

文章编号: 1001-4322(2001)01-0072-04

# 系统电磁脉冲边界层准稳态特性研究

周辉, 程引会, 李宝忠, 吴伟

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 对黑体谱脉冲 X 射线入射到系统材料上发射的光电子的行为及其准稳态成立的条件进行讨论, 研究了系统电磁脉冲(SGEMP)边界层中光电子参数和电场的准稳态特性。给出的公式, 可以方便地获得 SGEMP 边界层的主要参数, 如电子密度、电子分布、表面电场及其分布等。最后给出了一个计算实例。

**关键词:** 脉冲 X 射线; 光电发射; 系统电磁脉冲; 边界层; 准稳态

**中图分类号:** O434.14 **文献标识码:** A

系统表面材料受脉冲 X 射线辐照时会形成光电子边界层(材料表面附近空间电荷积累区域), 这些运动电子形成的电流是麦克斯韦方程组的激励源, 是研究系统电磁脉冲(SGEMP)响应的基础。对这个问题的研究可为系统抗 SGEMP 加固提供必要的环境电流和电磁场基本数据, 为在多种系统参数、辐射环境与 SGEMP 响应之间选择有利的设计方案和加固措施提供依据。

我们仅考虑一维边界层问题, 给出的公式和结果在系统表面纵横比较大时适用。如果 X 射线通量较高或 X 射线脉冲随时间变化缓慢, 边界层将很快形成, 并总是处于瞬时的准稳态中(在许多感兴趣的地方, 这种假设是合理的)。如果 X 射线通量不高或脉冲变化迅速, 则需要求出完整的动态解。本文主要研究前一种情况。

文中尽量给出物理量和参数的解析计算方法, 个别参数是用数值计算方法得到的。其中电子密度和电场的解析计算结果与数值计算结果吻合得很好。

## 1 光电子产额和能谱

对铝、铜、金和硅等常用材料的 X 射线光电产额可以用解析公式和 M-C 程序进行计算, 对 1~15keV 黑体谱脉冲 X 射线, 两种方法计算结果是一致的。表 1 是几种材料的背向单能光电产额<sup>[1]</sup>, 对不同能量单能产额加权求和可以得到黑体谱的光电产额。表 2 是铝在不同黑体温度时 X 射线照射下的光电产额<sup>[2]</sup>。

表 1 几种常用材料的单能 X 射线光电产额

Table 1 Backscattered monoenergetic photoelectron yield of several common materials

power of photoelectron and X-ray /keV	material atomic number Z density $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	photoelectron yield ratio $Y(E)/J^{-1}$						
		C	Al	Cu	Ag	Sn	Au	U
		6	13	29	47	50	79	92
		2.25	2.70	8.90	10.50	7.29	19.30	18.7
20		2.67E10	1.1E11	9.58E11	3.9E11	4.97E11	2.1E12	2.4E12
40		7.13E9	1.78E10	2.1E11	5.68E11	8.17E11	4.26E11	5.33E11
60		2.1E9	8.17E9	8.5E10	2.24E11	2.52E11	1.63E11	1.92E11
80		1.35E9	4.87E9	4.97E10	1.17E11	1.46E11	3.91E11	9.2E10
100		8.91E8	4.62E9	2.98E10	7.46E10	7.81E10	2.38E11	5.3E10

从材料表面发射的光电子的能谱可以用一个公式表示<sup>[2]</sup>

• 收稿日期: 2000-06-25; 修订日期: 2000-11-15

基金项目: 国家防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 周辉(1961-), 男, 研究员, 从事辐射效应、电磁场与微波技术研究; 西安市 69-13 信箱。

$$dn/dE = N_0 e^{-E/E_1} \quad (1)$$

公式中  $E$  是电子能量 (keV),  $N_0$  是常量,  $E_1$  是表征 X 射线能量的一个参数, 与材料关系不大, 对黑体谱 X 射线可以用黑体温度近似代替。通常, 光电子的角分布正比于  $\cos\theta$ ,  $\theta$  是相对于法线的发射角。

表 2 铝在不同黑体温度 X 射线入射时的光电产额

Table 2 Backscattered photoelectron yield of Al in some blackbody spectra

blackbody temperature/keV	1	2	3	5	8	10
photoelectron yield ratio $Y(E)/J^{-1}$	7.3E12	3.0E12	1.6E12	6.1E11	2.5E11	1.6E11

## 2 边界层电子特性参数和准稳态条件

对电子运动的稳态或准稳态建立和维持的条件, 考虑两个时间。一是准稳态的建立时间  $t_s$ , 这一时间表示 X 射线通量已达到产生空间电荷积累的强度, 光电子大量聚集在边界层, 并受强电场的作用返回发射表面。二是电子从表面发射开始, 飞行到边界层并返回发射表面所需的时间  $t_{ret}$ , 如果在电子的这一运动时间内, 光子通量变化不大, 可以认为边界层将维持准稳态。下面定量地讨论这两个时间。

### 2.1 准稳态建立时间 $t_s$

在 SI 单位制下, 设  $\phi(t)$  是  $t$  时刻前的 X 射线注入量, 则其注量率是

$$\dot{\phi} = d\phi / dt \quad (2)$$

设  $Y$  是光电产额, 则材料表面的电子发射率为

$$r_0 = Y \dot{\phi} \quad (3)$$

单位面积材料表面时间  $t$  以前发射的电子总数为

$$N(t) = \int_0^t r_0 dt \quad (4)$$

记光电子的平均法向速度为  $\bar{v}$ , 对指数谱和余弦角分布, 光电子的平均法向速度为

$$\bar{v} = 0.15 \sqrt{E_c/m} \quad (5)$$

大部分 X 射线脉冲开始时是随时间线性增长的, 设与时刻  $t$  前的  $\dot{\phi}$  对应的三角形时间波形的半高宽 (FWHM) 为  $T_h$ , 并对应这一时刻前发射的总电子数  $Y \phi(t)$ , 光电子的数密度  $n_e$  为

$$n_e = Y \phi / \bar{v} T_h \quad (6)$$

具有密度  $n_e$  的电子等离子体的特征时间, 即等离子体周期  $T_p$  为

$$T_p = \sqrt{\epsilon_0 m / e^2 n_e} \quad (7)$$

$T_h$  和  $T_p$  是我们考虑准稳态条件的两个参数。  $T_h$  是 X 射线和电子发射速率的时间特征,  $T_p$  是电子等离子体动态变化的时间特征。如果  $T_p \ll T_h$ , 边界层处在准稳态中, 反之, 就不会形成准稳态。因此, 选满足  $T_p = T_h$  为建立准稳态的基本条件。由 (2)、(6) 和 (7) 式及上述条件, 得到发射率为  $r_0$  时达到准稳态所需的单位面积光电子电子数  $N_s$  为

$$N_s = (0.3 r_0 \epsilon_0 \sqrt{E_c m / e^2})^{1/2} \quad (8)$$

对线性增长的 X 射线脉冲, 有

$$\dot{\phi} = \ddot{\phi} t \quad (9)$$

由式 (5) 可得, 这种 X 射线脉冲下, 单位表面积的光电子数为

$$N(t) = (Y \ddot{\phi} t^2) / 2 \quad (10)$$

再由 (8) 式可得电子数达到  $N_s$  所需的时间  $t_s$  为

$$t_s = \left( \frac{1.2 \epsilon_0 \sqrt{m E_c}}{e^2 Y \ddot{\phi}} \right)^{1/3} \quad (11)$$

### 2.2 电子返回时间 $t_{ret}$

具有平均热运动能量  $E_e$  和密度  $n$  的等离子体的德拜长度  $l_D$  为

$$l_D = \sqrt{\epsilon_0 E_e / e^2 n} \quad (12)$$

而对具有指数分布和余弦角分布的电子,其发射表面的电子密度(计及返回的电子)为

$$n = 2r_0/\bar{v} \quad (13)$$

因此,德拜长度可以用平均能量表示为

$$l_D = \left( \frac{0.075 E_e \epsilon_0 \sqrt{E_e/m}}{e^2 Y \dot{\phi}} \right)^{1/2} \quad (14)$$

则电子的返回时间为

$$t_{\text{ret}} = 2l_D/\bar{v} \quad (15)$$

由(5)式和(14)式可得

$$t_{\text{ret}} = 2.1 \times 10^6 \left( \frac{\sqrt{E_e}}{Y \dot{\phi}} \right)^{1/2} \quad (16)$$

式中  $t_{\text{ret}}$  的单位为 s。

式(11)和(16)给出了准稳态适用的条件,即在发射率为  $r_0$  时,电子运动达到准稳态需要的时间为  $t_s$ , 而 X 射线脉冲在时间  $t_{\text{ret}}$  内应变化不大。计算这两个时间参数只需要 X 射线脉冲和材料的相关参数。

### 3 表面和空间的电荷、电场及分布

对发射面电子密度  $n_{\text{surface}}$ , 表面电场强度  $E_{\text{surface}}$  以及距发射表面不同距离处的光电子数密度  $n(x)$  和电场的分布  $E(x)$ 。由式(13)得发射表面的电子密度为

$$n_{\text{surface}} = 2r_0/\bar{v} = 13.3Y \dot{\phi} \sqrt{m/E_e} \quad (17)$$

对  $n(x)$ , 可以用两种方法求解,一是求解电子等离子体非线性玻尔兹曼方程<sup>[2,4]</sup>,二是求解麦克斯韦方程组和电子运动方程<sup>[5]</sup>,对电磁脉冲系统,这两种方法目前尚无一般解析解。

由前面讨论得知,当 X 射线注入量较大时,其表面等离子体的特征长度是很小的,对表面附近电子密度的变化用  $n(x)/n_{\text{surface}}$  和  $x/l_D$  来表示是很方便的,即对满足准稳态条件的解,  $n(x)/n_{\text{surface}}$  随  $x/l_D$  的变化是一致的<sup>[2]</sup>。其变化曲线的拟合公式为

$$\frac{n(x)}{n_{\text{surface}}} = \begin{cases} 0.022l_D/x + 0.42e^{-x/l_D}, & x/l_D \in [0.1, 2] \\ 0.16l_D/x, & x/l_D \in (2, 7] \\ 1.2(l_D/x)^2, & x/l_D \in (7, 50] \end{cases} \quad (18)$$

距发射表面距离为  $x$  范围内的电子数为

$$N_T(x) = \int_0^x n(x) dx \quad (19)$$

由高斯定律和式(19),得

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -en(x)/\epsilon_0 \quad (20)$$

$$N_T(x) = \frac{\epsilon_0 E(0)}{e} \left[ 1 - \frac{E(x)}{E(0)} \right] \quad (21)$$

式中,  $E(0)$  是表面电场,也记为  $E_{\text{surface}}$ 。  $\epsilon_0 E(0)$  是表面电荷密度,由于远离表面处的电场为零,总电荷数为  $N_T(\infty) = \epsilon_0 E(0)/e$ 。由式(18)和(19)可得

$$N_T(\infty) = l_D n_{\text{surface}} \int_0^\infty \frac{n(x)}{n_{\text{surface}}} d(x/l_D) = 0.65 l_D n_{\text{surface}} \quad (22)$$

表面电场的绝对值为

$$|E_{\text{surface}}| = eN_T(\infty)/\epsilon_0 \quad (23)$$

发射表面附近电场的分布为

$$\left| \frac{E(x)}{E_{\text{surface}}} \right| = 1 - (e/\epsilon_0) \frac{N_T(x)}{|E_{\text{surface}}|} \quad (24)$$

至此, 准稳态下系统电磁脉冲的一些基本参数已经公式化。可以通过这些公式确定准稳态计算的条件和计算表面电荷密度、电场强度及其分布。

#### 4 计算实例

考虑一个计算实例: 入射 X 射线时间谱为三角谱, 上升时间  $t_1$  为 10ns, 下降时间  $t_2$  为 20ns, 底宽  $t_3$  为 30ns。X 射线注入量  $8.36 \times 10^4 \text{J/m}^2$ , 能谱为黑体温度 5keV 的黑体谱, 入射到铝表面。

因此, 其计算参数为  $Y = 6.1 \times 10^{11} \text{J}^{-1}$ ;  $E_e = 5.0 \text{keV}$ ;  $\phi = 8.36 \times 10^4 \text{J/m}^2$ ;  $\dot{\phi}_m = 2\phi/t_3 = 5.43 \times 10^{12} \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\ddot{\phi}_m = \dot{\phi}_m/t_1 = 5.43 \times 10^{20} \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ 。

由式(11)和(16)得准稳态建立时间和电子返回时间分别为  $t_s = 6.4 \times 10^{-10} \text{s}$  和  $t_{\text{ret}} = 2.0 \times 10^{-10} \text{s}$ 。由上面两个时间可以看到, 在 X 射线脉冲的早期, 电子运动就达到准稳态条件。同时, 在电子返回表面的时间内, X 射线脉冲的变化是很小的, 准稳态得以维持。

电子等离子体的德拜长度随 X 射线通量增大而减小, 表面电子密度和表面电场随通量增大而增大。当 X 射线通量达到  $\dot{\phi}_m$  时, 由式(14)得电子等离子体的最小德拜长度为  $l_{D,\text{min}} = 4.2 \times 10^{-4} \text{m}$ 。由式(17)得表面最大电子密度为  $n_{\text{surface}} = 1.4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 。由(23)式得表面最大电场强度为  $E_{\text{surface}} = 6.9 \times 10^6 \text{V/m}$ 。表面电场的值与数值计算结果吻合的很好<sup>[5,6]</sup>。

#### 5 小 结

本文给出的公式适用于脉冲 X 射线注入量较高和 X 射线通量变化相对较慢时, 即电子运动处于准稳态下的电子密度和电场强度计算, 其结果与数值计算结果有很好的一致性, 作为预估系统周围 SGEMP 特性和研究 X 射线参数、材料参数与 SGEMP 的关系是较方便的。实际情况也大都满足这一准稳态条件。

通过这些公式我们可以清楚地看出 SGEMP 响应与 X 射线和材料参数的关系, 因此, 可以从物理上较准确地研究与 SGEMP 相关的各种参量的变化关系, 提供系统加固所需的基本数据。

#### 参考文献:

- [1] 周 辉, 李宝忠, 程引会, 等. 强脉冲 X 射线效应的一些基本现象[J]. 抗核加固, 2000, 17(2).
- [2] Carron N J. Characteristic steady-state electron emission properties for parametric blackbody X-ray spectra on several materials [R]. ADA 027958.
- [3] Carron N J, Longmire C L. Scaling behavior of the time-dependent SGEMP boundary layer[J]. *IEEE Trans NS*, 1978, 25(6): 1329-1335.
- [4] Holland R. Comparison of FTDT particle pushing and direct differencing of Boltzmann's equation for SGEMP problems[J]. *IEEE Trans EMC*, 1995, 37(3): 433-442.
- [5] 周 辉, 李宝忠. 不同注量 X 射线系统电磁脉冲响应的数值计算[J]. 计算物理, 1999, 16(2): 157-161.
- [6] Wood A J. Scaling law for SGEMP[J]. *IEEE Trans NS*, 1976, 23(6): 1903-1908.

## Characteristics of steady-state SGEMP boundary layer

ZHOU Hui, CHENG Yin-hui, LI Bao-zhong, WU Wei

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The useful boundary layer properties are discussed when an X-ray pulse is incident on common materials. Two characteristic times are given to determine whether steady-state theory is applicable. With expressions given in the paper, parameters of boundary layer, such as electron density, electric fields and their profile with distance, can be calculated expediently. An example is discussed to illustrate the use of these expressions.

**Key words:** X-ray pulse; photoemission; SGEMP; boundary layer; steady-state