系统，降低了系统开发成本，提高了系统的灵活性，同时具有测试响应快的优点，能在短时间内获取多组数据并对其平均滤波。

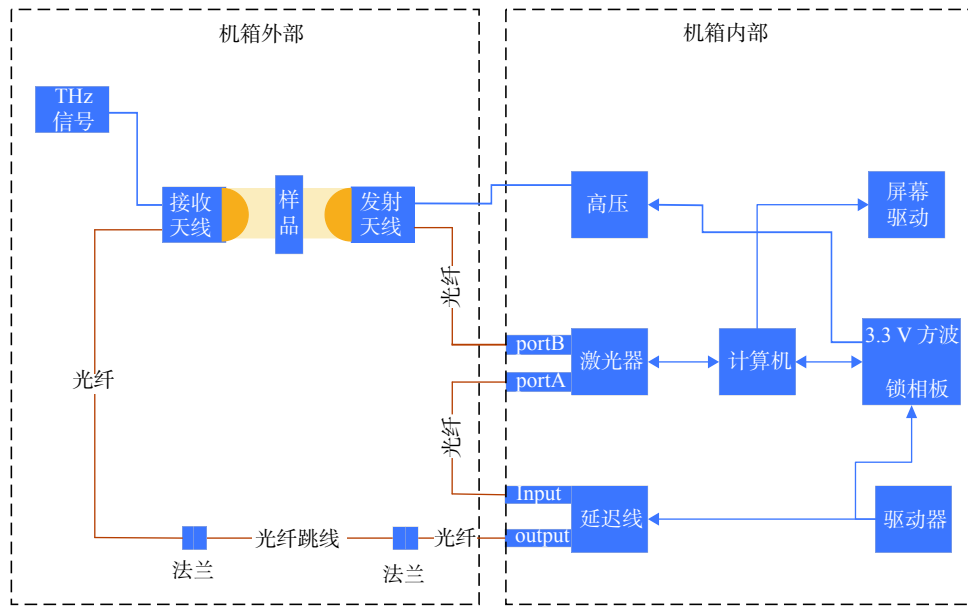


图 2 全光纤耦合式太赫兹时域光谱仪结构图

Fig. 2 Structure diagram of all-fiber coupled terahertz time-domain spectrometer

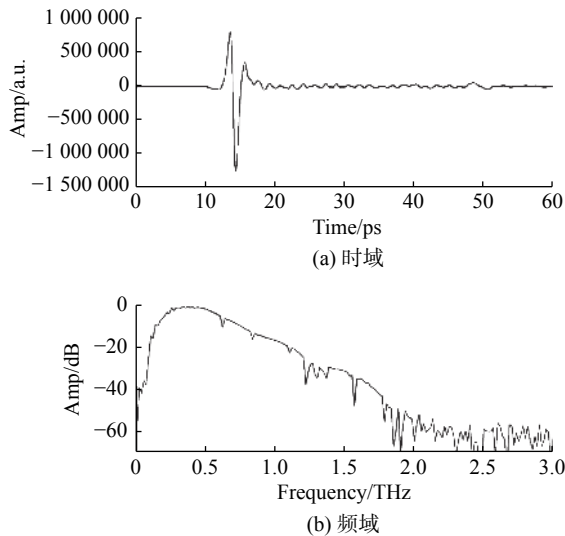


图 3 光谱仪时域、频域的太赫兹光谱信号图

Fig. 3 Spectral signal maps in time and frequency domains

### 2.2 等离子体产生装置

根据介质阻挡放电原理, 使用圆柱形腔体作为产生低温等离子体的放电系统, 腔体中安装了一层地线屏蔽网和一层高压电极网(接高压), 腔体中能产生 3 层等离子体, 其厚度 21 cm, 图 4 为等离子体腔体图。通过给密闭腔体抽真空, 将腔体内真空度抽至 20 Pa, 达到电离产生低温等离子体的条件。在腔体中注入氦气, 当给腔体施

加一定的放电功率时, 此时地线屏蔽网作为阴极, 高压电极网作为阳极。放电时, 系统中的电子在吸收能量后状态很活跃, 进而脱离原子核的束缚变成自由电子, 失去电子的原子变成了带正电的离子, 由于受到电离的作用使它们处于游离状态<sup>[17]</sup>, 在腔体中形成低温均匀等离子体的气体系统。

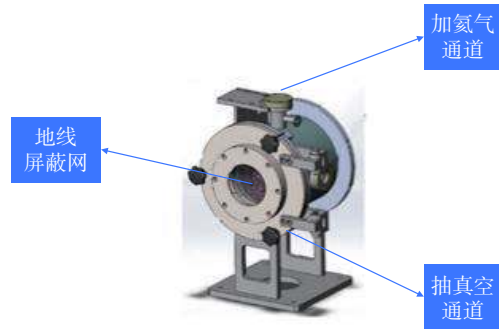


图 4 等离子体腔体图

Fig. 4 Plasma cavity

利用光谱诊断技术来确定等离子体密闭腔体中等离子体电子密度。透过腔体的观察窗测量等离子体太赫兹透射光谱, 用 Ocean View 软件计算圆柱形密闭腔内等离子体电子密度, 通过光谱的强度计算出等离子体的电子密度, 计算流程如图 5 所示。

其中

$$g(\lambda, T_e) = T_e^{3/2} \frac{c^2}{\lambda^2} Q^A(T_e) \left[ 1 + \left( 1 + \frac{hc}{\lambda k_B T_e} \right)^2 \right] \exp\left( -\frac{hc}{\lambda k_B T_e} \right) \quad (3)$$

式中： $c$  为光速； $Q^A$  是具有 Ar 原子的电子动量转移的横截面； $k_B$  和  $h$  为玻尔兹曼常数和普朗克常量； $L$  为等离子体厚度； $I_\lambda(\lambda)$  ( $\text{Wm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ ) 表示光在介质中经过吸收和辐射后的光谱强度； $S_\lambda(\lambda) = j_\lambda(\lambda)/k(\lambda)$  为源函数，具有与  $I_\lambda(\lambda)$  相同的量纲，描述了光束的特性；Bremsstrahlung 辐射包括电子和原子 (e-a) 之间以及电子和离子 (e-i) 之间的碰撞； $n_a$  为原子密度； $n_e$  为电子密度； $T_e$  为电子温度。

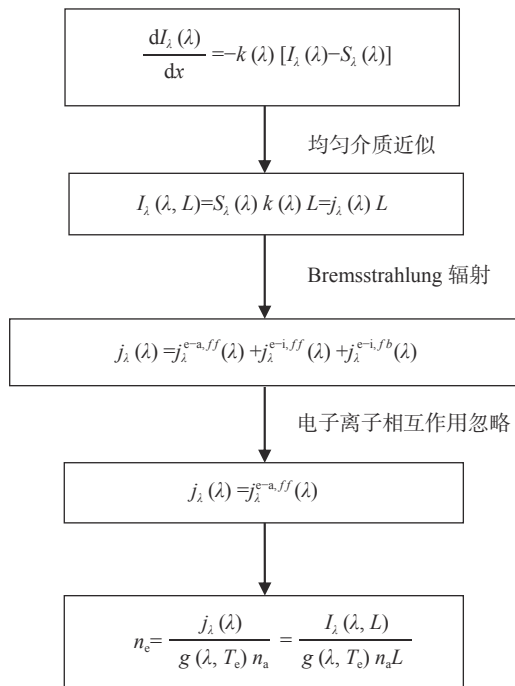


图 5 等离子体电子密度计算流程图

Fig. 5 Flow chart of plasma electron density calculation

为了便于求解方程，这里考虑在腔体中冲入的介质是均匀的情况下对方程进行求解。吸收系数  $k(\lambda)(\text{m}^{-1})$  和发射系数  $j_\lambda(\lambda)(\text{Wm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1})$  与位置无关。发射系数的大小主要是由电子与原子之间的碰撞辐射大小决定的<sup>[20]</sup>。实验中，我们通过改变给腔体供电的放电功率来产生等离子体，再探测固定波长 (486.13 nm) 的光谱，对这个波长的谱线进行 Stark 展宽拟合，从而得到等离子体的电子密度  $n_e$ 。在充入氦气和未充入氦气的空气状态下，分别测试了腔体放电功率为 100%、90%、80%、70%、60% 和 50% 时的等

离子体电子密度  $n_e$ ，测试计算结果如表 1 所示。为了获得量级较小的等离子体电子密度，将腔体的放电功率控制在 10%。由于电离氦气不会产生变化量较大的电子密度，因此电离空气获得 10 量级的电子密度。

表 1 不同放电功率下等离子体电子密度  
Tab. 1 Plasma electron density at different discharge powers

放电功率/ %	氦气放电电子密度/ ( $10^{12} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	空气放电电子密度/ ( $10^{12} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
10	/	0.0756
50	5.45	6.27
60	7.34	6.5
70	8.09	7.33
80	9.61	7.16
90	10.17	6.46
100	11.27	6.22

由表 1 可以发现，在相同的放电功率下，氦气放电产生的等离子体电子密度比空气放电大，因此我们选择在腔体中充入氦气可以提高等离子体的电子密度。实验中，为了获得明显特征，用太赫兹时域光谱仪分别测试了充入氦气时放电功率为 100%、80%、60% 和电离空气时放电功率为 10% 下等离子体的传输特性。

### 3 实验结果及分析

本次实验通过使等离子体的厚度、温度和碰撞频率不变，只改变等离子体的振荡频率这一参数，而振荡频率的大小只与等离子体的电子密度有关<sup>[17]</sup>，因此通过改变电子密度来研究太赫兹波在等离子体中的传输特性。为了获得变化较明显的实验现象，分别测试了充入氦气时放电功率为 100%、80%、60% 和电离空气时放电功率为 10% 这四种情况，通过多次测量平均处理后，得到以下结果。图 6 为太赫兹波在等离子体不同电子密度下的时域信号，由图 6 得到如下现象：随着电子密度的增加，太赫兹主峰逐渐左移；当等离子体的电子密度增大时，等离子体的振荡频率  $\omega_p$  也变大，由式(2)得到  $\beta$  越小，从而导致折射率变小，传播速度越快。

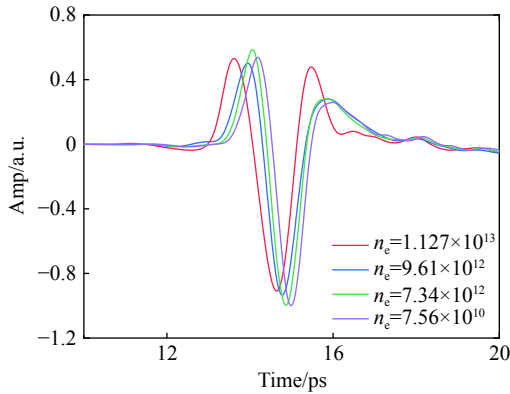


图 6 不同电子密度下太赫兹波的时域信号

Fig. 6 Time domain signal of terahertz waves at different electron densities

图 7 为不同电子密度下太赫兹波的透射谱, 实验表明, 透射率随着电子密度的增大而减小。由于等离子体中离子质量远远大于电子质量, 且离子处于低频的振荡频率远远低于电子振荡频率, 所以等离子体振荡频率可以用电子振动角频率来描述。当等离子体的电子密度增大时, 等离子体的振荡频率  $\omega_p$  变高, 从而导致式(2)中  $\alpha$  值变大, 而  $\alpha$  表达的是由于电子碰撞吸收造成太赫兹波能量损失, 说明  $\alpha$  越大, 太赫兹波能量损失越大, 透射率越低。所以透射率随着电子密度的增大而减小。在吸收谱和透射谱中出现了一些尖峰, 这是由于 Fabry-Perot 共振导致电磁波在有限厚度的介质中传输时产生边界效应, 从而形成的几何振荡<sup>[11]</sup>。

图 8 为不同电子密度下太赫兹波的吸收谱, 与透射谱类似, 谱线上出现了小的吸收峰。其他条件相同时, 当等离子体的电子密度的增大, 等

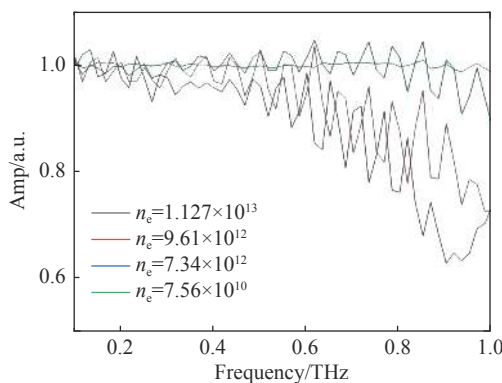


图 7 不同电子密度下太赫兹波的透射谱

Fig. 7 Transmission spectra of terahertz waves at different electron densities

离子体中的自由电子越多。而电子从电场中吸收能量, 因此随着电子密度的增大, 等离子体对太赫兹波的吸收也越强。

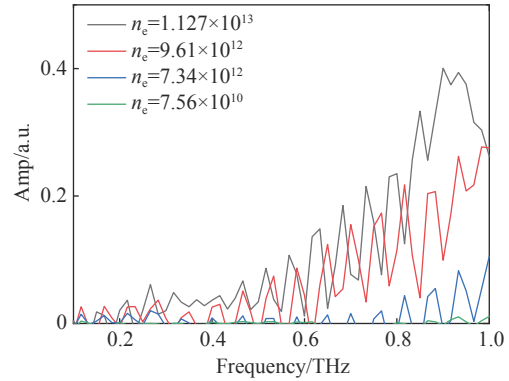


图 8 不同电子密度下太赫兹波的吸收谱

Fig. 8 Absorption spectra of terahertz waves at different electron densities

## 4 结 论

本文从实验的角度分析了不同电子密度对垂直极化太赫兹波在均匀非磁化等离子体中的传输影响, 根据实验结果得到以下规律: 随着电子密度的越大, 太赫兹波在等离子体中的传播速度越快; 随着电子密度的增大, 太赫兹波衰减越大。本文采用了频谱范围大于 0.22 THz 的太赫兹波进行等离子体的传输实验, 实验表明太赫兹频段可以被用来解决飞行器“黑障”区通信问题。本文的实验提供的参考具有实际意义。

### 参考文献:

- [1] MITCHELL F H. Communication-system blackout during reentry of large vehicles[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55(5): 619 – 626.
- [2] RYBAK J P, CHURCHILL R J. Progress in reentry communications[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, AES-7(5): 879 – 894.
- [3] ZENG X J, YU Z F, BU S Q, et al. Research on the RCS of hypervelocity model and its plasma sheath[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(6): 645 – 649.
- [4] 姚博. 高速飞行器等离子鞘套信道统计模型研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [5] ABDUL-MUNAIM A M, ALLER M M, PREU S, et

- al. Discriminating gasoline fuel contamination in engine oil by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Tribology International*, 2018, 119: 123 – 130.
- [ 6 ] CHEN H, CHEN X F, MA S H, et al. Quantify glucose level in freshly diabetic's blood by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2018, 39(4): 399 – 408.
- [ 7 ] MA Y Y, HUANG H C, HAO S B, et al. Investigation of copper sulfate pentahydrate dehydration by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(6): 060702.
- [ 8 ] MACKENZIE D M A, WHELAN P R, BØGGILD P, et al. Quality assessment of terahertz time-domain spectroscopy transmission and reflection modes for graphene conductivity mapping[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9220 – 9229.
- [ 9 ] ZHENG L, ZHAO Q, LIU S Z, et al. Theoretical and experimental studies of 35 GHz and 96 GHz electromagnetic wave propagation in plasma[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2012, 24: 179 – 192.
- [10] CHEN K, XU D G, LI J N, et al. Application of terahertz time-domain spectroscopy in atmospheric pressure plasma jet diagnosis[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102928.
- [11] 袁承勋. 等离子体中太赫兹波传输特性理论研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] 郑灵, 赵青, 刘述章, 邢晓俊. 太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 381 – 387.
- [13] 李拴涛, 李军, 朱忠博, 等. 等离子体鞘套中太赫兹波传输特性研究 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(2): 203 – 207, 214.
- [14] 耿兴宁, 徐德刚, 李吉宁, 等. 太赫兹波在飞行器等离子体鞘套中的传输特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(3): 033101.
- [15] OUYANG W C, DENG W F, WU Z W. Impact of half-angles on the transmission of terahertz wave in inhomogeneous plasma sheath[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(11): 4029 – 4036.
- [16] 李郝, 杨鑫, 张正平. THz 波在不同角度磁化的非均匀磁化等离子体中的传输特性分析 [J]. *物理学报*, 2021, 70(7): 075202.
- [17] 陈家民. 等离子体鞘套层中 THz 波传输特性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [18] 刘少斌, 刘崧, 洪伟. 色散介质时域有限差分方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] WILLIAMS G P. Filling the THz gap—high power sources and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 69(2): 301.
- [20] 高瑞林. 同轴网格空心阴极等离子体诊断及微波传输特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [21] 孙博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源 [J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1349 – 1359.

(编辑: 钱紫衡)