

激光与光电子学进展

基于缺陷微波光子晶体的冷等离子体 电磁参数诊断

朱砚菁¹, 梅永^{2*}, 王身云^{1**}

¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学工程训练中心, 江苏 南京 210044

摘要 等离子体特性电磁参数是研究等离子体应用技术的基础,为了精确地获取冷等离子体的电磁参数,提出一种基于等离子体缺陷微波光子晶体的冷等离子体电磁参数测量方法。利用传输矩阵法模拟了等离子体电磁参数与微波光子晶体缺陷透射峰的频率偏移量和峰值之间的关系。结果表明,等离子体缺陷微波光子晶体缺陷峰频率偏移量和峰值与等离子体频率和碰撞频率具有明确对应关系。因此,通过测量等离子体缺陷微波光子晶体缺陷透射峰频率偏移量和峰值,可以敏感地反演出被测等离子体的等离子体频率和碰撞频率。该方法的优势在于实现了等离子体电磁参数的非接触式和高灵敏度测量。

关键词 等离子体; 等离子体频率; 等离子体碰撞频率; 微波光子晶体; 传输矩阵法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0535001

Diagnosis of Cold Plasma Electromagnetic Parameters Based on Defective Microwave Photonic Crystal

Zhu Yanjing¹, Mei Yong^{2*}, Wang Shenyun^{1**}

¹*School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;*

²*Engineering Training Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

Abstract Plasma electromagnetic parameters are very important in development of plasma technology. In this paper, a testing method is presented based on a one-dimensional microwave photonic crystal with the cold plasma under test as a defective layer. The transfer matrix method (TMM) is used to simulate the relationship among plasma parameters, frequency offset of the defective peak, and the peak transmission intensity. The results indicate that the plasma and collision frequencies can be mapped into the frequency offset of the defective peak and the peak transmission intensity. Therefore, one can obtain the plasma electromagnetic parameter frequency by measuring the offset of the defective peak and the peak transmission intensity. This measuring approach provides a noncontact and sensitive way of sensing the electromagnetic parameters of cold plasma.

Key words plasmas; plasma frequency; plasma collision frequency; microwave photonic crystal; transfer matrix method

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-28; 录用日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(61971231)

通信作者: *yongmei2002@126.com; **wangsy2006@126.com

1 引言

等离子体是物质的第四种状态,其在材料、通信和国防等领域具有十分重要的应用前景^[1-3]。等离子体的特性参数测量是研究等离子体技术的基础,二者相互促进共同发展。因此,等离子体参数的诊断技术变得十分重要。经过众多学者的探索研究,等离子体参数诊断技术已经较为成熟,典型的方法有朗缪尔(Langmuir)探针法、光谱法和微波法^[4]。朗缪尔探针法是等离子体参数最基本的诊断方法。该方法是向等离子体中插入一根极小的测量电极,通过伏安特性测试来反演等离子体参数,其优点是设备较为简单,成本低,可测算到的等离子体参数范围宽,缺点是探针接触等离子体会产生干扰,破坏等离子体结构,测量精度较低。1990年魏在福等^[5]提出利用朗缪尔探针法诊断恒流 CO₂激光器的电子密度;光谱法是通过测量等离子体的光谱线来反演等离子体参数,其优点是非接触测量,对等离子体无扰动,测算精度高,响应快,缺点是光谱数据物理内涵复杂,数据处理复杂,参数反演误差大。2020年张泽亮等^[6]提出用激光汤姆孙散射方法测量了容性耦合等离子体的电子密度,测量结果较为准确;微波法是通过微波照射等离子体,测量其反射和透射系数来反演等离子体参数,因不会对目标等离子体产生扰动,且该方法适应性强、测量准确、测量速度快、对波源要求不高,以及适用于低温和高温等离子体的参数测量,因而成为近年等离子体参数诊断的研究热点。但是,微波法的使用仍然存在局限性,以及存在动态范围相对较小、检测灵敏度不高等问题^[7-10]。

本文提出一种基于缺陷微波光子晶体结构的等离子体参数测量方法。微波光子晶体是在微波波长尺度下的一种人工周期性结构^[11-14],其基本特性为微波禁带特性和微波局域特性。当微波在微波光子晶体中传播时会发生布拉格散射,能量形成能带结构,相邻能带间就出现微波带隙,具有优良的频率选择性。微波光子晶体的禁带大小与交迭介质的介电常数对比度相关,对比度越大,越易获得禁带较宽的微波光子晶体^[15];微波局域特性是指在微波光子晶体中引入某种缺陷,在微波禁带内形成微波局域的现象,从而使原先处于禁带的微波频率能够隧穿微波光子晶体结构,形成缺陷透射峰^[16-17]。缺陷透射峰的强度和位置与构成微波光子

晶体的缺陷材料的光学厚度和损耗相关。因此,拟采用测量手段得到缺陷透射峰的强度与频率位置,来反演微波光子晶体等离子体缺陷的电磁参数。这种方式实现了等离子体电磁参数的非接触式测量,又由于缺陷结构具有非常高的选频特性,使得该方式具有较高的灵敏度。

2 理论计算

碰撞冷等离子体的复介电常数^[18]可以表示为

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu_c - \omega)} \right], \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ω_p 为等离子体频率; ν_c 为等离子体碰撞频率; ω 为入射电磁波频率。因此,碰撞冷等离子体复介电常数的实部 $\epsilon'(\omega)$ 与虚部 $\epsilon''(\omega)$ 可以分别表示为

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2} \right), \quad (2)$$

$$\epsilon''(\omega) = \epsilon_0 \cdot \frac{\omega_p^2 \nu_c}{\omega(\omega^2 + \nu_c^2)}. \quad (3)$$

(2)式表示等离子体复介电常数实部影响电磁波传播的相位,(3)式表示等离子体复介电常数虚部影响电磁波传播的衰减。由(2)式可知,实部 $\epsilon'(\omega)$ 随着等离子体频率 ω_p 的增大逐渐减小。同一电子密度下,随着碰撞频率 ν_c 的增大,实部 $\epsilon'(\omega)$ 增大,逐渐逼近于真空介电常数数值。当碰撞频率 ν_c 较小时, ν_c 对复介电常数实部的影响可忽略不计;由(3)式可知,随着等离子体频率 ω_p 的增大,虚部 $\epsilon''(\omega)$ 逐渐增大,电磁波传播损耗增加。当等离子体频率 ω_p 一定时,等离子体碰撞频率 ν_c 与入射电磁波频率 ω 越接近,虚部越大,衰减损耗也就越大。

在本设计中,为了使等离子体对电磁波的碰撞吸收尽量小,在理论计算过程中等离子体的碰撞频率设定较小的变化范围。在低频碰撞的条件下,等离子体的等效折射率 n_p 可近似表示为

$$n_p = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2}}. \quad (4)$$

在冷等离子体内部,电子的活动比较活跃。因此,通常将电子密度近似看作等离子体密度。通过不同方式产生的等离子体,其电子密度也是不同的。电弧放电方式产生等离子体是通过在电极上施加电压来控制等离子体内部的电子密度大小。在保持等离子体缺陷层的几何厚度不变的情况下,

改变等离子体的电磁参数,一维缺陷微波光子晶体的透射峰频率会因缺陷层的光学厚度的变化而发生偏移,从而实现禁带内缺陷峰频率的可调谐;相反,通过测量缺陷峰频率大小和峰值大小,也可以反演出缺陷层等离子体的电磁参数。

本文设计的一维等离子体缺陷微波光子晶体结构如图 1 所示,它由介电材料 A [介电常数为 $\epsilon_A(\omega) = 9.0\epsilon_0$]、真空材料 B [介电常数为 $\epsilon_B(\omega) = 1.0\epsilon_0$] 和缺陷等离子体 C 沿 z 轴方向交迭生长而成,其包含了 6 层介电材料、4 层真空和 1 层等离子体缺陷层,即排列结构可表示为 $(AB)^N(ACA)(AB)^N$, 其中 $N=2$, N 为 A、B 介质层的交迭数。缺陷部分的等离子体介电常数由(1)式给出,即缺陷层材料的介电常数 $\epsilon_c(\omega) = \hat{\epsilon}(\omega)$ 。设定微波光子晶体的中心工作波长为 $\lambda_0 = 0.15 \text{ m}$ (中心工作频率为 $f_0 = 2.0 \text{ GHz}$),介电材料层和真空层的光学厚度均为 $0.25 \lambda_0$ 。同时,将缺陷层填充为真空的微波光子晶体(即 $\omega_p = 0$ 时,透射峰频率为微波光子晶体的禁带中心频率 $f_0 = 2.0 \text{ GHz}$)作为标准样品,通过与待测

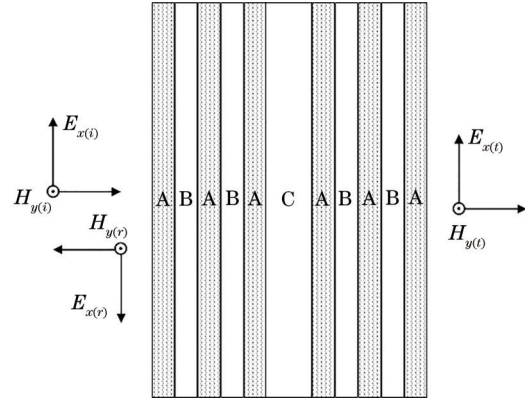


图 1 一维缺陷微波光子晶体结构示意图

Fig. 1 Schematic of one-dimensional microwave photonic crystal with defects

样品比较,计算出透射峰的频率偏移。

为了获得缺陷透射峰频率的偏移量和峰值与被测缺陷等离子体参数之间的关系,采用了传输矩阵方法模拟了等离子体缺陷微波光子晶体的透射谱。针对一维多层介质结构,单层介质的传输矩阵可以表示为^[19]

$$M_i(d_i, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{k}_i d_i) & -\sin(\hat{k}_i d_i) \frac{\omega \hat{\mu}(\omega)}{\hat{k}_i} \\ \sin(\hat{k}_i d_i) \frac{\hat{k}_i}{\omega \hat{\mu}(\omega)} & \cos(\hat{k}_i d_i) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\hat{k}_i = \sqrt{-\hat{z}_i(\omega)\hat{y}_i(\omega)}$, 其中, d_i 为第 i 层材料的厚度; $\hat{z}_i(\omega)$ 、 $\hat{y}_i(\omega)$ 分别为第 i 层材料的阻抗率和导纳率,其定义为 $\hat{z}_i(\omega) = j\omega\hat{\mu}_i(\omega)$, $\hat{y}_i(\omega) = j\omega\hat{\epsilon}_i(\omega)$, $\epsilon_i(\omega)$ 为第 i 层材料的复介电常数,这里假定每层材料都是无磁性的,即 $\hat{\mu}_i(\omega) = \mu_0$ 。然后,针对所设计的一维等离子体缺陷微波光子晶体多层介质结构,

其传输矩阵可以由每个材料层的传输矩阵级联相乘得到:

$$M = \prod_{i=1}^{N-2} M_i(d_i, \omega) = \begin{bmatrix} X_{11}(\omega) & X_{12}(\omega) \\ X_{21}(\omega) & X_{22}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

利用(6)式可以推导出一维等离子体缺陷微波光子晶体的透射系数为

$$t(\omega) = \frac{2}{[X_{22}(\omega) + X_{11}(\omega)] + j[X_{21}(\omega) \frac{\omega}{\hat{k}_0} - X_{12}(\omega) \frac{\hat{k}_0}{\omega}]}. \quad (7)$$

首先,采用(7)式计算出一维等离子体缺陷微波光子晶体的透射谱,建立缺陷透射峰偏移量和强度与等离子体电磁参数之间的关系;然后,针对未知等离子体参数的缺陷微波光子晶体,通过测量其禁带内的透射峰偏移量和强度,利用上述建立的关系,反演出等离子体的电磁参数(等离子体频率和碰撞频率)。常用的平板介质结构微波频段透射系

数测量平台结构如图 2 所示,该系统是采用自由空间法测量缺陷微波光子晶体的透射频谱^[20-22],主要测量设备包括微波扫频源、微波网络分析仪、模式转换器、聚焦透镜发射天线、聚焦透镜接收天线、待测样品和标准样品^[23]。

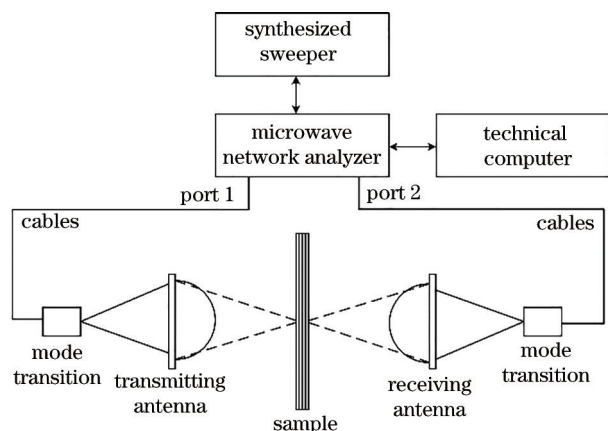


图 2 等离子体参数诊断装置示意图

Fig. 2 Schematic of plasma parameters diagnosis setup

3 结果与分析

等离子体频率是等离子体的一个重要参数,冷等离子体内部的电子与离子的密度基本相等,但是电子的活动比较活跃,因此等离子体密度可近似地看作是电子密度。图 3(a) 给出了碰撞频率 $\nu_c=10$ MHz 时,不同等离子体频率下的透射谱,可以发现,随着等离子体频率的增加,缺陷透射峰的频率在禁带内向高频发生偏移,峰值逐渐降低。具体地,随着等离子体频率从 $\omega_p=0$ GHz 逐渐增大到

$\omega_p=6.0$ GHz,等离子体缺陷微波光子晶体的缺陷峰频率从 $f_0=2.000$ GHz 偏移到 $f_0=2.154$ GHz,偏移量达到 0.154 GHz;透射峰峰值从 0.99 下降到 0.91,下降了 0.08。频率偏移量在禁带内近似呈二次方规律变化,透射峰近似呈线性规律衰减,如图 3(b) 所示。

在低温等离子体中,离子的数目远小于中性粒子。因此,电子与中性粒子的碰撞频率可以近似看成是等离子体的碰撞频率。碰撞频率也是等离子体的一个重要参数,碰撞频率对电磁波传播的影响主要是能量的衰减。图 4 给出了等离子体频率 $\omega_p=1.0$ GHz 时,不同等离子体碰撞频率下的透射谱。可以发现,随着等离子体碰撞频率的增加,缺陷透射峰强度明显减弱,而透射峰的频率偏移量很小。碰撞频率变化对等离子体复介电常数虚部的影响较大,碰撞频率越高,电磁波在微波光子晶体传播中能量损耗就越大,透射峰的峰值就越低。具体地,随着等离子体碰撞频率从 $\nu_c=10$ MHz 逐渐增大到 $\nu_c=5$ GHz,一维等离子体缺陷微波光子晶体的透射峰频率从 $f_0=2.00425$ GHz 偏移到 $f_0=2.0038$ GHz,与标准样品透射峰频率 ($f_0=2.0$ GHz) 比较,偏移量范围为 3.80~4.25 MHz;透射峰的峰值从 0.99 下降到 0.44,下降幅度为 0.55。

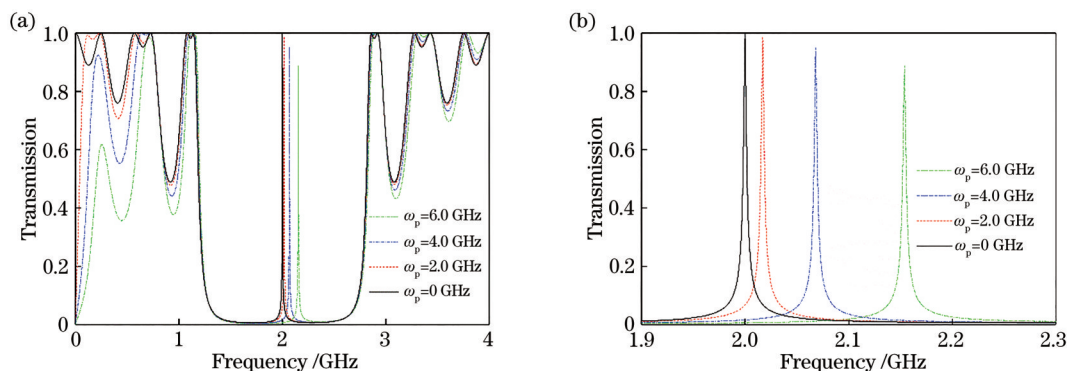


图 3 $\nu_c=10$ MHz 时,不同等离子体频率下的透射谱。(a) 全禁带;(b) 局部禁带

Fig. 3 Transmission spectra at different plasma frequencies when $\nu_c=10$ MHz. (a) Full band gap; (b) partial band gap

等离子体频率 ω_p 、等离子体碰撞频率 ν_c 是决定冷等离子体性质的主要电磁参数。图 5 计算了等离子体微波光子晶体缺陷透射峰偏移量(即透射峰频率与标准样品透射频率的差值)与待测缺陷等离子体的等离子体频率和碰撞频率之间的关系。由图 5 可以看出,在不同的碰撞频率下,透射峰频率偏移量与等离子体频率近似呈二次方规律变化,碰撞频率对透射峰频偏的影响很小。

图 6 给出了等离子体微波光子晶体缺陷透射峰

强度(即透射峰的峰值大小)与待测缺陷等离子体的等离子体频率和碰撞频率之间的关系。从图 6 中可以看出,当等离子体频率较低时,透射峰的峰值随碰撞频率增加衰减较为缓慢,近似平方规律;当等离子体频率较高时,透射峰峰值随碰撞频率增加衰减迅速,近似反比规律。具体地,当 $\omega_p=1$ GHz, $\nu_c=3$ GHz 时,透射峰强度衰减至 0.548;而当 $\omega_p=5$ GHz 时,在 $\nu_c=0.1$ GHz 处,透射峰强度已经衰减至 0.548,在 $\nu_c=3$ GHz 处,透射峰强度已经小于

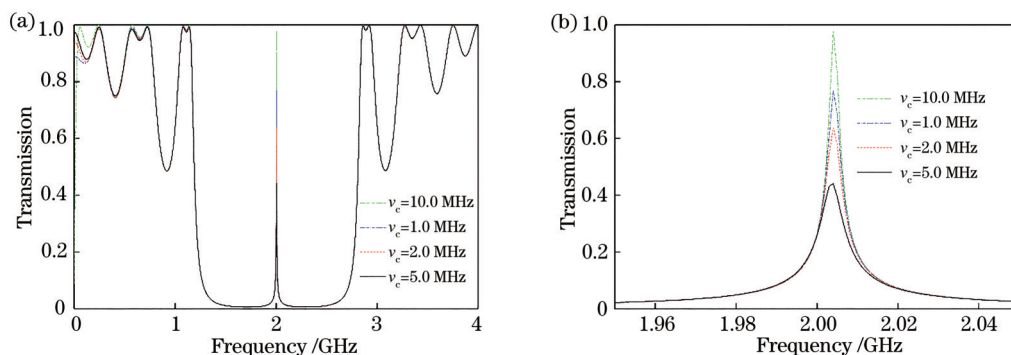


图 4 $\omega_p=1$ GHz 时,不同等离子体碰撞频率下的透射谱。(a) 全禁带;(b) 局部禁带

Fig. 4 Transmission spectra at different plasma collision frequencies when $\omega_p=1$ GHz. (a) Full band gap; (b) partial band gap

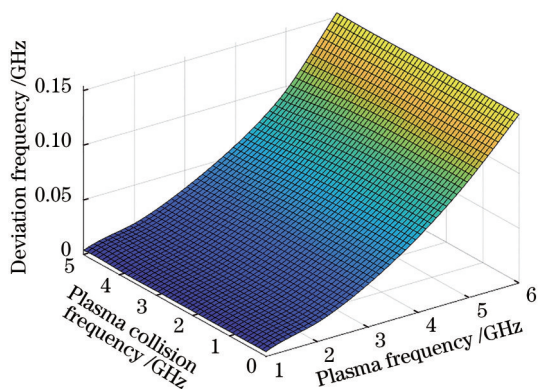


图 5 等离子体频率、等离子体碰撞频率与透射峰频率偏移的关系

Fig. 5 Relationship between plasma frequency, plasma collision frequency, and deviation frequency of transmission peak

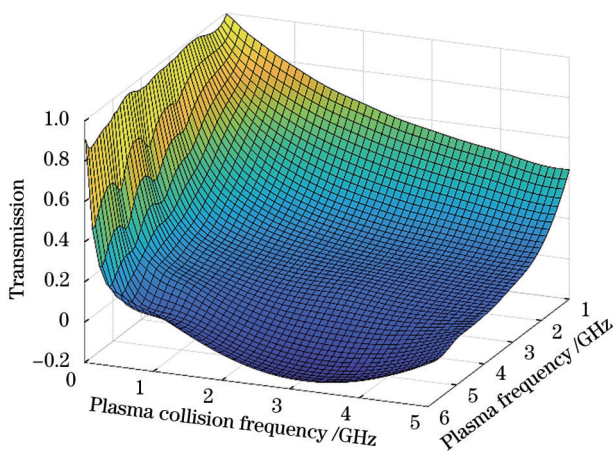


图 6 等离子体频率、等离子体碰撞频率与透射峰强度的关系
Fig. 6 Relationship between plasma frequency, plasma collision frequency, and transmission peak intensity

0.1,光子禁带几乎对所有入射频率截止。在等离子体碰撞频率一定时,等离子体频率越大,透射峰衰减越大。当等离子体碰撞频率较小时,随着等离

子体频率的增加,透射系数衰减较小;当等离子体碰撞频率较大时,透射系数随等离子体频率的增加,衰减也增大。具体地,当 $\nu_c=10$ MHz, ω_p 从 1 GHz 增至 6 GHz,透射峰共衰减 0.1;当 $\nu_c=5$ GHz 时, ω_p 从 1 GHz 增至 6 GHz,透射峰共衰减 0.42。

因此,通过图 2 所示的测量平台,测得了透射峰对应的频率和强度,对照图 5 和图 6 给出的关系,即可反演出待测缺陷等离子体的等离子频率和碰撞频率,这种测量方式实现了等离子体电磁参数的非接触式测量。

4 结 论

本文提出了一种基于等离子体缺陷微波光子晶体的等离子体电磁参数测量方法,通过传输矩阵法模拟了缺陷透射峰频率偏移量和强度与等离子体频率和等离子体碰撞频率之间的对应关系。基于建立的对应关系,根据实验测量到的缺陷透射峰的偏移量和强度,可以快速反演出缺陷等离子体的电磁参数。通过自由空间法测量缺陷等离子体的透射峰值频率和强度,可以实现等离子体的电磁参数的非接触式和高灵敏度测量。

参 考 文 献

- [1] Varault S, Gabard B, Sokoloff J, et al. Plasma-based localized defect for switchable coupling applications [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(13): 134103.
- [2] Qi L, Yang Z, Fu T. Defect modes in one-dimensional magnetized plasma photonic crystals with a dielectric defect layer[J]. Physics of Plasmas, 2012, 19(1): 012509.
- [3] Liu A L, Sui C Y, Li F Z, et al. Correlation between plasma characteristics and forming defects during laser additive manufacturing of ceramics[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602005.
刘安丽, 隋长有, 李发智, 等. 陶瓷激光增材制造等离子体特征与成形缺陷的相关性研究[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602005.
- [4] Jiang C, Wang Y Q. Diagnostics techniques of high-pressure micro-discharge plasma[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(10): 64-67.
江超, 王又青. 高气压微放电等离子体的诊断技术[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 64-67.
- [5] Wei Z F, Cheng Z G, Wang R W. Measurement of electron density in a transverse-flow CO₂ laser by Langmuir electrostatic probe[J]. Chinese Journal of Lasers, 1990, 17(9): 530-533, 523.
魏在福, 程兆谷, 王润文. 朗缪尔探针法测量横流 CO₂ 激光器的电子密度[J]. 中国激光, 1990, 17(9): 530-533, 523.
- [6] Zhang Z L, Song H Y, Liu S B. Measurement of the electron density of capacitive-coupled plasma by laser Thomson scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 231406.
张泽亮, 宋海英, 刘世炳. 激光汤姆孙散射测量容性耦合等离子体的电子密度[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 231406.
- [7] Wu Y, Bai S B, Wang J Y, et al. The methods of plasma diagnosis by microwave[J]. Optoelectronic Technology, 2007, 27(1): 49-54, 72.
吴莹, 白顺波, 王俊彦, 等. 利用微波诊断等离子体的方法[J]. 光电子技术, 2007, 27(1): 49-54, 72.
- [8] Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1124001.
杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等离子体滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1124001.
- [9] Yan E Y, Yang H, Zheng Q L, et al. Preliminary study of microwave diagnostics for transient plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(10): 46-50.
闫二艳, 杨浩, 郑强林, 等. 瞬变等离子体微波诊断初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(10): 46-50.
- [10] Liu S G, Fang J H, Fan W, et al. Microwave diagnose on electron density of electron-beam-generated air plasma[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(4): 639-642.
刘世贵, 方吉汉, 范威, 等. 大气压电子束等离子体密度诊断实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(4): 639-642.
- [11] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [12] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2060.
- [13] Mikhailova T V, Berzhansky V N, Shaposhnikov A N, et al. Optimization of one-dimensional photonic crystals with double layer magneto-active defect[J]. Optical Materials, 2018, 78: 521-530.
- [14] El-Khozondar H J, Mahalakshmi P, El-Khozondar R J, et al. Design of one dimensional refractive index sensor using ternary photonic crystal waveguide for plasma blood samples applications[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2019, 111: 29-36.
- [15] Wang S Y, Liu S B. Tunable filter using plasma defect in one-dimensional microwave photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7062-7066.
王身云, 刘少斌. 基于等离子体缺陷层的一维可调谐微波光子晶体滤波特性[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7062-7066.
- [16] Lu H, Tian H P, Li C H, et al. Large absolute band gaps of 2D photonic crystals[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1414-1418.
鲁辉, 田慧平, 李长红, 等. 大带隙二维光子晶体结构的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1414-1418.
- [17] Wu G M, Cai Z J, Wang J C, et al. Design and simulation in GaN based light emitting diodes using focused ion beam generated photonic crystals[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(17/18): 2674-2678.
- [18] Luebbers R J, Hunsberger F, Kunz K S. A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for transient propagation in plasma[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(1): 29-34.
- [19] Pan W L, Wu X G, Lu Y H, et al. Study on the characteristics of humidity sensitive for one-dimensional photonic crystal with defects[J]. Journal of Quantum Optics, 2020, 26(4): 382-391.
潘文亮, 武校刚, 卢禹昊, 等. 一维缺陷型光子晶体湿敏特性研究[J]. 量子光学学报, 2020, 26(4): 382-391.
- [20] Wang Y C, Guo G F, Wang J, et al. Measurement of electromagnetic parameters of electromagnetic materials by free-space method[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(1): 107-111.

- 王依超, 郭高凤, 王娟, 等. 自由空间法测量电磁材料电磁参数[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(1): 107-111.
- [21] Zhang Y X, Zhao Z Q, Shi W G, et al. Analysis of dielectric honeycombs effective complex permittivity using free space method[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(11): 1518-1522.
- 张云祥, 赵志钦, 史维光, 等. 自由空间法分析介质蜂窝等效复介电常数[J]. 电讯技术, 2013, 53(11): 1518-1522.
- [22] Zhang W, Su D L. Measurement of complex electromagnetic parameters of composite materials by free-space method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 141-145.
- 张伟, 苏东林. 自由空间法测量复合材料复电磁参数[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 141-145.
- [23] Tang Z X, Zhang B. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of medium[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 189-192.
- 唐宗熙, 张彪. 用自由空间法测试介质电磁参数[J]. 电子学报, 2006, 34(1): 189-192.