

等离子体天线中波的色散关系的研究

杨兰兰^{*} 屠彦 王保平
(东南大学电子工程系 南京 210096)

Axisymmetric Surface-Wave Dispersion in Plasma Antenna

Yang Lanlan^{*}, Tu Yan and Wang Baoping
(Electronic Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Dispersion of the axisymmetric surface wave along the plasma column was studied. The wave vector deduced from the dispersion analysis was used to explain the fact that the plasma surface wave with a frequency lower than that of the plasma propagates at close to light speed along the plasma column just as it travels at metal dielectric interface. We suggest that the plasma column can replace metals and be designed as a good antenna.

Keywords Plasma antenna, Surface wave, Dispersion relation, Wave vector

摘要 本文研究了同轴对称表面波沿等离子体柱轴向传播的色散关系,由此得到的波矢说明了当频率小于等离子体频率时,电磁波沿等离子体柱的传播类似于电磁波沿金属介质界面上的传播,传播速度接近于光速。因此可以使用等离子体代替金属用来构成最基本的天线振子。

关键词 等离子体天线 表面波 色散关系 波矢

中图分类号 TN136 文献标识码 A 文章编号 :1672-7126(2004)06-0424-03

传统的雷达天线设计大多使用一定尺寸的金属传导面在所选用的频率上辐射电磁波,而等离子体天线则选用电离气体作为振子辐射电磁波。当气体电离形成等离子体状态后就像导体一样可以导电,从而起到发射和接收无线电信号的天线作用。当除去电离状态以后,它既不对敌方探测雷达产生后向散射波,也不会吸收可降低电子对抗效能的高功率微波辐射,具有良好的隐形特性,不同于以往传统的金属天线^[1,2]。

等离子体天线具有许多不同于金属天线的优点。首先,它具有较低的雷达截面,使天线隐形成为可能。其次不需要改变天线的物理结构,通过改变等离子体的气体成分和电子浓度等物理参数就可以对天线的频率、带宽和方向性等参数进行动态重构^[3,4]。

等离子体天线的气体可以是密封在管子里的,也可以直接对大气中的气体进行电离。电离气体的

方法有许多种,可以通过在气体两端的电极间加直流或交流电压来电离气体,也可以在气体一端使用表面波来电离气体。

图1为澳大利亚国立大学研制的利用表面波驱动进行电磁波传输的等离子体天线的示意图^[5]。电

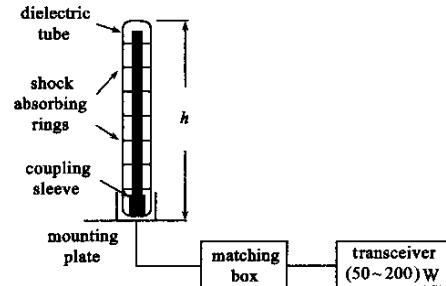


图1 表面波驱动等离子体天线示意图

Fig.1 Schematic diagram of the plasma antenna driven by the surface wave

磁波在等离子体柱上的传播类似于电磁波在金属圆柱上的传播,可以用来构成最基本的天线振子。

1 等离子体中波的特性分析

等离子体中波的行为与相对介电常数 ϵ_r 关系密切^[6],在等离子体中 $\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - jv)}$,其中 $\omega_{pe} = (\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0})^{1/2}$ 为等离子体频率, v 为等离子体中电子和中性粒子的碰撞频率。对低温等离子体,我们可以假设碰撞频率 $v = 0$,则 $\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$ 。

当入射电磁波的频率大于等离子体频率时, $\rho < \epsilon_r < 1$,等离子体的性质如同介质,电磁波以 λ_0/ϵ_r 的波长在等离子体中传播,其中 λ_0 为自由空间的波长。电磁波在等离子体中传播时,电磁波的能量被等离子体迅速吸收。通过改变等离子体的浓度,使得等离子体频率小于入射电磁波的频率,就可以达到吸收探测电磁波,减少反射波的隐身目的。同时,我们也可以利用改变等离子体浓度来达到控制发射天线的辐射方向图的目的。

当入射电磁波的频率小于等离子体频率时, $\epsilon_r < 0$,等离子体的性质如同金属,电磁波不能在等离子体内传播,只能反射。无线电波在大气电离层的反射和等离子体镜像雷达就是利用等离子体的这一性质。

典型的气体放电的等离子体频率在 $1 \text{ GHz} \sim 10 \text{ GHz}$ 范围内,大多数电磁波的频率都低于等离子体的频率。对于被绝缘管密封的等离子体而言,频率低于等离子体频率的电磁波可以以表面波的模式进行传播。表面波被紧紧束缚在管壁表面,沿半径方向的波会很快衰减,但表面波会沿绝缘管的轴向进行传播。等离子体表面波的传播类似于波在金属天线振子上的传播,因此等离子体柱像金属棒一样可以用来作为天线振子。

2 同轴对称表面波的色散关系研究

我们以轴对称的表面波沿圆柱形的等离子体柱的传播来研究表面波的波矢。如果我们忽略由波衍生的电流也会辐射电磁波这一情况,由无限长圆柱等离子体上的表面波的色散关系确定表面波的波矢。 k 由式(1)得到^[7,8]:

$$\epsilon_r T_0 I_1(\frac{T_0 a}{T_p a} K_0(T_0 a)) + T_p K_1(T_0 a) I_0(T_p a) = 0 \quad (1)$$

其中, $T_p^2 = k^2 - \epsilon_r k_0^2$, $T_0^2 = k^2 - k_0^2$, a 为等离子体柱的半径, $k_0 = \omega/c$ 为自由空间的波矢, ϵ_r 为相对介电常数, $K(\cdot)$ 和 $K(\cdot)$ 分别为第一类和第二类变形的贝塞尔函数。

图2是等离子体柱半径 $a = 0.0125 \text{ m}$,碰撞频率 $v = 1 \text{ GHz}$ 时,求得的复数波矢 k 和等离子体频率之间的关系。图2(a)(b)分别是信号频率为30 MHz 复数波矢 k 的实部、虚部和等离子体频率之间的关系,以及波矢的实部和自由空间波数 k_0 的比较。图2(c)(d)则是信号频率为300 MHz 时的上述参量之间的关系。

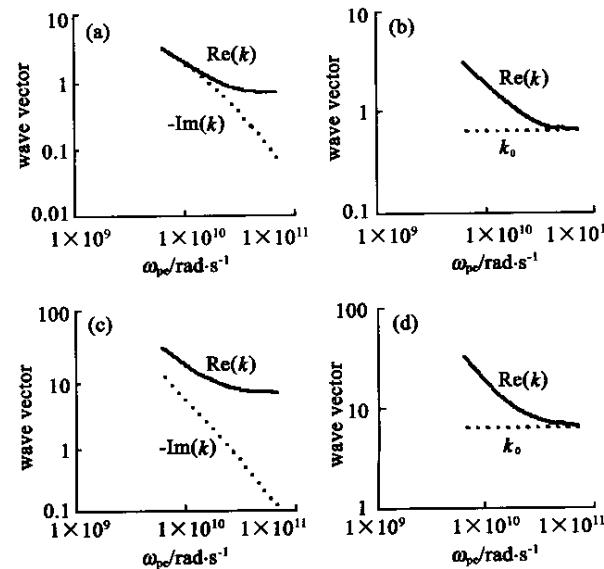


图2 复数波矢 k 与等离子体频率之间的关系($v = 1 \text{ GHz}$, $a = 0.0125 \text{ m}$)。(a)表示信号频率为30 MHz时,复数波矢 k 的实部、虚部和等离子体频率的关系。(b)表示信号频率为30 MHz时,复数波矢的实部和自由空间波数 k_0 的比较。(c)表示信号频率为300 MHz时,复数波矢 k 的实部、虚部和等离子体频率的关系。(d)表示信号频率为300 MHz时,复数波矢的实部和自由空间波数 k_0 的比较。

Fig.2 The relation between the wave vector and the plasma frequency($v = 1 \text{ GHz}$, $a = 0.0125 \text{ m}$). (a) Relation between the real and imaginary parts of wave vector and the plasma frequency for 30 MHz surface wave. (b) Relation between the real part of wave vector and the wave number in the free space for 30 MHz surface wave. (c) Relation between the real and imaginary parts of wave vector and the plasma frequency for 300 MHz surface wave. (d) Relation between the real part of wave vector and the wave number in the free space for 300 MHz surface wave.

传播常数 γ 和复数波矢之间的关系可由方程式(2)表示:

$$\gamma = \alpha + j\beta = jk = \sqrt{(\text{Re}(k))^2 + (\text{Im}(k))^2} \quad (2)$$

其中 $\alpha = -\text{Im}(k)$, $\beta = \text{Re}(k)$ 分别为衰减常数和相位常数。由图 2 可以看出, 当等离子体频率比较高时, 也就是等离子体内电子浓度比较高时, 相位常数 β 接近于自由空间的波数 k_0 , 衰减常数 α 比较小, 也就是说此时电磁波沿等离子体柱的传播类似于电磁波沿金属介质界面上的传播, 传播速度($\approx \omega/k_0 = c$)接近于光速。当等离子体频率比较低时, 表面波衰减很快, 且传播的波长小于电磁波在金属线上的波长。当信号频率改变时, 此趋势仍然成立。

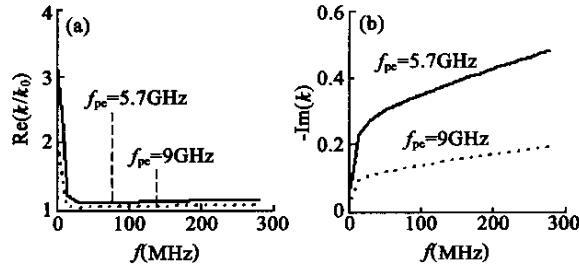


图 3 复数波矢 k 的实部和虚部随信号频率的变化曲线($v = 1$ GHz)

Fig. 3 The variations of the real and imaginary parts of the wave vector with the signal frequency

图 3 是复数波矢 k 的实部和虚部随信号频率的变化关系。由图 3(a)可以看出, 在 3 MHz ~ 300 MHz 的频率范围内 $\text{Re}(k/k_0)$ 的值都趋近于 1, 说明在此频率范围内电磁波以接近于光速的速度沿等离子体柱传播, 同时等离子体频率越高, 速度越趋近于光速。由图 3(b)可以看出, 随信号频率的增加, 波的衰减加快, 但可以通过提高等离子体的浓度(减小 ω/ω_{pe})抑制波的衰减。

在等离子体中, 碰撞频率 $v \sim \sqrt{p_e T_e}$ 为压强和电子能量的函数, 等离子体浓度 $n_e \sim \sqrt{P_{ex} p_e}$ 为激励能量和压强的函数。在中等激励能量条件下, 我们认为等离子体频率在 10^6 Hz ~ 10^9 Hz 之间, 压强在 $1.33 \text{ Pa} \sim 2.66 \times 10^2 \text{ Pa}$ 之间, 电子浓度小于 10^{18} m^{-3} 。图 4 是 30 MHz 和 300 MHz 的信号频率下, 复数波矢 k 的 $\text{Re}(k/k_0)$ 和 $\text{Im}(k/k_0)$ 的值和 ω/ω_{pe} 以及 ω/v 之间的等位图。

在 133 Pa 的 Ar 气里, 碰撞频率 $v = 0.5 \text{ GHz}$, 等离子体浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 当信号频率为 30 MHz

时, 复数波矢 k 的 $\text{Re}(k/k_0)$ 和 $\text{Im}(k/k_0)$ 的值位于图 4(a)(b) 的左上角, 这意味着波以接近于光速的速度传播。当信号频率为 300 MHz 时, 仍在上述的气体条件下, 则 $\log(\omega/\omega_{pe}) \approx -1.33$, $\log(\omega/v) \approx 0.58$ 则复数波矢的值处于图 4(c)(d) 的右上角, 可以看出电磁波的传播速度虽较 30 MHz 时减小, 但仍可以沿等离子体柱的轴向以较快的速度进行传播, 同时我们可以通过改变气体的条件来提高 300 MHz 信号的传播速度。由图 4 可以看出当碰撞频率减小和等离子体频率增大时, 波的传播更接近于沿金属介质界面上的传播。因此由上述碰撞频率和等离子体密度的关系可知, 在低气压下产生高密度的等离子体, 将更有利于电磁信号的传输。

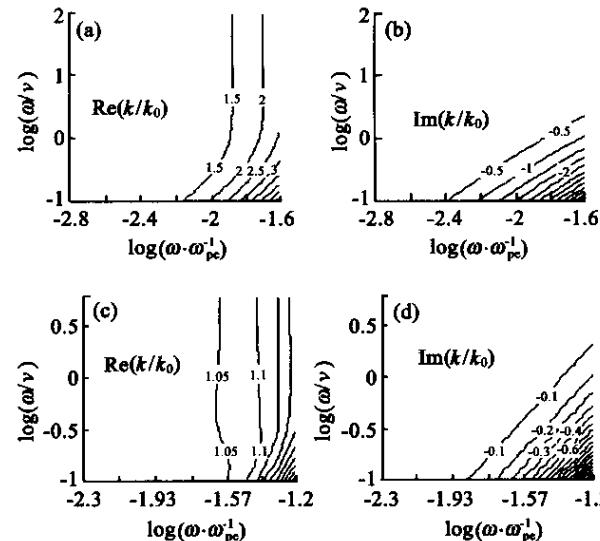


图 4 复数波矢 k 和 ω/ω_{pe} 以及 ω/v 之间的等位关系图:(a)(b)信号频率为 30 MHz 时的情况 (c)(d) 表示信号频率为 300 MHz 时的情况

Fig. 4 Contour plot of the dispersion relation (a) (b) at 30 MHz (c) (d) at 300 MHz

3 总结

等离子体天线是一种完全不同于传统天线的新天线概念, 它采用电离气体代替金属作为天线发射和接收天线电信号, 具有不同于传统天线的许多优点, 其中最重要的一点就是电子对抗中需考虑的天线的隐身特性。此外, 等离子体天线技术使得天线设计更有效, 可构建优越于传统固体天线的重量轻、尺寸小的新型天线。本文从表面波的色散关系出发, 研究了同轴对称的表面波沿等离子体柱的轴

(下转第 429 页)

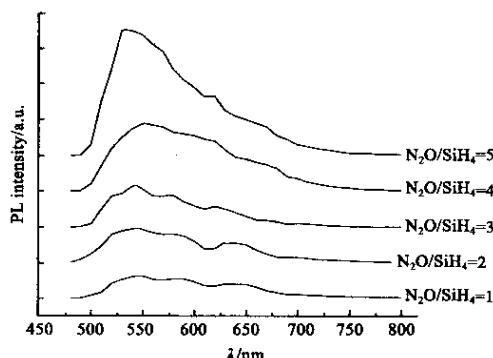


图4 不同N₂O/SiH₄比例的a-SiO_x:H薄膜的可见光致发光光谱

Fig.4 photoluminescence spectra of a-SiO_x:H films with different N₂O/SiH₄ ratios

关于纳米硅的发光机理,目前主要有两种模型:一是量子限制效应发光;二是与氧有关的缺陷发光。按照量子效应发光模型,材料的发光是由于纳米尺寸大小的微粒引起的,而且发光强度和能量跟晶粒大小密切相关,晶粒越小,发光强度越大,能量也越高。根据纳米晶结构的电子理论计算^[5,6],与能隙宽度2.25 eV~3.0 eV相对应的纳米硅晶粒应该小于2.6 nm,而本实验中nc-SiO_x:H薄膜中硅微晶粒的尺寸为8 nm左右,却观察到了2.34 eV能量的光发射,所以无法用此模型来解释。在薄膜的红外光谱中,只有Si-O-Si和Si-H键合的吸收峰,而没有发现O-H键的吸收峰,所以薄膜的发光也不可能是在有关文献提出的OH基团吸附所引起^[7],从结构上来看,nc-SiO_x:H薄膜是一种硅纳米晶粒镶嵌在非晶氧化硅网络中的复合相结构,Si晶粒被大量的非晶硅

和非晶氧化硅所包围,nc-Si跟SiO_x之间的界面结构由于晶格结构的差异,很容易产生诸如氧空位、非桥氧空穴中心(NBOHC)等缺陷。在本实验中,很可能这些缺陷结构就是薄膜发光的来源。

3 结论

首次以SiH₄、N₂O和H₂混合气体为原料,用PECVD方法直接合成得到了硅氧纳米复合薄膜(nc-SiO_x:H),未经任何后处理过程就观察到了530 nm(2.34 eV)的可见光致发光现象。XRD和HRTEM的测试结果证实,薄膜中形成了硅纳米晶,得到的是大量非晶网络包围纳米硅晶粒的镶嵌式复合结构。随着反应气体N₂O/SiH₄体积比的提高,薄膜FTIR谱中Si-O-Si的吸收峰明显变强,薄膜的发光强度也逐渐增加。薄膜的发光是由跟氧有关的结构缺陷(如氧空位、非桥氧空穴中心等)引起的。

参 考 文 献

- Canham L T. Appl Phys Lett, 1990, 57: 1046
- Ali A M, Inokuma T, Kurata Y, et al. Mater Sci & Engeer, 2001, C15: 125
- Yang C S, Lin C J, Kuei P Y, et al. Appl Surf Sci, 1997, 113/114: 116
- Augustine B H, Irene E H, He Y J, et al. J Appl Phys, 1995, 78: 15
- Delley B, Steigmeier E F. Phys Rev, 1993, B47: 247
- Delerue C, Lannoo M, Allan G. J Lumin, 1993, 57: 247
- Ruckschloss M, Landkammer B, Veprek S. Appl Phys Lett, 1993, 63: 1474
- Norris E G. Reconfigurable Plasma Antenna. US Patent number 6369763, 2002-04-09
- Borg G G, Harris J H, Martin N M, et al. Plasma as antennas: Theory, experiment and applications. Physics of Plasmas, 2000, 7: 2198~2202
- Goldston R J, Rutherford P H. Plasma Physics. Institute of Physics publishing, 1995
- Moisan M, Shivarova A, Trivelpiece A W. Experimental investigations of the propagation of surface waves along a plasma column. Plasma physics, 1982, 24(11): 1331~1400
- Borg G G, Harris J H. Application of plasma columns to radiofrequency antennas. Applied Physics Letters, 1999, 74(22): 3272~3274

(上接第426页)

向的波矢,得出电磁波沿等离子体柱的传播类似于电磁波沿金属介质界面上的传播,传播速度接近于光速的结论,因此可以使用等离子体代替金属用来构成最基本的天线振子。

参 考 文 献

- Kang W L, Rader M, Alexeff I. A microwave plasma closing switch and stealth plasma antenna. IEEE International Conference on Plasma Science, ISBN0-7803-2669-5, 1995: 141
- Norris E G. Gas Tube RF Antenna. US Patent number 5594465, 1997-01-14
- Anderson T R. Multiple Tube Plasma Antenna. US Patent number 5963169, 1999-10-05

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>