



·高功率微波技术·

# 稀薄空气、等离子体环境外系统 电磁脉冲的数值模拟\*

孙会芳, 张玲玉, 董志伟, 周海京

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 为研究大气环境对系统电磁脉冲(SGEMP)的影响, 针对海拔 50~100 km 的 X 射线能量沉积区, 分别应用 3 维 PIC 程序及 3 维 PIC-MCC 程序各自开展预电离等离子体和稀薄空气条件下外 SGEMP 的建模与模拟研究, 针对 3 种不同的 X 射线注量( $4 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 、 $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$ 、 $0.4 \text{ J/cm}^2$ ), 分别取对应两种不同海拔高度(70 km 和 80~90 km)的本底等离子体及海拔 56 km 的稀薄空气条件进行模拟计算, 并和真空中的计算结果进行对比, 得出预电离等离子体及稀薄空气对外 SGEMP 的影响规律: 当 X 射线注量较低时, 等离子体使得磁场增大, 电场减小, 而稀薄空气对外 SGEMP 效应影响不明显; 随着 X 射线注量增大, 空间电荷非线性效应越来越明显, 等离子体及稀薄空气都使得电场、磁场同时增大, 且稀薄空气的增大效应更显著。

**关键词:** 全电磁粒子模拟程序; 系统电磁脉冲; 光电子; 次级电子

中图分类号: TN753.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220211

## Simulation study of external system generated electromagnetic pulse in low pressure air or plasma

Sun Huifang, Zhang Lingyu, Dong Zhiwei, Zhou Haijing

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O Box 8009, Beijing 100094, China)

**Abstract:** For examining effects of atmosphere on system generated electromagnetic pulse (SGEMP), the external SGEMP are simulated by the 3D PIC code in pre-ionized plasma and by the PIC-MCC code in low pressure air respectively in the X-ray energy deposition region (50 km to 100 km). For three fluences of X-ray ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 、 $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$ 、 $0.4 \text{ J/cm}^2$ ), the simulations are done in pre-ionized plasma corresponding to two different altitudes (70 km and 80~90 km) and low pressure air corresponding to 56 km altitude each other, and the results are compared with those in vacuum. The variation laws of external SGEMP in pre-ionized plasma and low pressure air are received: the effects have relation to fluence of X-ray, when the fluence of X-ray is low, the magnetic field increases and the electric field decreases in the plasma environment, while the variations of external SGEMP are not obvious in low pressure air; with the fluence of X-ray increasing, the space charge nonlinear effects become more and more obvious, the electric field and magnetic field are enhanced together in both pre-ionized plasma and low pressure air, and the enhancement effects are more significant in low pressure air.

**Key words:** PIC code, system generated electromagnetic pulse, photoelectron, secondary electron

系统电磁脉冲(SGEMP)是核爆炸产生的 X 射线、瞬发  $\gamma$  射线等照射系统时, 由系统表面发射出电子, 这种电子运动进而产生的电磁脉冲。SGEMP 会对系统的电子设备造成一定的损伤, 且由于是系统本身产生, 难以进行电磁屏蔽, 因此一直是核爆效应的重要研究内容之一<sup>[1]</sup>。其中外 SGEMP 是指系统外表面发射电子产生的 SGEMP, 其强电磁场、表面电流可通过孔、缝耦合等对系统内部的电子学系统产生影响。

大气环境中的 SGEMP 相比于真空环境会产生明显变化, 表面发射的初级电子与背景气体会发生碰撞电离等相互作用, 产生大量的次级电子-离子对, 次级电子会进一步发生电离, 使得空间电子雪崩增长, 对 SGEMP 场产生

\* 收稿日期: 2022-07-03; 修订日期: 2022-09-24  
联系方式: 孙会芳, sun\_huifang@iapcm.ac.cn。

很大影响。由于大气密度、压强等参数随海拔高度变化, X 射线产生的外 SGEMP 效应和海拔高度有很强的依赖关系, 在海拔 50~100 km 的 X 射线沉积区, 除了初级电子产生的次级电子的影响, 还要考虑 X 射线能量沉积在稀薄空气中, 通过光电效应产生大量等离子体和光电流, 对飞行器的 SGEMP 也有很大影响, 具体来说, 在海拔 50~70 km, X 射线和空气作用的能量沉积引起的环境光电流耦合到飞行器, 在海拔 70~100 km 空气预电离严重以至于影响飞行器的效应, 当海拔 100 km 以上, X 射线和空气的相互作用很小, 可以忽略空气的影响<sup>[2-3]</sup>。有关气体环境中的内 SGEMP 已有大量的研究<sup>[4-7]</sup>, 但相关的外 SGEMP 研究较少<sup>[2-3]</sup>, 且受制于模拟技术的发展, 数值模拟研究仅局限于 2 维。但实际效应物是 3 维的, 有必要发展 3 维模拟技术, 顺应这一需求, 本文开展稀薄空气、预电离等离子体条件下外 SGEMP 的 3 维建模与模拟研究, 得出稀薄空气、预电离等离子体条件下圆柱体外 SGEMP 电磁场的特性及变化规律。

## 1 圆柱体外 SGEMP 的物理模型

图 1 是圆柱体外 SGEMP 模型示意图。黑体谱 X 射线沿平行端面方向入射半径为 10 cm, 高为 20 cm 的金属圆柱体, 受照的半个侧面向外发射光电子, 进而产生系统表面电流及系统周围的电磁场。

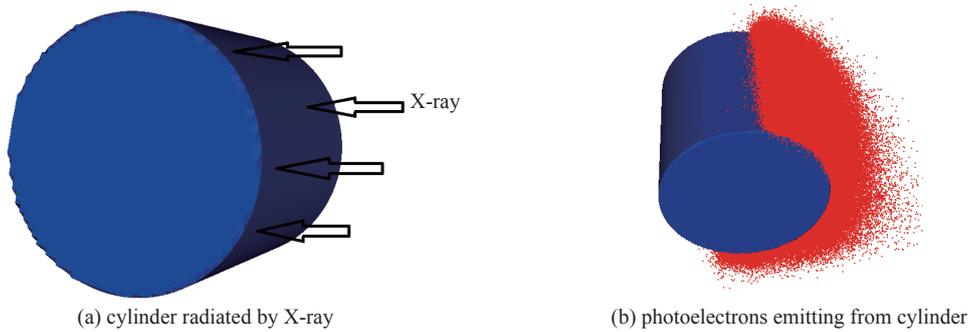


Fig. 1 Model sketch of external SGEMP of cylinder

图 1 圆柱体外 SGEMP 模型

取黑体谱 X 射线的特征温度  $T = 2 \text{ keV}$ , 对应光电产额  $Y = 2 \times 10^{12} \text{ e/J} = 3.2 \times 10^{-7} \text{ C/J}$ , 时间脉冲为正弦平方分布, 即

$$N(t) = N_0 \sin^2[(\pi t/2)/\tau] \quad (1)$$

式中:  $N_0$  为常数;  $t$  为 X 射线脉冲持续时间,  $0 \leq t \leq 2\tau$ ;  $\tau$  为特征时间参量, 取  $\tau = 25 \text{ ns}$ 。以下分别模拟计算当圆柱体位于真空、背景等离子体及稀薄空气环境中的外 SGEMP。

## 2 真空中圆柱体外 SGEMP 的数值模拟

### 2.1 计算建模

一般认为黑体谱 X 射线在系统表面产生的背散射光电子的能谱为指数谱, 空间分布为余弦角分布<sup>[8]</sup>, 光电流的时间波形等同于 X 射线的时间波形, 由 X 射线参数可得壁面发射总光电子数

$$Q_{\text{TOT}} = YA\varphi \quad (2)$$

式中:  $Y$  是光电产额;  $Q_{\text{TOT}}$  是总发射电荷 (C);  $A$  是发射面的面积 ( $\text{m}^2$ );  $\varphi$  是 X 射线注量 ( $\text{J/m}^2$ )。由总光电子数可得出光电流的大小。

采用 PIC 程序, 针对特征温度为 2 keV 的黑体谱 X 射线, 取 3 种不同的 X 射线注量 ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ ,  $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ ,  $0.4 \text{ J/cm}^2$ ), 分别计算其真空条件下的圆柱体外 SGEMP。采用笛卡尔坐标系, 计算空间大小:  $x = 50 \text{ cm}$ ,  $y = 50 \text{ cm}$ ,  $z = 30 \text{ cm}$ , 将圆柱体置于计算空间的中央, 圆柱体中心在坐标原点, 轴线沿  $z$  轴。空间各个方向网格大小都为 2 mm, 电子由右半侧面 ( $x > 0$ ) 沿  $x$  轴均匀向外发射, 计算外边界设置理想吸收边界条件, 圆柱体构成了空间电磁波和电子吸收的内边界。模拟时间为 50 ns, 和 X 射线脉冲的持续时间相同。

### 2.2 模拟结果及分析

对应 3 种 X 射线注量 ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ ,  $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ ,  $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 分别进行模拟计算, 得到发射电流最大值分别是 32 A、320 A、32 kA, 发射电流的时间波形和 X 射线时间波形相同。图 2 分别给出 3 种不同 X 射线注量下模拟时间为 24 ns 时圆柱体外的电子实空间分布。由图 2 可直观看出: 当 X 射线注量为  $4 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  时, 电子在空间均匀分布, 说明

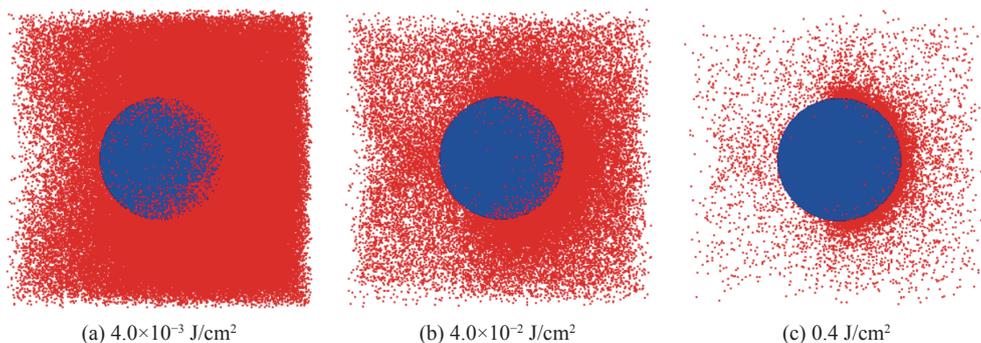


Fig. 2 Distribution of electrons in different fluence of X-ray at 24 ns

图 2 不同 X 射线注量下 24 ns 时圆柱体外 SGEMP 的电子实空间分布

电子可自由向外运动, SGEMP 处于线性效应区, 随着 X 射线注量增大, 发射表面附近空间电荷层逐渐形成, 受空间电荷层限制, 大量光电子被束缚在发射表面附近, 不能向外运动, 真正发射到空间的电流远远小于发射电流, 相应的 SGEMP 效应也会呈现非线性, X 射线注量越高, 电子受束缚越明显, 非线性程度越强。图 3 给出 X 射线注量为  $0.4 \text{ J/cm}^2$  时的发射电流和导体吸收电流波形, 可见, 在发射电流为  $3.2 \text{ kA}$  时, 约  $2.7 \text{ kA}$  的电流被导体自身吸收, 并没有发射到外部空间。

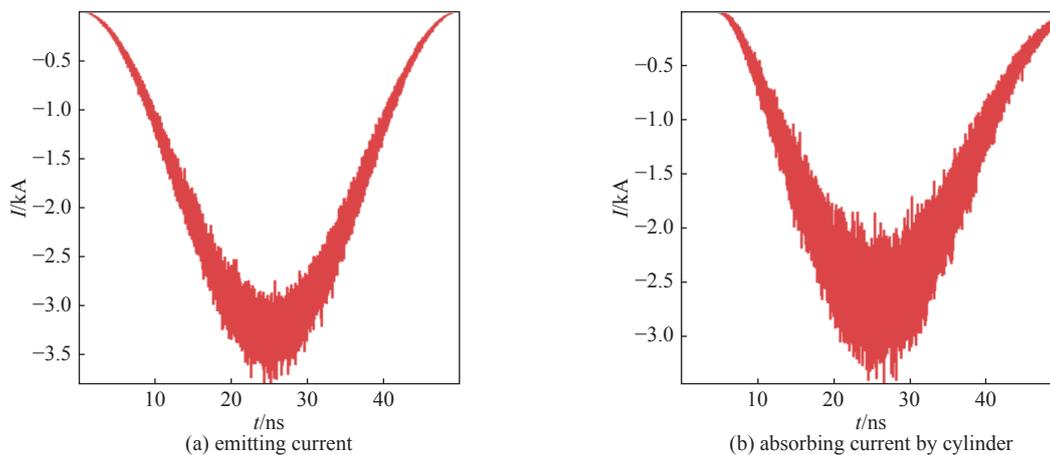


Fig. 3 Waveform of emitting current and absorbing current by cylinder in fluence of  $0.4 \text{ J/cm}^2$

图 3 注量为  $0.4 \text{ J/cm}^2$  时的发射电流和导体吸收电流波形

图 4 给出模拟时间为  $24 \text{ ns}$  时, 对应 3 种注量 ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 、 $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ 、 $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 的发射面中线 ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) 上的电场分布, 忽略端点和个别点的尖端效应。可得: 当注量为  $4 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  时, 电场约为  $0.15 \text{ MV/m}$ , 当注量为  $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$  时, 电场约为  $0.9 \text{ MV/m}$ , 当注量为  $0.4 \text{ J/cm}^2$  时, 电场约为  $1.4 \text{ MV/m}$ 。随着 X 射线注量的增大, 电场也随之增长, 但呈现非线性增长。

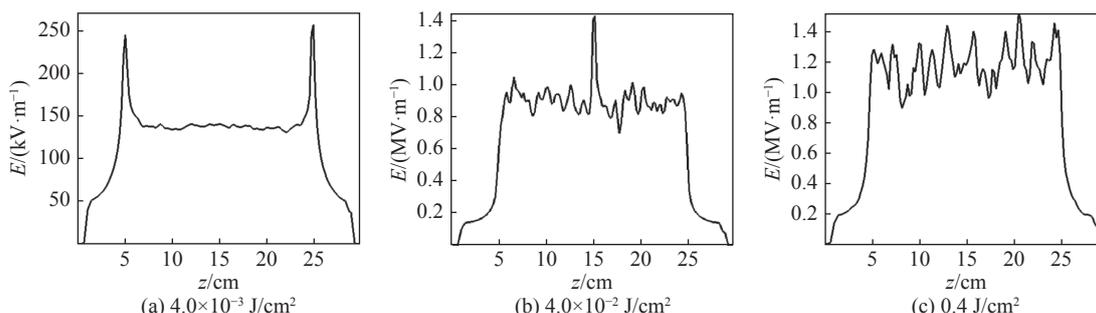


Fig. 4 Distribution of electric field on central line of emitting surface ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) in different fluence of X-ray ( $t=24 \text{ ns}$ )

图 4 不同 X 射线注量下  $24 \text{ ns}$  时发射面中线 ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) 上的的电场分布

图 5 给出模拟时间为  $24 \text{ ns}$  时, 对应 3 种注量 ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 、 $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ 、 $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 分别计算得到的发射面边线 ( $x=0, y=10.2 \text{ cm}$ ) 上的磁场分布, 忽略端点和个别点的尖端效应。由图 5 可见: 当注量为  $4 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  时, 磁场约为

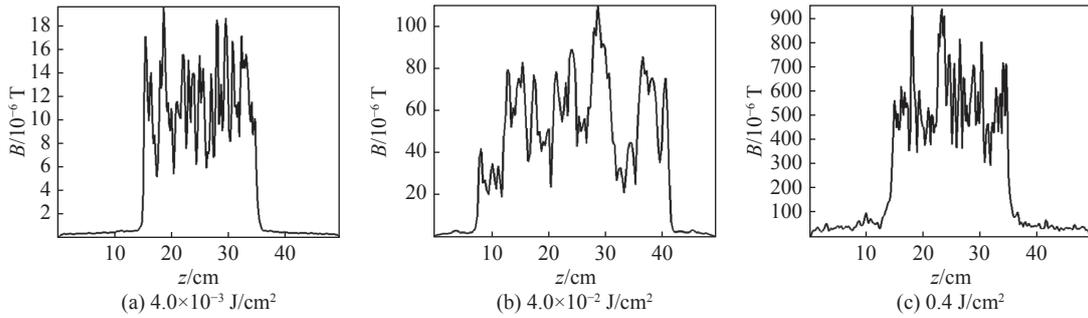


Fig. 5 Distribution of magnetic field on boundary line of emitting surface ( $x=0, y=10.2$  cm) in different fluence of X-ray ( $t=24$  ns)  
 图 5 不同 X 射线注量下 24 ns 时发射面边线 ( $x=0, y=10.2$  cm) 上的磁场分布

$1.6 \times 10^{-5}$  T, 当注量为  $4 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup> 时, 磁场约为  $0.9 \times 10^{-4}$  T, 当注量为  $0.4$  J/cm<sup>2</sup> 时, 磁场约为  $0.8 \times 10^{-3}$  T。随着 X 射线注量的增大, 磁场也随之增长, 增长趋势同样呈现非线性。

### 3 等离子体环境中圆柱体外 SGEMP 的数值模拟

#### 3.1 计算建模

采用 3 维 PIC 程序模拟计算等离子体环境中的圆柱体外 SGEMP, 针对 3 种不同的 X 射线注量 ( $4 \times 10^{-3}$  J/m<sup>2</sup>、 $4 \times 10^{-2}$  J/m<sup>2</sup>、 $0.4$  J/cm<sup>2</sup>), 分别取对应两种不同海拔高度的本底等离子体密度 (海拔 70 km; 等离子体密度  $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>、海拔 80~90 km; 等离子体密度  $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>)<sup>[2]</sup>, 不考虑电子和正离子的相互作用, 所有粒子都建模为宏粒子, 物理过程如图 6 所示, 包括 X 射线产生的表面光电子和空间本底等离子体两种机制共同产生的 SGEMP 效应场, 共 4 种宏粒子: 表面光电子、等离子体电子、正离子 (氮离子占总数的 79%、氧离子占总数的 21%)。表面光电子发射模型和真空中计算模型相同, 空间本底等离子体电子、正离子建模为只考虑热运动的初始低能宏粒子, 采用空间加载, 为节省计算资源, 采用变权重粒子与粒子合并技术, 适时调整宏粒子权重大小, 当单个网格内粒子数超过给定阈值时将宏粒子按照某种规则 (比如粒子维持能量和 (或) 动量守恒) 进行合并, 将两个粒子合并为一个, 用来有效控制计算内存和计算资源的过度消耗<sup>[9]</sup>。模拟时间同样为 50 ns。

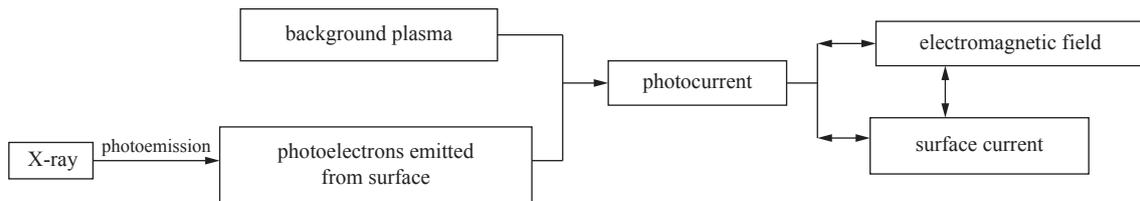


Fig. 6 Physical model of external SGEMP in background plasma  
 图 6 等离子体环境中外 SGEMP 物理模型

#### 3.2 模拟结果及分析

图 7 给出 X 射线注量为  $4 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup> 等离子体密度分别为  $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>、 $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>, 得到的发射面中线 ( $y=0, x=10.2$  cm) 上的电场分布和发射面边线 ( $y=0, x=10.2$  cm) 上的磁场分布。由计算结果可得出, 电磁场仍在 24 ns 左右取得最大值, 可见由于没有碰撞相互作用, 电磁场仍处于稳态, 对应于较低的等离子体密度 ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>), 忽略个别点的尖峰值, 电场约为 0.8 MV/m, 比真空中的电场 (0.9 MV/m) 略有降低, 磁场约为  $1.7 \times 10^{-4}$  T, 和真空中相比磁场 ( $0.9 \times 10^{-4}$  T) 增大; 对应于较高的等离子体密度 ( $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>), 忽略个别点的尖峰值, 电场约为 0.5 MV/m, 比真空中的电场 (0.9 MV/m) 大约减小了 1 倍, 磁场约为  $5.0 \times 10^{-4}$  T, 和真空中相比磁场 ( $0.9 \times 10^{-4}$  T) 约增大为原来的 6 倍。

根据上述 3 种不同 X 射线注量 ( $4 \times 10^{-3}$  J/m<sup>2</sup>、 $4 \times 10^{-2}$  J/m<sup>2</sup>、 $0.4$  J/cm<sup>2</sup>), 在低密度 ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>) 及高密度 ( $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) 等离子体条件下的模拟结果, 图 8 给出真空、低密度及高密度等离子体条件下模拟时间为 24 ns 时发射面中线上 ( $y=0, x=10.2$  cm) 的电场峰值和发射面边线 ( $x=0, y=10.2$  cm) 上的磁场峰值随注量的变化。由图可见, 当 X 射线注量较低时, 电磁场处于线性效应向非线性效应逐渐过渡的区域, 两种密度的本底等离子体对效应的影响规律一致, 都使得磁场增大, 电场减小, 这与文献 [2] 报道一致。这是因为: 在真空条件下, 光电子从圆柱体发射, 在其表面留下正电荷, 随着电子不断向外发射, 在圆柱体表面附近产生强电场, 对电子的运动产生阻碍作用, 电子被限制在发

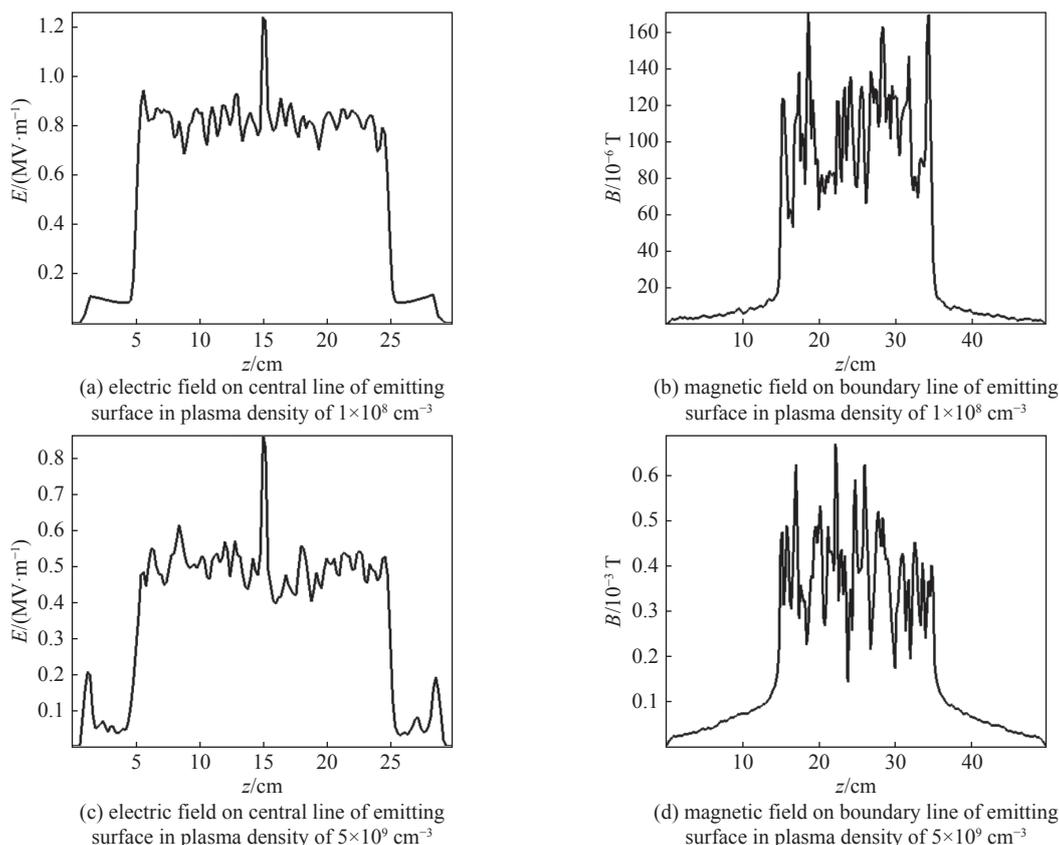


Fig. 7 Distribution of electric field on central line of emitting surface ( $y=0, x=10.2$  cm) and magnetic field on boundary line of emitting surface ( $x=0, y=10.2$  cm) with fluence of  $4 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup> respectively in different density plasma ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>,  $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) at 24 ns

图 7 X 射线注量为  $4 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup>, 对应两种等离子体密度 ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>、 $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) 24 ns 时, 发射面中线 ( $y=0, x=10.2$  cm) 上的电场分布和发射面边线 ( $x=0, y=10.2$  cm) 上的磁场分布

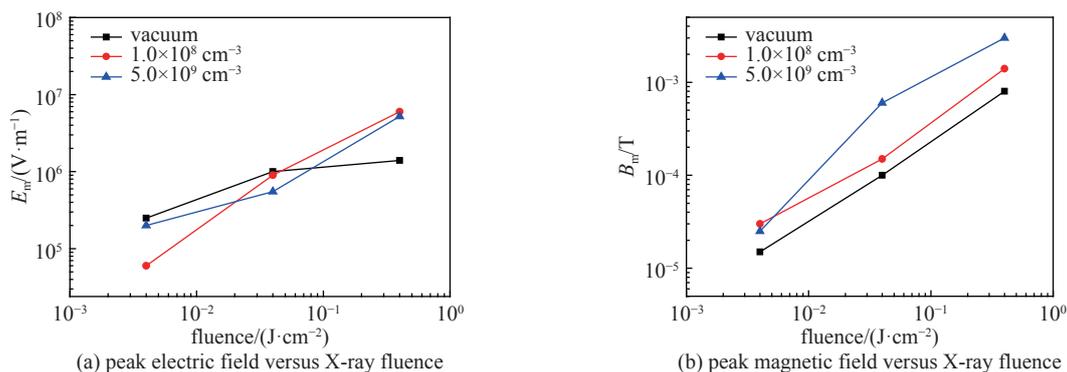


Fig. 8 Peak electromagnetic field versus X-ray fluence respectively in vacuum, background plasma of low density ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>) or dense density ( $1 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>)

图 8 真空、低密度 ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>) 及高密度 ( $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) 等离子体条件下的电磁场峰值随注量的变化

射表面附近,即产生空间电荷限制,阻碍光电子的进一步发射和电流的增大;然而,当圆柱体处于本底等离子体环境中时,在表面电场的作用下,等离子体中的电子会被吸引到导体表面中和正电荷,同时正离子也会中和空间负电荷,使得空间电荷限制减弱,表现为发射电流增大、圆柱腔体周围磁场增大、电场减小。但文献 [2] 中的结论是在一定的 X 射线注量下得出的,本文研究发现,随着 X 射线注量增大,非线性效应越来越明显,本底等离子体对 SGEMP 效应的影响也发生变化,表现为电场、磁场都比真空条件下的增大(如图 8 所示)。可见,等离子体对外 SGEMP 效应的影响和 X 射线注量有关,当注量较大时表面电场不是减小而是增大,这和以往的认识不同,分析产生这种现象的原因是:等离子体的存在虽然减弱了空间电荷限制,但外 SGEMP 不同于内 SGEMP:对于内 SGEMP,随着空间电荷层的破坏,发射电流增大,而腔体发射的电流最终被腔体本身吸收,中和了腔体表面所带的正电荷,使腔体所带电量减少;然而,对于外 SGEMP,电子向外空间发射,随着空间电荷层的破坏,圆柱体发射电流增大,其

表面正电荷增加。而圆柱体表面电场主要由表面正电荷和形成空间电荷限制的负电荷层共同激发产生,当由于表面正电荷的增加导致的电场增大值大于由于空间负电荷层电荷的减少导致的电场减小值时,表面电场增大。

图 9 给出注量为  $0.4 \text{ J/cm}^2$ 、环境等离子体密度为  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  时的发射电流和吸收电流波形。由图可见,和真空中模拟结果(图 3)相比,发射电流基本一致,而吸收电流最大值由  $2.7 \text{ kA}$  减小到  $1.7 \text{ kA}$ ,表明腔体表面所带正电荷增加,导致表面电场增大。

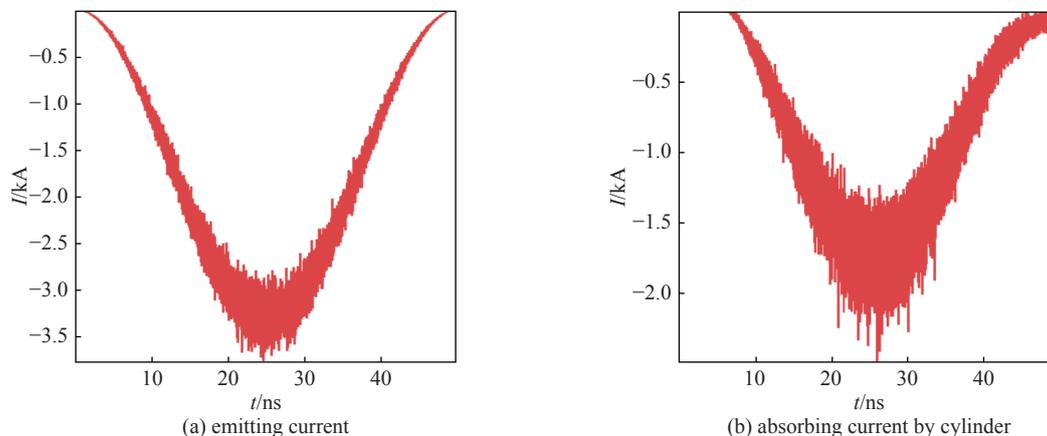


Fig. 9 Waveform of emitting current and absorbing current by cylinder in plasma density of  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  with fluence of  $0.4 \text{ J/cm}^2$

图 9 注量为  $0.4 \text{ J/cm}^2$ 、等离子体密度为  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  时的发射电流和导体吸收电流波形

## 4 稀薄空气环境中圆柱体外 SGEMP 的数值模拟

### 4.1 计算建模

采用 3 维 PIC-MCC 方法,针对 3 种不同的 X 射线注量( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 、 $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ 、 $0.4 \text{ J/cm}^2$ )模拟计算稀薄空气环境中的圆柱体外 SGEMP<sup>[6]</sup>,所取大气参数:海拔  $56 \text{ km}$ 、空气密度为  $1.049 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ,压强为  $37.36 \text{ Pa}$ ,空气成分包括氮气(分子数 79%)和氧气(分子数 21%)。物理过程如图 10 所示。

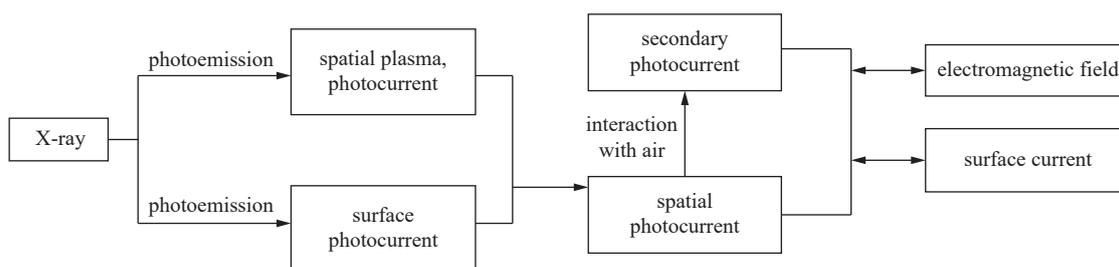


Fig. 10 Physical model of external SGEMP in low pressure air

图 10 稀薄大气中外 SGEMP 的物理模型

稀薄空气环境中,影响圆柱体外 SGEMP 的电流产生机制有三种:一是 X 射线和圆柱体表面相互作用产生的表面光电流;二是表面光电流和空气碰撞产生的次级光电流;三是 X 射线和空气相互作用产生的空气等离子体、光电流。其中,表面光电流发射模型和真空中计算模型相同。次级光电流的建模中,空气建模为流体,发射光电子建模为宏粒子,发展电子和中性气体相互作用的碰撞技术,考虑弹性碰撞、碰撞激发和碰撞电离 3 种相互作用,通过试算得出在稀薄大气条件下吸附和复合作用对结果影响不大,因此为节省计算资源,暂不考虑这两种复合机制,碰撞截面采用 EEDL 数据库数据,电子与中性气体电离碰撞的产物为相应的一次电离的正离子(氮离子和氧离子)和次级电子,正离子和次级电子也都建模为宏粒子,而碰撞激发和弹性碰撞均只考虑消耗电子的能量而没有区分气体的状态。对于第三种电流产生机制,即 X 射线和空气相互作用产生的空气光电流的建模,需要计算空气中的光电流,用 MC 粒子输运方法模拟 X 射线和空气相互作用,根据 X 射线的沉积能量计算得出光电子密度和光电子的能谱、角分布,进而得出空气中的光电流,并加载到 PIC-MCC 程序中,作为激发 SGEMP 效应的又一电流源项。模拟同样采用变权重粒子与粒子合并技术以节省计算资源,计算时间为  $50 \text{ ns}$ 。

### 4.2 模拟结果及分析

先考察前两种机制,即暂不考虑空气产生的光电流,只考虑由表面光电流和其与空气碰撞产生的次级电子两

种机制共同激发的 SGEMP 效应, 由计算结果得出, 此时的电磁场在计算结束即 50 ns 时取得最大值, 因为计算中考虑了碰撞电离相互作用, 次级电子数目不断增长, 电磁场处于非稳态(计算忽略了吸附和复合两种电子减少的机制, 但已试算证明在稀薄大气条件下, 此两种机制对结果影响有限, 可忽略)。图 11 给出注量为  $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$ , 50 ns 时发射面中线 ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) 上的电场分布和发射面边线 ( $x=0, y=10.2 \text{ cm}$ ) 上的磁场分布。忽略个别点的尖峰值, 电场约为  $1.0 \text{ MV/m}$ , 与真空中的电场值 ( $0.9 \text{ MV/m}$ ) 基本一致, 磁场约为  $2.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ , 和真空中相比磁场 ( $0.9 \times 10^{-4} \text{ T}$ ) 增大为原来的 2 倍左右。

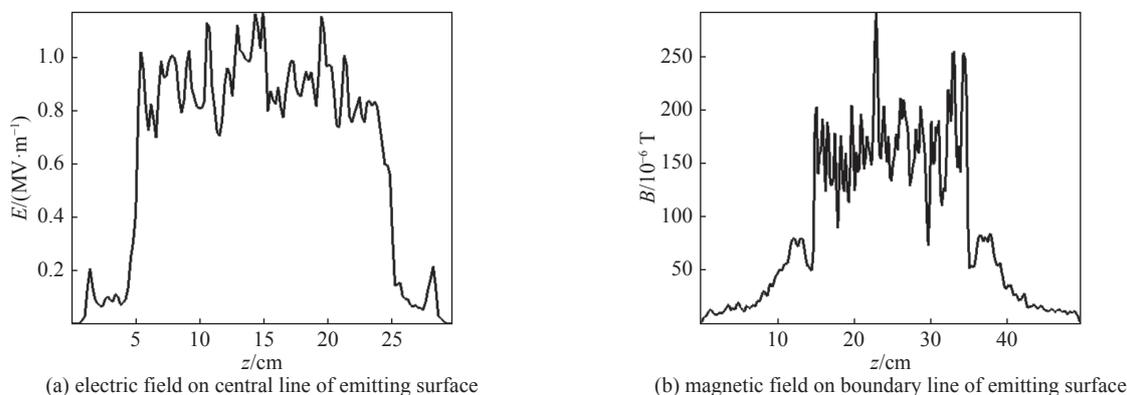


Fig. 11 Distribution of electric field on central line of emitting surface ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) and magnetic field on boundary line of emitting surface ( $x=0, y=10.2 \text{ cm}$ ) with fluence of  $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$  excited by both photocurrent emitting from surface and secondary electrons at 50 ns

图 11 X 射线注量为  $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$  时由表面光电流和次级电子共同激发的 SGEMP 在 50 ns 时发射面中线 ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) 上的电场分布和发射面边线 ( $x=0, y=10.2 \text{ cm}$ ) 上的磁场分布

再考虑由表面光电流、次级电子和空气产生的光电流三种机制共同激发的 SGEMP 效应。用北京应用物理与计算数学研究所自主知识产权的三维 MC 粒子输运程序 JMCT<sup>[10]</sup>, 取海拔 56 km 的大气参数, 根据 X 射线在空气中的能量沉积计算分别得出对应 3 种注量 ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ ,  $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ ,  $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 空气产生光电子数密度为  $3.428 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.428 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.428 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ , 并计算得出光电子的归一化能谱和角分布如图 12 所示, 由图 12(a) 可见, 光电子数在能量为 2 keV 时取得最大值, 之后随着能量的增大逐渐减少; 图 12(b) 中, 取 X 射线入射方向为参考方向, 图中给出归一化光电子数随方向角度余弦值的变化, 由图可见, 在角度余弦值为 0.7 左右 (与入射方向大约成  $45^\circ$  的方向) 发射光电子数最多。

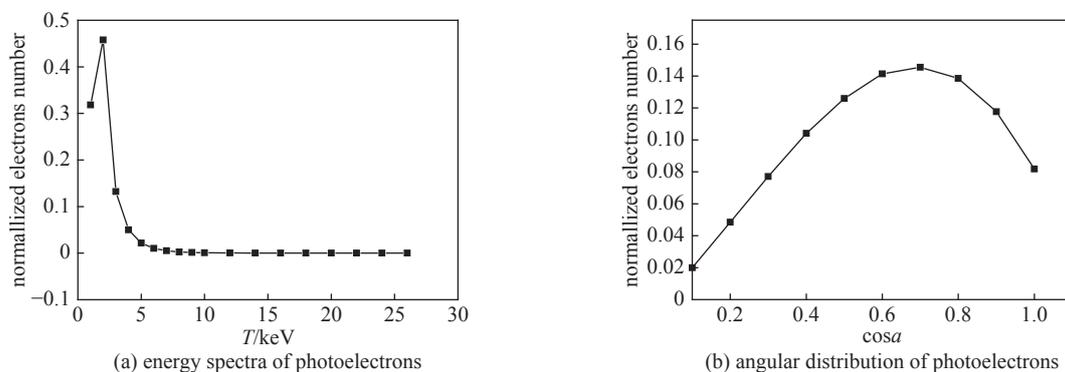


Fig. 12 Energy spectra and angular distribution of photoelectrons produced in air

图 12 空气光电流能谱和角分布

将 JMCT 计算得到的空气中产生光电子的初始分布进行加载, 采用 3 维 PIC-MCC 方法模拟计算三种机制共同激发的 SGEMP 效应, 图 13 给出注量为  $4 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$ , 50 ns 时发射面中线 ( $y=0, x=10.2 \text{ cm}$ ) 上的电场分布和发射面边线 ( $x=0, y=10.2 \text{ cm}$ ) 上的磁场分布。忽略个别点的尖峰值, 电场约为  $1.6 \text{ MV/m}$ , 大约是真空中电场 ( $0.9 \text{ MV/m}$ ) 的 2 倍左右, 磁场约为  $3.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ , 约是真空中磁场 ( $0.9 \times 10^{-4} \text{ T}$ ) 的 3 倍左右, 和不考虑空气中光电流的情况 (图 11) 相比, 电磁场都进一步增大。

根据上述 3 种不同注量 ( $4 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ ,  $4 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ ,  $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 真空、空气电离及空气电离+空气光电流条件下的模拟结果, 图 14 分别给出真空、空气电离及空气电离+空气光电流条件下发射面中线上的电场峰值、发射面边

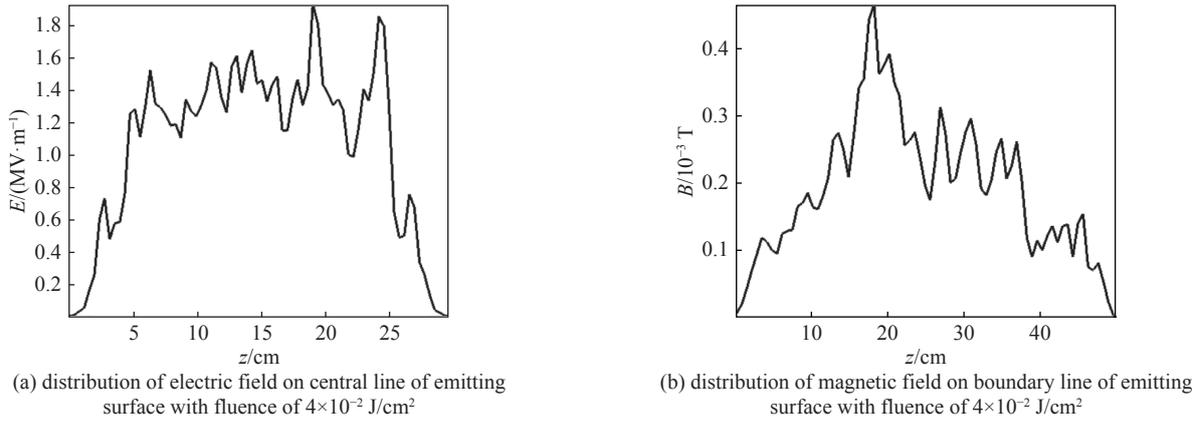


Fig. 13 Distribution of electric field on central line of emitting surface ( $y=0, x=10.2$  cm) and magnetic field on boundary line of emitting surface ( $x=0, y=10.2$  cm) with fluence of  $4 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup> excited by photocurrent emitting from both surface and air, secondary electrons together at 50 ns

图 13 X 射线注量为  $4 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup> 时由表面光电流、次级电子 and 空气光电流共同激发的 SGEMP 在 50 ns 时发射面中线 ( $y=0, x=10.2$  cm) 上的的电场分布和发射面边线 ( $x=0, y=10.2$  cm) 上的的磁场分布

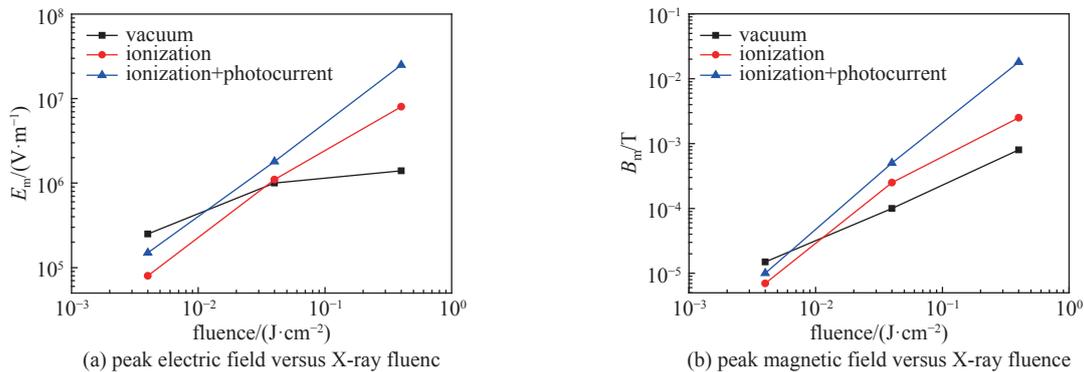


Fig. 14 Peak electromagnetic field versus X-ray fluence respectively in vacuum, ionization or both ionization and air photoelectrons environment

图 14 真空、空气电离及空气电离+空气光电流条件下的电磁场峰值随注量的变化

线上的磁场峰值随注量的变化。可以看出，稀薄空气的存在对飞行器的外 SGEMP 有很大影响，物理机制包括两方面：一是光电子和空气的碰撞相互作用引起的次级电子和电流；二是 X 射线输运过程中和空气作用引起的环境光电流。当 X 射线注量较低时，空间电荷效应不明显，电磁场处于线性区域，影响不明显。随着 X 射线注量增大，空间电荷效应越来越明显，增强效应也越来越显著，表现为电场、磁场都大大增强，其中环境光电流因和 X 射线注量成正比，随注量的增大对效应的影响不断增强，不可忽略。稀薄空气影响外 SGEMP 的物理机制和本底等离子体类似，都是因为环境中的电子和离子的存在减弱了空间电荷限制，使得发射电流增大所致。但相对于初始能量很低的本底等离子体，稀薄空气中的次级电子和环境光电流具有更高的初始能量，特别是环境光电流，其初始能量直接来源于入射 X 射线，运动方向朝向圆柱腔体，和表面发射电流相反，更容易影响空间电荷限制和腔体表面电子的发射，从而对效应应有更大影响。

## 5 结 论

本文分别应用 3 维 PIC 程序及 3 维 PIC-MCC 程序，初步开展预电离等离子体和稀薄空气条件下外 SGEMP 的建模与模拟研究，针对 3 种不同的 X 射线注量 ( $4 \times 10^{-3}$  J/m<sup>2</sup>、 $4 \times 10^{-2}$  J/m<sup>2</sup>、 $0.4$  J/cm<sup>2</sup>)，分别取对应两种不同海拔高度 (70 km 和 80~90 km) 的本底等离子体密度 ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>、 $5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) 进行了计算，并和真空中结果进行比较，综合分析 3 种注量的模拟结果，得出预电离等离子体条件下，当 X 射线注量较低时，环境等离子体使得磁场增大，电场减小；但随着 X 射线注量增大，非线性效应越来越明显，本底等离子体对效应的影响也发生变化，表现为电场、磁场都较真空中的增大。在对应海拔 56 km 的稀薄空气 (密度为  $1.049 \times 10^{22}$  /m<sup>3</sup>) 条件下，同样针对 3 种不同的 X 射线注量 ( $4 \times 10^{-3}$  J/m<sup>2</sup>、 $4 \times 10^{-2}$  J/m<sup>2</sup>、 $0.4$  J/cm<sup>2</sup>) 进行了计算，综合分析 3 种注量的模拟结果得出，当 X 射线注量较低时，电磁场处于线性区域，空气对 SGEMP 效应影响不明显；随着 X 射线注量增大，次级电子和空气光电流密度都相应增大，以至于对外 SGEMP 效应的影响也越来越显著，表现为电场、磁场较真空中的都有显著增强，其中环境光电流

对效应的影响尤为突出,不可忽略。综上可得预电离等离子体及稀薄空气对外 SGEMP 的影响规律,其影响大小和 X 射线注量直接相关, X 射线注量较低时等离子体使得磁场增大,电场减小,而稀薄空气对外 SGEMP 效应影响不明显;随着 X 射线注量增大,空间电荷非线性效应越来越明显,等离子体及稀薄空气都使得电场、磁场同时增大,且稀薄空气的增大效应更显著。

#### 参考文献:

- [1] 王泰春, 贺云汉, 王玉芝. 电磁脉冲导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. (Wang Taichun, He Yunhan, Wang Yuzhi. Introduction to electromagnetic pulse[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011)
- [2] Woods A J, Hobbs W E, Wenaas E P. Air effects on the external SGEMP response of a cylinder[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, 28(6): 4467-4478.
- [3] Woods A J, Treadaway M J, Nunan S, et al. Air-enhanced SGEMP response—an experimental and analytical investigation[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, 29(6): 1793-1797.
- [4] Osborn D C, Stahl R H, Delmer T N. Large-area electron-beam experiments on space-charge neutralization in a cavity[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1976, 23(6): 1964-1968.
- [5] Hinshelwood D, Swanekamp S B, Allen R J, et al. Electron-beam-gas interaction studies for code validation[C]//2015 Hardened Electronics and Radiation Technology Technical Interchange Meeting. 2015.
- [6] Zhang Hantian, Zhou Qianhong, Zhou Haijing, et al. Particle-in-cell simulations of low-pressure air plasma generated by pulsed X rays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130: 173303.
- [7] Gilbert R M, Klebers J, Bromborsky A. Air pressure effects on internal SGEMP: a benchmark experiment for computer code validation[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1977, 24(6): 2389-2398.
- [8] 孙会芳, 张芳, 董志伟. 圆柱体外SGEMP的三维数值模拟[J]. *计算物理*, 2016, 33(4): 434-440. (Sun Huifang, Zhang Fang, Dong Zhiwei. 3D simulation of external SGEMP of cylinder[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2016, 33(4): 434-440)
- [9] 董志伟, 孙会芳, 杨郁林, 等. 磁绝缘线振荡器阴极释气电离粒子模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 033023. (Dong Zhiwei, Sun Huifang, Yang Yulin, et al. Particle simulation technology of MILO cathode outgassing ionization[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 033023)
- [10] 张玲玉, 李瑞, 李刚, 等. JMCT光子-电子耦合输运模拟计算研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 126007. (Zhang Lingyu, Li Rui, Li Gang, et al. Simulation of JMCT photon-electron coupled transport[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 126007)