



·建模与数值模拟·

神光装置辐照腔体系统电磁脉冲的数值模拟*

孙会芳¹, 易涛², 董志伟¹, 周海京¹, 张玲玉¹, 余波², 刘品阳²

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 应用三维 MC 程序和 PIC 程序, 对神光装置辐照下腔体内系统电磁脉冲 (SGEMP) 模型进行了耦合模拟。在半高宽为 2.9 ns、平均能量为 10.3 keV 的韧致谱 X 射线点源辐照下, 圆柱腔内电场最大值高达 2 MV/m, 以轴向电场为主; 磁场最大值约为 0.8×10^{-3} T, 以角向磁场为主, 电磁场最大值都集中在发射面附近, 以脉冲直流场为主, 交流辐射场幅度较小, 约在 kV/m 量级。考察了注量对 SGEMP 效应的影响, 注量越高, 电场沿轴向变化越快, 交流辐射场占比越大。

关键词: 系统电磁脉冲; 蒙特卡罗方法; 全电磁粒子模拟方法; X 射线

中图分类号: TN753.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230273

Simulation of cavity system generated electromagnetic pulse radiated by SG-facility

Sun Huifang¹, Yi Tao², Dong Zhiwei¹, Zhou Haijing¹, Zhang Lingyu¹, Yu Bo², Liu Pinyang²

(1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Using 3D MC code and PIC code, model of electromagnetic pulse (SGEMP) generated in the cavity system radiated by SG-facility is calculated. The simulated results show that the intensity of electric field could be 2.2 MV/m and magnetic field be 0.8×10^{-3} T under irradiation of the bremsstrahlung X-ray point source with full width at half maximum 2.9 ns, average energy 10.3 keV produced by SG-facility irradiating the end of cylinder cavity. The electric field is mainly axial and the magnetic field is primarily azimuthal. Both electric field and magnetic field are concentrated near the emitting surface, with the pulsed DC field being predominant and the amplitude of the AC radiation field being relatively smaller, at the level of kV/m. The effect of fluence on SGEMP is also studied, showing that higher fluence leads to faster axial variation of the electric field and larger proportion of the AC radiation field.

Key words: system generated electromagnetic pulse, MC code, PIC code, X-ray

系统电磁脉冲 (SGEMP) 研究的是核爆过程产生的 X 射线辐照在飞行器表面, 由于光电效应产生光电子, 进而产生表面电流和空间电磁场等的效应^[1-3], 其中 X 射线辐照腔体, 将在其内部激励电磁脉冲, 即腔体 SGEMP, 它将严重干扰或毁坏腔体内的电子设备^[4], 因此, 腔体 SGEMP 一直是 SGEMP 研究的一个重要分支^[5-8]。本文利用本单位自主研发的三维蒙特卡罗 (MC) 程序 JMCT 和三维全电磁粒子模拟 (PIC) 程序, 进行耦合计算, 模拟大型激光装置——神光装置产生 X 射线辐照圆柱腔体产生的 SGEMP 效应, 并对结果进行初步分析。

1 物理模型

本文模拟研究利用神光装置产生的强激光打靶, 产生激光等离子体, 进而产生的脉冲 X 射线照射腔体端面, 由其注入孔内表面发射光电子激发的腔体 SGEMP^[9]。腔体结构及 SGEMP 模拟示意图如图 1 所示, 腔体是由大圆柱腔和其一个端面上的小圆柱腔凸起构成的, 大圆柱腔外径 180 mm, 内径 170 mm, 内高 470 mm, 侧壁材料为铝, 厚度 5 mm, 端面材料是铜, 厚度也是 5 mm。小圆柱腔为 X 射线注入孔, 半径 25 mm, 高为 20 mm, 侧壁和顶面是厚度为 30 μ m 的铝箔。采用这种结构是为了保证腔体内有较大发射电流的同时屏蔽电磁脉冲的影响, 因为激光打靶产

* 收稿日期: 2023-08-16; 修订日期: 2024-01-08
联系方式: 孙会芳, sun_huifang@iapcm.ac.cn.

生的辐射脉冲不仅包括 X 射线, 同时还有较强的电磁脉冲和中子, 其中耦合进入腔体内部的电磁脉冲会对腔体 SGEMP 造成干扰, 侧壁 5 mm 的铝, 其厚度大于电磁场的趋肤深度, 顶面 5 mm 的铜, 在屏蔽电磁脉冲的同时也衰减了 X 射线, 使其内表面不发射光电子, 注入孔半径 25 mm, 使得耦合进入腔体的电磁场很小, 其顶面厚度 30 μm 的铝箔保证了发射的光电流足够大, 可见 X 射线被限定在注入孔注入, 只有注入孔铝箔的内表面发射光电子。由于靶尺寸很小, 可看做点源, 所用靶材料是镍, 产生的 X 射线能谱为典型的韧致辐射谱, 平均能量为 10.3 keV, 归一化时间波形半高宽为 2.9 ns。



Fig. 1 Sketch of the cavity SGEMP

图 1 腔体 SGEMP 示意图

2 数值模拟及结果分析

2.1 光电输运模拟

MC 输运程序 JMCT 是由北京应用物理与计算数学研究所和中物院高性能数值模拟软件中心共同开发的、具有自主知识产权的通用并行三维蒙特卡罗粒子输运模拟软件, 其准确性和适用性已经得到验证^[10-11]。JMCT 程序光子-电子耦合输运模块中, 考虑的物理过程包括光电效应、电子对效应和康普顿散射、相干散射等相互作用, 对电子输运采用了浓缩历史的方法。采用实验测得的辐照腔体表面的 X 射线能谱、时间波形等参数, 用 JMCT 模拟计算 X 射线辐照腔体端面在注入孔内表面产生的光电子, 光源距被照面 30 cm, 注入孔内表面产生的光电子的归一化的能谱和发射角分布如图 2 所示, 电子平均能量为 8 keV, 发射角分布近似余弦分布, X 射线注量为 0.4 J/cm²。

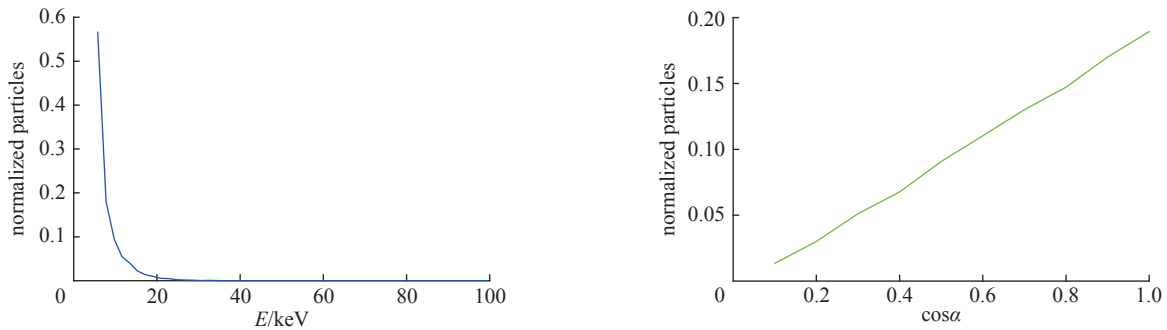


Fig. 2 Normalized energy spectrum and angular distribution of the photoelectrons

图 2 归一化的电子能谱和发射角分布

2.2 PIC 模拟

由 JMCT 计算所得的光电子参数作为输入, 经数据梳理转化作为初始电流源, 用三维 PIC 程序计算腔体内的电流及电磁场分布。首先创建发射面发射电流的能谱、发射角分布的概率分布函数, 用蒙特卡罗随机抽样的方法实现电子发射的角分布和能谱分布^[12], 计算空间大小为: $x=20\text{ cm}$, $y=20\text{ cm}$, $z=52\text{ cm}$; 圆柱腔体置于中间位置, 采用笛卡尔坐标系, 圆柱腔体轴线与 z 轴方向一致, 圆柱发射面中心位于坐标原点。空间各个方向网格大小都为 1 mm, 发射的金属圆柱腔体构成了空间电磁波和电子吸收的边界。

电子的实空间及相空间分布如图 3 所示, 由图 3(a)可见电子由注入孔内表面向腔内发射, 并在腔体内运动扩散, 由图 3(b)可见其电子发射符合一定能谱分布和余弦角分布的特征, 说明电子束发射建模正确。

光电子自注入孔内表面向腔内发射, 最终会被腔体自身吸收, 腔体发射电流和吸收电流波形如图 4 所示, 发射电流最大值约为 160 A, 吸收电流波形和发射电流波形相似, 略有展宽, 说明绝大部分发射电子很快被腔体自身吸收。

图 5(a)是发射面上($z=1.0\text{ mm}$)电场的空间分布, 图 5(b)是沿图 5(a)所示直径线($y=0$, $z=1.0\text{ mm}$)的电场分布, 图 5(c)是圆柱腔轴线切面上($y=10.0\text{ cm}$)的电场分布, 图 5(d)是轴线切面中线即轴线上($x=0$, $y=0$)的电场分布, 综合分析图 5 可见电场在发射面中心位置附近取得最大值, 且沿径向和轴向迅速下降, 由图 5(b)和图 5(d)可得电场最大值约为 2 MV/m。

图 6 给出靠近发射面中心位置(0, 0, 1 mm)的电场波形, 由图 6 可见发射面附近轴向电场分量 E_z 最强, 约为 2 MV/m, 和图 5 中的电场空间分布观测结果基本一致。图 7 给出中心轴线上不同位置轴向电场 E_z , 可代表离发射面不同距离的轴向电场的三种典型波形, 从不同能量, 不同发射电流密度等产生的 SGEMP 特征场来看, 轴向空间

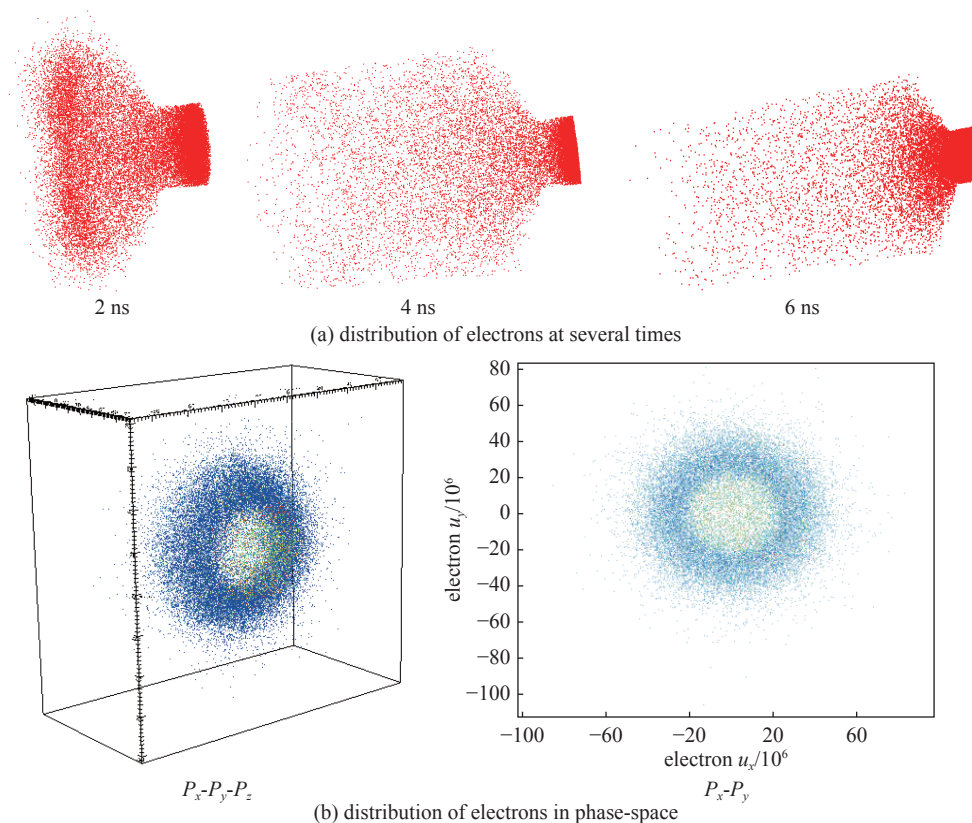


Fig. 3 Distribution of electrons in space and phase-space

图3 电子的实空间和相空间分布

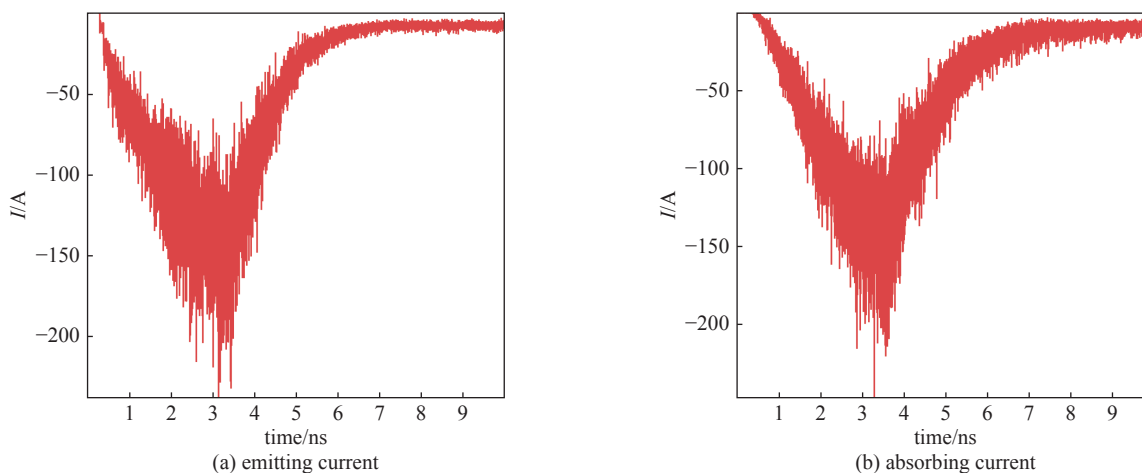


Fig. 4 Waveform of emitting current and absorbing current in cavity

图4 腔体发射电流和吸收电流波形

电场总可以分为三个区域: 表面电场区、饱和电场区和电子逃逸区^[13], 如图 7 所示。表面电场区长度与在该密度和能量下的电子等离子体德拜长度相当, 电场波形与 X 射线通量的时间波形(发射电子的时间波形)类似, 由于高能量的发射电子能够穿透该区域, 使得该区域出现极高电场^[13], 由图 7(a) 可得表面电场区 E_z 最大值约为 2 MV/m。饱和电场区的电场波形的特征是电场幅度随时间增加不再增加, 甚至出现下降, 这是由于随着表面电场区和饱和区电场的增加, 后续发射电子不能完全穿过这一势垒区, 绝大多数的发射电子从该区域返回到发射面, 由图 7(b) 可得饱和电场区 E_z 最大值约为 500 kV/m。电子逃逸区是饱和区边缘电子受负电势中心影响, 继续向圆柱壁或另一个端面运动而形成, 该区域的电场与表面电场区电场极性相反, 而且幅度更小, 由图 7(c) 可得逃逸电场区 E_z 最大值约为 150 kV/m。由图 7 可见腔内电场以脉冲直流场为主, 但也有小幅振荡的交流辐射场, 其量级约在 kV/m, 可在腔内传播, 且发射电子束脉冲结束后仍然存在。

磁场的空间分布如图 8 所示, 图 8(a) 是发射面上($z=1.0$ mm)的磁场分布, 图 8(b) 是沿图 8(a) 所示直径线($y=0$,

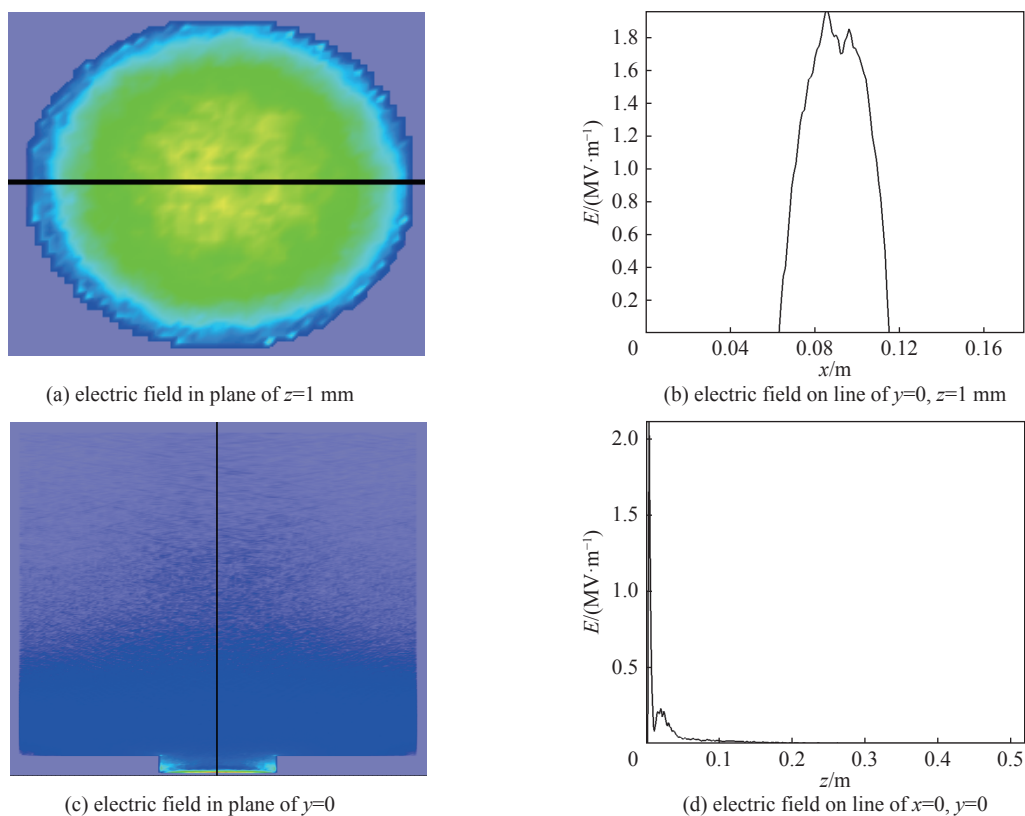


Fig. 5 Distribution of electric field in space

图 5 电场的空间分布

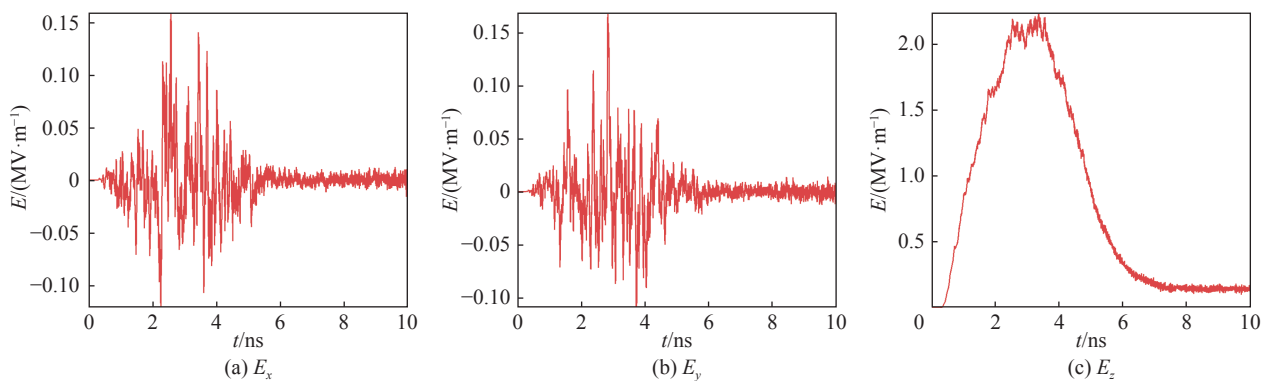


Fig. 6 Waveforms of electric field at point of $x=0, y=0, z=1.0$ cm near center of emitting plane

图 6 发射面中心点 $(0, 0, 1 \text{ mm})$ 电场波形

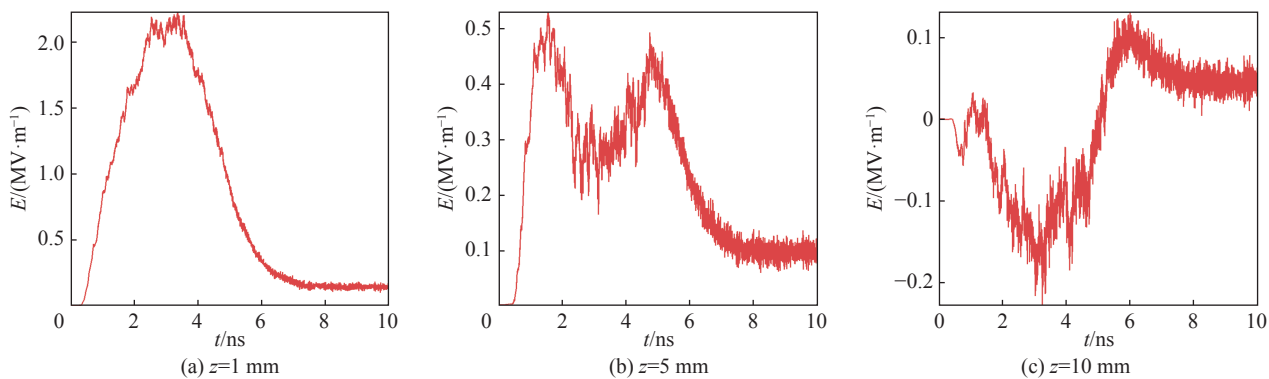


Fig. 7 Waveforms of E_z at several points on axial line

图 7 轴线上各点电场 E_z 波形

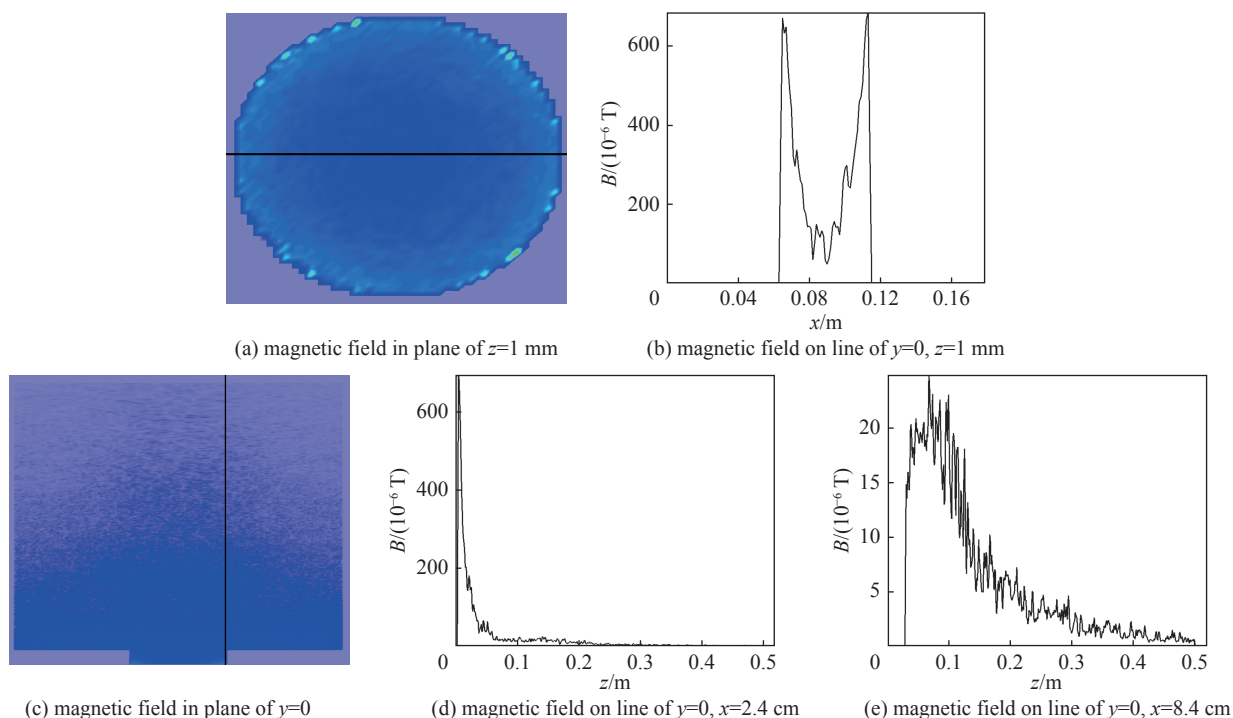


Fig. 8 Distribution of magnetic field in space

图 8 磁场的空间分布

$z=1.0$ mm) 的磁场分布, 图 8(c) 是圆柱腔轴线切面上 ($y=10.0$ cm) 的磁场分布, 图 8(d) 是轴线切面沿注入孔轴向边缘线上 ($x=2.4$ cm, $y=0$) 的磁场分布, 图 8(e) 是轴线切面沿大圆柱腔轴向边缘线上 ($x=8.4$ cm, $y=0$) 的磁场分布。综合分析图 8 可见磁场在发射面边缘附近取得最大值, 且沿径向和轴向迅速下降。并且沿大圆柱腔的边缘磁场进一步大幅度降低, 由图 8(b) 和图 8(d) 可得磁场最大值为 0.7×10^{-3} T。

图 9 给出靠近发射面边缘位置 (2.4 cm, 0, 0.1 cm) 的磁场波形, 由图 9 可见角向磁场分量 B_θ (此处为 B_y) 最强, 图 10 给出发射面边缘上不同轴向位置的角向磁场, 可见随着离发射面距离的增加, 角向磁场迅速衰减。

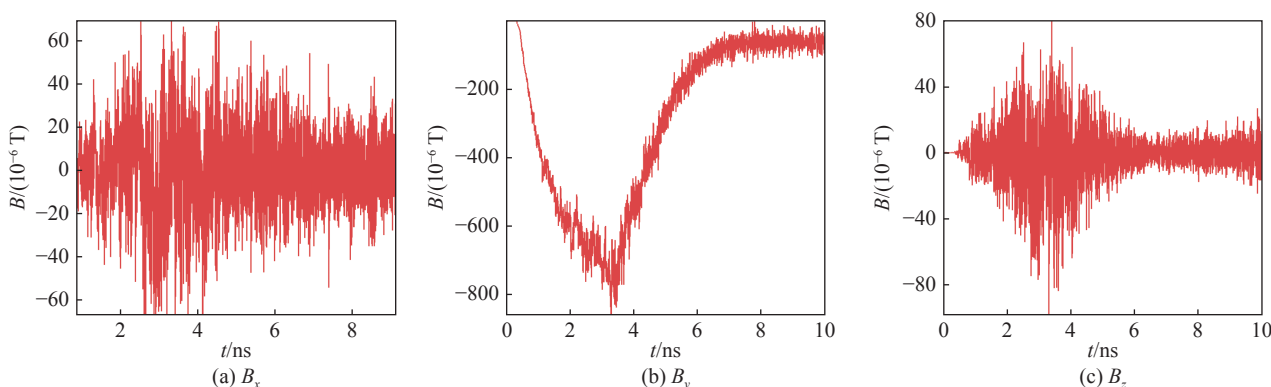


Fig. 9 Waveforms of magnetic field at point of $x=2.4$ cm, $y=0$, $z=0.1$ cm near border of emitting plane

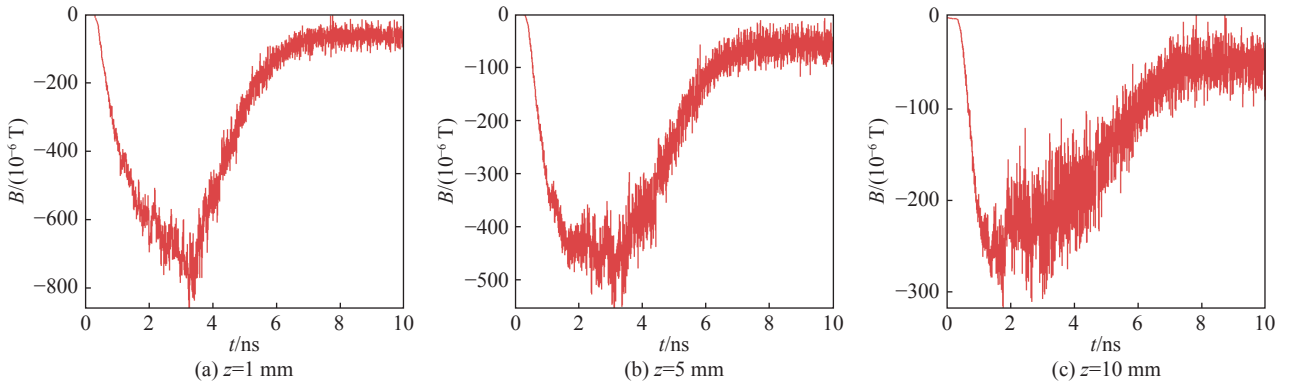
图 9 发射面边缘位置 (2.4 cm, 0, 0.1 cm) 的磁场波形

3 改变 X 射线注量模型的数值模拟

在其它参数不变的情况下, 由 MC 方法计算得到产生的光电子数和入射 X 射线注量成正比, 因此初始发射电流也和 X 射线注量成正比, 为考察发射电流大小对 SGEMP 场的影响, 保持腔体结构和入射 X 射线的其他参数不变, 只改变 X 射线注量, 分别将注量增大为原来 10 倍、减小为原来 1/10, 看腔内电磁场的分布情况。

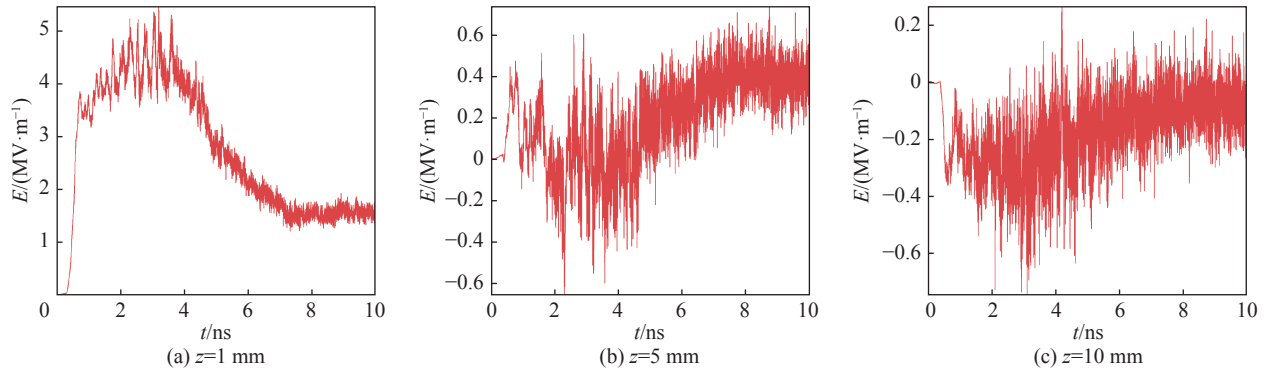
3.1 注量增大为原模型 10 倍的数值模拟结果

将注量增大为原模型的 10 倍, 即被照面注量为 4.0 J/cm², 因 X 射线能谱和时间波形不变, 所以光电产额、腔内归一化的电子能谱和发射角分布都和原模型的相同。光电产额仍为 3.694×10^{11} J⁻¹, 腔内归一化的电子能谱和发射角分布仍是图 2 所示分布。腔体发射电流和吸收电流波形和原模型的波形相似。发射电流最大值约为 1.6 kA, 也

Fig. 10 Waveforms of B_y at several points near borderline of emitting plane图 10 发射面边线各点的 B_y 波形

是原模型的 10 倍,说明计算建模正确。

图 11 给出中心轴线上不同位置轴向电场 E_z , 其位置的取值和图 7 中的相同。由图 11(a)可见轴线上 $z=1$ mm 点仍处于表面电场区,其电场最大值约为 4.5 MV/m,可见在发射电流增大为原来 10 倍时表面电场仅增大为原来的 2 倍左右,说明存在强的空间电荷效应,导致电场处于非线性效应区。对比图 11(b)和图 7(b),轴线上 $z=5$ mm 点的电场波形已经发生变化,从波形判断此处的电场不再处于饱和电场区,和图 11(c)所示的 $z=1$ cm 处的波形相似,即电场处于电子逃逸区,因为随着发射电流密度增大,腔体内电子等离子体德拜长度变小,即空间电荷层距离发射面更近,导致表面电场区、饱和电场区都朝向发射面移动。对比图 11 和图 7 可见,图 11 中各点电场的交流辐射成分占比明显增大,说明发射电流密度越大,空间电荷效应越强,交流辐射场也相应增强。

Fig. 11 Waveforms of E_z at several points on axial line图 11 轴线上各点电场 E_z 波形

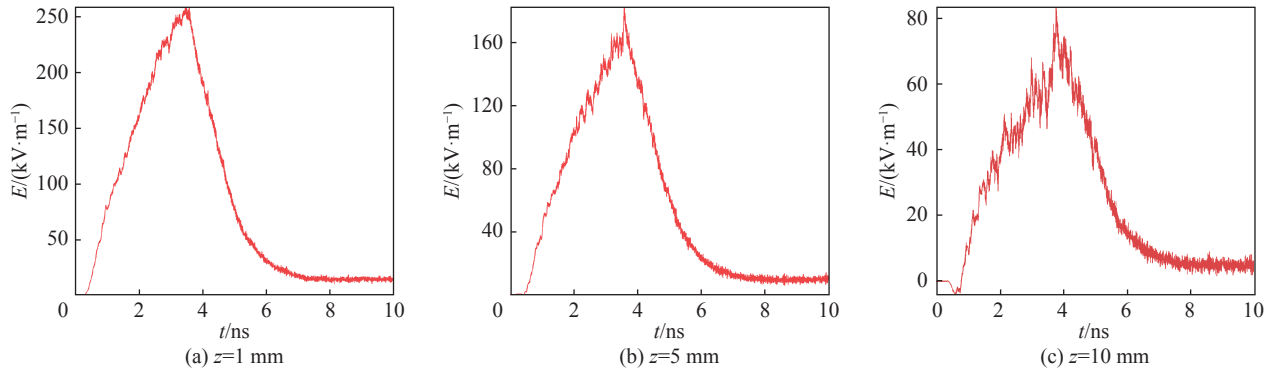
3.2 注量减小为原模型 1/10 的数值模拟结果

将注量减小为原模型的 1/10,即被照面注量为 0.04 J/cm^2 ,同样 X 射线能谱和时间波形不变,所以光电产额、腔内归一化的电子能谱、发射角分布和电子平均能量都和原模型的相同。腔体发射电流波形和原模型的波形相似,发射电流最大值约为 16 A,是原模型的 1/10,吸收电流波形和原模型的相比,有所展宽,分析其原因是发射电流密度减小,空间电荷限制效应减弱,致使大部分电子可以在腔体内传播,腔体吸收电子的时间延迟所致。

图 12 给出中心轴线上不同位置轴向电场 E_z ,其位置的取值和图 7 中的相同。由图 12(a)可见轴线上 $z=1$ mm 点仍处于表面电场区,其电场最大值约为 0.25 MV/m。图 12(b)、图 12(c),即轴线上 $z=5$ mm 和 $z=1$ cm 的电场波形和图 12(a)中电场波形相似,只是随着距发射面的距离增大,幅度减小,说明这三个点的电场都处于表面电场区,同样是因为随着发射电流密度减小,腔体内电子等离子体德拜长度大,导致表面电场区尺度变大。图 12 中各点电场的交流辐射成分占比比较图 7 中的明显变小。

4 结论

本文应用三维 MC 程序 JMCT 和三维 PIC 程序,实现了神光装置辐照腔体 SGEMP 模型的耦合模拟,得出当由神光装置产生的韧致谱 X 射线点源——半高宽为 2.9 ns、平均能量为 10.3 keV——辐照距离 30 cm 的圆柱腔端面时,注量为 0.4 J/cm^2 ,光电流最大值为 160 A。产生的 SGEMP 电磁场以脉冲直流场为主,因空间电荷限制效应,电

Fig. 12 Waveforms of E_z at several points on axial line图 12 轴线上各点电场 E_z 波形

荷、电磁场都集中在发射表面附近,在空间随着和发射面距离增大迅速衰减。发射表面中心点电场最强,发射面上电场沿角向均匀分布,沿径向逐渐减弱,表面中心电场最大值约为 2.2 MV/m ,以轴向电场为主。发射表面边缘磁场最强,沿角向均匀分布,沿径向向圆心逐渐减弱,磁场最大值约为 $0.8 \times 10^{-3} \text{ T}$,以角向磁场为主。考察了 X 射线注量对 SGEMP 效应场的影响,在 X 射线能谱不变的情况下,注量越高空间电荷效应越强,电子等离子体的德拜长度越小,电场沿轴向变化越快,同时交流辐射场占比越大。

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] Wenaas E P, Rogers S, Woods A J. Sensitivity of SGEMP response to input parameters[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1975, 22(6): 2362-2367.
- [3] Higgins D F, Lee K, Marin L. System-generated EMP[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, 26(1): 14-22.
- [4] 乔登江. 核爆炸物理概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. (Qiao Dengjiang. Introduction to nuclear explosion physics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003)
- [5] Longmire C L. State of the art in IEMP and SGEMP calculations[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1975, 22(6): 2340-2344.
- [6] Xu Zhiqian, Meng Cui, Wu Ping, et al. Simulation of the SGEMP response inside the cavity with aperture[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2023, 70(1): 20-27.
- [7] Chen Jiannan, Wang Jianguo, Chen Zaigao, et al. Study of SGEMP field-coupling inside and outside reentrant cavity[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(4): 1182-1189.
- [8] 孙会芳, 董志伟, 周海京. 圆柱腔内系统电磁脉冲的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 123018. (Sun Huifang, Dong Zhiwei, Zhou Haijing. Simulation study of internal system generated electromagnetic pulse of cylinder cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 123018)
- [9] 易涛, 景峰, 王新彬, 等. 神光 III 装置电磁脉冲测量[J]. *安全与电磁兼容*, 2017(6): 83-85. (Yi Tao, Jing Feng, Wang Xinbin, et al. Electromagnetic pulse measurement at Shen Guang III laser facility[J]. *Safety & EMC*, 2017(6): 83-85)
- [10] 张玲玉, 李瑞, 李刚, 等. JMCT 光子-电子耦合运输模拟计算研究[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)
- [11] 史博, 刘晓波. JMCT 的高浓铀模型验证计算[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 026008. (Shi Bo, Liu Xiaobo. The validation and calculation of highly enriched uranium models in JMCT[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 026008)
- [12] 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)
- [13] 程引会, 周辉, 李宝忠, 等. 光电子发射引起的柱腔内系统电磁脉冲的模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(8): 1029-1032. (Cheng Yinhui, Zhou Hui, Li Baozhong, et al. Simulation of system-generated electromagnetic pulse caused by emitted photoelectron in cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(8): 1029-1032)