

•测试、试验与仿真•

等离子体对毫米波散射机理研究

张紫浩¹, 高 鹏¹, 欧阳吉庭², 赵日康²

(1. 光电子信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

摘 要: 等离子体与电磁波的相互作用, 主要体现在等离子体对入射电磁波的反射、吸收、色散和调制上。介绍了等离子体的特点及等离子体对电磁波传输的影响, 利用有限时域差分法(FDTD)建立了模型, 调整等离子体的主要表征参数, 模拟分析了均匀/非均匀等离子体圆柱对入射毫米波的散射物理机制和传输特性影响。结果表明, 等离子体密度决定其频率和碰撞频率, 而等离子体的频率和碰撞频率是影响其电磁散射特性的主要因素。

关键词: 等离子体; 毫米波散射; FDTD; 均匀等离子体圆柱; 非均匀等离子体圆柱

中图分类号: TN972.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0060-07

Research on Millimeter-wave Scattering Property of Plasma

ZHANG Zi-hao¹, GAO Peng¹, OUYANG Ji-ting², ZHAO Ri-kang²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China;

2. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The interaction between plasma and electromagnetic wave mainly lies in four aspects, the incident electromagnetic wave's reflection, absorption, dispersion and modulation by plasma. The features of plasma and its effect on electromagnetic wave propagation are introduced. Simulation model is built based on finite difference time domain (FDTD) method. Adjusting characterization parameters of plasma, the effects on the scattering physical mechanism and propagation characteristics of incident microwave from symmetrical and asymmetrical plasma cylinders are simulated and analyzed. Simulation results show that frequency and collision frequency of plasma are determined by its density, while frequency and collision frequency are the main elements that influence plasma's electromagnetic scattering characteristics.

Key words: plasma; millimeter-wave (MMW) scattering; finite difference time domain (FDTD); symmetrical plasma cylinder; asymmetrical plasma cylinder

等离子体(plasma)是物质存在的一种在形态, 是由大量处于非束缚态的带电粒子(如自由电子和带电离子)为主要成分的物质形态。1879年克鲁克斯首先发现了等离子体, 1928年美国科学家朗缪尔和汤克斯在气体放电中发现放电主体部分呈现电中性, 并首次将Plasma一词引入到物理学中^[1], 用它来描述气体放电管里的物质形态。等离子体与固体、液体、气体一样, 是物质的一种存在形态。最明显的区别在于固体、液体、气体都是由中性的分子或原子聚集而成的, 而等离子体则由电离后的自由

电子和离子聚集而成。从能量上来看, 固体、液体、气体、等离子体的能量依次增大, 因此等离子体被称为物质的第四态。

等离子体与电磁波的相互作用在近几十年来一直受到人们关注, 近年来, 等离子体技术在飞行器隐身、等离子体天线、“捷变镜”雷达和等离子体波导等领域中的应用研究日益受到各国的重视, 其原理是利用等离子体与电磁波相互作用的特性, 以等离子体替代或对原有工作装置加以改进, 提高或实现新的性能以满足不断增长的军事和工业需求^[2-6]。

等离子体与电磁波的相互作用,主要体现在等离子体对入射电磁波的反射、吸收、色散和调制上。电磁波在等离子体中传播时,等离子体中电子和离子的运动会受到电磁波的电场和磁场的影响,而电子和离子在电磁场中获得动能后将和等离子体中的其他粒子相互碰撞,动能转换为热能,从而使电磁波的能量受到衰减。电磁波在等离子体中的传播特性与等离子体的频率及碰撞频率密切相关,而等离子体频率又与等离子体的电子密度密切相关,所以通过调节等离子体的电子密度可以改变等离子体的电学参数,如介电常数,进而改变电磁波在等离子体中的传播特性。这在许多的领域得到广泛应用,比如等离子体微波控制技术、等离子体隐身技术等。

文中主要研究等离子体对毫米波(3 mm、8 mm)传播的影响,通过有限时域差分法(FDTD)建立模型,在不同参数条件下,模拟分析均匀/非均匀等离子体圆柱对毫米波传输的规律。

1 影响等离子体对毫米波散射的因素

采用有限时域差分法(FDTD)建立模型,分析等离子体主要参数对毫米波传输的影响。表征等离子体的几个重要物理参数与毫米波在等离子体中的传输特性息息相关,包括等离子体密度 n 、等离子体温度 T 、等离子体频率 f 、电子碰撞频率 ν_{en} 、等效介电常数 ϵ 等。

1.1 等离子体密度和温度

等离子体密度和等离子体温度是等离子体的两个独立参数,通常,等离子体可以简单的被看做是电子、正离子和未电离的中性粒子三者的集合体。等离子体密度一般情况下是指等离子体中的电子密度。等离子体电子、离子密度分别用 n_e 、 n_i 表示,单位为 cm^{-3} 。从热力学的角度,温度是物质内部微观粒子的平均平动动能的量度。在热力学平衡态下,粒子的平均动能与热平衡温度的关系为

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}\kappa T \quad (1)$$

其中, m 是粒子质量; v 是粒子的速度; κ 是玻尔兹曼常数。由于这种粒子平均动能和温度的确定关系,因此常将粒子的平均动能等同于温度。等离子体中一般用带有下边的符号 T_e 、 T_i 、 T_n 分别表示电子、

离子、中性粒子的温度,单位为单电子伏特 eV ($\text{eV} = 11\,600\text{ K}$)。

1.2 等离子体频率

等离子体频率(plasma frequency)是研究等离子体与电磁波相互作用中的一个重要参数,它是用来描述外界扰动引起等离子体内部电子和离子的振荡情况,频率的大小表示等离子体对电中性破坏反应的快慢。在低温等离子体中,因为离子的质量一般比电子的质量大很多,所以在高频外场作用下,离子的振荡频率要远小于电子的振荡频率,可以认为离子不会振动,而只关注电子的振动。因此,电子的振荡角频率就等于等离子体的振荡角频率(习惯上称为等离子体角频)。因此等离子体的角频率与等离子体的电子密度息息相关。其定义为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2)$$

其中, m_e 是电子质量; ϵ_0 是真空中介电常数。则等离子体的频率为:

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = 8.98\sqrt{n_e} \quad (3)$$

1.3 等离子体的碰撞频率

在等离子体的各种粒子中,电子质量很小,在电场的作用下高速运动,质量较大的离子和中性气体粒子对电子来说处于相对静止状态。因此等离子体内各种粒子之间的相互碰撞中,电子与中性粒子之间和电子与离子之间的碰撞占主导地位。如无特别说明,等离子体频率一般指等离子体电子碰撞频率。

在温度为 T 的大气中,电子与中性粒子间的碰撞频率^[7]为

$$\nu_{en} = 8.3 \times 10^5 \pi r^2 \sqrt{T_e} N_n \quad (4)$$

其中, N_n 为中性粒子密度,由气体状态方程 $p = N_n \kappa T$ 决定。

假设 $T = 400\text{ K}$ (略高于室温),波尔兹曼常数 $\kappa = 1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$,则中性气体粒子密度 $N_n = 1.81 \times 10^{23}$ 。为电子温度, r 为气体中性粒子碰撞半径,取氩气的碰撞半径,则氩气中电子与中性粒子间的碰撞频率可由式(5)计算如下

$$\nu_{en} = 1.56 \times 10^7 p \cdot \sqrt{T_e} \quad (5)$$

同样的,电子与离子间的碰撞频率为

$$v_{ei} = \frac{5.5n_i}{T_e^{3/2}} \left[\ln \left(\frac{280T_e}{n_i^{1/3}} \right) + \frac{1}{3} \ln \left(\frac{T_e}{T_e} \right) \right] \quad (6)$$

在相当宽的温度范围内,电子碰撞频率等于上述两个碰撞频率之和,即 $v_e = v_{en} + v_{ei}$ 。而通常情况下,等离子体中带电粒子的数量远小于中性粒子的数量,使得 $v_{en} \gg v_{ei}$,因此常把电子与中性粒子间的碰撞频率近似等于等离子体的电子碰撞频率(等离子体频率)。毫米波在等离子体中传播时,等离子体中的带电粒子在电磁场的作用下运动,并通过碰撞消耗入射波能量,从而衰减透射出等离子体的毫米波能量。

1.4 等离子体的相对介电常数

当外部电磁场的变化频率在 GHz 频段时,等离子体中的离子优于质量太大而不能响应高频电磁场,因此可被看成是固定的背景,等离子体的相对介电常数通常完全由电子运动决定。等离子体中单个电子在电磁场中的运动方程为

$$m_e \frac{d\vec{v}_e}{dt} + m_e v_{en} \vec{v}_e = -e\vec{E} \quad (7)$$

其中, v_e 为电子的运动速度。

非磁化碰撞等离子体的介电常数 $\tilde{\epsilon}_r$ 为^[18-9]

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - i \frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \quad (8)$$

1.5 等离子体厚度

通常认为等离子体频率与入射毫米波存在如下关系:当入射毫米波的频率大于等离子体频率时,即 $f > f_p$,毫米波可以进入等离子体,并在等离子体中传播(或透射出等离子体);当入射毫米波的频率小于等离子体频率时,即 $f_p > f$,毫米波不能进入等离子体,而被等离子体完全反射,这时等离子体表现出截止性。但是等离子体的这种截止性会受到等离子体厚度的影响,如果等离子体厚度太薄,那么毫米波仍然能够穿过等离子体。所以在研究等离子体与毫米波的相互作用时,等离子体的厚度也应该是被考虑的一个重要参数。

2 等离子对毫米波散射机理建模分析

由于放电的形态不同,产生的等离子体的形状也不尽相同,那么他们对电池波传播的影响也是不同

的。使用二维 FDTD 方法^[10],模拟研究常见的等离子体圆柱对垂直入射毫米波(3 mm 波和 8 mm 波)的传播影响,并考虑到等离子体的实际实现方法,研究了均匀和非均匀圆柱体等离子体两种不同情况。

在建模中,分别研究均匀和非均匀等离子体柱对毫米波传播的影响,取入射毫米波的频率分别为 99 GHz(3 mm 波源)、37.5 GHz(8 mm 波源),入射毫米波的尺寸为 20 cm,入射毫米波与等离子体圆柱中心的相距 45 cm。等离子体柱的半径为 10 cm,在半径方向上的电子密度由中心到边缘呈线性递减。为了更方便的分析结果,将圆柱四周划分为不同的角度,入射毫米波的位置被设定为 180° ,对称的位置设定为 0° ,具体如图 1 所示。

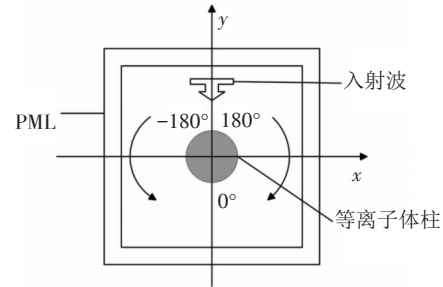


图1 二维等离子体圆柱的模拟结构示意图

2.1 均匀等离子体圆柱对毫米波传输的影响

首先,研究均匀等离子体柱对毫米波(3 mm、8 mm)传输的影响。当等离子体频率 $f_p = 16$ GHz、碰撞频率 $\nu_{en} = 2\pi \times 10$ G/s 时,在 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的计算区域内,得到等离子体柱周围无比场强的二维分布,如图 2 所示。

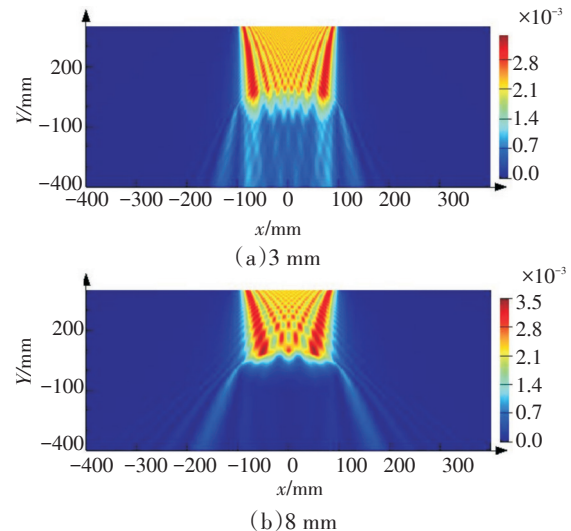


图2 围绕均匀等离子体柱的 $|E|^2$ 的二维分布

从图中可以看出,均匀等离子体柱使微波在多个对称方向上产生了不同强度的复杂散射。主要从等离子体密度和碰撞频率两个方面分析对毫米波散射的影响规律。

(1) 等离子体密度对毫米波散射的影响

等离子体碰撞频率 $v_{en} = 2\pi \times 10$ G/s, 不同接收角度 φ 上, 低密度等离子柱 ($f_p < f$) 散射的毫米波功率如图3所示。

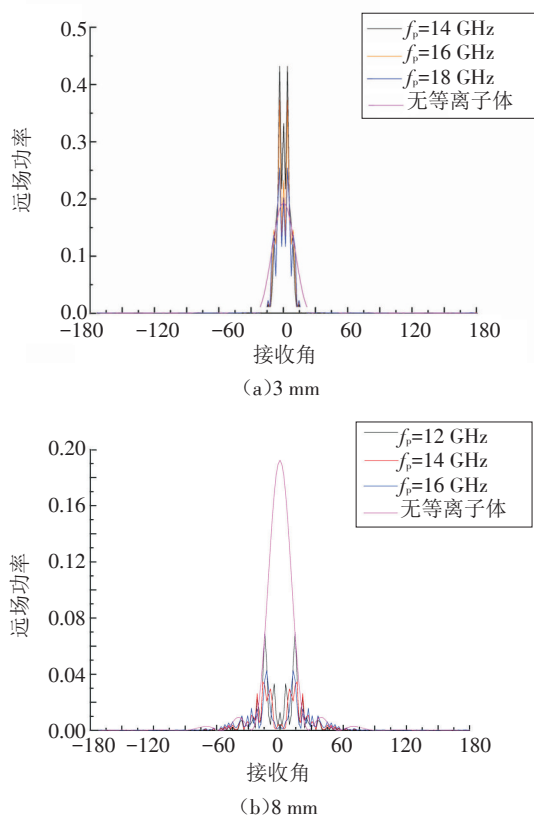


图3 不同等离子体频率

从图中可以看出,对于 $f_p < f$ 的低密度等离子体, 增加等离子体频率, 在 $\varphi=0 \sim \pm 15^\circ$ 上主要的微波散射功率的峰值减小; 在其他角度 φ 上的散射微波功率的随等离子体频率增加而增大。由此可见, 对于均匀等离子体柱, 增加等离子体频率可以减小低密度等离子体柱的主要散射峰的大小, 而不会改变高密度等离子体柱的主要散射峰; 由于反射的原因, 在某些角度上微波散射功率随等离子体频率增加而增加, 尤其在 $\varphi=\pm 180^\circ$ 上。

(2) 等离子体碰撞频率对毫米波散射的影响

当等离子体频率 $f_p=16$ GHz, 不同接收角度 φ

上, 低密度等离子柱 ($f_p < f$) 散射的毫米波功率分布如图4所示。

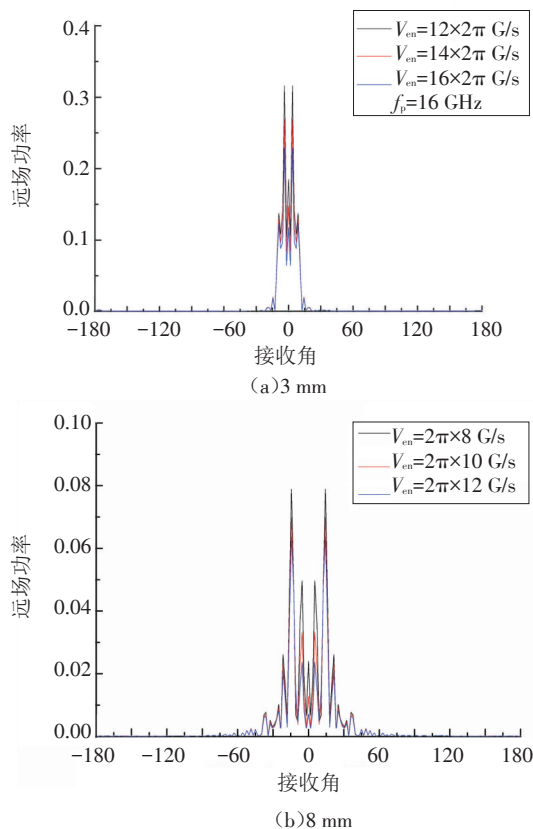


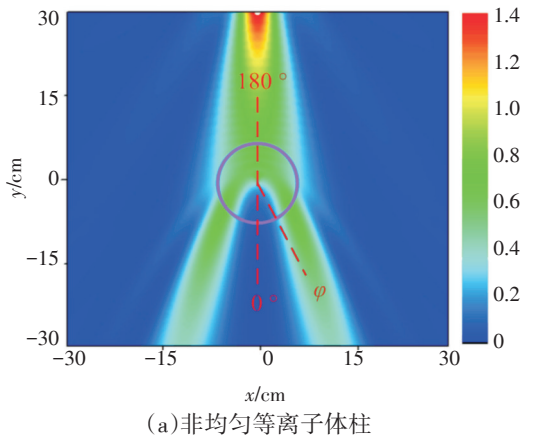
图4 不同碰撞频率

对于 $f_p < f$ 的低密度等离子体, 增加碰撞频率, 在 $\varphi=0^\circ$ 的散射毫米波功率增大, 在其他角度上的散射毫米波功率减小, 同时增加碰撞频率, 不会改变 $\varphi=\pm 15^\circ$ 范围内的散射毫米波功率, 特别是对于第一个散射峰。而在其他角度上, 增加碰撞频率可以减小散射毫米波功率。

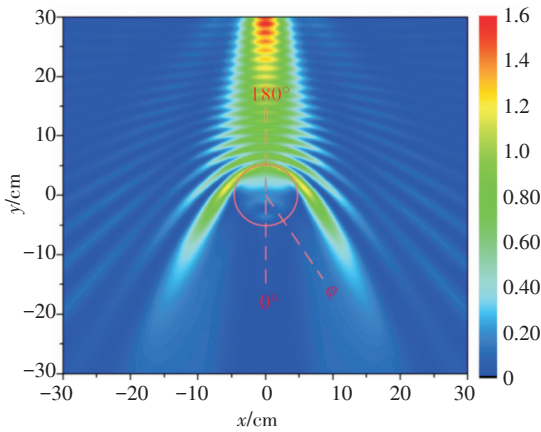
2.2 非均匀等离子体圆柱对毫米波传输的影响

假设其等离子体的密度分布是沿柱半径方向的抛物线分布, 柱中心的等离子体密度最大, 即做 f_p , 柱边缘的等离子体密度为0。

首先研究非均匀等离子体柱周围微波场强的二维分布。简单起见, 以3 mm波长为例计算。选择与均匀等离子体柱相同的参数设置: $f_p=8$ GHz, $f=10$ GHz, $v_{en} = 2\pi \times 1$ G/s, 计算区域 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。结果如图5所示。



(a)非均匀等离子体柱



(b)均匀等离子体柱

图5 围绕等离子体柱的|E|^2的二维分布

比较图5中的(a)和(b)两个分图,毫米波明显的被非均匀等离子体柱散射到两个对称的方向。等离子体频率从中心到边缘呈线性递减,根据式(8)得知相对介电常数逐渐增加。非均匀等离子体柱可以被视为一系列同心圆柱壳的组合,每一个壳层都有单独的电子密度。所以根据相对介电常数和折射率的关系 $n = (\epsilon_r)^{1/2}$ 及折射定律 $n_1/\sin\theta_1 = n_2/\sin\theta_2$ (n_1 和 n_2 分别表示不同壳层的折射率, θ_1 与 θ_2 分别表示入射角和反射角),毫米波的轨迹将会逐渐的从中心向边缘偏离,导致在总体上表现为毫米波在非均匀等离子体柱中传播方向的偏转,如图6所示。

这种毫米波散射功率的分布会受到不同等离子体参数的影响。

(1)等离子体频率对毫米波散射的影响

等离子体碰撞频率 $\nu_{em} = 2\pi \times 1 \text{ G/s}$,不同接收角度 φ 上的散射毫米波功率分布如图7所示。

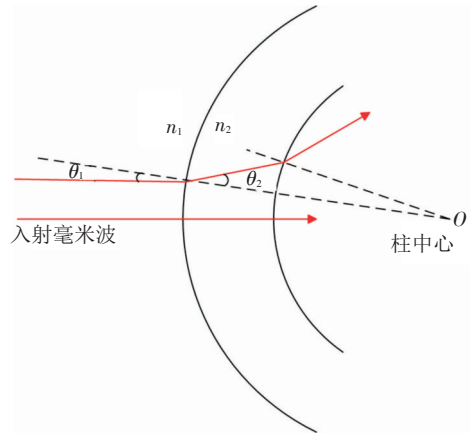
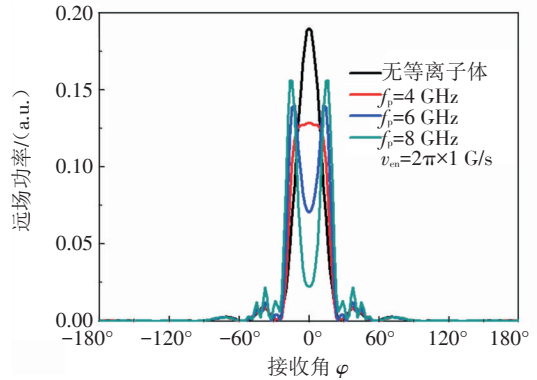
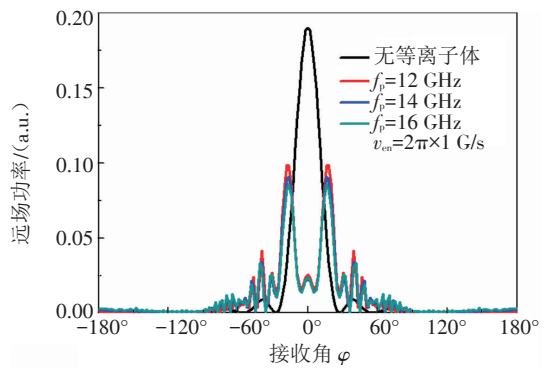


图6 入射毫米波的偏转



(a)低密度等离子体,即 $f_p < f'$



(b)高密度等离子体,即 $f_p > f'$

图7 不同等离子体频率

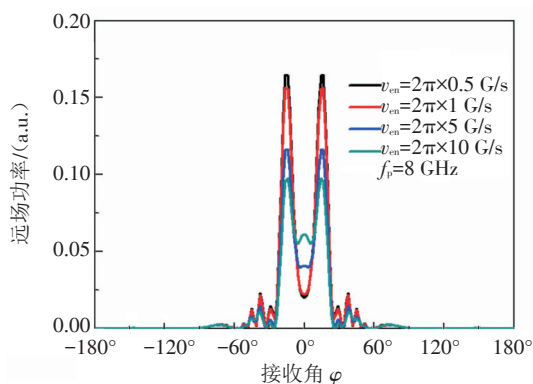
从图7中可以看出,(1)对于低密度等离子体柱,当等离子体频率 f_p 分别为6 GHz和8 GHz时,在对称的接收角度 φ 上有一对明显的毫米波散射峰。毫米波散射功率的峰值随等离子体频率增加而增加,例如当 $f_p=6 \text{ GHz}$ 时,对应毫米波散射峰的大小为0.14,而当 $f_p=8 \text{ GHz}$ 时,对应毫米波散射峰增大到0.16;同时,毫米波散射峰对应的角度 φ 也会随等离

子体频率增加而增加。当等离子体频率 $f_p=4$ GHz时,两个毫米波散射峰合并在一起而消失。可以预测如果进一步减小等离子体频率,非均匀等离子体柱对毫米波的散射作用将会消失。(2)对于高密度等离子体柱,随着等离子体内频率的增加,毫米波散射峰的大小明显减小,但是它们对应的角度 φ 没有明显的变化。

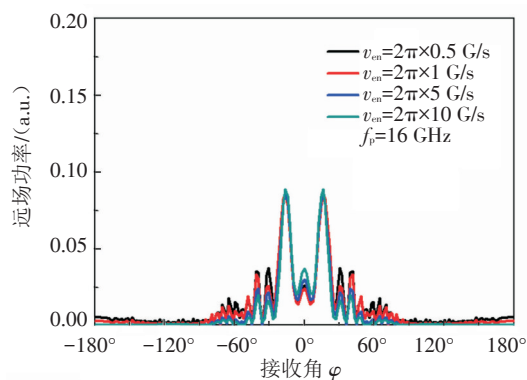
由此可见,对于 $f_p < f$ 的低密度非均匀等离子体柱,可以通过改变等离子体频率来调节散射毫米波的传播方向以及相对应的散射波功率;对于 $f_p > f$ 的高密度非均匀等离子体柱,改变等离子体频率只能减小散射波功率的大小,而不会影响散射波的传播方向。

(2) 等离子体碰撞频率对毫米波散射的影响

等离子体的碰撞频率也会改变非均匀等离子体柱对毫米波的散射特性。对于 $f_p=8$ GHz的低密度等离子体柱和 $f_p=16$ GHz的高密度等离子体柱,碰撞频率的影响如图8所示。



(a) 低密度等离子体



(b) 高密度等离子体

图8 不同碰撞频率

从图中可以看出,(1)对于低密度等离子体柱,增加等离子体的碰撞频率会减小散射毫米波的功

率峰值,但不会改变散射毫米波的角度 φ 。(2)对于高密度等离子体柱,碰撞频率增加,被散射的毫米波功率峰的位置和大小都没有变化,但是其他角度 φ 上的毫米波功率是减小的。

由此可见,虽然增加等离子体的碰撞频率不会改变散射毫米波的传播方向,但是会减小散射的毫米波功率,这一点与均匀等离子体柱对毫米波的散射作用类似。

3 结论

利用FDTD方法,模拟了毫米波在均匀和非均匀等离子体柱中的传播,研究了不同等离子体参数对毫米波传播特性的影响,并分析了其中的物理机制,结论如下:

(1)对于均匀等离子体柱,增加等离子体频率 f_p 和碰撞频率 v_{en} 可以减小低密度等离子体柱($f_p < f$)的主要散射波的功率大小;

(2)对于非均匀等离子体柱,增加等离子体频率会增大等离子体柱的散射波功率,并增加低密度等离子体柱的散射波的偏转角 φ ;增加碰撞频率 v_{en} 只会增加低密度等离子体柱的散射波功率。

参考文献

- [1] Langmuir I. Oscillations in ionized gases[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 1928, 14(8): 627.
- [2] 张祖银,王立娜,胡海峰,等. A high figure of merit localized surface plasmon sensor based on a gold nanograting on the top of a gold planar film[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(10): 104213-1-104213-4.
- [3] 王帅雷,方宁,渠慎丰. 过密等离子体包覆目标的散射特性分析[J]. 电子测量技术, 2010, 33(12): 12-15.
- [4] 苏彦勋,柯沅锋,蔡士良,等. 层层自组装纳米粒子表面等离子体引发光电流应用于等离子体增强太阳能电池[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 267-273.
- [5] 李兴文,魏文赋,吴坚,等. 激光诱导等离子体光学诊断方法研究综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1788-1797.
- [6] 金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 26-34.
- [7] 张平,张雅鑫,周俊,等. Enhancement of Smith-Purcell radiation with surface-plasmon excitation[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(10): 104102-1-104102-6.
- [8] Helaly A, Soliman E A, Megahed A A. Electromagnetic

- waves scattering by nonuniform plasma cylinder[J]. IEEE Proceedings: microwaves, antennas and propagation, 1997, 144(2): 61-66.
- [9] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185.
- [10] LI Tian-bao, XU Bing-she, LIANG Jian, et al. Progress in research of surface-plasmon-enhanced light-emitting diode[J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2010, 16(2/3): 62-66.
- [11] GENG Zhao-xin, LI Qing, WANG Wei, et al. PMDS prism-glass optical coupling for surface plasmon resonance sensors based on MEMS technology[J]. Science China, 2010, 53(10): 2144-2158.

(上接第28页)

- cal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(3): 428-436.
- [9] Cao D Z, Dai E G. All-fiber Band-pass acousto-optic tunable filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 98-107.
- [10] Zhang Q, Zhu T, Shi L L, et al. All-fiber bandpass filter based on asymmetrical modes exciting and coupling[J]. Opt Commu, 2012, 286(1): 161-165.
- [11] Zhang H, Kang S X, Liu B, et al. All-fiber acousto-optic tunable bandpass filter based on a lateral offset fiber splicing structure[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-12.
- [12] Liu C, Pei L, Wang Y, et al. Temperature and axial strain characteristic of cladding etched single-mode fiber based acousto-optical filter[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 131-136.
- [13] Pei L, Liu C, Li J, et al. Highly sensitive axial strain fiber laser sensor based on all-fiber acousto-optic tunable filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(24): 2430-2433.
- [14] Liu C, Pei L, Wang Y, et al. Highly sensitive strain sensor based on cladding-etched all-fiber acousto-optic tunable filter[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2013, Beijing, 2013.
- [15] Tim A Birks, Philip St J, Russel, et al. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(11): 2519-2529.
- [16] Li Q, Liu X M, Peng J D, et al. Highly efficient acousto-optic tunable filter based on cladding etched single-mode fiber[J]. IEEE Photonic Tech L, 2002, 14(3): 337-339.

(上接第50页)

- [4] Wang X J, Chen Y X. Preparation and characterisation of Cd_{1-x}Zn_xS thin films grown in chemical bath deposition[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(s5): 208-211.
- [5] Yang Z X, Zhong W, Deng Y, et al. Design and synthesis of novel single-crystalline hierarchical CdS nanostructures generated by thermal evaporation processes[J]. Crystal Growth & Design, 2011, 11(6): 2172-2176.
- [6] 陈冰清, 常薇, 刘斌, 等. Cd_{1-x}Zn_xS的制备及光催化性能研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(9): 66-68+72.
- [7] 张效敏, 叶鸽. Cd_{1-x}Zn_xS纳米梳状结构的合成与光学特性研究[J]. 人工晶体学报, 2011, 40(2): 405-409.
- [8] Gunjal S D, Kholam Y B, Arote S A, et al. Structural, optical and electrical properties of spray pyrolysis deposited CdS films[J]. Macromolecular Symposia, 2015, 347(1): 9-15.
- [9] 陈星建, 丁浩冉, 徐波, 等. 气-固反应法制备纳米结构及其生长机制[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(2): 8-11.
- [10] Sethi R, Kumar L, Sharma P K, et al. Tunable visible emission of Ag-doped CdZnS alloy quantum dots[J]. Nanoscale research letters, 2010, 5(1): 96.
- [11] Bakhsh A, Gul I H, Maqsood A, et al. Size dependent photoluminescence properties of CdZnS nanostructures[J]. Journal of Luminescence, 2016, 179: 574-580.
- [12] Gaur R, Jeevanandam P. Synthesis of Cd_{1-x}Zn_xS nanoparticles by a novel thermal decomposition approach and studies on their optical properties[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(9): 7223-7231.