

文章编号: 2095-4980(2016)05-0746-04

系统电磁脉冲空间电荷层振荡特性理论

郭景海, 吴 伟, 李进玺, 马 良, 赵 墨, 刘逸飞, 程引会

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 从电磁场理论出发, 给出了发射电子为单能条件下系统电磁脉冲(SGEMP)空间电荷层振荡特性的解析求解方法, 得到了空间电荷层的振荡频率和振荡幅度的解析式, 其结果与用等离子体理论求解得到的结果一致。通过本文的研究工作, 可以进一步认识发射电子为单能条件下 SGEMP 中的空间电荷层问题, 该问题可以分别用电磁场理论和等离子体理论处理。

关键词: 系统电磁脉冲; 空间电荷层; 等离子体

中图分类号: TN788; O434.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201605.0746

Oscillation characteristic of space charge boundary layer of SGEMP

GUO Jinghai, WU Wei, LI Jinxi, MA Liang, ZHAO Mo, LIU Yifei, CHENG Yinhui

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: The oscillation characteristics of space charge boundary layer of the System Generated Electromagnetic Pulse(SGEMP) are studied based on electromagnetic theory with the emitted electron being monoenergetic. The analytical formula of frequency and amplitude are obtained, which accord with the results by plasma theory. Then the issue that the space charge boundary layer does exist when emitted electron is monoenergetic has been further understood, which can be addressed with both the electromagnetic theory and the plasma theory.

Key words: System Generated Electromagnetic Pulse; space charge boundary layer; plasma

当 X 射线入射到系统材料表面时会激发出光电子, 受照面上出现正电荷的积累, 当 X 射线注量较高时, 会有大量的电子聚集在发射面附近, 形成空间电荷层^[1-4], 产生很强的法向电场, 从而阻止后续电子的运动。这就是系统电磁脉冲(SGEMP)中的空间电荷受限现象。产生的电磁场会干扰系统内电子设备的正常工作, 甚至会对其造成损害。对空间电荷层振荡特性的研究可以增进对 SGEMP 特性的理解, 为电子设备在 X 射线辐射环境下生存能力的加固提供理论支持。本文即是用解析方法研究 SGEMP 空间电荷层的振荡特性。

在发射电子为单能的近似条件下, 空间电荷层会发生振荡现象, 直观上可以理解为: 由于空间电荷的限制, 一部分发射电子返回发射面, 导致空间电荷受限程度减弱, 又会有更多的电子进入空间电荷层, 如此反复, 形成空间电荷层的振荡, 也可以看出电子往返时间的倒数即为空间电荷层的振荡频率。

1 准稳态条件

由于空间电荷层内的电子数目一直处于变化之中, 很难用解析方法精确描述, 这里用到了准稳态^[5]近似条件, 即单个电子从发射到返回的这段时间内, 光电子的发射率变化很小, 认为发射电子密度和返回电子密度相等。准稳态条件可描述为:

$$\frac{\dot{\varphi}(t+t_s)-\dot{\varphi}(t)}{\dot{\varphi}(t)} \ll 1 \quad (1)$$

式中: φ 为脉冲 X 射线注量; t_s 为电子的往返时间。

解析计算中, 脉冲 X 射线近似为三角时间谱, 上升时间为 t_r , 半高宽为 T , 则有:

收稿日期: 2015-05-19; 修回日期: 2015-08-13

基金项目: 抗辐射加固国防预先研究基金资助项目(311060303)

$$\dot{\varphi}(t) = \begin{cases} \frac{\varphi}{Tt_r} t & (t \leq t_r) \\ \frac{\varphi}{T} \frac{2T-t}{2T-t_r} & (t > t_r) \end{cases} \quad (2)$$

在脉冲 X 射线的上升沿早期，空间电荷层迅速形成，在时刻 t 之前发射面的电子数密度为：

$$N(t) = \int_0^t Y \dot{\varphi}(t) dt = \frac{Y \varphi t^2}{2Tt_r} \quad (3)$$

式中 Y 为材料光电产额。发射面附近的电场可表示为：

$$E(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{eN(t)}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

式中： σ 为面电荷密度； ε_0 为真空介电常数； e 为电子电荷。

若第 1 个返回电子在 t_e 时刻发射，则该电子的往返时间可表示为：

$$t_s(t_e) = \frac{2mv_0\varepsilon_0}{e^2 N(t_e)} \quad (5)$$

式中： m 为电子质量； v_0 为光电子初始运动速度。则第 1 个电子的返回时刻为：

$$t_{re}(t_e) = t_e + t_s(t_e) \quad (6)$$

因为第 1 个返回电子返回时刻取极小值，由 $\frac{dt_{re}(t_e)}{dt_e} = 0$ 可得

$$t_e = 2 \left(\frac{mv_0\varepsilon_0 T t_r}{e^2 Y \varphi} \right)^{1/3} \quad (7)$$

第 1 个返回电子的往返时间为：

$$t_s(t_e) = \left(\frac{mv_0\varepsilon_0 T t_r}{e^2 Y \varphi} \right)^{1/3} \quad (8)$$

以第 1 个电子返回发射面作为空间电荷层的形成时刻^[5]，该时刻为：

$$t_{re}(t_e) = 3 \left(\frac{mv_0\varepsilon_0 T t_r}{e^2 Y \varphi} \right)^{1/3} \quad (9)$$

在上述条件下，准稳态条件可以描述为：

$$\frac{\dot{\varphi}(t+t_s) - \dot{\varphi}(t)}{\dot{\varphi}(t)} = \frac{t_s}{t} \ll 1 \quad (10)$$

空间电荷层形成时其值为 $1/3$ ，基本满足准稳态条件，空间电荷层形成之后，随着脉冲 X 射线通量的增加，准稳态条件也会越来越满足，因此可以用准稳态近似描述空间电荷层的行为特性。

2 振荡特性

发射电子为单能条件下，空间电荷层形成之后，空间电荷数目的包络在稳步增加(上升沿)或稳步减少(下降沿)的同时，还伴随着高频的振荡^[6-8]，直观上可以理解为：由于空间电荷限制，使一部分发射电子返回发射面，导致空间电荷数目减少，空间电荷受限程度减弱，又会有更多的电子进入空间电荷层，如此反复，形成空间电荷层的振荡，也可以看出电子往返时间的倒数即为空间电荷层的振荡频率。

空间电荷层内的电荷密度可表示为^[5]：

$$\rho(z) = \frac{2eY\dot{\varphi}(t)}{v_0} \quad (11)$$

设空间电荷层的厚度(即振荡幅度)为 z ，则电荷层内的电场强度可表示为：

$$E_z = \frac{\rho(z)z}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

另一方面，由能量守恒可得

$$E_z e z = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (13)$$

可解得空间电荷层的振荡幅度为：

$$z = \frac{v_0^{3/2}}{2} \sqrt{\frac{m\varepsilon_0 T t_r}{e^2 Y \varphi t}} \quad (14)$$

电子的往返时间为:

$$t_s(t) = \frac{2mv_0}{E_z e} = 2 \sqrt{\frac{mv_0 \varepsilon_0 T t_r}{e^2 Y \varphi t}} \quad (15)$$

则空间电荷层的振荡频率为:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{t_s(t)} = 1.57 \sqrt{\frac{e^2 Y \varphi t}{mv_0 \varepsilon_0 T t_r}} \quad (16)$$

另一方面,空间电荷层形成之后,发射面附近分布着稠密的电子云,整个空间电荷层可以看作是由电子组成的等离子体,等离子体的电子数密度为:

$$n = \frac{\rho(z)}{e} \quad (17)$$

由等离子体理论,具有密度为 n 的等离子体的振荡频率为:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{2e^2 Y \varphi t}{m\varepsilon_0 v_0 T t_r}} \quad (18)$$

$\omega_p / \omega_0 = 0.9$, 2 种方法得到的振荡频率一致。

另外,电子等离子体的德拜长度为:

$$l_D = \sqrt{\frac{w\varepsilon_0}{e^2 n}} = \frac{v_0^{3/2}}{2} \sqrt{\frac{m\varepsilon_0 T t_r}{e^2 Y \varphi t}} \quad (19)$$

式中 w 为电子动能。

比较发现,用电磁场理论求得的空间电荷层厚度与用等离子体方法得到的德拜长度的表达式完全一样,而空间电荷层的振荡频率与相应的等离子体频率也仅有细微的差异,这是一个值得进一步研究的问题,初步的解释为:当脉冲 X 射线注量达到一定程度时,大量光电子在发射面附近累积形成空间电荷层,电子密度是如此之大以至于从外部看来整个空间电荷层开始表现出整体特性,空间电子形成类等离子体状态,可以用等离子体的相关理论处理空间电荷层的行为特性,而其具体的物理机理还需要进一步研究。

3 结论

本文对高注量脉冲 X 射线作用于电子设备时产生的空间电荷层振荡问题给出了理论研究,用电磁场方法和等离子体理论所得到的结果一致。

通过本文的研究,可以对 SGEMP 中的空间电荷层问题有进一步的认识,从物理上对空间电荷层特性有较清晰的了解,对研究脉冲 X 射线作用下电子设备腔体内的电磁环境具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] HIGGINS D F, LONGMIRE C L. Highly space charge limited SGEMP calculations[R]. Santa Barbara, CA, USA: Mission Research Corp., 1975.
- [2] 周辉,程引会,李宝忠,等. 系统电磁脉冲边界层准稳态特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(1): 72-75. (ZHOU Hui, CHENG Yinhui, LI Baozhong, et al. Study on the quasi steady state characteristics of the boundary layer of SGEMP[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(1): 72-75.)
- [3] CARRON N J, LONGMIRE C L. On the structure of the steady state space-charge-limited boundary layer in one dimension[R]. Santa Barbara, CA, USA: Mission Research Corp., 1975.
- [4] 李宝忠,周辉,郭红霞,等. 圆柱模型在金属腔体内的系统电磁脉冲响应[J]. 原子能科学与技术, 2004, 38(5): 448-451. (LI Baozhong, ZHOU Hui, GUO Hongxia, et al. SGEMP response of a cylindrical model in metal cavity[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(5): 448-451.)
- [5] CARRON N J, LONGMIRE C L. Scaling behavior of the time-dependent SGEMP boundary layer[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978, 25(6): 1329-1335.

(下转第 752 页)