

特殊多层结构中电磁波传播特性研究

吴振华, 张开春, 刘盛纲

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】对各向异性导体-介质-等离子体特殊多层结构中电磁波的传播特性进行了研究。通过理论推导得到了该结构中的色散方程; 并通过计算机计算, 给出了色散曲线。研究了该结构中是否存在金属网层对色散曲线的影响, 证明了金属网层对电磁波的耦合作用, 使慢波和等离子体表面波结合产生了慢等离子体表面波。分析了金属网角度、介质厚度和介电常数对色散的影响。

关键词 各向异性介质; 色散特性; 等离子体表面波; 慢波

中图分类号 TN129

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.006

Research on Characteristics of Electromagnetic Wave Propagation in a Multi-Layer Structure

WU Zhen-hua, ZHANG Kai-chun, and LIU Sheng-gang

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The characteristics of electromagnetic wave propagating in a multi-layer structure with anisotropic conductor-dielectric-plasma are researched. The dispersion curve is obtained by theoretical analysis and numerical calculation. The coupling effect of the anisotropic conductor sheet on electromagnetic wave is proved through comparing dispersion curves under various conditions. The results show that the slow plasma surface wave is formed because of the coupling of slow wave with plasma surface wave.

Key words anisotropic dielectric; dispersion equation; plasma surface wave; slow wave

近年来等离子体在工业中得到了广泛的应用^[1-2], 特别是在微电子工业中, 等离子体是一种很重要的材料处理工具^[3-4]。这不仅是因为等离子体处理技术有很多优点, 如成本低、效果好、环境污染低等, 而且有些工艺只有等离子体才能完成。目前主要采用低温等离子体加工技术, 包括低温化学气相沉积、化学聚合、阳极氧化、干法刻蚀等; 另外, 还有热蒸镀、离子镀、溅射、离子注入等^[5]。传统的产生等离子体的方法有直流辉光放电、射频放电、微波激发等离子体等^[6-7]。产生等离子体后, 为了利用等离子体, 对它的均匀性、体积以及存在时间等有严格的要求。本文分析了一种用电磁波产生大面积等离子体的结构, 该结构可简单描述为: 当输入电磁波时, 各向异性导体介质表面的电位以很高的频率变化, 引导等离子体放电^[8]; 能使场的能量与系统的模式相匹配, 从而能持续地放电, 达到维持等离子体的目的。

1 色散关系

本文研究的结构如图1所示。

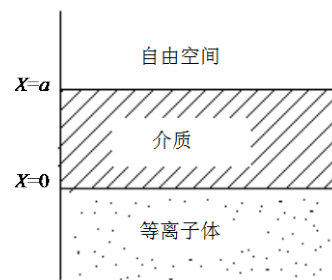


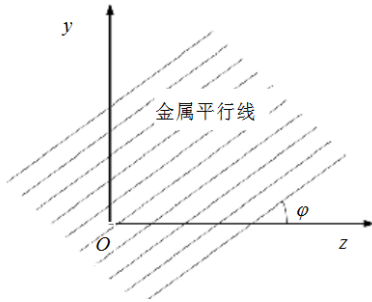
图1 结构示意图

三层结构为各向异性导体-电介质-等离子体, 其空间坐标采用直角坐标系。在介质层的上表面放置了一个各向异性的理想金属薄膜。所谓各向异性可理解为一排紧密排列的平行金属线, 沿线方向电导率 $\sigma = 1$, 垂直方向电导率 $\sigma = 0$, 如图2所示放置, 与z轴夹角为 φ 。

收稿日期: 2008-12-04; 修回日期: 2009-07-15

基金项目: 国家973重大基础研究项目(2007CB310401)

作者简介: 吴振华(1980-), 男, 博士生, 主要从事真空电子学太赫兹源方面的研究。

图2 在 $x=a$ 界面上金属平行线示意图

在 $z=0$ 处加入一微波场 $E = \hat{x}A_0 e^{-i(\omega t - k_z z)}$, 利用 Maxwell's 方程, 得到等离子体、介质以及自由空间中3个方向上各个场分量的表达式^[9-10]。在等离子体中, $x < 0$, 有:

$$E_x = -\frac{ik_z}{\alpha_1} A_1 e^{\alpha_1 x} \quad (1)$$

$$E_y = B_1 e^{\alpha_1 x} \quad (2)$$

$$E_z = A_1 e^{\alpha_1 x} \quad (3)$$

$$H_z = \frac{c}{i\omega} \alpha_1 B_1 e^{\alpha_1 x} \quad (4)$$

式中 A_1 和 B_1 为待定系数; $\alpha_1 = \sqrt{k_z^2 - (\omega^2/c^2)\epsilon_1}$; 等离子体介电常数 $\epsilon_1 = 1 - \omega_p^2/\omega^2$; 等离子体频率 $\omega_p^2 = 4\pi n_0 e^2/m$, 其中 n_0 、 e 和 m 分别为电子密度、电量和质量。

在介质中, $0 < x < a$, 有:

$$E_x = -\frac{ik_z}{\alpha_2} (A_2 e^{\alpha_2 x} - A_2' e^{-\alpha_2 x}) \quad (5)$$

$$E_y = B_2 e^{\alpha_2 x} + B_2' e^{-\alpha_2 x} \quad (6)$$

$$E_z = A_2 e^{\alpha_2 x} + A_2' e^{-\alpha_2 x} \quad (7)$$

$$H_z = \frac{c}{i\omega} \alpha_2 (B_2 e^{\alpha_2 x} - B_2' e^{-\alpha_2 x}) \quad (8)$$

$$H_y = \left(-\frac{i\omega\epsilon_2}{c\alpha_2} \right) (A_2 e^{\alpha_2 x} - A_2' e^{-\alpha_2 x}) \quad (9)$$

式中 A_2 、 B_2 、 A_2' 和 B_2' 为待定系数; $\alpha_2 = \sqrt{k_z^2 - (\omega^2/c^2)\epsilon_2}$; ϵ_2 为电介质的介电常数。

在自由空间, $x > a$, 有:

$$E_y = B_3 e^{-\alpha_3 x} \quad (10)$$

$$H_z = -\frac{c}{i\omega} \alpha_3 B_3 e^{-\alpha_3 x} \quad (11)$$

$$H_y = \frac{i\omega}{c\alpha_3} A_3 e^{-\alpha_3 x} \quad (12)$$

$$E_z = A_3 e^{-\alpha_3 x} \quad (13)$$

$$E_x = \frac{ik_z}{\alpha_3} A_3 e^{-\alpha_3 x} \quad (14)$$

式中 $\alpha_3^2 = k_z^2 - \omega^2/c^2$ 。由此得到各层中场分量的

表达式, 再利用各层之间的边界条件, 可以求出待定系数。下面进行边界条件分析。在 $x=0$ 处, 等离子体和介质层交界将等离子体简化为各向同性的电介质, 且介电常数为 ϵ_1 , 容易得到 E_z 、 E_x 、 E_y 以及 H_z 在该边界上是连续的^[11], 通过式(1)~式(9)可得:

$$\frac{\epsilon_1 \alpha_2}{\epsilon_2 \alpha_1} A_1 - A_2 + A_2' = 0 \quad (15)$$

$$A_1 - A_2 - A_2' = 0 \quad (16)$$

$$B_1 - B_2 - B_2' = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} B_1 - B_2 + B_2' = 0 \quad (18)$$

分析介质和各向异性导体的交界面的边界条件。在 $x=a$ 处 E_z 、 E_y 是连续的^[4], 由式(5)~式(14)可得:

$$A_2 e^{\alpha_2 a} + A_2' e^{-\alpha_2 a} - A_3 e^{-\alpha_3 a} = 0 \quad (19)$$

$$B_2 e^{\alpha_2 a} + B_2' e^{-\alpha_2 a} - B_3 e^{-\alpha_3 a} = 0 \quad (20)$$

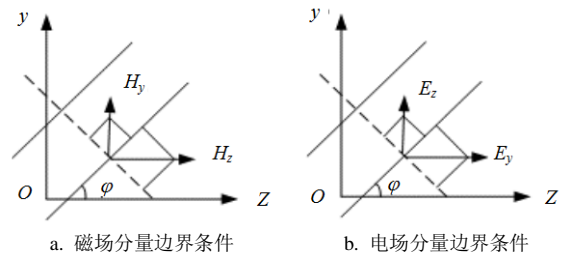


图3 各向异性边界条件分析

对于金属平行线, 如图3所示, 沿导体方向磁场强度是连续的, 分析可得 $H_y \sin \phi + H_z \cos \phi$ 连续, 将式(5)~式(14)的相关参量代入, 整理可得:

$$A_2 e^{\alpha_2 a} - A_2' e^{-\alpha_2 a} + A_3 \frac{\alpha_2}{\alpha_3 \epsilon_2} e^{-\alpha_3 a} + B_2 \frac{c^2 \alpha_2^2}{\omega^2 \epsilon_2} \cot \phi e^{\alpha_2 a} - B_2' \frac{c^2 \alpha_2^2}{\omega^2 \epsilon_2} \cot \phi e^{-\alpha_2 a} + B_3 \frac{c^2 \alpha_2 \alpha_3}{\omega^2 \epsilon_2} \cot \phi e^{-\alpha_3 a} = 0 \quad (21)$$

沿导体方向电场强度为零, 即 $E_y \sin \phi + E_z \cos \phi = 0$, 由式(10)~式(14)可得:

$$A_3 \cot \phi + B_3 = 0 \quad (22)$$

下面求色散方程, 从式(15)~式(22)可以得到一个方程组, 其中的未知数为 A_1 、 A_2 、 A_2' 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_2' 、 B_3 , 已知 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 、 α_1 、 α_2 , 但介质厚度 a 、等离子体频率 ω_p 没有确定。进行归一化处理, 令 $x = \frac{\omega}{\omega_p}$ 、 $y = \frac{ck_z}{\omega_p}$, 设 $L = \frac{a\omega_p}{c}$ 为参数, 将归一化结果代入行列式中, 并进一步简化行列式, 令

$$p_1 = \sqrt{y^2 - x^2 + 1}, p_2 = \sqrt{y^2 - x^2 \epsilon_2}, p_3 = \sqrt{y^2 - x^2},$$

得到简化后的行列式为:

$$Q = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-x^2)\frac{p_2}{\epsilon_2} & -p_1 & p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_3 \epsilon_2 e^{p_2 L} & -p_3 \epsilon_2 e^{-p_2 L} & p_2 e^{-p_3 L} & 0 & \frac{p_2^2 p_3}{x^2} \cot \varphi e^{p_2 L} & -\frac{p_2^2 p_3}{x^2} \cot \varphi e^{-p_2 L} & \frac{p_2 p_3^2}{x^2} \cot \varphi e^{-p_3 L} \\ 0 & e^{p_2 L} & e^{-p_2 L} & -e^{-p_3 L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cot \varphi & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_1 & -p_2 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{p_2 L} & e^{-p_2 L} & -e^{-p_3 L} \end{vmatrix}$$

当该系数行列式值为零时, 即方程组有解。由此可以确定系数行列式中 x 和 y 的关系, 即色散关系为:

$$|Q| = 0 \tag{23}$$

当选择一组 L 和 φ 的值时, 可得到与之对应的色散关系。

2 计算结果及分析

本文研究有或无金属网线对色散曲线的影响。

当 $\varphi = 45^\circ$ 、 $\omega_p = 0.93 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、 $a = 16 \text{ mm}$ 、 $\epsilon_2 = 5$, 计算得到的色散曲线如图4所示。

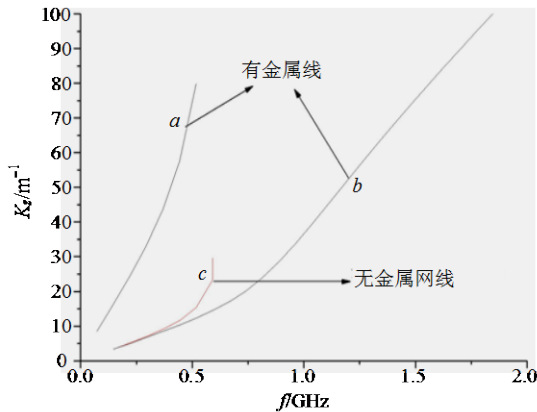


图4 有无金属网线对色散曲线的影响

在图4中, 曲线 c 是在没有金属网线的边界条件下解得的, 曲线 a 、 b 存在金属网线时的色散, 3条曲线均为慢波(HEM波)。由于曲线 b 有更宽的频率, 所以单独对色散曲线 b 进行研究。

讨论 φ 对色散曲线的影响, 当 $\omega_p = 0.93 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、 $a = 16 \text{ mm}$ 、 $\epsilon_2 = 5$ 时, 取 φ 分别为 30° 、 45° 和 60° , 得到的色散关系如图5所示。从图5可以看出, 当 φ 变大时, 波数 k_z 也随之变大。从理论上分析可知, 金属线与 z 轴夹角变大, 将更有效

地延迟波在 z 方向的传播。在极限情况下, $\varphi = 90^\circ$ 时, 波将无法传播。

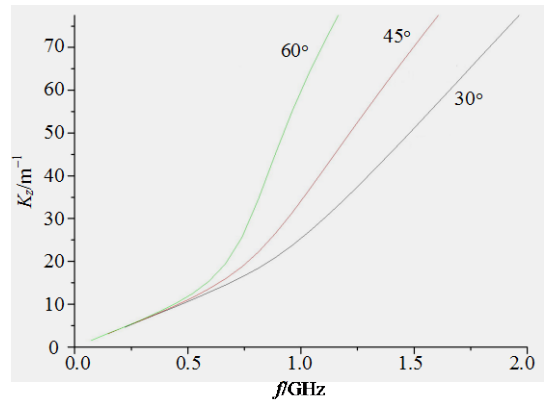


图5 φ 对色散曲线的影响

本文讨论介质厚度 a 对色散曲线的影响, 当 $\varphi = 45^\circ$ 、 $\omega_p = 0.93 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、 $\epsilon_2 = 5$ 时, 取 a 分别为 8 、 16 、 32 mm , 得到的色散曲线如图6所示。从图6可以看到, 当 a 值变大, 波数 k_z 就会变大。

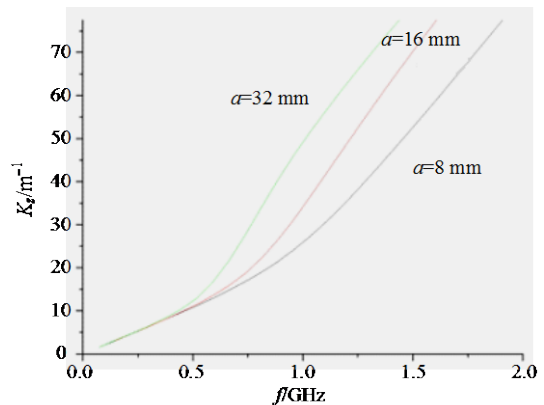


图6 介质层厚度 a 对色散曲线的影响

另外, 本文研究等离子体频率 ω_p 对色散的影响, 当 ω_p 逐渐变小时, 色散曲线越靠近 k_z 轴; 当 ω_p 趋近于零时, 该色散曲线将不存在。因此, 也说明

色散是由等离子体产生的。同样由计算可得介质层的介电常数 ε 对色散关系的影响。 ε 越大, 传播常数越大, 与物理理论分析是一致的。

3 结束语

本文通过对各项异性导体-介质-等离子体的特殊结构的理论分析和数学计算, 得到了电磁波的色散关系; 并对其中的慢波做了分析, 证明了结构中各层对所传播的电磁波模式的影响, 并讨论了参数 φ 、 a 、 ε 对色散曲线的影响。通过调节不同的参数, 可以得到希望的慢等离子体表面波。该慢波可以长时间维持大体积等离子体的存在, 这也是研究该种结构的主要原因和目的。

参 考 文 献

- [1] 赵 青, 李宏福, 任 同, 等. 离子体隐身技术的研究[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(2): 142-145.
ZHAO Qing, LI Hong-fu, REN Tong, et al. Study on plasma stealth technology[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(2): 142-145.
- [2] FUTAMURA S, KABASHIMA H, EINAGA H. Steam reforming of aliphatic hydrocarbons with nonthermal plasma[J]. Industry Applications, IEEE Transactions, 2004, 40(6): 1476-1481.
- [3] YAMAMOTO T, NEWSOME R, ENSOR D S. Surface modification and organic film removal using atmospheric pressure pulsed corona[C]//Industry Applications Society Annual Meeting. [S.l.]: IEEE, 1992.
- [4] FUTAMURA S, SUGASAWA M. Additive effect on energy efficiency and byproduct distribution in voc decomposition with nonthermal plasma[J]. Industry Applications, IEEE Transactions, 2008, 44(1): 40-45.
- [5] 甄汉生. 等离子体加工技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
ZHENG Han-sheng. Technology for plasma processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [6] GOTO H H, LOWE H D, OHMI T. Independent control of ion density and ion bombardment energy in a dual RF excitation plasma[J]. Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions, 1993, 6(1): 58-64.
- [7] FORSTER J C. RF driven plasmas in semiconductor manufacturing[C]//Pulsed Power Plasma Science, PPPS. [S. l.]: [s.n.], 2007.
- [8] MEHRANY K, RASHIDIAN B. Novel optical slow wave structure and surface electromagnetic wave coupler with conducting interfaces[J]. Semiconductor Science and Technology, 2004, 9(7): 890-896.
- [9] 王华东, 鄢 扬, 郭 军. 电磁波在等离子体层中衰减的数值分析[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(4): 357-360.
WANG Hua-dong, YAN Yang, GUO Jun. Numerical analysis of attenuation of electromagnetic wave in non-uniform magnetized plasma slab[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(4): 357-360.
- [10] HASHIM A M, HASHIZUME T, IIZUKA K, et al. Plasma wave interactions in the microwave to THz range between carriers in a semiconductor 2DEG and interdigital slow waves[J]. Superlattices and Microstructures, 2003, 34(3): 531-537.
- [11] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
ZHANG Ke-qian, LI De-jie. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.

编 辑 黄 莘