

临近空间飞行器等离子体鞘套的太赫兹波穿透特性*

陈 锴^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 李吉宁^{1,2}, 钟 凯^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:临近空间高超声速飞行器再入过程中会产生等离子体鞘套, 干扰电磁波对飞行器的探测。针对这一问题, 对典型临近空间飞行器模型进行建模, 模拟其再入过程中不同飞行工况下的流场分布。基于流场分布对等离子体参数分布进行建模, 利用散射矩阵方法从理论上对太赫兹波在等离子体鞘套中的传输特性进行计算。计算结果表明高频太赫兹波能够有效穿透等离子体鞘套。在实验室环境下进行太赫兹主动成像实验, 实验结果显示等离子体对于太赫兹主动成像结果几乎无影响。仿真和实验结果初步证明了太赫兹技术用于高超声速飞行器探测的潜力, 这对于国防安全具有重要意义。

关键词:太赫兹波; 等离子体; 传输特性; 主动成像

中图分类号: TN95 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2022)01-055-08

Terahertz wave propagation characteristics in the plasma sheath of near space vehicle

CHEN Kai^{1,2}, XU Degang^{1,2}, LI Jining^{1,2}, ZHONG Kai^{1,2}, YAO Jianquan^{1,2}

(1. School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Plasma sheath formed during the reentry of near space hypersonic vehicle will interfere the electromagnetic wave detection. In order to solve this problem, the model of the typical near space vehicle was built, and the flow field distribution under different flight conditions during the reentry process was simulated. Based on the flow field distribution, the plasma parameter distribution was modeled, and the transmission characteristics of terahertz wave in the plasma sheath were theoretically calculated by using the scattering matrix method. The results show that high frequency terahertz wave can penetrate plasma sheath effectively. In addition, terahertz active imaging experiments were carried out in the laboratory environment. The experimental results show that the plasma exerts little effect on the terahertz active imaging results. The simulation and experimental results preliminarily prove the potential of terahertz technology for hypersonic vehicle detection, which is of great significance for national defense.

Keywords: terahertz wave; plasma; propagation characteristics; active imaging

高超声速飞行器(如飞船返回舱、洲际导弹、回收式卫星等)再入过程中由于与大气的剧烈摩擦,产生的高热与高压会使大气发生电离,从而形成等离子体鞘套。等离子体鞘套的存在会严重干扰甚至阻断电磁信号的传输,也就是“黑障”问题^[1-3]。对于航空航天领域,等离子体鞘套会影响飞行器与地面通信,造成航天安全隐患;而对于国防安全领域,等离子体鞘套会干扰对目标弹体的探测,威胁临近空间安全。针对等离子体鞘套问题,目前世界范围内的研究机构已经开展了相关研究并给出了一些解决方案,其中提高探测频率能够从根本上减少等离子体对电磁波的吸收,

是目前较有潜力的一种方法^[4-5]。太赫兹波通常指频率位于0.1~10 THz范围内的电磁波,其在电磁波谱中位于微波与红外之间。相比于穿透探测手段,太赫兹探测技术具有较高的时空分辨能力、较强的穿透能力以及热不敏感性^[6-8]。太赫兹技术用于临近空间探测有望解决“黑障”问题,研究太赫兹在等离子体中的传输特性是太赫兹探测技术实现应用的基础。

由于地面环境难以模拟再入过程的极端流场环境,目前的研究仍以理论计算为主。2012年,郑灵等分析了0.1~1 THz的TE波垂直入射均匀等离子体的过程,计算了其传输特性^[9]。2015

* 收稿日期:2021-01-07

基金项目:国家部委基金资助项目(6140415010202)

作者简介:陈锴(1996—),男,天津人,博士研究生,E-mail:chenkai_thz@tju.edu.cn;

李吉宁(通信作者),男,讲师,博士,硕士生导师,E-mail:jiningli@tju.edu.cn

年,蒋金等根据 RAM C - III 飞行实验数据,将不同海拔高度的等离子体鞘套分别构建为 Gauss 分布和 Epstein 分布,研究了太赫兹波的传输特性^[10]。对于 0.1 THz 的太赫兹波,在峰值等离子体密度为 10^{13} cm^{-3} 时,不同分布的等离子体中的衰减均低于 30 dB。2018 年, Yuan 等针对 RAM C - III 飞行器模拟进行流场仿真,计算了太赫兹波在其中的传输特性^[11]。目前关于太赫兹在等离子体中的传输特性的实验主要集中在低频太赫兹波段。2012 年,郑灵等通过激波管产生等离子体,研究 0.22 THz 波在等离子体中的传输,当电子密度达到 $2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 时太赫兹波的衰减仍在 30 dB 以下^[9]。2013 年,马平等利用激波管产生等离子体,进行 35 GHz 和 0.1 THz 电磁波在等离子体中的传输特性实验,在电子密度达到 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 时,35 GHz 电磁波不能传输而太赫兹波的衰减小于 11 dB^[12]。本课题组前期已对钝锥体、RAM C - III 等不同外形的飞行器模型进行了流场分析,对太赫兹波在非均匀磁化等离子体中的传输特性进行了计算^[13-14]。并针对一些简单的金属零件进行了扫描成像实验,初步验证了太赫兹波对于等离子体的高穿透特性^[15]。受限于成像方式,其单次成像时间较长。

本文针对等离子体鞘套问题,从理论和实验上研究了高频太赫兹波在等离子体内的传输特性。根据类先进高超声速武器 (Advanced Hypersonic Weapon, AHW) 飞行器模型对高超声速流场分布进行了仿真。根据流场分布结果与空气化学反应模型计算了等离子体参数分布,并计算了 0.1 ~ 10 THz 范围内太赫兹波的传输特性。在实验室条件下利用 2.52 THz 连续太赫兹辐射源进行了等离子体遮蔽目标的主动成像实验。

1 理论模型

等离子体是由大量带电粒子和中性粒子组成的宏观电中性物质,其物质特性较为复杂,研究方法也较为多样。当考虑其与外加电磁场的相互作用时,通常可用宏观介质理论,将其视作为耗色散介质,进而利用其介电特性描述电磁波在其中的传输过程。为简化分析,考虑均匀非磁化等离子体,其介电常数 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, 其中相对介电常数 ε_r 可描述为:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - j \frac{\nu_{en}}{\omega} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \quad (1)$$

式中:碰撞频率 ν_{en} 表征电子与中性粒子的碰撞,受外电场激励的电子通过碰撞的形式将能量传递;等离子体频率 ω_p 描述等离子体中带电粒子的

自由振荡。

考虑到电子与离子质量的较大差异,电子对等离子体频率的贡献通常可忽略不计,因此通常可将等离子体频率简化为:

$$\omega_p \approx \omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}} \quad (2)$$

式中: n_e 为等离子体中的电子密度; ε_0 为真空介电常数; m_e 为电子质量。

高超声速飞行器再入大气过程中,产生的等离子体鞘套的性质与其产生过程密切相关。由于空气电离反应的进行受到流场分布的影响,因此首先利用商用计算流体力学软件 ANSYS Fluent 对图 1 所示的类 AHW 飞行器模型进行了流场仿真。

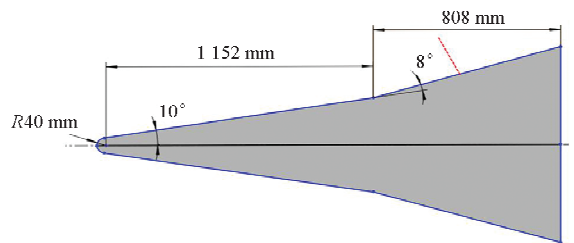
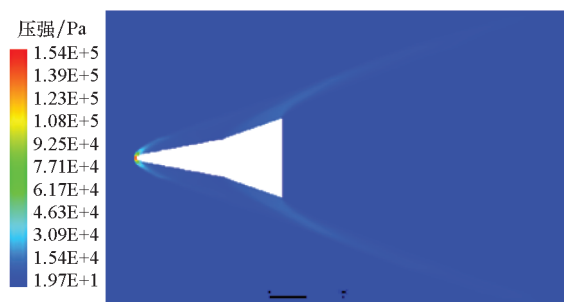


图 1 飞行器模型

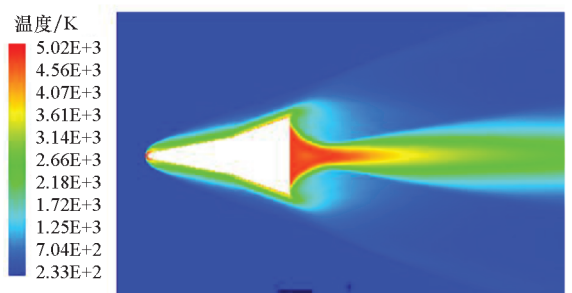
Fig. 1 Model of the vehicle

仿真环境设置为 30 km 的高空,根据 NASA 兰利研究中心的卤素掩星实验,这一海拔下大气背景温度为 232.73 K,压强为 1 180 Pa,飞行器在飞行马赫数分别为 10、13 和 15 时的流场分布如图 2 ~ 4 所示。



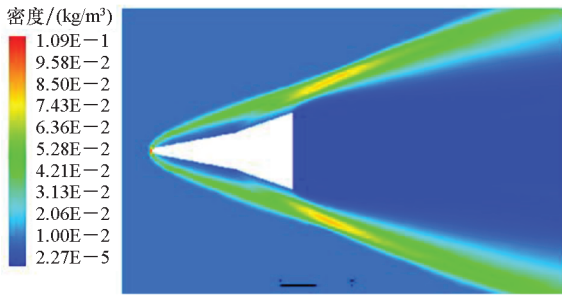
(a) 10Ma 下的压强分布

(a) Pressure distribution at 10Ma



(b) 10Ma 下的温度分布

(b) Temperature distribution at 10Ma



(c) 10Ma 下的气体密度分布

(c) Air density distribution at 10Ma

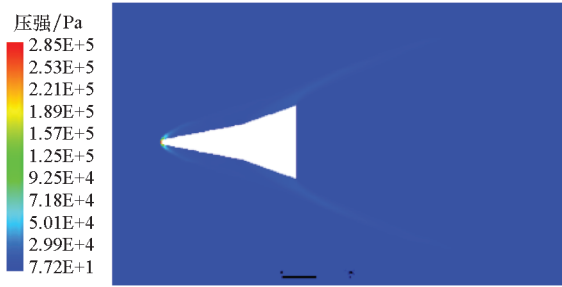


(a) 15Ma 下的压强分布

(a) Pressure distribution at 15Ma

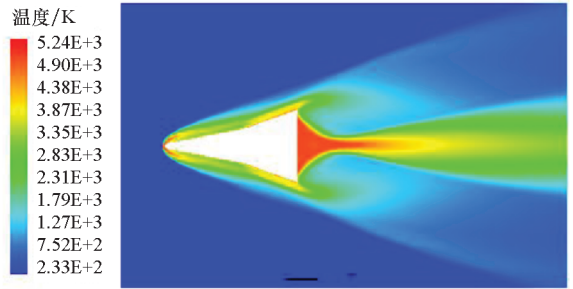
图 2 临近空间飞行器 10Ma 下的流场分布

Fig. 2 Flow field distribution of near space aircraft at 10Ma



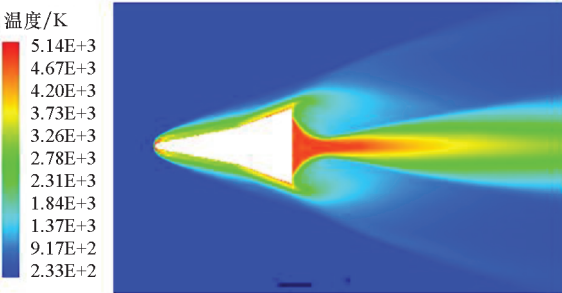
(a) 13Ma 下的压强分布

(a) Pressure distribution at 13Ma



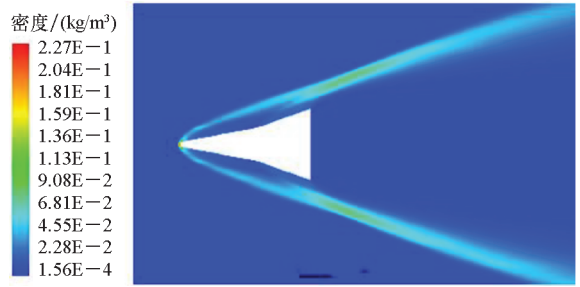
(b) 15Ma 下的温度分布

(b) Temperature distribution at 15Ma



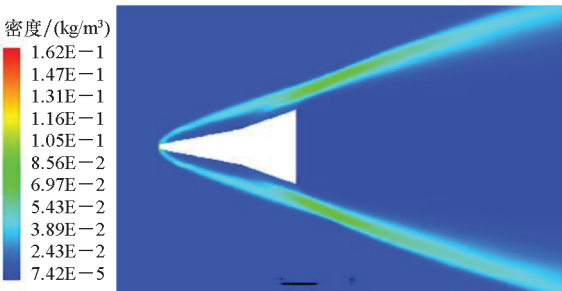
(b) 13Ma 下的温度分布

(b) Temperature distribution at 13Ma



(c) 15Ma 下的气体密度分布

(c) Air density distribution at 15Ma



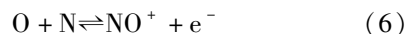
(c) 13Ma 下的气体密度分布

(c) Air density distribution at 13Ma

图 4 临近空间飞行器飞行速度 15Ma 下的流场分布

Fig. 4 Flow field distribution at 15Ma

对于等离子体的产生过程,采用 7 组元空气反应模型来描述。假设高层空气仅由氮气和氧气组成,其体积比为 79 : 21,当飞行器周围的空气被电离时,混合气体仅由 $O_2, N_2, O, N, NO, NO^+, e^-$ 组成。空气中存在以下 4 种独立的化学反应^[16]:



设各组分的分压为 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_7$,根据道尔顿分压定律,气体总压强 P 满足:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 \quad (7)$$

根据电荷守恒定律:

图 3 临近空间飞行器 13Ma 下的流场分布

Fig. 3 Flow field distribution of near space aircraft at 13Ma

$$P_6 = P_7 \quad (8)$$

根据元素守恒定律:

$$2P_1 + P_3 + P_5 + P_6 = \alpha(2P_2 + P_4 + P_5 + P_6) \quad (9)$$

其中, α 是空气中的氮气和氧气的摩尔分数比, 在数值上等于氮气和氧气的体积比。考虑到 4 个化学反应, 利用式 (10) ~ (13) 描述反应进行的程度。

$$K_{\text{eq1}} = \frac{\left(\frac{P_3}{P}\right)^2}{\frac{P_1}{P}} \quad (10)$$

$$K_{\text{eq2}} = \frac{\left(\frac{P_4}{P}\right)^2}{\frac{P_2}{P}} \quad (11)$$

$$K_{\text{eq3}} = \frac{\frac{P_3}{P} \cdot \frac{P_4}{P}}{\frac{P_5}{P}} \quad (12)$$

$$K_{\text{eq4}} = \frac{\frac{P_6}{P} \cdot \frac{P_7}{P}}{\frac{P_3}{P} \cdot \frac{P_4}{P}} \quad (13)$$

其中, K_{eq} 反应的化学平衡常数, 可以表示为:

$$K_{\text{eq},r} = \exp(B_1^r + B_2^r \ln Z + B_3^r Z + B_4^r Z^2 + B_5^r Z^3) \quad (14)$$

式中, $Z = 10\,000/T$, 在单温度模型中, T 是流场的温度, 本文中的平衡常数来自文献[16]。

通过联立求解以上方程可求得全部 7 种组分的分压, 并进一步计算出等离子体中的电子数密度^[17]:

$$n_e = \frac{\rho Y_7}{m_e} \quad (15)$$

式中: ρ 为空气密度; Y_7 为电子的质量分数; m_e 为电子质量。

碰撞频率可根据经验公式计算得到^[18]。

$$\nu_{\text{en}} = 5.8 \times 10^{12} \sqrt{TP} \quad (16)$$

式中: T 和 P 分别为等离子体的温度和压力。

根据等离子体特征参数分布可以求解电磁波的传输特性。对于非均匀分布的等离子体鞘套, 可利用散射矩阵方法进行分析^[19]。散射矩阵方法将非均匀介质考虑成若干均匀薄层, 且各层之间的参数变化相对缓慢, 如图 5 所示。由于实际飞行器产生的等离子体参数不存在突变, 因此在合理分层的情况下利用散射矩阵方法进行分析是可行的。

太赫兹波由自由空间(0)入射至等离子体, 经过 n 层等离子体层后出射到自由空间($n+1$), E_i 、 E_r 、 E_t 分别为入射、反射、透射的电磁波电场强度。

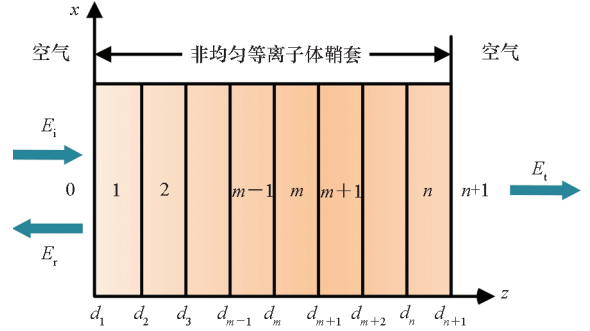


图 5 太赫兹波在非均匀分布等离子体内传输示意图
Fig. 5 Schematic diagram of THz wave transmission in inhomogeneous plasma

对于在等离子薄层中传输的电磁波, 其波数为 $k = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$, 其中 k_0 为真空中的波数。考虑到等离子体对太赫兹波的反射, 区域(0)内的总电场强度为:

$$E_z^{(0)} = E_0 (e^{-jk^{(0)}z} + A e^{jk^{(0)}z}) \quad (17)$$

式中: E_0 为初始入射的太赫兹电场强度; A 为总反射系数。

传输至第 m 层时, 电场强度为:

$$E_z^{(m)} = E_0 (B_m e^{-jk^{(m)}z} + C_m e^{jk^{(m)}z}) \quad (18)$$

式中: B_m 和 C_m 分别为第 m 层的透射系数和反射系数。

出射区域($n+1$)中只有透射波, 故有:

$$E_z^{(n+1)} = E_0 D e^{-jk^{(n+1)}z} \quad (19)$$

式中: D 为总透射系数。

每一等离子体层对透射系数和反射系数的影响可以用矩阵形式描述, 即

$$\begin{bmatrix} B_m \\ C_m \end{bmatrix} = S_m \begin{bmatrix} B_{m-1} \\ C_{m-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, S_m 为第 m 层边界处的散射矩阵。

$$S_m = \begin{bmatrix} e^{-jk^{(m)}d_m} & e^{jk^{(m)}d_m} \\ k^{(m)} e^{-jk^{(m)}d_m} & -k^{(m)} e^{jk^{(m)}d_m} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} e^{-jk^{(m-1)}d_m} & e^{jk^{(m-1)}d_m} \\ k^{(m-1)} e^{-jk^{(m-1)}d_m} & -k^{(m-1)} e^{jk^{(m-1)}d_m} \end{bmatrix} \quad (21)$$

为满足入射和出射表面的边界条件, 等离子体整体须满足:

$$S_g \begin{bmatrix} A \\ 1 \end{bmatrix} = V_p \cdot D \quad (22)$$

其中:

$$\mathbf{V}_p = \frac{1}{2k^{(n)}} \begin{bmatrix} k^{(n)} + k^{(n+1)} e^{j(k^{(n)} - k^{(n+1)})d_p} \\ k^{(n)} - k^{(n+1)} e^{-j(k^{(n)} + k^{(n+1)})d_p} \end{bmatrix} \quad (23)$$

\mathbf{S}_g 表示总散射矩阵,为各层散射矩阵之积。

$$\mathbf{S}_g = \left(\prod_{m=n}^2 \mathbf{S}_m \right) \mathbf{S}_1 \quad (24)$$

\mathbf{S}_g 可以写成 $\mathbf{S}_g = [\mathbf{S}_{g1}, \mathbf{S}_{g2}]$ 的形式,则式(22)可写为:

$$\begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix} = -(\mathbf{S}_{g1} - \mathbf{V}_p)^{-1} \cdot \mathbf{S}_{g2} \quad (25)$$

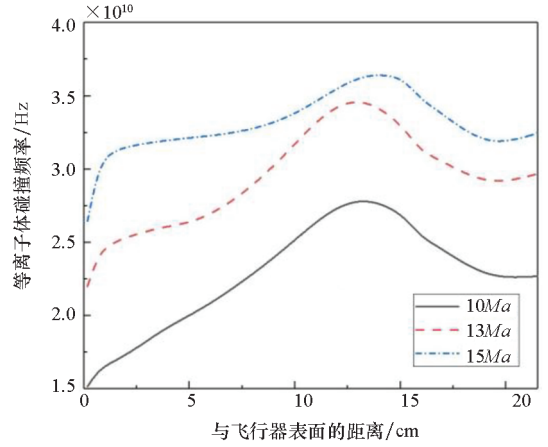
根据式(25)以及等离子体各层折射率分布情况,可以计算得出总的反射系数和透射系数。反射率 R 、透射率 T 和吸收率 Q 为:

$$\begin{cases} R = |A|^2 \\ T = |D|^2 \\ Q = 1 - R - T \end{cases} \quad (26)$$

2 数值模拟分析

根据上述方法,首先对不同飞行马赫数下的等离子体电子密度分布和碰撞频率分布进行了计算。考虑到计算的复杂程度,仅针对图 1 中红色虚线位置处的等离子体参数分布进行了计算。红色虚线距飞行器头部约 1.5 m,根据流场计算结果,此处具有较高的温度与压强,生成的等离子体较为稠密,对电磁波衰减较强,因此选取红色虚线作为典型位置进行分析,结果如图 6 所示。

图 6 表明随着飞行马赫数的增加,等离子体电子密度和碰撞频率均增加。这是由于飞行马赫数的增加使得飞行器表面与空气摩擦加剧,导致温度升高,进而使得化学反应朝着正反应方向进行,等离子体电子密度增加,并且粒子之间的碰撞更剧烈,导致碰撞频率增加。随着与飞行器距离的增大,等离子体电子密度下降,这是由于温度对



(b) 等离子体碰撞频率分布

(b) Collision frequency distribution of plasma

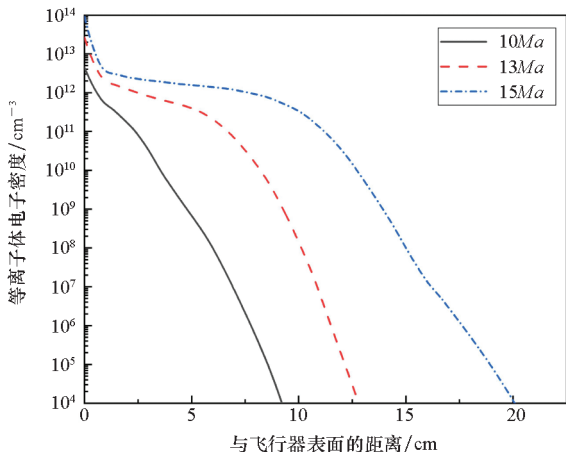
图 6 不同飞行马赫数下等离子体鞘套的电子密度和碰撞频率分布

Fig. 6 Electron density and collision frequency distribution of plasma sheath at different Mach numbers

空气反应的进行程度影响较大,因而影响电子密度分布。而碰撞频率先增加后下降,这是温度和压强共同作用的结果。

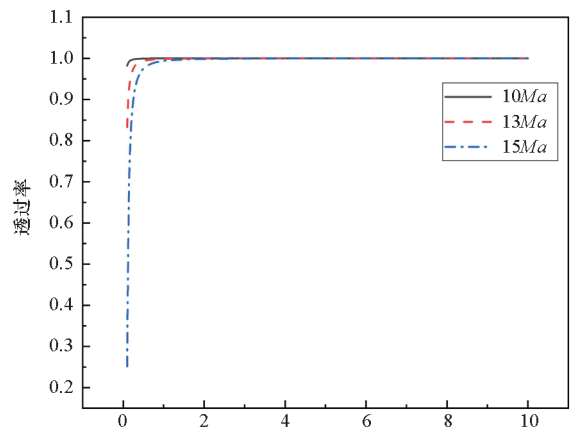
根据等离子体的特征参数分布计算了 0.1 ~ 10 THz 范围内的太赫兹波的传输特性,如图 7 所示。

图 7 表明随着太赫兹波频率的升高,透过率上升,反射率下降,反射曲线周期振荡,吸收率下降。造成这种现象的原因是,当入射波频率增加时,电磁场周期性变化的速度加快,使电子未能及时做出响应,导致吸收的能量变少,透过的能量变多,透过率上升,反射和吸收下降。随着飞行速度的增加,透射率下降,反射率升高,吸收率升高。这是由于电子密度的增加导致更多的电子参与到对太赫兹的吸收当中,同时碰撞频率的增加,导致了更多的能量以粒子碰撞的形式耗散。



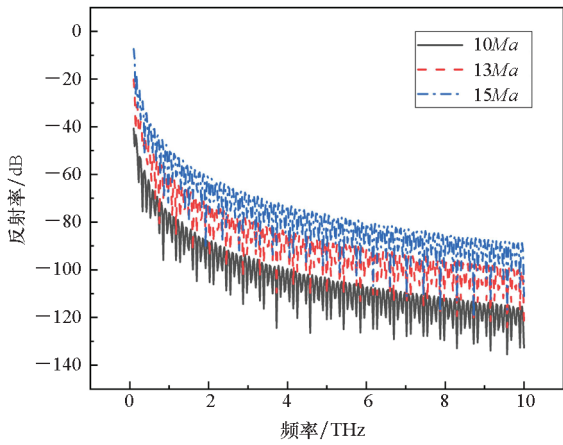
(a) 等离子体电子密度分布

(a) Electron density distribution of plasma

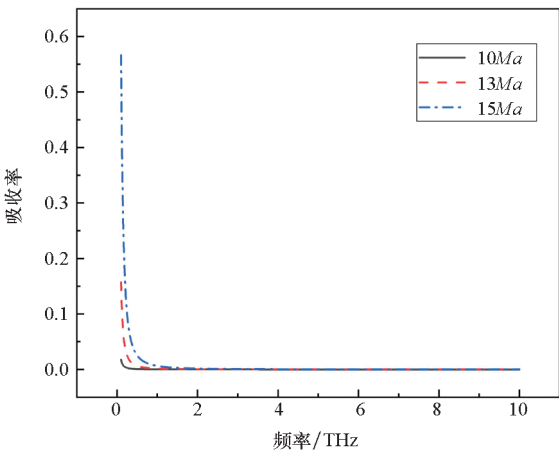


(a) 透过率

(a) Transmittance



(b) 反射率
(b) Reflectance



(c) 吸收率
(c) Absorbance

图 7 不同飞行马赫数下太赫兹波在等离子体内的传输特性

Fig. 7 Propagation characteristics of THz wave in plasma at different flight speeds

3 成像实验

根据仿真计算的结果,高频太赫兹波能够有效穿透典型飞行器再入过程形成的等离子体鞘套。为进行验证,在实验室条件下进行了模拟实验。实验装置如图 8 所示。

图 8 中太赫兹源采用光泵浦太赫兹激光器 FIRL-100,利用二氧化碳激光器泵浦不同工作气体可在 1.63 THz、2.52 THz、3.11 THz 等频点处产生连续太赫兹波。其中,通过泵浦甲醇气体在 2.52 THz 处的最高输出功率可达 150 mW,高于其他频点。考虑到输出功率差异对于成像效果的影响以及实验室条件,只开展了 2.52 THz 成像实验。经激光器出射的光束经偏折后照射在成像目标上,成像目标为模拟 AHW 飞行器的尖头金

属目标,如图 9(a)所示。

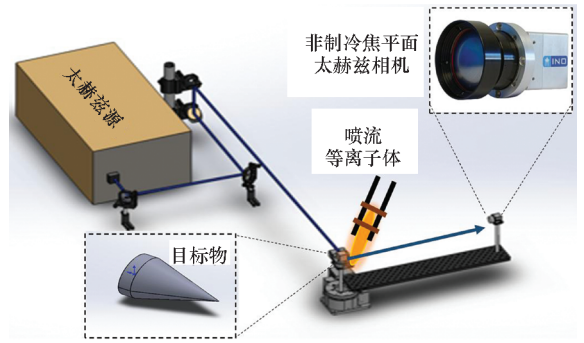


图 8 太赫兹主动成像实验装置

Fig. 8 Setup of Terahertz active imaging

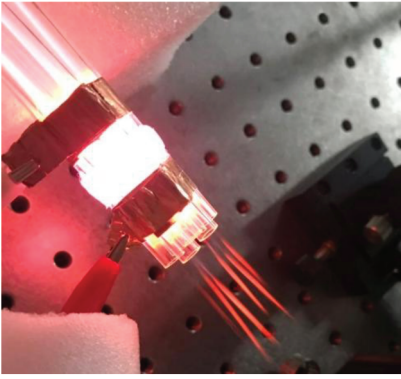
经目标散射的散射波由非制冷测热辐射计阵列相机 (INO, Microxcam-384i, 分辨率为 384 像素 × 288 像素, 帧率为 50 Hz) 接收,利用一聚乙烯片排除红外信号的干扰。利用高阻硅透镜组构成的成像镜头可在 60 cm 的距离上实现清晰成像。为了模拟等离子体对于太赫兹主动成像探测的影响,利用大气压等离子体喷流的方式模拟了等离子体鞘套。根据介质阻挡放电原理,向石英管内通入氩气以及铜质环状电极施加高压交流电。通过合理设计电极结构和放电参数,产生相对均匀、稳定的等离子体喷流阵列,产生的等离子体射流长度接近 2 cm,如图 9(b)所示。根据现有文献报道可知,该种方式产生的等离子体电子密度进行了测量,测量结果在 $10^{11} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 范围内,与再入过程产生的等离子体电子密度相近^[20-22]。课题组利用实验室自行搭建的太赫兹时域光谱系统进行了测量,测得等离子体电子密度处于 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 范围内^[23]。因此可以用于实验室环境模拟等离子体鞘套对电磁波的吸收。

图 10 显示了实验室条件下模拟太赫兹波穿透等离子体成像的结果。图 10(a)为无等离子体遮挡的太赫兹成像结果,图中条状亮斑来自



(a) 尖头金属目标模型

(a) Sharp end metal target model



(b) 大气压等离子体喷流阵列

(b) Atmospheric pressure plasma jet array

图9 临近空间飞行器等离子体鞘套的模拟

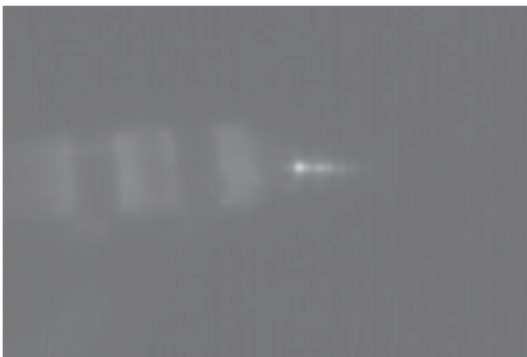
Fig.9 Simulation of plasma sheath of near space vehicle

金属目标尾部的强烈反射。利用等离子体产生装置产生稳定的等离子体喷流,靠近并遮挡金属目标,得到的太赫兹图像如图10(b)所示。图10(b)中条形亮斑亮度几乎无变化,说明了高频太赫兹波能够有效穿透等离子体鞘套,实现较为准确的探测。



(a) 无等离子体遮挡的太赫兹成像结果

(a) Result of THz imaging without plasma shelter



(b) 有等离子体遮挡的太赫兹成像结果

(b) Result of THz imaging with plasma shelter

图10 等离子体遮挡目标的成像对比试验结果

Fig.10 Results of imaging experiments of the target with plasma shelter

4 结论

本研究针对临近空间飞行器再入过程中产生的等离子体鞘套对电磁波的吸收问题,从仿真计算和地面实验两方面研究了高频太赫兹波在等离子体鞘套中的传输特性。首先根据类 AHW 飞行器模型对不同飞行状态下其周围的流场进行了仿真。根据仿真结果计算了等离子体特征参数分布,并利用散射矩阵方法将非均匀等离子体鞘套做分层处理,计算了 0.1 ~ 10 THz 范围内的太赫兹波的传输特性。计算结果显示:随着频率的增大,太赫兹波的反射率和吸收率降低,而透过率升高。随着飞行马赫数的增大,太赫兹波的透过率在全波段整体降低。随后搭建了太赫兹主动成像系统,利用 2.52 THz 光泵浦太赫兹激光器对等离子体遮蔽的金属目标进行成像。成像结果证明了高频太赫兹波对等离子体的强穿透特性。本研究为临近空间突破等离子体实现飞行器的准确探测提供了有效方法,对于临近空间防御能力的提升和航天安全的保障具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] MITCHELL F H. Communication-system blackout during reentry of large vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(5): 619 - 626.
- [2] MESSIAEN A M, VANDENPLAS P E. Theory and experiments of the enhanced radiation from a plasma-coated antenna[J]. Electronics Letters, 1967, 3(1): 26 - 27.
- [3] LANGBERG E. Optical communication during hypersonic reentry [J]. IRE Transactions on Communications Systems, 1959, 7(2): 68 - 70.
- [4] ZHANG Y Y, XU G J, ZHENG Z Q, et al. Propagation of terahertz waves in a magnetized, collisional, and inhomogeneous plasma with the scattering matrix method[J]. Optik, 2019, 182: 618 - 624.
- [5] OUYANG W C, JIN T, WU Z W, et al. Study of terahertz wave propagation in realistic plasma sheath for the whole reentry process [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(1): 460 - 465.
- [6] 王宏强, 邓彬, 秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 1 - 21.
WANG H Q, DENG B, QIN Y L. Review of terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018, 7(1): 1 - 21. (in Chinese)
- [7] 姚建铨, 钟凯, 徐德刚. 太赫兹空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术, 2013, 10(2): 1 - 16.
YAO J Q, ZHONG K, XU D G. Study and outlook of terahertz space applications [J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(2): 1 - 16. (in Chinese)
- [8] 雷红文, 王虎, 杨旭, 等. 太赫兹技术空间应用进展分析与展望[J]. 空间电子技术, 2017, 14(2): 1 - 7, 12.
LEI H W, WANG H, YANG X, et al. Analysis and progress of terahertz techniques applied in space science [J]. Space

- Electronic Technology, 2017, 14 (2): 1 - 7, 12. (in Chinese)
- [9] 郑灵, 赵青, 刘述章, 等. 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): 245202. ZHENG L, ZHAO Q, LIU S Z, et al. Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 245202. (in Chinese)
- [10] 蒋金, 陈长兴, 汪成, 等. 太赫兹波在非均匀等离子体鞘套中的传播特性[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 3109 - 3115. JIANG J, CHEN C X, WANG C, et al. Properties of terahertz wave propagation in inhomogeneous plasma sheath[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3109 - 3115. (in Chinese)
- [11] YUAN K, SHEN L F, YAO M, et al. Studies on the transmission of sub-THz waves in magnetized inhomogeneous plasma sheath [J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(1): 013302.
- [12] 马平, 秦龙, 石安华, 等. 毫米波与太赫兹波在等离子体中传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2965 - 2970. MA P, QIN L, SHI A H, et al. Millimeter wave and terahertz wave transmission characteristics in plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2965 - 2970. (in Chinese)
- [13] GENG X N, XU D G, LI J N, et al. Terahertz wave propagation characteristics in plasma sheath around a hypersonic blunt cone[J]. Optik, 2020, 206: 163633.
- [14] CHEN K, XU D G, LI J N, et al. Propagation characteristics of terahertz wave in hypersonic plasma sheath considering high temperature air chemical reactions [J]. Optik, 2020, 208: 164090.
- [15] 耿兴宁, 李吉宁, 徐德刚, 等. 等离子体中太赫兹波传输及成像探测特性研究 [J]. 光电工程, 2020, 47(5): 190075. GENG X N, LI J N, XU D G, et al. Terahertz wave propagation and imaging detection characteristics in plasma[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(5): 190075. (in Chinese)
- [16] GNOFFO P A, GUPTA R N, SHINN J L. Conservation equations and physical models for hypersonic air flows in thermal and chemical nonequilibrium [R]. NASA-TP-2867, 1989.
- [17] LI J, HE M, LI X P, et al. Multi-physics modeling of electromagnetic wave-hypersonic vehicle interactions under high-power microwave illumination: 2-D case [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3653 - 3664.
- [18] 陈伟, 郭立新, 李江挺, 等. 时空非均匀等离子体鞘套中太赫兹波的传播特性 [J]. 物理学报, 2017, 66(8): 084102. CHEN W, GUO L X, LI J T, et al. Propagation characteristics of terahertz waves in temporally and spatially inhomogeneous plasma sheath [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 084102. (in Chinese)
- [19] GUO L J, GUO L X, LI J T. Propagation of terahertz electromagnetic waves in a magnetized plasma with inhomogeneous electron density and collision frequency[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(2): 022108.
- [20] PING Z, BEN L, ZHENCHAO D, et al. Development from dielectric barrier discharge to atmospheric pressure plasma jet in helium: experiment and fluid modeling [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51: 405202.
- [21] JIANG C, MILES J, HORNEF J, et al. Electron densities and temperatures of an atmospheric-pressure nanosecond pulsed helium plasma jet in air[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(8): 085009.
- [22] LEE W, TRAN T N, OH C H, et al. Study on helium atmospheric pressure plasma jet using collisional-radiative model[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(7): 073502.
- [23] 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.