

文章编号: 2095-4980(2017)02-0253-05

长脉冲 GW 级 HPM 大气击穿时间分析

胡俊杰, 余道杰, 魏进进, 蔡北兵, 周东方

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 结合电子流体方程与 Maxwell 方程组,对单脉冲高功率微波(HPM)大气击穿过程进行仿真,采用时域有限差分方法(FDTD)并结合 HPM 自生等离子体的特征参数,仿真了不同压强和场强下单脉冲 HPM 自生等离子体的参量变化,分析了 HPM 频率为 6.4 GHz 时,不同场强、压强下的大气击穿时间,并开展了大气击穿实验加以验证。理论分析与实验结果表明,实验与理论分析结果一致,压强与场强的变化对大气击穿时间均有显著影响,原因在于场强和压强对大气击穿种子电子浓度的变化起决定性作用,进而影响大气击穿时间。场强为 kV/cm 量级时,大气击穿时间在 10 ns 量级,在相同的场强下,随着压强的增大,击穿时间会先减小再增加。相同的大气压强条件下,场强越高,大气击穿时间越短。

关键词: 高功率微波; 大气击穿; 击穿实验; 击穿时间

中图分类号: TN911.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0253

Analysis on atmospheric breakdown time for GW level HPM long pulse

HU Junjie, YU Daojie, WEI Jinjin, CAI Beibing, ZHOU Dongfang

(School of Information and Communication Engineering, Information Systems Engineering College, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: The process of high power microwave atmospheric breakdown is simulated with the combination of electron fluid equation and Maxwell equation. Using the characteristic parameters of plasma, the Finite Difference Time Domain(FDTD) method is adopted to analyze the atmospheric breakdown of the single pulse High Power Microwave(HPM) under different pressures and electric field intensities, then the time of the atmospheric breakdown is obtained under different pressures and electric fields when the microwave frequency is 6.4 GHz. Theoretical analysis and simulative results show that the change of the pressure and the electric field has a significant effect on the atmospheric breakdown time, because the electron concentration in the atmosphere is dominated by the electric field intensity and pressure. The atmospheric breakdown time is at 10 ns order of magnitude when the field strength is at the order of kV/cm. When the electric field strength is constant, it can be found that the atmospheric breakdown time will be reduced with the increase of pressure. Then the atmospheric breakdown time will increase again when the pressure drops to a certain value. Through the contrast analysis of different field strengths, it also can be found that the higher the electric field intensity, the shorter the atmospheric breakdown time.

Keywords: High Power Microwave; atmospheric breakdown; atmospheric breakdown experiment; breakdown time

近年来, HPM 技术朝着高功率、长脉冲、高重频和小型化方向飞速发展^[1], HPM 空间大气传输过程中发生的大气击穿现象是其技术长远发展的主要限制因素^[2-3]。针对 HPM 大气击穿现象,早期国内外学者的研究重点在于大气击穿阈值,研究了不同大气环境条件下不同频率、脉宽情况下的大气击穿阈值及击穿规律。近几年研究的热点集中在 HPM 大气击穿时间、击穿现象等方面,先后提出了粒子模型法、流体模型法等研究方法^[4-6],通过研究大气击穿过程中微观粒子的相互作用,进而解释宏观大气击穿物理机理,并针对单脉冲大气击穿做了

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2016-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201056; 61271104)

大量的理论和实验研究,获得了一定条件下的大气击穿实验结果。例如赵鹏程等人利用改进型流体模型研究高功率微波大气传输过程;赵刚等设计了反射面聚焦法大气击穿实验方案,观察到大气击穿等离子丝状阵列的产生与传播过程^[7-11]。一般情况下,HPM 大气击穿时间在 ns 级,而且 HPM 源辐射出的微波脉冲上升沿和下降沿具有不稳定性等特点,在如此短的时间内难以对击穿时间准确地标定和测量,但是击穿时间又是标定大气击穿特性的重要指标之一,因而有必要对大气击穿过程,特别是击穿时间开展进一步研究。为此,论文结合电子流体方程、Maxwell 方程和玻尔兹曼方程^[12],采用 FDTD 仿真分析了频率为 6.4 GHz 单脉冲 HPM 的大气击穿过程。通过电子流体方程,分析等离子体密度变化;利用玻尔兹曼方程,模拟大气传输的实际环境,综合考虑了电场、压强、大气温度、大气湿度等因素对大气电离参数的影响;编写一维 HPM 大气击穿仿真程序;仿真 HPM 传输过程,分析了入射波为高功率微波条件下的电子密度与碰撞频率变化过程和微波传输特性,得到了频率为 6.4 GHz,场强为 4 704.7 V/cm 和 6 538.9 V/cm 时,对应不同压强下的大气击穿时间,并在实验中对大气击穿时间进一步验证。

1 大气击穿流体方程

假设 TEM 波,且沿 z 方向传播,则高功率微波流体模型基本方程可表示为^[12-13]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = (v_i - v_a)N_e - r_{ei}N_e^2 + \Delta(Dn) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(N_e \bar{\varepsilon}_e)}{\partial t} = q_e(N_e u_x E_x + N_e u_z E_z) - N_e Q_l \quad (4)$$

式中: ε_0 和 μ_0 分别为自由空间的电导率和磁导率; 电流密度 $\mathbf{J} = q_e N_e \mathbf{v}_e$, q_e 为电子电荷, N_e 为电子密度; D 为电子扩散系数; r_{ei} 为电子与正离子的复合系数; u_x 为沿 x 方向的电子流体速度; v_i 为电离频率, v_a 为复合频率; Q_l 为能量损失频率。电离参数是影响大气击穿过程中最重要的影响因素之一,结合大气中电子与分子等粒子之间的弹性散射、激发、电离过程,以及电子能量的影响,电离参数 v_j 的具体表达式为:

$$v_j = N_{\text{gas}} \int_0^\infty \sqrt{\frac{2\varepsilon_e}{m}} \sigma_i(\varepsilon_e) f(\varepsilon_e) d\varepsilon_e, (j = i, m, a) \quad (5)$$

$$Q_l = N_{\text{air}} \left[\frac{8}{3\sqrt{\pi}} \frac{m_e}{M_{\text{gas}}} \int_0^\infty \sqrt{\frac{2\varepsilon_e}{m_e}} \sigma_c f(\varepsilon_e) \varepsilon_e d\varepsilon_e + \sum_{n, n \neq c} \int_0^\infty \sqrt{\frac{2\varepsilon_e}{m_e}} \sigma_n f(\varepsilon_e) \varepsilon_n d\varepsilon_e \right] \quad (6)$$

式中: M_{gas} 和 N_{gas} 分别为气体分子的质量和密度; σ_c 和 σ_n 为电子与电子、分子的碰撞横截面; ε_n 为电子与分子碰撞反应的阈值。所建模型中碰撞率、电离率和能量损失率通过电子能量分布函数计算,其归一化电子能量分布函数 $f(\varepsilon_e)$ 为:

$$f(\varepsilon_e) = c_1 \varepsilon_e^{1/2} \exp(-c_2 \varepsilon_e^\chi) \quad (7)$$

式中: $c_1 = \frac{\chi}{\varepsilon_e^{3/2}} \frac{[\Gamma(\xi_2)]^{3/2}}{[\Gamma(\xi_1)]^{3/2}}$; $c_2 = \frac{1}{\varepsilon_e^\chi} \left(\frac{\Gamma(\xi_2)}{\Gamma(\xi_1)} \right)^\chi$, $\Gamma(\xi) = \int_0^\infty t^{\xi-1} \exp(-t) dt$, $\xi > 0$, $\xi_1 = \frac{3}{2\chi}$, $\xi_2 = \frac{5}{2\chi}$; χ 为空气的极化率。

根据电波传播的基本理论,当 HPM 导致的大气等离子体使得 HPM 发生全发射时达到完全击穿状态,即此时的大气等离子体频率 ω_{pe} 等于微波频率:

$$\omega_{pe} = \omega \sqrt{\frac{(1+\chi)(\omega^2 + v_m^2)}{\omega^2 + v_m v_i}} \quad (8)$$

式中 ω 为 HPM 角频率。已知击穿时 $\omega_{pe} = \sqrt{N_e q_e^2 / (m_e \varepsilon_0)}$, 电子质量 $m_e = 9.109\ 389\ 7 \times 10^{-31}$ kg, 电子电荷 $q_e = 1.602\ 177\ 33 \times 10^{-19}$ C, 真空中介电常数 $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ F/m, 从而可得击穿时对应的电子密度的临界值 n^{cr} 为:

$$n^{\text{cr}} = \frac{10^{16} (1+\chi)(\omega^2 + v_m^2)}{9\lambda^2 (\omega^2 + v_m v_i)} \quad (9)$$

式中 λ 为 HPM 的波长。

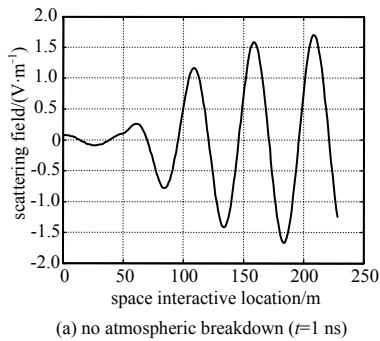
2 大气击穿时间理论分析

分析 HPM 大气击穿阈值时, 一般认为低层大气中初始种子电子的浓度^[14]为 $5\sim 10\text{ cm}^{-3}$, 其来源于宇宙射线产生的高能带电粒子与大气分子的离化作用, 如果空气中种子电子浓度为 $5\sim 10\text{ cm}^{-3}$, 对应的外部宇宙射线导致的平均电子产生率为 0.5 s^{-1} , 则初始种子电子的平均产生时间为 2 s, 也就是说, HPM 脉宽小于 2 s 时不会导致大气击穿, 因为这段时间内击穿区域根本不会出现种子电子, 这与现有实验证实结论不符, 说明宇宙射线并不是 HPM 大气击穿种子电子的主要来源^[15]。目前普遍认为 O^+ 离子的解析附碰撞有可能提供大气击穿的初始种子电子。所以将大气击穿分为 2 个过程, 一是 O^+ 离子的解析附碰撞产生种子电子过程; 二是雪崩击穿过程。论文主要分析雪崩击穿过程, 所以仿真初始电子浓度设置为 10^{11} cm^{-3} 。

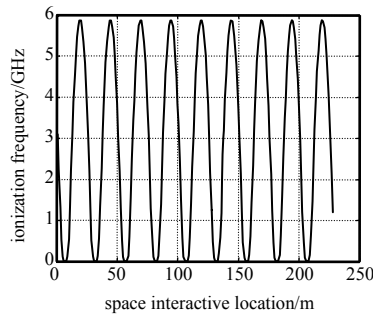
根据流体模型方程, 建立了 HPM 大气击穿一维模型, 其中入射 HPM 脉冲为沿 x 方向的线极化平面波, 频率为 6.4 GHz, 图 1 为散射场强曲线。入射脉冲频率 6.4 GHz, 场强 4 704.7 V/cm。可以发现, 随着脉冲作用时间的增加, 产生不可忽略的散射场, 并反作用于大气。电子浓度越高, 散射电场场强幅值越高, 当大气发生雪崩击穿时, 散射电场场强与入射电场场强接近, 并于击穿点前与入射波同相, 相互叠加形成驻波, 击穿点后与入射波反相, 相互叠加总场强趋近于 0。

图 2 为电离频率曲线, 入射脉冲频率为 6.4 GHz, 场强为 4 704.7 V/cm。入射脉冲作用于大气, 使大气中分子发生电离, 产生新的电子。脉冲功率越高, 电离频率越大, 当发生大气雪崩击穿时, 散射电场与入射电场于击穿点前叠加形成驻波, 场强幅值增大, 电离频率增加, 击穿点后叠加场强趋近于 0, 电离频率趋近于 0。

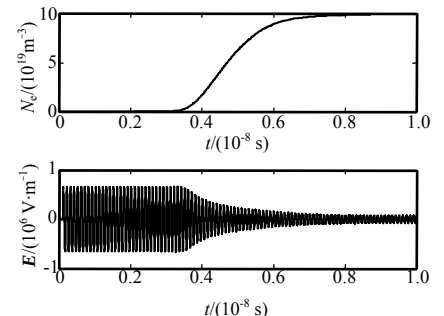
图 3 为电子浓度与辐射场随时间变化曲线。入射脉冲频率 6.4 GHz, 图 3(a)中场强为 6 538.9 V/cm, 压强为 1 509 Pa; 图 3(b)中场强为 4 704.7 V/cm, 压强为 1 495 Pa。随着入射 HPM 脉冲的传输, 电子与大气中分子不断碰撞, 产生新的电子, 电子浓度逐步增大, 散射电场不断增大, 当电子浓度达到电子密度临界值时, 发生大气雪崩击穿, 散射电场与入射电场叠加形成驻波, 击穿点处场强会逐步衰减为 0。



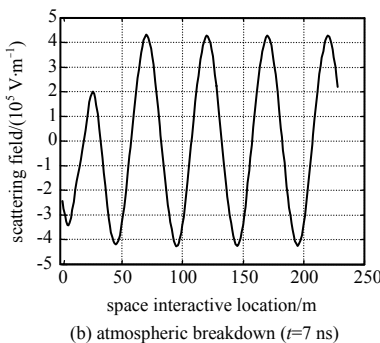
(a) no atmospheric breakdown ($\tau=1\text{ ns}$)



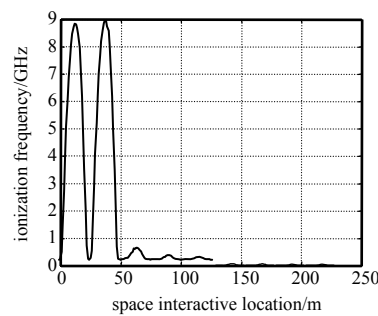
(a) no atmospheric breakdown ($\tau=1\text{ ns}$)



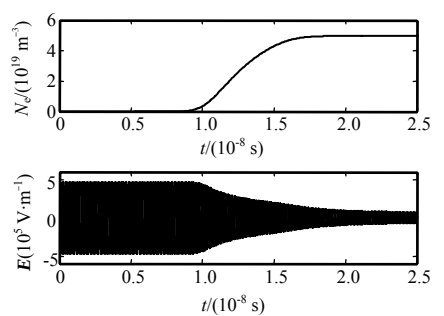
(a) $E=6\,538.9\text{ V/cm}$



(b) atmospheric breakdown ($\tau=7\text{ ns}$)



(b) atmospheric breakdown ($\tau=7\text{ ns}$)



(b) $E=4\,704.7\text{ V/cm}$

Fig.1 Variation of scattering electric field
图 1 单脉冲大气击穿散射场强变化过程

Fig.2 Variation of ionization frequency
图 2 单脉冲大气击穿电离频率变化过程

Fig.3 Variation of electron concentration and electric field strength with time
图 3 单脉冲大气击穿过程中电子浓度与电场强度随时间的变化

3 大气击穿时间实验分析

针对仿真结果, 开展了介质聚焦透镜法大气击穿实验, 实验原理图如图 4 所示, 实验采用 HPM 天线为圆锥喇叭天线, 最大辐射方向 $\pm 20^\circ$, 极化方式为水平极化, 等效辐射功率为 1.5 GW, 脉宽为 120 ns。如图 4 所示, 在 HPM 辐射天线 2 个最大辐射方向上分别放置 2 路测量系统, 其中一路测量天线监测 HPM 源输出波形, 另一路在 HPM 源与测量天线之间依次放置介质聚焦透镜、大气环境模拟实验腔体, 通过测量天线监测 HPM 大

气击穿透射波形。大气环境模拟实验腔体与测量控制系统主要由大气环境模拟实验腔体、真空泵、真空计、摄像头和连接组件构成。

利用真空泵调节控制大气环境模拟实验腔体内的气压,记录入射 HPM 脉冲输入波形与透射波形,监测大气击穿时的发光现象,分析不同压强下的大气击穿时间与大气击穿阈值。通过介质聚焦透镜法大气击穿实验波形,可以发现,在不同的压强下,其存在不同击穿状态:不击穿、临界击穿、击穿。

通过大气击穿实验,测得了不同条件下的击穿时间与击穿阈值,并与仿真结果进行了对比分析,如图 5。图 5 为不同大气压强下大气击穿时间的实验测量结果与仿真结果对比图,脉冲频率为 6.4 GHz,脉宽 τ 为 120 ns,场强分别为 6 538.9 V/cm 和 4 704.7 V/cm。实验中通过调整腔体与高功率微波源之间的距离控制场强,距离为 3 m 时大气环境模拟腔体中心场强为 6 538.9 V/cm,距离为 4 m 时,大气环境模拟腔体中心场强为 4 704.7 V/cm,通过调节改变大气环境模拟腔体内部压强,通过示波器对比入射脉冲、透射脉冲和反射脉冲,分析大气击穿时间,观察脉冲变化得到击穿时间。可以发现,仿真结果与实验结果基本一致,击穿时间随着压强增大会先减少再增加。当压强较低时,仿真结果低于实验结果,这是因为种子电子的产生需要一定时间。频率为 6.4 GHz,场强为 6 538.9 V/cm 时,其拐点在 0.13 Torr 到 0.95 Torr 之间,击穿阈值在 15 Torr 附近。当频率为 6.4 GHz,场强为 4 704.7 V/cm 时,其拐点在 0.05 Torr 到 1 Torr 之间,击穿阈值在 7 Torr 左右。

4 结论

采用时域差分法,针对大气压强与入射波场强对大气击穿时间的影响问题,通过对 Maxwell 方程、电子流体方程以及玻尔兹曼方程的耦合求解,建立大气击穿流体仿真模型,对比分析了不同场强与压强下大气击穿过程,仿真分析了 HPM 脉冲作用下离子浓度和微波脉冲传输特性,从理论和实验,对比分析了不同压强和不同场强下的大气击穿时间变化,计算了大气击穿时间。理论分析与实验结果表明:理论仿真与实验测试结果一致,在相同的场强下,随着压强的增大,击穿时间会先减小再增加;相同大气压强下,场强较高时,大气击穿时间更短;当压强较低时,仿真结果要略低于实验结果,这是因为低压条件下种子电子的产生需要一定时间。

参考文献:

- [1] ZHANG J, JIN Z X, YANG J H, et al. Recent advance in long-pulse HPM sources with repetitive operation in S-, C-, and X-bands[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(6): 1438-1445.
- [2] 周东方, 余道杰, 杨建宏, 等. 基于混合大气传输模型的单脉冲高功率微波大气击穿理论与实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(1): 14207-1-14207-7. (ZHOU D F, YU D J, YANG J H, et al. Theoretical and experimental investigation of air breakdown on single high power microwave based on the mixed-atmosphere propagation model[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(1): 14207-1-14207-7.)

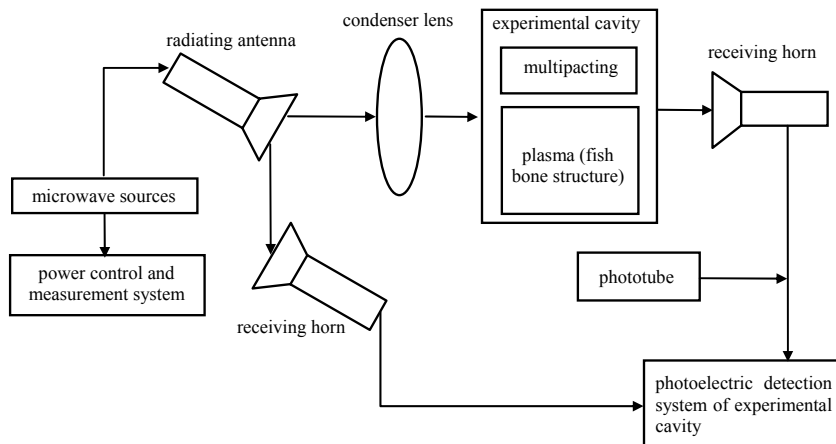


Fig.4 Experimental study on atmospheric breakdown of dielectric focusing lens
图 4 介质聚焦透镜法大气击穿实验原理图

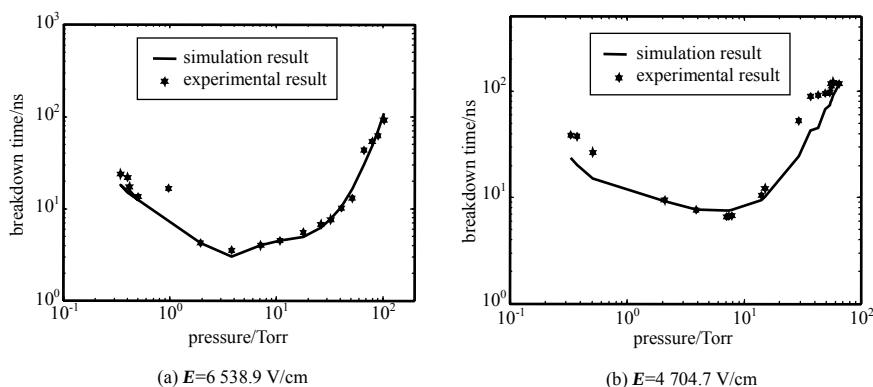
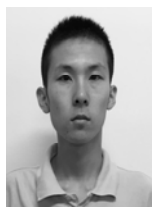


Fig.5 Experimental and simulation value curves of atmospheric breakdown time
图 5 不同入射场强下单脉冲大气击穿时间的实验测量值与仿真结果对比曲线

- [3] HIDAKA Y,CHOI E M,MASTOVSKY I,et al. Imaging of atmospheric air breakdown caused by a high-power 110-GHz pulsed Gaussian beam[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008,36(4):936-937.
- [4] LIU G Z,LIU J Y,HUANG W H,et al. A study of high power microwave air breakdown[J]. Chinese Physics, 2009,9(10): 757-763.
- [5] 赵荣,侯德亭,陈勇,等. 高功率微波在自生等离子体中的传输特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(3):216-219. (ZHAO R,HOU D T,CHEN Y,et al. Propagation analysis of high power microwave in self-generated plasma[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(3):216-219.)
- [6] 袁忠才,时家明. 高功率微波与等离子体相互作用理论和数值研究[J]. 物理学报, 2014,63(9):205-211. (YUAN Zhongcai, SHI Jiaming Theoretical and numerical studies on interactions between high-power microwave and plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(9):205-211.)
- [7] 赵刚,闫二艳,陈朝阳,等. 高功率微波大气击穿阈值分析及实验[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(z1):111-114. (ZHAO Gang,YAN Eryan,CHEN Zhaoyang,et al. Analysis and experimental study on threshold of air breakdown by high power microwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(z1):111-114.)
- [8] 卢洵,赵朝锋,徐振启,等. 高功率微波在大气击穿时的传输特性研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2004,2(4):287-289. (LU X,ZHAO C F,XU Z Q,et al. Propagation analysis of high power microwave pulse at air breakdown[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2004,2(4):287-289.)
- [9] 周前红,董志伟. 弱电离大气等离子体电子碰撞能量损失的理论研究[J]. 物理学报, 2013,62(20):308-314. (ZHOU Q H,DONG Z W. Theoretical study on the energy loss induced by electron collisions in weakly ionized air plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(20):308-314.)
- [10] NAM S K,VERBONCOEUR J P. Theory of filamentary plasma array formation in microwave breakdown at near-atmospheric pressure[J]. Physical Review Letters, 2009,103(5):055004-1-055004-4.
- [11] ZHAO P C,LIAO C,YANG D,et al. High power microwave breakdown in gas using the fluid model with non-equilibrium electron energy distribution function[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(5):438-445.
- [12] 赵朋程,廖成,唐涛,等. 高功率微波低空水平传输的 FDTD 求解与击穿分析[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010,22(4):431-435. (ZHAO P C,LIAO C,TANG T,et al. FDTD calculation of high power microwave level propagation in air and breakdown analysis[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010,22(4):431-435.)
- [13] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011:200-236. (GE D B,YAN Y B. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2011:200-236.)
- [14] 周东方,余道杰,宁辉,等. 高功率微波大气击穿区域分布[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(6):119-123. (ZHOU Dongfang,YU Daojie,NING Hui,et al. High power wideband switched oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(6):119-123.)
- [15] 魏进进,周东方,余道杰,等. 高功率微波脉冲大气击穿概率研究[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(6):10-14. (WEI Jinjin, ZHOU Dongfang,YU Daojie,et al. Probability distribution of high power microwave pulse breakdown in air[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(6):10-14.)

作者简介:



胡俊杰(1992-),男,山东省青岛市人,在读硕士研究生,主要研究方向为高功率微波传输.email:15254287957@163.com.

余道杰(1978-),男,河南省新乡市人,博士,副教授,主要研究方向为高功率微波传输、电磁场、微波天线。

魏进进(1987-),男,河南省焦作市人,博士,讲师,主要研究方向为高功率微波传输、电磁场、微波天线。

周东方(1963-),男,浙江省诸暨市人,博士,教授,主要研究方向为高功率微波传输、天线罩、均衡器等。

蔡北兵(1993-),男,陕西省咸阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为高功率微波传输、电磁场数值计算。