



DOI: 10.12086/oe.2020.190075

## 等离子体中太赫兹波传输及成像探测特性研究

耿兴宁<sup>1,2</sup>, 李吉宁<sup>1,2\*</sup>, 徐德刚<sup>1,2</sup>, 刘畅<sup>3</sup>,  
范小礼<sup>3</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

<sup>3</sup>光学辐射重点实验室, 北京 100854

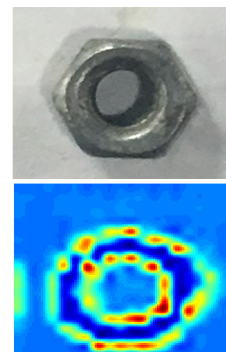
**摘要:** 本文根据散射矩阵方法模拟等离子体并建立了非均匀等离子体理论模型, 并在此基础上计算了 0.1 THz ~ 10 THz 频段的全波段太赫兹波在其中的传输特性。根据介质阻挡放电原理在实验室环境下搭建等离子体射流产生装置并产生非均匀等离子体, 进行了太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 以及宽带太赫兹源在等离子体中的透射光谱测量以及太赫兹波对等离子体遮挡下目标物的反射成像的试验。理论和实验结果均表明, 较高频太赫兹波在等离子体中有良好的穿透性, 这为太赫兹波在黑障区的通信以及雷达探测应用打下研究基础。

**关键词:** 太赫兹波; 等离子体; 传输特性

**中图分类号:** TN29; O441.4

**文献标志码:** A

**引用格式:** 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



## Terahertz wave propagation and imaging detection characteristics in plasma

Geng Xingning<sup>1,2</sup>, Li Jining<sup>1,2\*</sup>, Xu Degang<sup>1,2</sup>, Liu Chang<sup>3</sup>, Fan Xiaoli<sup>3</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>3</sup>Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China

**Abstract:** In this paper, the theoretical model of ununiform plasma sheath is established based on scattering matrix method and the transmission characteristics of 0.1 THz ~ 10 THz wave are simulated. A kind of plasma jet is produced in laboratory environment according to the principle of dielectric barrier discharge. Then the measurement of transmission spectrum of terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS), broadband terahertz source, and the terahertz wave reflective imaging of target under plasma shelter are carried out, respectively. Both theory and experiment results show that terahertz wave has good penetration in plasma, which provides a new way for communication and radar detection in blackout area.

收稿日期: 2019-02-27; 收到修改稿日期: 2019-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61705162); 装备预研基金重点项目(6140415010202)

作者简介: 耿兴宁(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波与等离子体方面的研究。E-mail: gengxingning@tju.edu.cn

通信作者: 李吉宁(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事太赫兹技术与太赫兹器件方面的研究。E-mail: jiningli@tju.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

**Keywords:** terahertz wave; plasma sheath; propagation characteristics

**Citation:** 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

## 1 引言

太赫兹波一般是指频率范围在 0.1 THz~10 THz 的电磁波,其在电磁波谱中介于毫米波与红外光波之间,具有穿透性强、安全性高、方向性好等特点。近年来,随着太赫兹波的产生和探测技术的发展,人们对太赫兹波有了更深入的认识,太赫兹技术也在越来越多的领域得到了广泛的应用,例如太赫兹雷达、太赫兹通讯、太赫兹安检、太赫兹质检、太赫兹生物成像等<sup>[1-6]</sup>。

飞行器在临近空间高超声速飞行时由于等离子体鞘套的作用会造成通信信号的中断、雷达追踪失效等影响,即所谓的“黑障”问题<sup>[7-8]</sup>。随着航空航天事业的高速发展,对这一问题的解决愈加重要。而研究通信黑障问题的关键就是研究电磁波与等离子体的相互作用。

国内外对于电磁波与等离子体的相互作用已做了若干研究,美国 NASA 在 20 世纪 70 年代的“Project RAM”项目中,研究了微波电磁波与等离子体的相互作用,提出了减小“黑障”的数种理论方法,并进行了部分相应的再入飞行实验<sup>[9]</sup>。80 年代以后,随着美国新的战略项目的开展,在等离子体对通信、电磁波传播、雷达探测和精确制导的影响方面,从理论和实验上进行了较全面和系统的研究。1988 年,美国空军曾开展大气压下电磁波在等离子体中传输的吸收特性研究<sup>[10]</sup>;90 年代初,休斯顿实验室利用等离子体隐身技术将微波反射器的雷达回波信号强度降低了 99%<sup>[11]</sup>。进入新世纪,随着太赫兹技术取得突破,太赫兹波与等离子体的相互作用研究也逐渐被人们所关注。英国兰开斯特大学的 Jamison 等<sup>[12]</sup>利用超快亚皮秒宽带太赫兹源来计算放电产生等离子体中的物理量参数,并指出其在等离子体探测中的潜在应用价值。张希成等人利用单周期太赫兹脉冲打入激光诱导的等离子体,并通过产生的荧光辐射来获取等离子体的信息<sup>[13]</sup>。但目前关于电磁波在等离子体中传播的理论研究主要集中在微波或低频太赫兹波段<sup>[14-23]</sup>,而仅有的试验研究也集中在 1 THz 以下波段<sup>[23-27]</sup>。而高频太赫兹波段远离等离子体振荡频率,没有红外和激光雷达的一些技术限制,在传输损耗、成像分辨率等方面较低频更具优势,因此,有必要从理论和实验上对较高

频率的太赫兹波在等离子体中的传输特性进行研究。

本文基于散射矩阵的方法,建立非均匀等离子体鞘套的近似理论模型,并模拟计算了全波段的太赫兹波在等离子体中的传输特性。在实验室环境下利用气体放电形成喷流等离子体,分别进行了太赫兹时域光谱系统和宽带太赫兹源系统在等离子体中的透射率测量以及太赫兹波穿透等离子体遮挡目标的成像试验。理论和试验结果都表明,全波段太赫兹波在等离子体中有很好的穿透性,该研究将为太赫兹波在临近空间高超声速飞行器的等离子体黑障问题中的应用打下研究基础。

## 2 理论模型

根据 NASA 开展的 RAM C-III 飞行试验,飞行器周围的等离子体鞘套分布可以看成高斯分布<sup>[15]</sup>,其等离子体密度分布的表达式为

$$n_e(z) = \begin{cases} n_{\text{emax}} \exp[\delta_1(z-z_0)^2] & (z_1 \leq z \leq z_0) \\ n_{\text{emax}} \exp[-\delta_2(z-z_0)^2] & (z_0 \leq z \leq z_2) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $n_{\text{emax}}$  是等离子体密度的最大值, $z$  为测量位置到飞行器表面的垂直距离, $z_0$  是高斯函数的分段点对应的位置, $\delta_1$  和  $\delta_2$  是描述高斯函数分段的常数。 $z_2-z_1$  是等离子体区域的厚度。飞行器表面等离子体的高斯函数分布如图 1 所示。

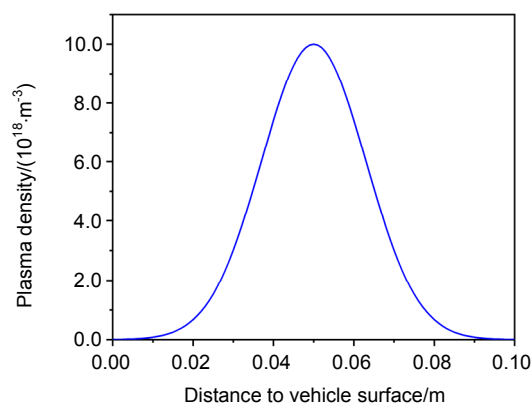


图 1 飞行器表面等离子体密度分布

Fig. 1 Plasma density distribution around vehicle surface

等离子体频率定义为  $\omega_p = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2}$ , 其中,  $\omega_{pe}$  和  $\omega_{pi}$  分别为等离子体电子和离子振荡频率,可分别表示为

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}, \quad \omega_{pi} = \sqrt{\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 m_i}}$$

其中： $n_e$ 和 $n_i$ 分别为等离子体电子密度和离子密度，且 $n_e=n_i$ ， $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$  F/m 为真空介电常数， $m_e=1.67 \times 10^{-27}$  kg 为电子质量， $m_i$ 为离子质量， $e=1.6 \times 10^{-19}$  C 为电子电量。

由于 $m_i \gg m_e$ ，因而 $\omega_{pe} \gg \omega_{pi}$ ，故有：

$$\omega_{p,m} \approx \omega_{pe,m} = \sqrt{\frac{n_{e,m} e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2)$$

超高速飞行器周围的等离子体鞘套一般可视为非磁化等离子体，非磁化等离子体的介电常数可表示为 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ，其中， $\epsilon_r$ 为非磁化等离子体相对介电常数，可表示为

$$\epsilon_r^{(m)} = 1 - \frac{\omega_{p,m}^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - j \frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_{p,m}^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \quad (3)$$

其中： $\omega$ 为电磁波角频率， $\nu_{en}=2\pi f_{en}$ 为等离子体中电子与中性粒子之间的碰撞频率，也称等离子体碰撞频率。另有，等离子体中波数表示为 $k^{(m)} = k_0 \sqrt{\epsilon_r^{(m)}}$ ，其中 $k_0 = \omega/c$ 为真空中波数。

利用散射矩阵方法模拟太赫兹波在等离子体中的传输。散射矩阵法是将连续非均匀的电介质划分为 $n$ 层电介质薄层，假设每一层介质都是均匀的，以此来进行电介质建模，并计算平面波在整个电介质中的传输特性<sup>[28-29]</sup>。

如图2所示，等离子体按照高斯函数分布，电磁波沿着 $xoz$ 平面传播，垂直入射等离子体，(0)区域电场表示为

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

中间第 $m$ 层电场表示为

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

( $n+1$ )区域电场表示为

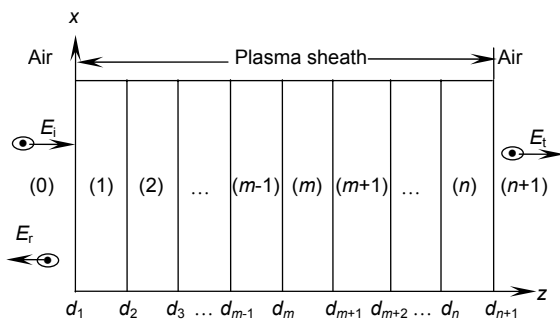


图2 太赫兹波在等离子体中的传播模型

Fig. 2 Terahertz wave propagation model in plasma

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

其中： $A$ 是总的反射系数， $D$ 是总透射系数， $B_m$ 、 $C_m$ 是第 $m$ 层透射系数和反射系数。根据边界条件可得：

$$\begin{bmatrix} B_m \\ C_m \end{bmatrix} = S_m \begin{bmatrix} B_{m-1} \\ C_{m-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$S_m$ 是第 $m$ 层的散射矩阵，可表示为

$$S_m = \begin{bmatrix} e^{-jk^{(m)}d_m} & e^{jk^{(m)}d_m} \\ k^{(m)} e^{-jk^{(m)}d_m} & -k^{(m)} e^{jk^{(m)}d_m} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} e^{-jk^{(m-1)}d_m} & e^{jk^{(m-1)}d_m} \\ k^{(m-1)} e^{-jk^{(m-1)}d_m} & -k^{(m-1)} e^{jk^{(m-1)}d_m} \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了匹配 $z=0$ 的边界条件，可得：

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = S_1 \begin{bmatrix} A \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中：

$$S_1 = \frac{1}{2k^{(1)}} \begin{bmatrix} k^{(1)} - k^{(0)} & k^{(1)} + k^{(0)} \\ k^{(1)} + k^{(0)} & k^{(1)} - k^{(0)} \end{bmatrix}$$

同样，为了匹配 $z=d_{n+1}$ 的边界条件，可得：

$$\begin{bmatrix} B_n \\ C_n \end{bmatrix} = V_p \cdot D$$

其中：

$$V_p = \frac{1}{2k^{(n)}} \begin{bmatrix} k^{(n)} + k^{(n+1)} e^{j(k^{(n)} - k^{(n+1)})d_p} \\ k^{(n)} - k^{(n+1)} e^{-j(k^{(n)} + k^{(n+1)})d_p} \end{bmatrix}$$

从上式中，可得：

$$S_g \begin{bmatrix} A \\ 1 \end{bmatrix} = V_p \cdot D$$

$S_g$ 是总散射矩阵。

$$S_g = \left( \prod_{m=1}^n S_m \right) S_1 \quad (6)$$

$S_g$ 可以表示成 $S_g = (S_{g1}, S_{g2})$ ，则上式可写为

$$\begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix} = -(S_{g1} - V_p)^{-1} \cdot S_{g2} \quad (7)$$

从而可以解得总的反射系数和透射系数 $A$ 和 $D$ 。

则反射率，透射率和吸收率为

$$\begin{cases} R = |A|^2 \\ T = |D|^2 \\ Q = 1 - R - T \end{cases} \quad (8)$$

选取等离子体碰撞频率为 $f_{en} = 0.2 \times 10^{12}$  Hz，等离子体厚度 $d=10$  cm，等离子体密度最大值 $n_{e,max} = 10^{19}$  m<sup>-3</sup>，则0.1 THz~10 THz波的传输特性如图3所示。

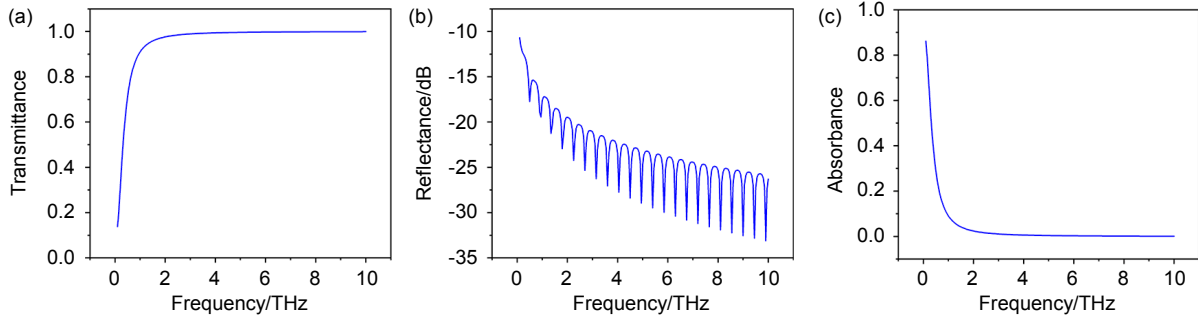


图 3 太赫兹波在等离子体中的传输特性。(a) 透射率; (b) 反射率; (c) 吸收率

Fig. 3 Propagation characteristics of terahertz wave in plasma. (a) Transmittance; (b) Reflectance; (c) Absorbance

由图 3 可以看出,随着太赫兹波频率的增加,其在等离子体中的透射率增加,反射率减小,吸收减小,这是因为当太赫兹波频率增加时,等离子体中的电子不能及时响应快速变化的电场,导致其与电场的相互作用减少,更多的能量能透过等离子体。在 2 THz 以下的较低频率范围内,透射率增长的很快,0.1 THz 时的透射率为 14%,1 THz 时的透射率为 91%,2 THz 时的透射率为 98%;频率在 2 THz 以上时,透射率逐渐趋于稳定并接近 100%。反射率采用分贝标度表示,由于电磁波在等离子体的边界多次反射,反射率会出现明显的周期振荡,当等离子体中的波数的实部  $k = n\pi/d$  时,会发生第  $n$  阶共振<sup>[20]</sup>,在本文所设条件下,振荡周期为 0.45 THz。由于反射系数在太赫兹波段非常小,因此采用反射率的分贝标度能更清晰地表示出太赫兹波的周期振荡情况。等离子体对太赫兹波的吸收主要随着透射率的变化而变化,在 2 THz 以下的频率范围内,吸收的变化较为剧烈,而在 2 THz 以上的高频段逐渐趋于稳定,由于高频太赫兹波几乎能全部透过等离子体,因此吸收接近于 0。从传输特性可以得出,太赫兹波能够穿透等离子体鞘套,为解决

临近空间通信黑障问题提供了一种重要的方法。

### 3 实验

#### 3.1 等离子体产生实验

根据介质阻挡放电原理,利用高压电源、石英管和送气装置组成大气压等离子体射流产生装置<sup>[30]</sup>,如图 4(a)所示。石英管内径 6 mm,管壁厚度 1 mm,管壁外靠近石英管口处包裹铜质环电极,电极上加入电压 10 kV,频率 20 kHz 的高压电源,并在石英管内通入氦气。放电时,氦气通过电极时被电离产生等离子体,被喷出管外形成长度 20 mm,最大宽度 5 mm 左右的射流,如图 4(b)所示。这种方式产生的等离子体不同于传统的介质阻挡放电将等离子体限制在放电间隙中,而是使等离子体与高压电极分开,增加了安全性,等离子体的温度接近室温,在生物医学,材料改性等方面有着广泛的应用。荷兰埃因霍温理工大学的课题组分别测量了不同气体的介质阻挡放电射流等离子体在径向上的分布,密度为  $10^{18} \text{ m}^{-3} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$  量级,并且从管口中心向四周递减,类似于高斯分布<sup>[31-32]</sup>。

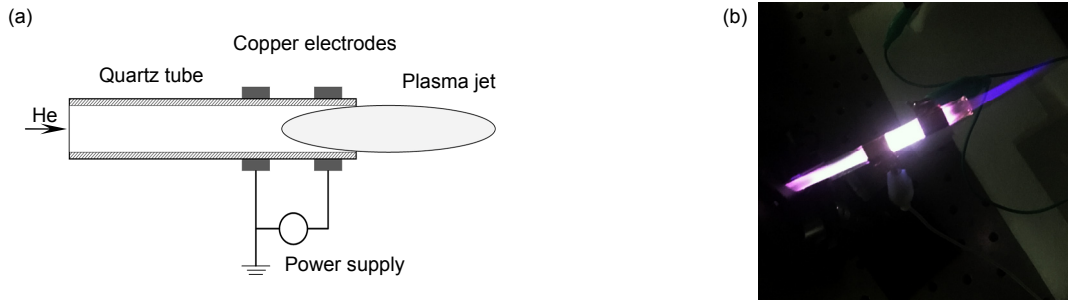


图 4 介质阻挡放电。(a) 装置结构图; (b) 等离子体射流

Fig. 4 Dielectric barrier discharge. (a) Device structure; (b) Plasma jet

### 3.2 等离子体在太赫兹波中透射实验

分别利用太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)以及实验室自主搭建的宽带太赫兹辐射源系统<sup>[33]</sup>测量太赫兹波在等离子体中的透射率。TDS的探测系统如图5所示,太赫兹辐射由光电导天线产生,光谱范围0.1 THz~4 THz,太赫兹脉冲经硅透镜发射,通过两个离轴剖面镜聚焦到待测的样品上,携带样品的信息再次经过两个离轴剖面镜聚焦到探测器上。为降低水汽等对太赫兹波的吸收,整个系统置于干燥空气中。

宽带太赫兹辐射源测量太赫兹波在等离子体中透射率的实验系统如图6所示。Nd:YAG激光器产生1064 nm的激光,通过KTP晶体后倍频进入两块KTP晶体组成的光学参量振荡(OPO)系统,其中一块KTP晶体固定,另一块放置在可调的振镜上控制参量振荡的角度,以实现双波长的输出,两束波长相近的光通过DAST晶体差频得到太赫兹波的输出。输出的太赫兹波经过等离子体后利用太赫兹探测器接收,将经过等

离子体时的信号与无等离子体时的信号相比得到太赫兹波在等离子体中的透射率。

THz-TDS 以及宽带太赫兹源的透射率测量结果如图7(a)和7(b)所示,利用TDS系统同样可以测得等离子体的平均密度<sup>[34]</sup>,本文中的等离子体平均密度大约为 $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ,以此为基础的理论计算结果同样表示在图7(a)和7(b)中。从图中可以看出,利用THz-TDS所测得的透射率在0.6 THz以下的频率范围内随着频率的增加而增加,而在0.6 THz以上逐渐稳定在98%左右,与模拟的结果基本一致;宽带源由于频率远高于等离子体频率,其所测透射率基本稳定在97%上下,而按照此条件模拟计算的等离子体透射率在1 THz以上达到99%。图7(a)中测量结果与计算结果在高频段存在差异,是由于TDS的辐射源在高频区域的功率明显下降,系统信噪比降低所致。宽带太赫兹源在2 THz~6 THz及11 THz左右辐射功率较大,图7(b)中测量与计算结果的差异来源于太赫兹辐射功率的下降导

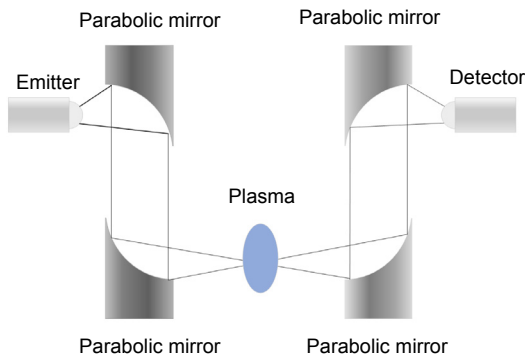


图5 THz-TDS透射率测量系统  
Fig. 5 Terahertz time-domain spectroscopy transmittance measurement system

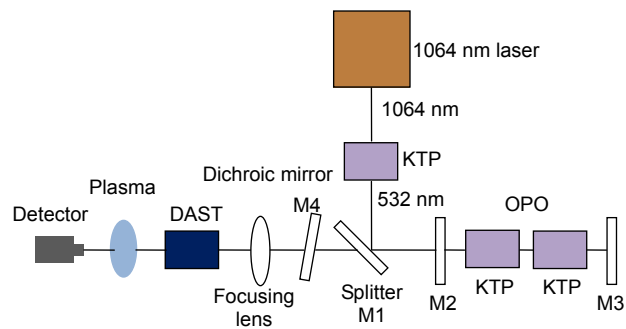


图6 宽带太赫兹源透射率测量系统  
Fig. 6 Broadband terahertz source transmittance measurement system

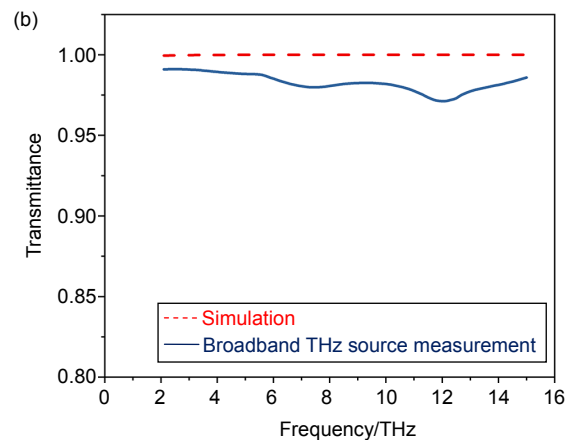
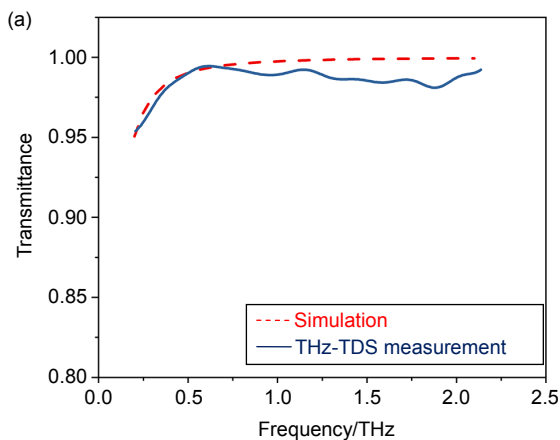


图7 太赫兹波在等离子体中透射率。(a) THz-TDS 实验测量结果; (b) 宽带源实验测量结果

Fig. 7 Transmittance of terahertz wave in plasma.

(a) Measurement result with THz-TDS; (b) Measurement result with broadband source

致系统信噪比的降低。并且考虑到宽带源在开放的实验室环境下有较大的大气损耗，所以测量结果较理论模拟值差异较大，而 TDS 系统测量时持续充入干燥空气，故测量与理论误差相对较小。

### 3.3 太赫兹波目标反射实验

采用连续波太赫兹成像系统进行太赫兹波穿透等离子体并对目标物进行反射成像的实验，实验的装置如图 8 所示。光源采用光泵浦连续二氧化碳激光器，输出太赫兹频率为 2.52 THz，利用频率为 50 Hz 的斩波器调制输出信号，以满足探测器的响应特性。为了减少由于微弱的功率波动引起的图像噪声，利用线栅将信号分成参考光和信号光，参考光利用 Golay cell 检测，信号光通过离轴剖面镜组成的共焦系统穿透等离子体，并聚焦在目标物上，同样用 Golay Cell 检测。目标物放置在计算机控制的扫描台上，并获得二维图像。等离子体的尺寸大于光斑尺寸，能实现对光斑的

遮挡。采用的目标物为金属垫片和螺母，垫片为黑色碳钢材质，外径 7 mm，内径 3 mm，厚度 0.5 mm；螺母为银白色不锈钢材质，内径 3 mm，外边长 3 mm，厚度 2 mm 的六角螺母。由于太赫兹波不能穿透金属，所以能接收到太赫兹波被金属反射的信号。根据理论模拟，2.52 THz 的太赫兹波在等离子体中的透射率高达 98%以上，此波段太赫兹波能以较少的损耗穿透等离子体。

垫片和螺母的反射成像如图 9 所示，可以看出，反射成像基本能反映出目标物的轮廓，颜色越亮代表反射率越高，但由于目标物具有一定的厚度以及表面的粗糙程度不同，并且太赫兹波在 30°角入射，导致物体表面出现不规则的散射而使成像出现畸变。

利用 FDTD Solutions 仿真太赫兹波透过等离子体并被目标物反射成像，结构如图 10 所示，外围橙色方框为 FDTD 的模拟区域，红色部分为高斯分布的等

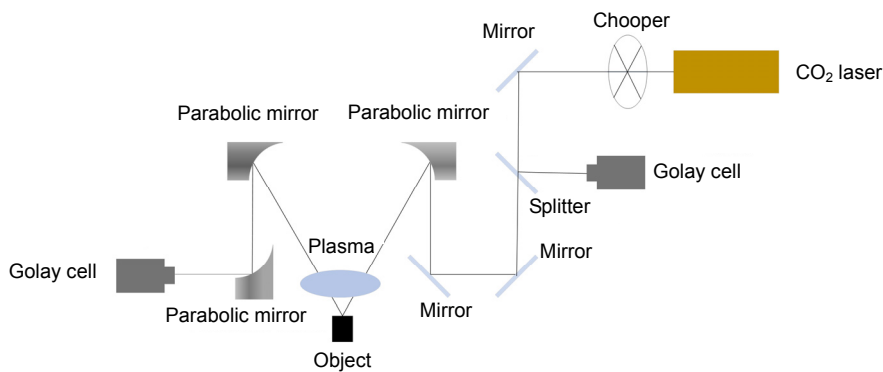


图 8 太赫兹波等离子体成像系统  
Fig. 8 Terahertz wave plasma imaging system

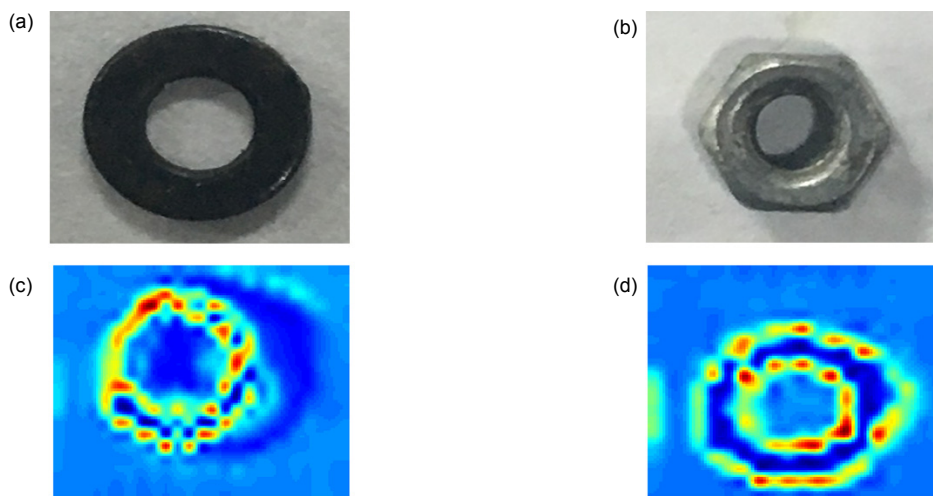


图 9 目标物及其太赫兹波反射成像。(a) 垫片；(b) 螺母；(c) 垫片反射成像；(d) 螺母反射成像

Fig. 9 Target and terahertz wave reflection imaging.

Optical image of (a) a shim and (b) a nut; (c) Reflection image of the shim and (d) reflection image of the nut

离子体鞘套。等离子体密度按照图 1 所示的高斯分布均匀分成 10 层, 密度值为每层所对应区域密度的中值。绿色为金属目标物, 材料设置为理想导体, 既具有金属材料的性质又能够缩短仿真时间, 左侧白框为光源, 设置为 2.52 THz 的平面波, 太赫兹波向右侧传播。光源与等离子体之间的黄框为频域场和能量监视器, 用于记录反射成像的图像数据。

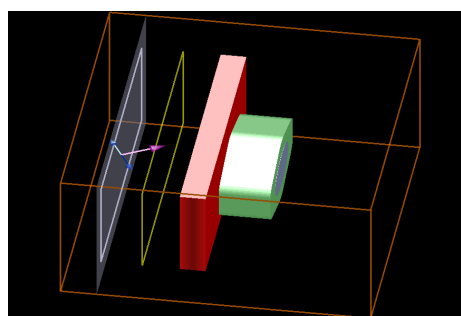


图 10 等离子体覆盖目标的仿真结构  
Fig. 10 Simulation structure under plasma shelter

分别对螺母和垫片形状的目标物进行反射成像仿真, 为减少仿真所需内存, 将物体尺寸缩小到原尺寸的一半。仿真结果如图 11(a)、11(b)所示。可以看出, 仿真的结果能够反映出目标物的轮廓, 与实验的结果基本符合。

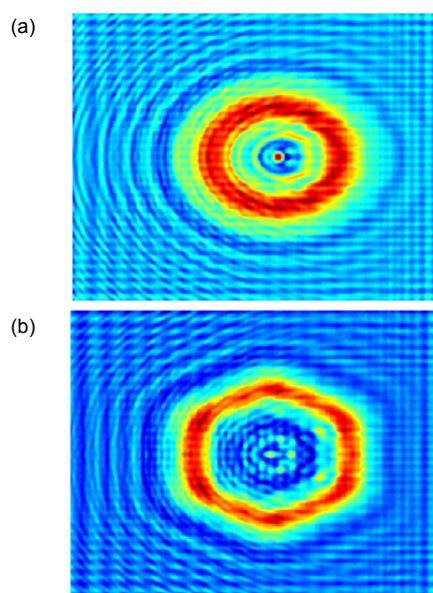


图 11 反射成像仿真。(a) 垫片; (b) 螺母  
Fig. 11 Simulation result of reflection imaging.  
(a) A shim and (b) a nut

## 4 总结

本文利用散射矩阵方法建立了太赫兹波在非均匀

等离子体中的传输模型, 并模拟计算了 0.1 THz~10 THz 的全波段太赫兹波在非均匀等离子体中的传输特性。结果表明, 随着太赫兹波频率的增加, 其在等离子体中的透射率增加, 反射率减小, 吸收减小, 在较低频率范围内, 透射率增长的很快, 在频率 2 THz 以上时, 透射率逐渐趋于稳定并接近 100%。由于电磁波在等离子体的边界多次反射, 反射率会出现明显的周期振荡, 振荡周期为 0.45 THz。等离子体对太赫兹波的吸收在 2 THz 以下的频率范围内的变化较为剧烈, 而在 2 THz 以上的高频段逐渐趋于稳定, 由于高频太赫兹波几乎能全部透过等离子体, 因此吸收接近于 0。随着太赫兹波频率的增加, 太赫兹波越能穿透等离子体。根据介质阻挡放电的原理产生非均匀等离子体, 并分别利用太赫兹时域光谱系统、超宽带太赫兹源系统和二氧化碳泵浦太赫兹激光器进行了超宽带太赫兹波对等离子体的透射测量以及在等离子体覆盖下目标物的 2.52 THz 太赫兹波反射成像实验。试验结果显示, 在实验室环境下的非均匀等离子体对超宽带太赫兹波的透射率均达到 90%以上。成像测量结果与仿真结果对比, 二者具有较好的一致性。理论和试验都表明, 太赫兹波, 特别是高频太赫兹波对非均匀等离子体有很好的穿透性, 为解决临近空间高超声速飞行器的等离子体黑障问题提供了有效的手段。

## 参考文献

- [1] Yao J Q. Introduction of THz-wave and its applications[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2010, **22**(6): 703-707.  
姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, **22**(6): 703-707.
- [2] Bu F L, Xing H Y. Progress of Terahertz spectroscopy[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, **23**(4): 1-6.  
卜凡亮, 行鸿彦. 太赫兹光谱技术的应用进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, **23**(4): 1-6.
- [3] Chang S L, Wang X F, Shao Z Z. Terahertz spectrum and its application[J]. *National Defense Science & Technology*, 2015, **36**(2): 17-22.  
常胜利, 王晓峰, 邵铮铮. 太赫兹光谱技术原理及其应用[J]. 国防科技, 2015, **36**(2): 17-22.
- [4] Zhang D W, Yuan J M. Introduction to Terahertz technology[J]. *National Defense Science & Technology*, 2015, **36**(2): 12-16.  
张栋文, 袁建民. 太赫兹技术概述[J]. 国防科技, 2015, **36**(2): 12-16.
- [5] Yao J Q, Zhong K, Xu D G. Study and outlook of Terahertz space applications[J]. *Space Electronic Technology*, 2013, **10**(2): 1-16.  
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.
- [6] Liu F, Zhu Z B, Cui W Z, et al. Application of Terahertz techniques in space science[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, **11**(6): 857-866.  
刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J].

- 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, **11**(6): 857–866.
- [7] Garg P, Dodiya A K. Reducing RF blackout during re-entry of the reusable launch vehicle[C]//*Proceedings of 2009 IEEE Aerospace Conference*, 2009: 918–932.
- [8] Gillman E D, Foster J E, Blankson I M. Review of leading approaches for mitigating hypersonic vehicle communications blackout and a method of ceramic particulate injection via cathode spot arcs for blackout mitigation[R]. NASA/TM-2010-216220, E-17194, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, United States, 2010.
- [9] Huber P W, Evans J S, Schexnayder Jr C J. Comparison of theoretical and flight-measured ionization in a blunt body re-entry flowfield[J]. *AIAA Journal*, 1971, **9**(6): 1154–1162.
- [10] Vidmar R J. Generation of tenuous plasma clouds in the Earth's atmosphere[R]. Annual Report, SRI International Corp., Menlo Park, CA, United States, 1987.
- [11] Gregoire D J, Santoru J, Schumacher R W. Electromagnetic-wave propagation in unmagnetized plasmas[R]. Final Report, Hughes Research Labs., Malibu, CA, United States, 1992.
- [12] Jamison S P, Shen J L, Jones D R, et al. Plasma characterization with terahertz time-domain measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(7): 4334–4336.
- [13] Liu J L, Zhang X C. Plasma characterization using terahertz-wave-enhanced fluorescence[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(4): 041505.
- [14] Liu J F, Xi X L, Wan G B, et al. Simulation of electromagnetic wave propagation through plasma sheath using the moving-window finite-difference time-domain method[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, **39**(3): 852–855.
- [15] 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.  
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.
- [16] Zhou T X, Chen C X, Jiang J, et al. Terahertz wave propagation in magnetized plasma sheath[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, **28**(7): 073101.  
周天翔, 陈长兴, 蒋金, 等. 太赫兹波在磁化等离子体中传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, **28**(7): 073101.
- [17] Xia X R, Yin C Y, Wang G M. Electromagnetic characteristic analysis of non-uniform magnetized plasma slab[J]. *Aerospace Shanghai*, 2008, **25**(6): 8–11, 19.  
夏新仁, 尹成友, 王光明. 非均匀磁化等离子体层的电磁特性分析[J]. 上海航天, 2008, **25**(6): 8–11, 19.
- [18] 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.  
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.
- [19] Gürel C S, Öncü E. Frequency selective characteristics of a plasma layer with sinusoidally varying electron density profile[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, **30**(6): 589–597.
- [20] Soltanmoradi E, Shokri B, Siahpoush V. Study of electromagnetic wave scattering from an inhomogeneous plasma layer using Green's function volume integral equation method[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, **23**(3): 033304.
- [21] Zhao L, Bao W M, Gong C Y. An overview of the research of plasma sheath[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, **1049-1050**: 1518–1521.
- [22] Gal G, Gibson W. Interaction of electromagnetic waves with cylindrical plasma[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, **16**(4): 468–475.
- [23] 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): 373–379.  
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): 373–379.
- [24] Yuan Z C, Shi J M, Wang J C. Experimental studies of the interaction of microwaves with mixture burning plasmas in the atmosphere[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 707–710.  
袁忠才, 时家明, 汪家春. 大气中固体燃烧等离子体与微波相互作用的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(5): 707–710.
- [25] He X, Chen J P, Ni X W, et al. Attenuation of planar electromagnetic waves by inhomogeneous plasma[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(9): 2115–2118.  
何湘, 陈建平, 倪晓武, 等. 非均匀等离子体对平面电磁波的衰减[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(9): 2115–2118.
- [26] Ma H J, Wang G L, Luo J, et al. Experimental study of electromagnetic wave transmission characteristics in S–Ka band in plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(2): 164–171.  
马昊军, 王国林, 罗杰, 等. S–Ka 频段电磁波在等离子体中传输特性的实验研究[J]. 物理学报, 2018, **67**(2): 164–171.
- [27] Wu R H, Liu H Y, Liu J Q, et al. Experiment on influence of the communication signals transmission in plasma sheath[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, **39**(11): 1437–1442.  
邬润辉, 刘洪艳, 刘佳琪, 等. 等离子体鞘套对 C 波段通信信号传输影响的试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, **39**(11): 1437–1442.
- [28] Liu F, Liu J F, Gong C R, et al. Transmission of Terahertz waves in plasma sheath[J]. *Space Electronic Technology*, 2013(4): 10–12.  
刘丰, 刘江凡, 宫晨蓉, 等. 太赫兹波在等离子体鞘套中的传播[J]. 空间电子技术, 2013(4): 10–12.
- [29] Chen X Y, Shen F F, Liu Y M, et al. Improved scattering-matrix method and its application to analysis of electromagnetic wave reflected by reentry plasma sheath[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, **46**(5): 1755–1767.
- [30] Li W H, Tian C, Feng S S, et al. Advance in atmospheric pressure plasma jet and its applications[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, **38**(8): 695–707.  
李文浩, 田朝, 冯绅坤, 等. 大气压等离子体射流装置及应用研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2018, **38**(8): 695–707.
- [31] van Gessel A F H, Carbone E A D, Bruggeman P J, et al. Laser scattering on an atmospheric pressure plasma jet: disentangling Rayleigh, Raman and Thomson scattering[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2012, **21**(1): 015003.
- [32] Hübner S, Sousa J S, Puech V, et al. Electron properties in an atmospheric helium plasma jet determined by Thomson scattering[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, **47**(43): 432001.
- [33] He Y X, Wang Y Y, Xu D G, et al. High-energy and ultra-wideband tunable terahertz source with DAST crystal via difference frequency generation[J]. *Applied Physics B*, 2018, **124**(1): 16.
- [34] Ando A, Kurose T, Reymond V, et al. Electron density measurement of inductively coupled plasmas by terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS)[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**(7): 073303.



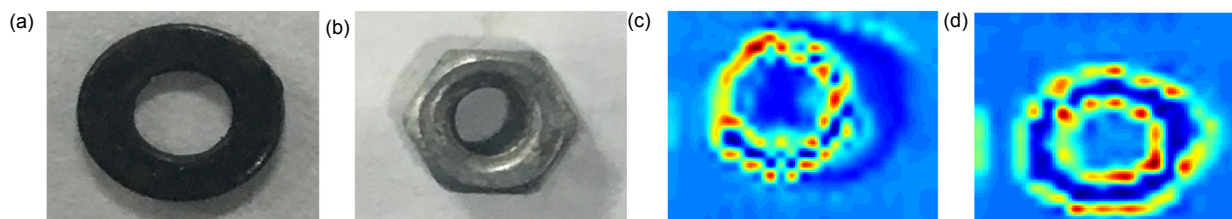
# Terahertz wave propagation and imaging detection characteristics in plasma

Geng Xingning<sup>1,2</sup>, Li Jining<sup>1,2\*</sup>, Xu Degang<sup>1,2</sup>, Liu Chang<sup>3</sup>, Fan Xiaoli<sup>3</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>3</sup>Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China



Target and terahertz wave reflection imaging. (a) A shim and (b) a nut; (c) Reflection image of the shim and (d) reflection image of the nut

**Overview:** Terahertz radiation is generally referred to the electromagnetic wave in the frequency range of 0.1 THz~10 THz, which is between millimeter wave and infrared wave in the electromagnetic spectrum, and it has the characteristics of coherence, instantaneity, low electron energy, and good penetrability. For a long time, terahertz wave has not been fully exploited and utilized compared with other bands of electromagnetic wave due to the lack of efficient terahertz radiation sources and high sensitivity terahertz detectors. In recent years, with the development of terahertz generation and detection technology, scientists have a deeper understanding of terahertz wave. Terahertz technology has also been widely used in more and more fields, such as terahertz security inspection, terahertz imaging, and terahertz communication. After entering the near space, a high-temperature and high-pressure environment is produced surrounding the hypersonic vehicle under the fierce interaction of the vehicle and atmosphere, which can ionize the gas around the vehicle, and thus produce a layer of plasma sheath covering the vehicle. The existence of plasma sheath will cause the distortion of communication signal and even interrupt it, here comes the well-known "blackout" problem. With the rapid development of aerospace industry, especially the utilization and development of near space, plasma sheath has become an urgent problem to be solved. Current research shows that increasing the frequency of electromagnetic wave higher than the plasma oscillation frequency can effectively reduce the shielding effect of plasma on electromagnetic wave, and the frequency of terahertz wave is much higher than that of microwave, so it can propagate better in plasma than microwave, which provides an effective method to solve the problem of plasma sheath. The NASA's RAM project in 1970s explored the attenuation effect of plasma medium on microwaves, and put forward various theories and methods for reducing the blackout issue. Since then, many attempts have been made to reduce the impact of plasma sheath on communication signal. However, many of the studies focus on microwave band. Terahertz wave has a desirable prospect in solving the blackout problem, so it is of great practical significance to study the propagation of terahertz wave in plasma. In this paper, the theoretical model of plasma is established, and the propagation of 0.1 THz~10 THz terahertz wave in plasma is simulated. Then the experiment of terahertz wave reflection imaging of target under plasma shelter are carried out. Both theory and experiment results show that terahertz wave has good penetration in plasma. This study will lay a theoretical foundation for solving the plasma blackout problem of hypersonic vehicle in near space.

**Citation:** 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

Supported by National Natural Science Foundation of China (61705162) and Equipment Pre-Research Fund (6140415010202)

\* E-mail: jiningli@tju.edu.cn