

文章编号: 1001- 4322(2000)01- 083- 04

导体及其周围电离气体电磁俘获的数值模拟*

周 辉, 刘顺坤, 程引会

(西北核技术研究所, 西安 69 信箱, 710024)

摘 要 介绍了圆柱导体周围稠密大气部分电离时导体对入射电磁场的散射特性的计算结果。采用了三维时域有限差分方法联合求解 Maxwell 方程组和空气离子方程组。结果表明, 导体周围气体电离等离子体层的存在严重影响电磁场的散射特性, 即电子等离子体与导体形成了谐振结构, 在谐振频率上俘获了电磁场能量。

关键词 气体电离; 等离子体; 电磁散射; 谐振效应

中图分类号: O 434. 14

文献标识码: A

等离子体与电磁场相互作用是一个很复杂的研究课题, 采用计算机数值模拟技术进行等离子体特性研究是一个有效的途径。本文的目的是将三维电磁散射程序和空气电离参数计算方法相结合, 研究导体周围的空气电离等离子体与电磁场的相互作用问题, 探索数值模拟方法, 寻找稠密大气中气体部分电离时与导体形成的特殊结构及其与电磁场的相互作用。

本文研究圆柱导体周围存在气体部分电离形成的电子等离子体时的电磁散射特性。稠密大气下的气体部分电离以电子与中性粒子的碰撞为主, 没有外加强磁场情况下, 将电离气体按各向均匀导电媒质处理, 计算其电子和离子迁移率, 从而得到其电导率。为简化计算过程, 设初始电子密度一定, 选取合适的空气电离率以保持初始电子密度在电磁散射过程中保持不变。研究中采用了三维时域有限差分方法求解 Maxwell 方程组和空气电离方程组, 主要研究了背向、侧面和前向三个方向的散射电场特性, 计算给出了近场特性。计算结果表明, 等离子体的存在减小了背向散射的电磁场。

1 物理模型和计算公式

导体圆柱模型和外加入射电磁场如图 1 所示。

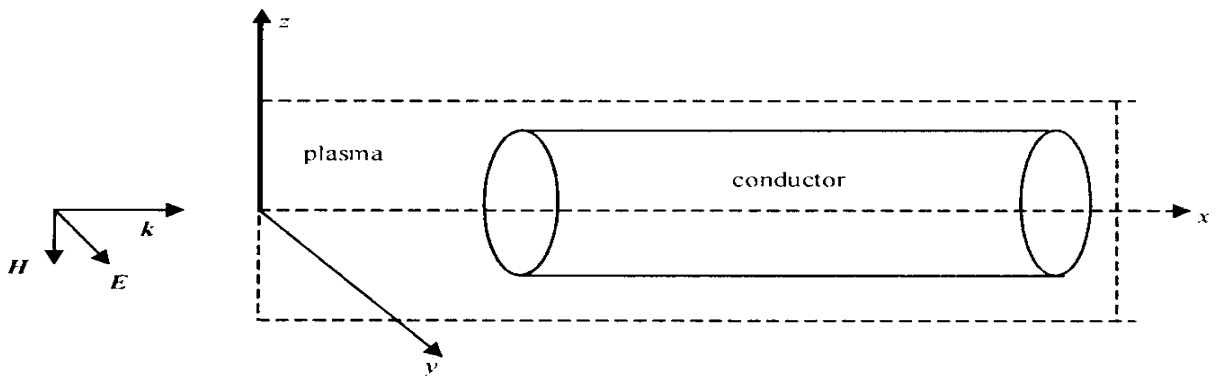


Fig. 1 Assumed geometry for the calculation

图 1 物理模型示意图

数值模拟的物理基础是 Maxwell 方程组、空气离子方程组和空气中的电离电子产生率。他们由下面公式决定。

* 国防科技基础研究资金资助课题

1999 年 月 日收到原稿, 1999 年 月 日收到修改稿。

周 辉, 男, 1961 年 4 月出生, 硕士, 副研究员

$$\begin{aligned} \text{电磁场方程:} \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

(1)式中的电流源 \mathbf{J} 包含了等离子体的贡献。在气压较高时,可以采用空气电离电导率和迁移率等概念对大量的电离电子的宏观行为做出较精确的处理。当气压较低时,需要对电子进行粒子跟踪处理^[1]。本文针对前一种情况进行研究。对散射问题,有如下计算公式^[2]。

$$\begin{aligned} \text{等离子体内:} \quad \nabla \times \mathbf{E}^s = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}^s}{\partial t} - \sigma^s \mathbf{H}^s - ((\mu - \mu_0) \frac{\partial \mathbf{H}^i}{\partial t} + \sigma^s \mathbf{H}^i) \\ \nabla \times \mathbf{H}^s = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}^s}{\partial t} - \sigma \mathbf{E}^s + ((\epsilon - \epsilon_0) \frac{\partial \mathbf{E}^i}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{等离子体外:} \quad \nabla \times \mathbf{E}^s = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}^s}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{H}^s = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}^s}{\partial t} \quad (3)$$

无外加静磁场时,对部分电离的稠密气体电导率计算公式为

$$\sigma = 1.601 \times 10^{-19} (\mu N_e + \mu_i (N_+ + N_-)) \quad (4)$$

N_+ 、 N_- 和 N_e 分别是正离子、负离子和电子的密度。如电离源为 S_e , 它们应按下列空气离子方程组变化^[3]

$$\begin{aligned} \frac{dN_e}{dt} &= S_e - (A + G)N_e - \beta N_+ N_- \\ \frac{dN_+}{dt} &= A N_e - \beta N_+ N_- \end{aligned} \quad (5)$$

$$N_+ = N_- + N_e$$

关于方程组(4)和(5)及其中各参数的定义和计算公式,文献[3]中有详细的介绍。在时域用有限差分方法联合求解(2)~(5)式,可以得到导体周围电离气体的电导率和导体对入射电磁场的散射场。

3 结果与讨论

选取平面电磁波沿圆柱轴向垂直入射,电场偏振方向沿 y 轴,波传播方向沿 x 轴(见图1)。取三个点的电场(y 方向极化)进行分析,它们分别是入射端面附近轴线上等离子体区域外的背散射电场 E_1 (0, 0, 0),侧面的散射电场 E_2 (57, 0, 9)和导体后轴线上远离发射面的前向散射电场 E_3 (96, 0, 0)。

计算参数如下:圆柱导体直径 30cm,长 60cm,理想导体。入射端电子等离子体厚度 27cm,侧面等离子体厚度 9cm,后面等离子体厚度 9cm,均匀分布。入射场为高斯脉冲, $E = E_m e^{-\alpha(t-t_m)^2}$, α 取值 1.078×10^{24} , t_m 取值 3.85×10^{-12} , E_m 取值为 1, 电场 y 方向极化, 电场幅值 1V/m。大气相对密度为 1 (0.101325 MPa), 设动态稳定电离电子密度 $5 \times 10^{16}/\text{m}^3$, 计算得到电导率 0.014S/m。计算结果见图 2 至图 7。

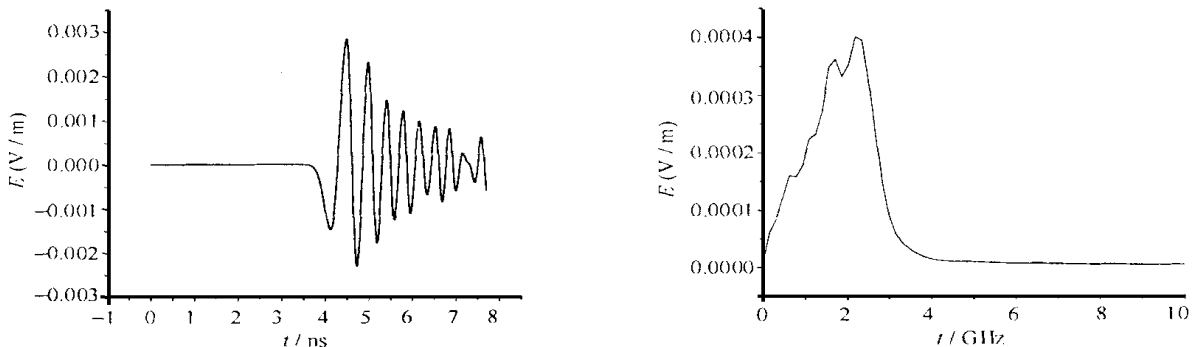


Fig. 2 Beck-scattering E-fields from the conductor without plasma

图 2 无气体电离时的背向散射电场 E_1 及其频谱

结果表明,对题设计算参数,气体电离等离子体的存在使导体系统的背向散射电场减小了 5 倍,见图 2 与图 3。侧面散射电场减小了 2 倍,见图 4 和图 5。但前向散射电场变化不大,幅值减小了 15%,频

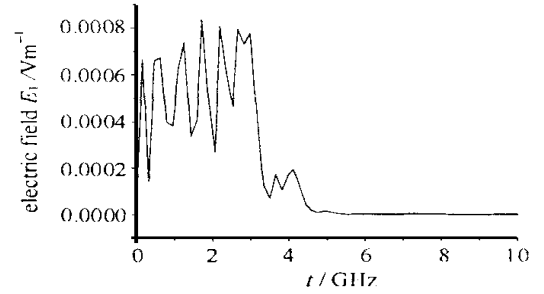
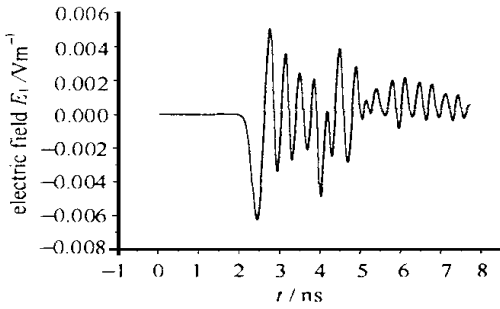


Fig 3 Back-scattering E-fields from the conductor w with plasma

图 3 有电离气体时背向散射电场及其频谱

谱也没有大的变化。图 6 是有气体电离时背向和前向散射电场的比较, 而图 7 反映无气体电离时背向和前向散射电场的比较。导体周围存在气体电离等离子体时, 其作用如同与导体系统形成低频谐振腔结构, 加上导电媒质对电磁场反射和吸收衰减, 构成对入射电磁波的复杂的作用过程。

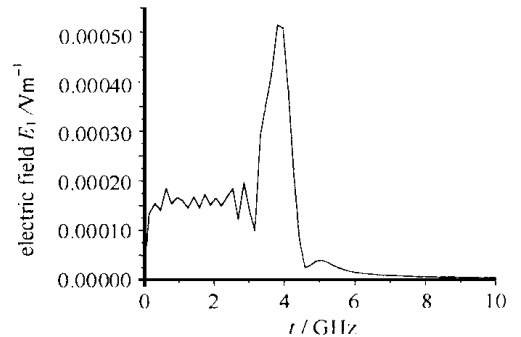
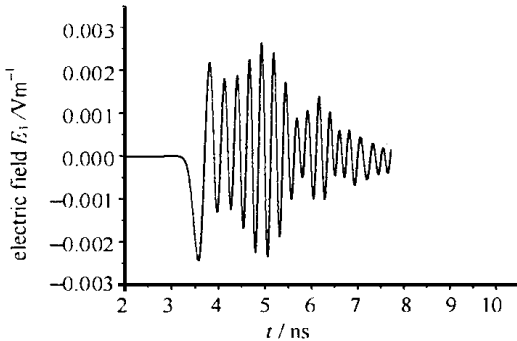


Fig 4 Scattering E-fields from the side of the conductor w without plasma

图 4 无电离气体时侧面散射电场及其频谱

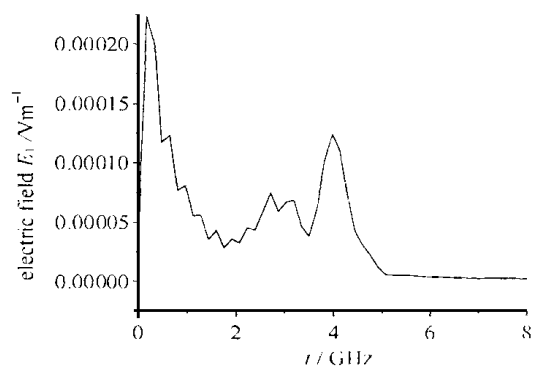
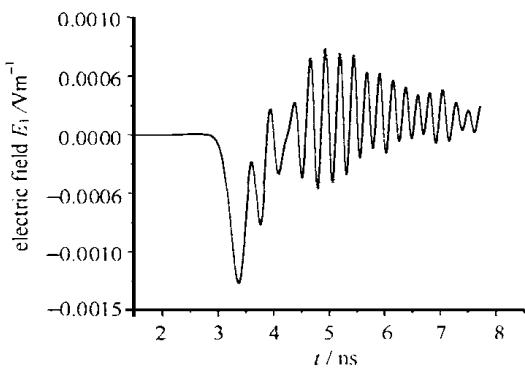


Fig 5 Scattering E-fields from the side of the conductor w with plasma

图 5 有电离气体时的侧面散射电场及其频谱

计算中气体电离参数是任意选取的, 等离子体厚度也不大, 因此结果并不表示对电磁散射的最佳设计。对一个特定形状和尺寸的导体系统电磁场散射与诸多因素有关, 一般其最大散射截面出现在系统的谐振频率附近。另一方面, 等离子体与导体系统将形成俘获电磁场能量的谐振腔结构^[4], 极大地影响电磁场的散射行为。空气电离度也不是越高越好, 有一个范围, 特别是对应系统谐振频率有一个上限, 电子密度超过这个上限将引起较大的反射, 等离子体吸收和俘获的电磁场能量减小。从散射场的时间特性可以看出, 本文结果中等离子体反射成分已很明显。

由计算结果可以得出初步看法, 即通过精心设计, 减小导体系统背向电磁散射截面一个数量级以上是有可能的。如在图 3 所示的有电离气体时背向散射电场及其频谱中可以看到, 若外加电磁波是单频的

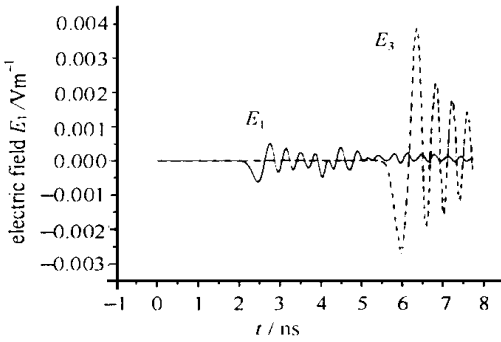


Fig 6 Scattering E-fields with plasma
图 6 气体电离时背向和前向散射电场比较

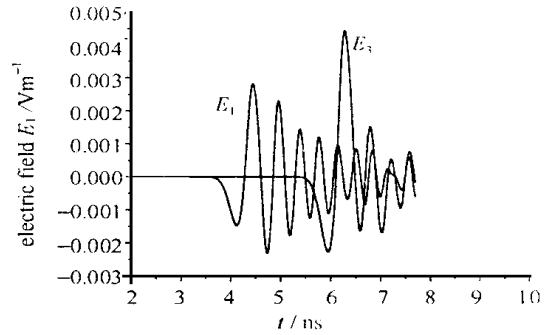


Fig 7 Scattering E-fields without plasma
图 7 无气体电离时背向和前向散射电场比较

且处于图中的吸收频率附近,系统对外加电磁波将有更大的能量吸收。但本文并没有对很大范围内的导体和环境参数进行系统的研究,尚无法得出较肯定的规律性认识。

没有外加强磁场时,均匀导电媒质模拟气体部分电离等离子体是合适的,计算量和精度满足规律研究的需要。当存在外加强磁场时,上述计算方法仍可以给出模拟媒质的宏观特性,但需对媒质的介电参数进行修正,使其满足各向异性计算要求。对电子在外磁场中与瞬态电磁场相互作用的粒子行为需要用粒子模拟方法进行研究^[5]。另外,外加强磁场中等离子体的电磁特性是各向异性的。

本文未寻找出导体周围气体电离等离子体与电磁场相互作用的更多的规律性结论,目的在于探索研究方法和寻找初步的电磁场散射特性。

参考文献

- 1 周 辉等 系统电磁脉冲研究中次级电子行为的粒子模拟 试验与研究, 1999, 22(2)
- 2 刘顺坤等 动力飞行器电磁脉冲效应数值分析 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 117
- 3 Jerry Longley H, Longmire L. Development of the GLANC EMP Code AD-774773
- 4 Hobbs Willard E, etc Numerical simulation of plasma effects near the surface of an irradiated conductor: *IEEE Tran*, 1979, NS26 (6): 5035~ 5040
- 5 王 闽 等离子体物理及其计算机模拟 西安: 陕西科学技术出版社, 1993

PLASMA TRAPPING OF EM-FIELDS NEAR THE SURFACE OF CONDUCTOR SURROUNDED BY IONIZED GAS

ZHOU Hui, LIU Shunkun, CHEN Yinhu

Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69, Xi'an, 710024

ABSTRACT: The method has been introduced to study plasma effects on incident electromagnetic fields near a conductor when surrounded by ionized gas. A code has been given to examine phenomena relating to electromagnetic fields interacting with a metallic surface and with the ambient atmosphere. An important result is that the plasma will affect the fields to the vicinity of the metal surface. The relevant physics is discussed and the results of a calculation are included.

KEY WORDS: ionized gas; plasma, electromagnetic scatter; syntax