

先进微波成像诊断技术中高通滤波板的优化设计

杨华斌 仝丽 朱逸伦

Optimization design of dichroic plate for the advanced technology in microwave imaging diagnostic

Yang Hua-Bin Tong Li Zhu Yi-Lun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 165202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.165202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.165202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma

物理学报.2015, 64(11): 115201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.115201>

高压均匀直流辉光放电等离子体的光学特性

Optical properties of direct current glow discharge plasmas at high pressures

物理学报.2015, 64(4): 045206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045206>

软 X 射线激光探针诊断高 Z 材料等离子体

Diagnosis of high-Z plasma with soft X-ray laser probe

物理学报.2014, 63(21): 215203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215203>

利用软 X 射线双频光栅剪切干涉技术诊断金等离子体

Diagnoses of Au plasma with soft X-ray double frequency grating interference technique

物理学报.2014, 63(12): 125210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125210>

多目标优化推断内爆芯部温度和密度空间分布

Deduction of temperature and density spatial profile for implosion core by multi-objective optimization

物理学报.2014, 63(12): 125209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125209>

先进微波成像诊断技术中高通滤波板的优化设计^{*}

杨华斌 仝丽 朱逸伦[†]

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2014年10月26日收到; 2015年4月13日收到修改稿)

介绍了频率选择表面的理论模型和高通滤波板的模拟结果. 通过在高通滤波板中规律性地加入介质, 提高了高通滤波板高通上升沿的上升速度, 并在模拟中证明了其可行性. 论证了使用介质填充的方法可明显优化上升沿速度, 并拓展通带带宽, 拓展了高通滤波板的使用范围, 提高了工作性能. 为先进微波成像的高斯光束空间滤波提供了理想部件.

关键词: 先进微波成像, 高斯光束, 空间滤波, 高通滤波板

PACS: 52.70.kz, 42.79.Ci

DOI: 10.7498/aps.64.165202

1 引言

近年来, 基于电子回旋辐射计 (electron cyclotron emission radiometer, ECER) 的发展, 电子回旋辐射成像设备系统 (electron cyclotron emission imaging, ECEI) 研制成功. 电子回旋辐射计径向测量范围较宽, 时间分辨也很高^[1]. 电子回旋辐射成像设备在保持这两个优点的基础上拓展了极向分辨率, 因此具有更高的时空分辨率^[2], 这是一种先进的微波成像诊断技术. 现在国际多个大型托卡马克装置都已经建立了ECEI诊断系统^[3-7], 同时也取得了很多有意义的物理结果.

先进微波成像诊断系统一般由四部分组成: 前端准光学系统、探测器与外差混频阵列、前端信号处理电子学系统和信号采集与传输网络. 第二部分的工作状态直接决定了后端系统对信号探测的优劣. 毫米波天线阵列采用外差混频的方法将电子回旋辐射信号与本振信号混频输出^[8]. 在EAST装置上, 使用二次谐波非寻常模式90—140 GHz^[9]的频段, 出于后端电子学系统的限制必须要对这一频段的频率通过混频的方式降频. 电子回旋辐射信号中混杂着电子回旋共振加热波 (electron cyclotron

resonance heating wave, ECRHW), 影响成像图像, 并且会对混频器和中频系统造成破坏, 因此必须对聚焦后的电子回旋辐射信号进行空间滤波^[10]. 考虑空间尺寸、成像效果和实现单边带测量这些条件, 选择不同截止频率的频率选择表面 (frequency selected surface, FSS) 高通滤波板 (dichroic plate) 和陷波滤波板 (notch filter)^[11], 安装在探测器天线阵列盒的微波馈口上. 高通滤波板能对高斯光束进行空间高通滤波, 陷波滤波板中心陷波频率是140 GHz. 本文介绍一种方法: 在高通滤波板波导里有规律地加入介质, 可以实现通带带宽增加10 GHz, 截止频率降至约90 GHz; 充分利用二次谐波和三次谐波不重合的部分, 使得ECEI系统具有更完善的测量范围. 在此基础上同时做到了低于截止频率的频段可以迅速衰减, 使得截止频率和通带之间的上升沿阶段更锐利, 提高了阻带抑制度, 降低了后端系统的噪声.

2 高通滤波板理论设计分析

频率选择表面是由金属贴片单元或在金属屏上的开孔单元二维周期性排列形成的结构, 可以在单元谐振频率附近有选择地透射或反射电磁波^[12].

^{*} 国家磁约束核聚变能发展研究专项基金 (批准号: 2009GB107001, 2014GB109002) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xiaolun@mail.ustc.edu.cn

波导具有天然的高通滤波特性, 高通滤波板就是利用波导的高通特性制作而成, 主要用于高通滤波和远红外反射 (far infrared reflection, FIR). 传输频率依赖于高通滤波板的厚度 t_h , 孔隙直径 d , 孔隙圆心之间的距离 s . 对低于截止频率 f_c 的入射频率 f , 具有近似完全反射的作用^[13]. 不过近几年在 $f \ll f_c$ 光学研究中发现了反常传输现象^[14]. 我们设计的高通滤波板如图 1 所示, 采用圆形波导结构.

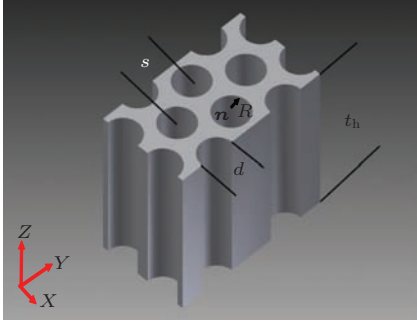


图 1 高通滤波板示意图

Fig. 1. The diagram of dichroic plate.

取 Z 方向为传播方向, 在波导内部, 电磁波的电场部分沿波导轴向 Z 随时间 t 具有 $E(z, t) = E_0 \exp(-\gamma z + i\omega t)$ 的形式, ω 是角频率, 并且满足相应的边界条件.

对于 TM 模式, 在波导内表面上电场 Z 向分量 $E_z|_{\text{surface}} = 0$, 对 TE 模式磁场部分

$$\frac{\partial B_z(x, y)}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{surface}} = 0,$$

\mathbf{n} 是波导表面的法线方向即沿波导径向 R 的方向.

电磁波经过频率选择表面的一般传输理论是由 Chen^[15] 给出的, 他认为入射到高通滤波板的平面波会转化成一系列的 Floquet 模耦合到波导里. 在波导出口处, 高通滤波板相当于缝隙阵列再向外辐射电磁场. 导出的传输和反射特点符合 Floquet 和波导模型. 在截止频率以上 Floquet 模遵循 Bragg 衍射定理, 低于截止频率时, Floquet 模以表面波的形式存在^[16].

为使高通滤波板有稳定的滤波条件, 其工作波长必须大于衍射边缘波长^[17], 衍射边缘波长可以表示为 $\lambda_{\text{diffraction}} = s\sqrt{3/4}$, 其中 $\lambda_{\text{diffraction}}$ 表示衍射波长, 因此 s 决定了高通滤波板工作的最大频率. 文献^[15] 中指出高通滤波板的厚度是滤波板滤波条件的参数, 即截止频率, 厚度增大时截止频率明显降低.

按照 Chen 的复杂推导, 传输系数有

$$T = \frac{1}{1 - i \left[A + B \tanh\left(\frac{1}{2} i \beta t_h\right) \right]} - \frac{1}{1 - i \left[A + B \coth\left(\frac{1}{2} i \beta t_h\right) \right]}, \quad (1)$$

其中

$$\beta(f) = 2\pi\lambda \sqrt{1 - \left(\frac{p_{nm}\lambda}{\pi d}\right)^2}, \quad (2)$$

$$A = 12 \sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{\lambda}{s}\right)^2 - 1} \left[\frac{J'_1(x)}{1 - \left(\frac{x}{1.841}\right)^2} \right]^2 - \frac{12}{\sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{\lambda}{s}\right)^2 - 1}} \left[\frac{J_1(x)}{x} \right]^2,$$

$$x = \frac{2\pi d}{s\sqrt{3}}, \quad (3)$$

$$B = 0.21 \left(\frac{s}{d}\right)^2 i\beta\lambda. \quad (4)$$

函数 β, A, B 用来简化 T 的表达形式. 式中 f 表示入射电磁波频率, λ 表示入射电磁波波长, $J'_1(x)$ 是一阶贝塞尔函数的导数, p_{nm} 是 $J_n\left(k\frac{d}{2}\right) = 0$ 的 m 次根. T 表示传输系数, 表示出射波与入射波的幅比. T 的数值表征了某个频率透过功率大小.

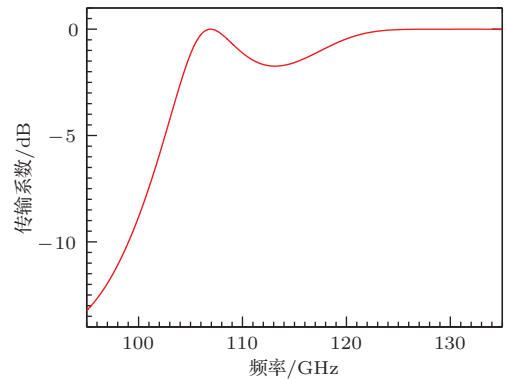


图 2 高通滤波板的频率选择特性

Fig. 2. The frequency selective characteristics of dichroic plate.

函数 A 和 B 也依赖于滤波板的几何尺寸厚度 t_h , 孔隙直径 d , 孔隙圆心之间的距离 s . 为了利用频率选择表面进行高斯光束的空间滤波, 将二次谐波非寻常模式 90—140 GHz 频段选择出来, 综合截止频率、高通滤波板工作稳定性、实际加工制造难度这三个因素, 我们取 $t_h = 5 \text{ mm}$, $d = 1.9 \text{ mm}$, $s = 2.4 \text{ mm}$. 利用 (1) 式得到如图 2 所示的传输系数, 可以明显地看到截止频率现象. 从 (1) 式中可

以看出滤波板具有明显的波长选择性. 相对于空气介质, 同频率的电磁波具有更小的相速度, 因此波长会相应减小. 基于此物理思想, 通过改变波长可以实现带宽的改变. 在滤波板的波导中加入介质可人为改变了空气中某个频率的波长, 从而实现改变带宽. 传统认为高通滤波板对频率具有选择特性, 通过(1)式可见, 高通滤波板实现滤波的原理是对波长的选择, 不同波长通过的情况不同. 这一发现区别于以往对高通滤波板的认识.

3 高通滤波板仿真设计与优化结果

为了研究更准确的通带范围以及阻带与通带之间传输系数的变化, 我们以有限积分算法为背景, 利用 CST 仿真软件进行设计. 图 1 所示是我们建立的高通滤波板模型单元, d 是圆形波导口的直径. 设计中在一定厚度的金属板上凿出一定结构的圆形波导阵列, 为提高选择表面的传输系数, 采用“蜂窝型”结构. 理论已经在第二部分介绍过. 根据前面数值计算的结果, 我们意识在空心波导里面填充某种介质, 可以显著地增加带宽, 并且可以获得一个锐利的上升沿. 也就是说在截止频率以下波能被迅速衰减.

首先研究不同填充材料下传输系数的变化. 将波导完全填充介质, 从图 3 可以看出, 随着介电常数的增大, 通带带宽也在增大, 但是传输系数并未明显衰减, 因此通带带宽是随着介质介电常数的增加而增加的. 我们取 $\epsilon = 1.3$ 作为后续研究的填充材料.

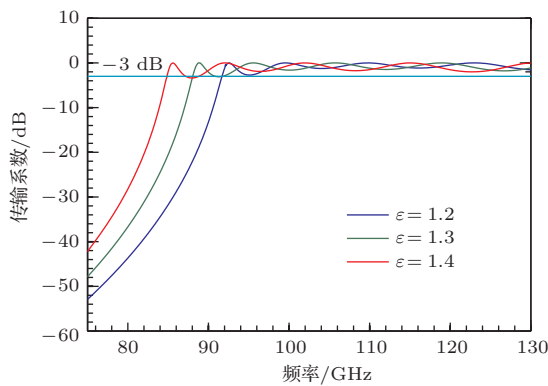


图 3 (网刊彩色) 不同填充材料下的传输系数
Fig. 3. (color online) Transmission coefficient of different filling materials.

图 4 是我们设计的第一种方法, 用于改善带宽和上升沿的锐利程度. 此方案的优点在于不需要重

新设计加工新的高通滤波板, 只需在原来滤波板的基础上进行操作, 节约成本.

我们仍取 $t_h = 5$ mm, $d = 1.9$ mm, $s = 2.4$ mm, 利用 CST 仿真计算得到如图 5 所示的整块高通滤波板的传输系数. 从图 5 中可以明显看到, 在没有填入任何介质时, 截止频率约 100 GHz, 在加入介质时截止频率明显降低了, 通带带宽也随之增加. 从图 5 中也能明显地看出, 随着介质圆柱半径的增加, 带宽增加是递增的. 当空心波导内完全填充介质时截止频率降低到最低. 相对于无介质情况, 通带带宽增加了约 12 GHz. 定义从 -30 dB 增长到 -3 dB 这段直线是阻带与通带间的上升沿, 我们也发现随着插入介质圆柱半径的增大, 上升沿速度有些增加, 即上升阶段变得更加锐利. 这显然更加接近理想高通滤波板的设计要求. 阻带抑制度得以提升.

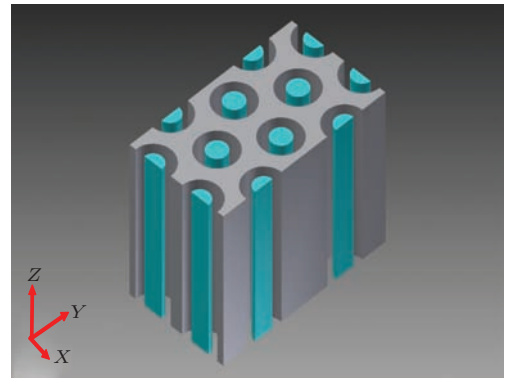


图 4 (网刊彩色) 不同插入圆柱介质半径下的结构示意图
Fig. 4. (color online) The structure of the inserted cylindrical dielectric material of different radius.

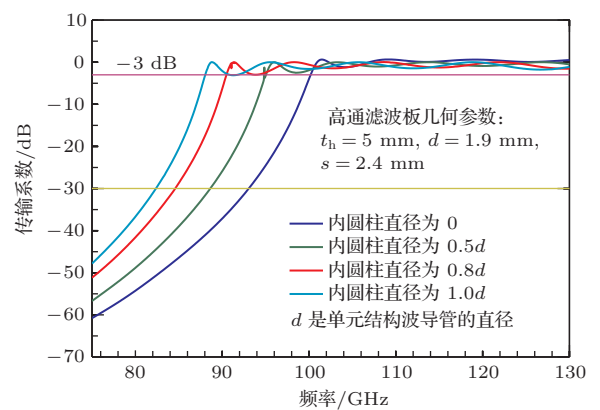


图 5 (网刊彩色) 不同插入圆柱介质半径下的传输系数
Fig. 5. (color online) Transmission coefficient vs. different radius of the inserted cylindrical dielectric material.

图 6 是第二种优化设计方案的结构示意图. 这种设计方案的优点是可以精确控制圆形波导内部

镀层厚度和位置, 相对于第一种设计方案更容易进行操控. 设计时镀层厚度也采用归一化形式. 在有镀层的情况下同样观察到通带变宽, 随着镀层厚度的增加带通呈递增趋势. 从图7可见, 采用相同的几何参数设置, 镀层厚度更厚, 整块高通滤波板的传输系数从 -30 dB上升到 -3 dB的上升沿也会更加锐利, 更趋于理想情况的高通滤波板特性. 在波导中完全填充介质时带宽增加到最大, 上升沿速度也达到最大.

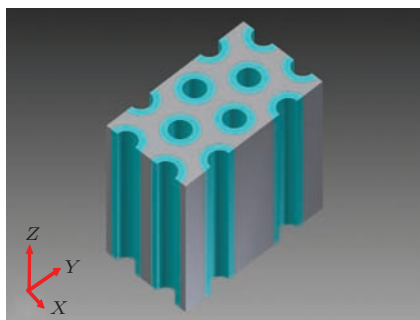


图6 (网刊彩色) 镀层形式的结构示意图

Fig. 6. (color online) Sketch of coating.

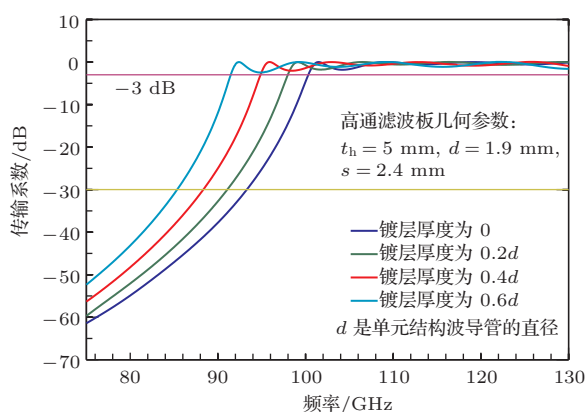


图7 (网刊彩色) 不同镀层厚度的传输系数

Fig. 7. (color online) Transmission coefficient of different coating thickness.

通过模拟发现随着空心波导中介质厚度的增加. 通带带宽有明显的增加, 并且从 -30 dB上升到 -3 dB的上升沿速度也是逐步递增的. 完全填充时达到最大. 鉴于此, 为了增加高通滤波板的通带带宽, 锐化上升沿. 我们可以采用直接将空心波导完全填充介质的方法. 通过改造升级后的高通滤波板具有更大的带宽、上升沿更锐利、更接近于理想滤波板特性, 为后续电子学系统的探测降低了噪声.

对比理论计算的结果和仿真结果, 可以看到很好的一致性. 理论很好地预期了仿真结果.

4 结 论

本文简要介绍了频率选择表面的基本原理, 以Chen^[15]的理论为基础, 设计出了高通滤波板的模型, 利用仿真软件进行了模拟, 找到了一种简单易行的方法增加高通滤波板的带宽, 并且锐化了上升沿, 使其更接近理想情况. 该滤波器有效地对高斯光束在空间上进行了滤波, 保证了先进微波成像诊断系统后端的外差混频的要求. 相对于其他亚毫米波频段的滤波器, 此滤波器在高频段传输系数更高, 可以近似认为具有完全通过性; 在插入介质时可以实现通带带宽的增加和锐化上升沿. 在实验应用中, 不需重新加工滤波板, 通过介质的调整就能充分利用二次谐波. 现有的先进微波成像诊断技术主要关注不同频率电磁波通过高通滤波板前后功率的变化, 达到滤波的作用, 本文设计只兼顾了这一点, 电磁场模式的变化并未给出具体结果, 目前文献中也鲜有此类研究成果, 这一点将是未来研究的主要方向. 未来我们的工作将深入研究高斯光束经过高通滤波板后波振面的变化; 设计更加完善的高通滤波板, 更好地还原高斯光束经过滤波之后的波振面.

参考文献

- [1] Hartfuss H J, Geist T, Hirsch M 1997 *Plasma Phys. Control. Fusion* **39** 1693
- [2] Cima G, Bravenec R V, Wootton A J, Rempel T D, Gandy R F, Watts C, Kwon M 1995 *Phys. Plasmas* **2** 720
- [3] Mase A, Kogi Y, Ohashi M, Ohsako S, Nagayama Y, Kawahata K, Aoi S, Sakata E 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1445
- [4] Oyama N, Mase A, Negishi H, Tokuzawa T, Itakura A, Tamano T, Yatsu K, Watabe K, Mizuno K, Nagayama Y, Kawahata K, Matsuura H, Miura A 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 500
- [5] Park H, Mazzucato E, Munsat T, Domier C W, Johnson M, Luhmann Jr N C, Wang J, Xia Z, Classen I G J, Donné A J H, van de Pol M J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3787
- [6] Austin M E, Lohr J 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1457
- [7] Hsia R P, Deng B H, Geck W R, Liang C, Domier C W, Luhmann Jr N C, Brower D L, Cima G 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 488
- [8] Gao B X 2013 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [高炳西 2013 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

- [9] Q J J 2012 *M.S. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [秦津津 2012 硕士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [10] Deng B H, Hsia R P, Domier C W, Burns S R, Hillyer T R, Luhmann Jr N C, Oyevaar T, Donn e A J H RTP team 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 998
- [11] Munsat T, Domier C W, Kong X Y, Liang T R, Luhmann Jr N C, Tobias B J, Lee W C, Park H K, Yun G S, Classen I G J, Donn e A J H 2010 *Appl. Opt.* **49** 20
- [12] Munk B A (translated by Hou X Y) 2009 *Frequency Selective Surface Theory and Design* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [Munk B A 著 (侯新宇 译) 2009 频率选择表面理论与设计 (北京: 科学出版社)]
- [13] Winnewisser C, Lewen F, Helm H 1998 *Appl. Phys. A* **66** 593
- [14] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [15] Chen C C 1973 *Transmission of Microwave Through Perforated Flat Plates of Finite Thickness* IEEE pp1–6
- [16] Pickett H M, Farhoomand J, Chiou A E 1984 *Appl. Opt.* **23** 4228
- [17] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 167307 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 167307]

Optimization design of dichroic plate for the advanced technology in microwave imaging diagnostic*

Yang Hua-Bin Tong Li Zhu Yi-Lun[†]

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 26 October 2014; revised manuscript received 13 April 2015)

Abstract

Taking theories and stimulation as the starting points, this paper gives the optimal design for dichroic plate in the advanced technology of imaging diagnostic. Dichroic plate is firstly analyzed theoretically, whose result shows that it is a wavelength-sensitive device, different from the traditional understanding of dichroic plate. In fact, a dichroic plate is a wavelength selective, and its outward manifestation is a frequency selective plate. There are two ways of putting medium into the dichroic plate. It can be seen that with the increase of the medium's semidiameter, the passband bandwidth increases obviously and the rising slope is sharper. When the medium is fully populated, the passband bandwidth reaches its maximum, the frequency increasing upto 12 GHz, and in the meanwhile the rising slope possessing the top speed. The other is to adopt the method of coating. If a hollow dielectric cylinder is filled to become a waveguide, it can also be seen that with the thickening of the wall of the dielectric cylinder, the passband bandwidth also increases obviously and the rising slope is sharper. When the medium is fully filled in the circular waveguide, the result is the same as that of the first method.

Keywords: microwave imaging diagnostic, Gaussian beam, spatial filtering, dichroic plate

PACS: 52.70.kz, 42.79.Ci

DOI: 10.7498/aps.64.165202

* Project supported by the Special Funds for the Development of National Magnetic Confinement Nuclear Fusion Energy, China (Grant Nos. 2009GB107001, 2014GB109002).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaolun@mail.ustc.edu.cn