

光阴极 RF 腔中微波过程研究*

杨振萍^{1)†} 李正红²⁾

1) 西南科技大学理学院, 绵阳 621021)

2) 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2007 年 5 月 29 日收到, 2007 年 8 月 18 日收到修改稿)

由于光阴极 RF 腔注入器中电子束的脉冲结构由激光控制的特点, 根据其电子束脉冲结构的特点, 利用微波腔的等效电路, 给出了这种微波腔中微波场变化公式, 和关于光阴极 RF 腔的最佳耦合计算公式, 并以 CAEP 光阴极 RF 腔注入器为例进行理论分析, 给出这些变化对电子束参数(如能散度)的影响.

关键词: 光阴极 RF 腔注入器, 光阴极, 注入器, 能散度

PACC: 0200, 4100

1. 引 言

在自由电子激光(FEL)研究中, 如何获得高质量的电子束是非常关键的技术^[1], 它不仅要求电子束的品质好(流强高、发射度小、能散低等), 而且要求电子束的平均功率高. 目前光阴极 RF 腔注入器是获得这样高质量电子束的较好手段之一, 同时由于光阴极 RF 腔注入器中电子束的脉冲结构由激光控制, 造成光阴极 RF 腔中微波场建场过程同通常热阴极 RF 腔不同.

在光阴极 RF 腔微波建场的过程中, 涉及到微波源同 RF 腔的相互作用(耦合效应), 束流与 RF 腔的相互作用(束流负载效应), 这两种作用既具有稳态特性, 又具有瞬态特性. 对这两种相互作用有两种分析方法, 一种是等效电路法: 将 RF 腔用一个等效的集中参数谐振电路来模拟, 比较简单; 另一种是场的本征模式分析法: 根据谐振腔理论, 将实际场按 RF 腔的本征模式展开, 求得实际场的瞬态效应, 较复杂, 能反映微波源同 RF 腔同束流与 RF 腔之间的瞬态相互作用. 然而在只考虑工作模式, 忽略高阶模式影响时, 通常采用等效电路法.

2. 等效电路

在光阴极 RF 腔注入器中, 当脉冲大功率微波

进入 RF 腔时, 微波在 RF 腔中建立微波场, 由于电子束的脉冲结构由激光控制, 束流随时间变化, 是周期性微脉冲结构(如图 1(a)). 在微波场建立的起始阶段, 束流为 0, 当 RF 腔内微波场建立后, 束流通过 RF 腔, 微波场幅度略有降低, 电子束通过后, 束流为 0, 微波场幅度略有回升(如图 1(b)).

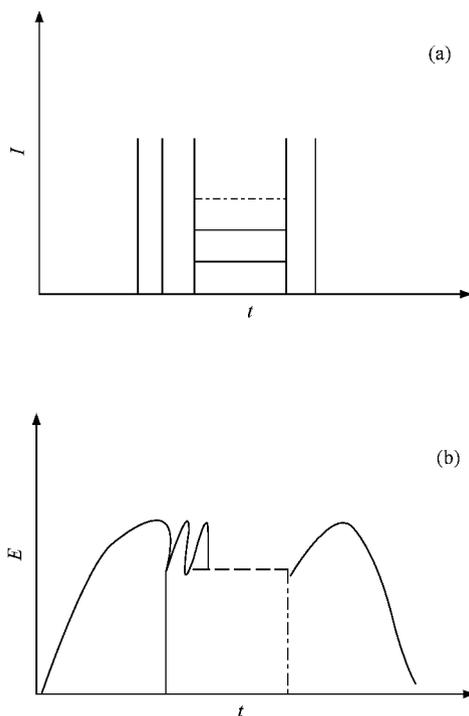


图 1 光阴极 RF 腔中电子束和微波场随时间的变化 (a) 电子束脉冲结构 (b) RF 腔中微波场幅度随时间的变化

* 国家自然科学基金(批准号: 10347009)和国家高技术研究发展计划(批准号: 863-803-403)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yzhenp@yahoo.com.cn

将整个加速结构($n + 0.5$ 腔)等效为一个谐振腔 ,外部波导通过耦合窗向结构供电 ,其等效谐振电路^[2,3]如图 2(a)。

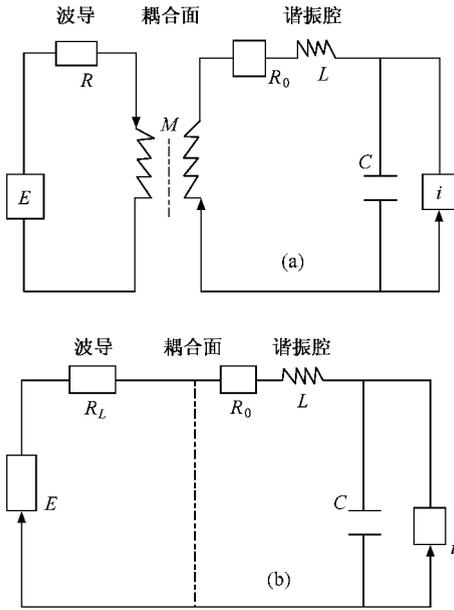


图 2 (a)波导与加速结构的耦合等效电路图 (b)波导与加速结构之间的等效电路图

根据其等效原理 ,该等效电路可以进一步等效 (图 2(b)) ,波导与谐振腔之间的耦合 M 相当于谐振腔中串联一个负载电阻 R_L 。

3. RF 腔中加速场强的变化方程

由等效谐振电路可得 ,稳态时整个结构的阻抗^[4,5]为

$$R_{in} = R_0 + R_L + j \frac{R_0 + R_L}{Q} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right), \quad (1)$$

式中 Q 为整个结构(波导与加速结构)的品质因素(加速腔的有载 Q 值)为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_0 + R_L}.$$

加速腔的有载 Q 值可以表示为

$$Q = Q_0(1 + \beta_c), \quad (2)$$

式中 Q_0 为加速结构的固有品质因素(即加速腔值); $\beta_c = Q_0/Q_c$ 是外部供电波导与加速结构之间的耦合系数 ,与耦合窗的大小和位置有关 ; Q_c 为外部品质因素。

谐振时 ,腔的输入阻抗呈现纯电阻 ,其输入阻抗为 $R_{in} = R_0$ 。

根据(1)式 ,谐振时微波腔的输入阻抗可以表示为

$$\frac{R_{in}}{R_L} = \frac{Q_c}{Q_0} = \beta_c.$$

在场建立过程(无束负荷时) ,输入腔中的功率满足 $P_{in} = \frac{\omega_0 W}{Q_0}$ 则

$$\frac{R_L}{R_{in}} = \frac{Q_c}{\omega_0 W} P_{in}. \quad (3)$$

同时 ,在场建立过程中外部供电波导中的驻波比 ρ 为

$$\rho = \frac{R_L}{R_{in}} = \frac{Q_0}{Q_c}.$$

外部供电波导中的反射系数 Γ 为

$$\Gamma = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}.$$

当源功率为 P_0 时 ,则输入腔中的功率为

$$P_{in} = 4P \frac{Q_0}{Q_c} \left(1 + \frac{Q_0}{Q_c} \right)^{-2}. \quad (4)$$

由此可得 ,场建立过程 ,输入腔中的功率为

$$P_{in} = \left(\frac{4P_0 \omega_0 W}{Q_c} \right)^{1/2} - \frac{\omega_0 W}{Q_c}. \quad (5)$$

根据能量守恒定律 ,当存在束负荷时 ,输入腔的功率为

$$P_{in} = \frac{dW}{dt} + P_L + P_b, \quad (6)$$

式中第一项用于增加腔中的储能 ,第二项是腔壁损耗 ,即 $P_L = \frac{\omega_0 W}{Q_0}$,第三项是转移给束的功率(等于束的加速功率) ,则加速腔储能 W 变化的方程为

$$\frac{dW}{dt} + \frac{\omega_0 W}{Q} = \left(\frac{4P_0 \omega_0 W}{Q_c} \right)^{1/2} + P_b. \quad (7)$$

由于 RF 腔中场强振幅 E 正比于储能 W ,则

$$E = \eta \sqrt{W}, \quad (8)$$

式中 η 是联系腔内场强幅度与微波储能的系数。

利用(8)式 ,加速腔储能 W 变化的方程可改写成加速腔加速场强变化的方程 ,即

$$2 \frac{dE}{dt} + \frac{\omega_0 E}{Q} = \eta \left(\frac{4P_0 \omega_0}{Q_c} \right)^{1/2} + \frac{\eta^2}{E} P_b. \quad (9)$$

令 $E_0 = \eta \left(\frac{4P_0 \omega_0}{Q_c} \right)^{1/2} \frac{Q}{\omega_0}$, $t_f = \frac{2Q}{\omega_0}$,则加速腔加速场强变化的方程可以写为

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{t_f} = \frac{E_0}{t_f} + \frac{\eta^2}{2E} P_b. \quad (10)$$

4. RF 腔加速场强变化

4.1. 微波建场过程

在建场阶段,束流为 0,束流功率也为 0,则

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{t_f} = \frac{E_0}{t_f}.$$

由此可得建场阶段,腔内场强幅度的变化为

$$E = E_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_f}\right) \right), \quad (11)$$

式中 $E_0 = \eta \left(\frac{4P_0 \omega_0}{Q_e} \right)^{1/2} \frac{Q}{\omega_0}$ 为稳态时腔内微波的场强

幅度, $t_f = \frac{2Q}{\omega_0}$ 为微波场的建场时间常数.

4.2. 电子束同 RF 腔的相互作用

当电子束通过 RF 腔时,电子的能量增益正比于 RF 腔中微波的场强幅度 E ,可以表示为

$$\Delta\gamma = \frac{eE}{2m_0 c^2} f(\varphi), \quad (12)$$

式中 φ 为出口处电子相位,则电子束通过时获得的能量为

$$\Delta W = \frac{qE}{2} f(\varphi).$$

电子束同微波作用时间等于电子束通过 RF 腔的时间,即 $t = \frac{l}{c}$ (l 为加速结构长度).

则电子束通过 RF 腔时,电子束从微波场获得的功率可近似为

$$P_b \approx \frac{c}{2l} qE f(\varphi). \quad (13)$$

由此可得,电子束通过 RF 腔时加速腔加速场强变化的方程为

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{t_f} = \frac{E_0}{t_f} - \frac{\eta^2}{4l} qc f(\varphi). \quad (14)$$

由此可得电子束通过 RF 腔后,加速腔加速场强为

$$E_1 = \left(E_0 - \frac{\eta^2}{4} t_f qc f(\varphi) \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{t_f}} \right) + E e^{-\frac{t}{t_f}}. \quad (15)$$

电子束通过 RF 腔的时间很短,由上式可得电子束通过 RF 腔后,微波场幅度降低,即

$$\Delta E = \frac{\eta^2}{4} qc f(\varphi) - \left(\frac{l}{ct_f} \right) E_0. \quad (16)$$

由于电子束通过 RF 腔的时间很短,微波腔加速场强降低 ΔE 可以进一步近似为

$$\Delta E = \frac{\eta^2}{4} qc f(\varphi). \quad (17)$$

由(17)式可以看出,电子束通过微波腔加速场强的降低与初始状态(即微波腔的储能)无关.

当 $\Delta E \ll E$ 时,微波腔储能降低为

$$\Delta W = \frac{2}{\eta^2} E \Delta E = \frac{1}{2} qE f(\varphi), \quad (18)$$

式中 $\eta^2 = \frac{E^2}{W}$ 同微波腔结构有关.

4.3. 电子束通过后 RF 腔加速场强的变化

在电子束通过后,束流为 0,束流功率也为 0,其方程为

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{t_f} = \frac{E_0}{t_f}.$$

由此可得电子束通过后在下一个电子束达到前,RF 腔内场强为

$$E_2 = E_0 \left(1 - e^{-\frac{T-t}{t_f}} \right) + E_1 e^{-\frac{T-t}{t_f}}, \quad (19)$$

式中 E_1 为电子束通过 RF 腔后微波场强幅度, T 是电子束之间的时间间隔.

4.4. 电子束能量

在光阴极 RF 腔注入器^[6,7]中,驱动激光器以脉冲串的形式工作,一个宏脉冲中有很多个微脉冲,微脉冲间隔 T .根据上面的推导,当一个宏脉冲电子束串通过 RF 腔时,每个电子束通过 RF 腔时腔内场强 E 有一定变化,在电子束串通过时,腔内场强 E 有一个稳态值,其稳态值由 $E = E_2$ 决定,则

$$E = E_0 \left(1 - e^{-\frac{T-t}{t_f}} \right) + \left(\left(E_0 - \frac{\eta^2}{4l} qc f(\varphi) \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{t_f}} \right) + E e^{-\frac{t}{t_f}} \right) e^{-\frac{T-t}{t_f}} \\ = \left(E_0 - \frac{\eta^2}{4l} qc f(\varphi) \right) \left(e^{\frac{t}{t_f}} - 1 \right) / \left(e^{\frac{T}{t_f}} - 1 \right). \quad (20)$$

由于微波建场时间远大于束流脉冲间隔,因而可以近似为

$$E \approx \left(E_0 - \frac{\eta^2}{4} qc f(\varphi) \right) \frac{t_f}{T}. \quad (21)$$

则稳态时,电子通过加速腔的能量增益近似为

$$\Delta\gamma = \frac{eE f(\varphi)}{2}.$$

因此电子束串通过 RF 腔后,获得的能量可近似为

$$W = n \frac{qE(\varphi)}{2} \approx \frac{nq(\varphi)}{4} \left(E_0 - \frac{\eta^2}{4} q(\varphi) \frac{t_f}{T} \right). \quad (22)$$

由于 $E_0 = \eta \left(\frac{4P_0\omega_0}{Q_c} \right)^{1/2} \frac{Q}{\omega_0}$, $t_f = \frac{2Q}{\omega_0}$, 则电子的能量可以写为

$$W \approx \frac{Q}{\omega_0} \left(\eta \left(\frac{4P_0\omega_0}{Q_c} \right)^{1/2} - \frac{\eta^2}{2T} q(\varphi) \right) \frac{nq(\varphi)}{2}.$$

由 $Q = Q_0(1 + \beta_c)$, $\beta_c = Q_0/Q_c$ 可得

$$W \approx \frac{Q_0(nq(\varphi))}{\omega_0(1 + \beta_c)} \left(\eta \left(\frac{P_0\omega_0}{Q_0} \beta_c \right)^{1/2} - \frac{\eta^2}{4T} q(\varphi) \right). \quad (23)$$

对耦合系数 β_c 求导, 由 $\frac{dW}{d\beta_c} = 0$, 可以求得最佳耦合系数 β_c , 则最佳耦合系数为

$$\beta_c = 1 + \frac{\eta^2 q^2 f^2(\varphi)}{4T^2} \frac{Q_0}{\omega_0 P_0} + \frac{\eta q(\varphi)}{4T} \sqrt{\frac{Q_0}{\omega_0 P_0}} \times \sqrt{1 + \frac{\eta^2 q^2 f^2(\varphi)}{32T^2} \frac{Q_0}{\omega_0 P_0}}. \quad (24)$$

由(24)式可以看出光阴极 RF 腔与波导之间的最佳耦合系数不仅同电子束(束流负载)有关, 而且同微波功率源功率、RF 腔的品质因子 Q 和电子束的加速相位有关.

5. CAEP 光阴极 RF 腔注入器

5.1. CAEP 光阴极 RF 腔

CAEP 光阴极 RF 腔^[8,9]是 L 波段(2.5)腔, 首腔为半腔, RF 腔的参数如表 1, 轴向加速电场分布近似为

$$E_z(z) = 40.82E(\cos kz + 0.0175\cos 3kz) \text{ (首腔)},$$

$$E_z(z) = 21.98E(\cos kz - 0.0175\cos 3kz) \text{ (腔 2)},$$

$$E_z(z) = 15.7E(\cos kz - 0.202\cos 3kz) \text{ (腔 3)}.$$

当电子束通过 RF 腔时, 由于阴极表面场强很高, 电子运动速度可以近似为光速, 只考虑基波场的作用, 忽略空间高次谐波项, 同时忽略电子束的横向运动, 根据轴向加速电场分布, 电子的能量增益为

$$\Delta\gamma = \frac{eE}{2m_0 c^2} f(\varphi) l, \quad (25)$$

式中 φ 为出口处电子相位,

$$f(\varphi) = 58.2l \sin\varphi + \frac{40.82}{k} \cos\varphi,$$

其中 $l = 0.115n$ (l 为 RF 腔的腔长).

表 1 CAEP 光阴极 RF 腔的参数

RF 腔	首腔	腔 2	腔 3
频率/MHz	1299.8	1299.8	1299.3
品质因子 $Q/10^4$	1.671	2.3506	2.2417
渡越时间因子 T	0.79	0.79	0.842
分流阻抗 $Z(\text{M}\Omega/\text{m})$	54.1	76.1	83.1
腔内场强幅度 $E = 1(\text{MV}/\text{m})$ 时			
RF 腔中储能/J	1.487	0.862	0.380
RF 腔中腔壁损耗/MW	0.718	0.296	0.138
轴向平均电场 (MV/m)	26	14	10

由此, 根据表 1 光阴极 RF 腔的参数, 当腔内场强幅度 $E = 1(\text{MV}/\text{m})$ 时, RF 腔中储能为 2.73 J, 腔壁损耗为 1.15 MW, 加速结构的品质因子为 $Q = 1.94 \times 10^4$, 腔内场强幅度 E 与储能的系数为 $\eta = 0.605$.

5.2. CAEP 光阴极 RF 腔中微波场的数值计算

在 CAEP 光阴极 RF 腔注入器中, 驱动激光器以脉冲串的形式工作, 一个宏脉冲中有 812 个微脉冲, 微脉冲间隔为 12.5 ns, 由(24)式可得, RF 腔与波导之间的最佳耦合系数 $\beta_c = 1.5$, 采用的微波功率源是 KL-28 速调管, 其峰值功率为 3.5 MW, RF 腔腔壁允许的极限场强大于 56 MV/m.

图 3 为波导中微波功率为 1.15 MW, RF 腔与波导之间的耦合系数为 1.5 时, RF 腔中的微波建场过程.

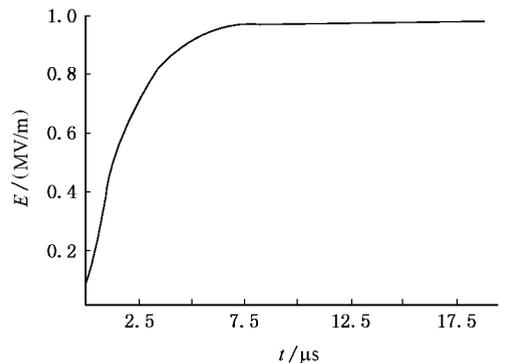


图 3 CAEP 光阴极 RF 腔中的微波建场过程

图 4 为波导中微波功率为 1.15 MW, 电子束的

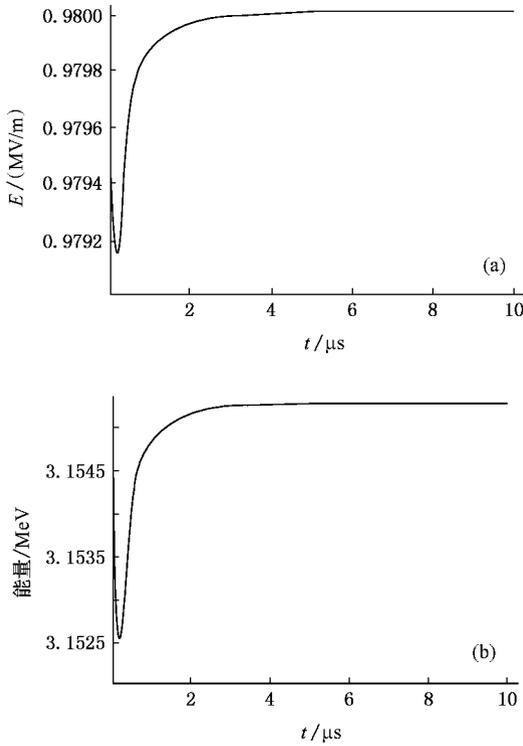


图 4 (a)RF 腔中微波场随时间的变化 (b)电子能量随时间的变化

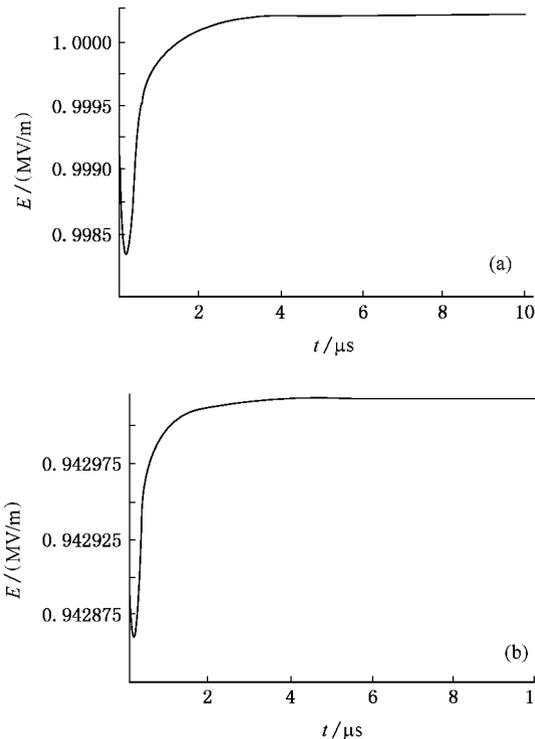


图 5 不同耦合时,RF 腔时微波场随时间的变化 (a) $\beta_c = 1.0$; (b) $\beta_c = 2.0$

电荷为 1nC 时,电子束通过 RF 腔时微波场随时间的变化和微脉冲电子束电子能量随时间的变化.

图 5 为波导中微波功率为 1.15 MW,不同耦合系数,电子束的电荷为 1nC 时,电子束通过 RF 腔时微波场随时间的变化.

图 6 为波导中微波功率为 1.15 MW,不同耦合系数,电子束的电荷为 1nC 时,不同时间微脉冲电子束能量随时间的变化.

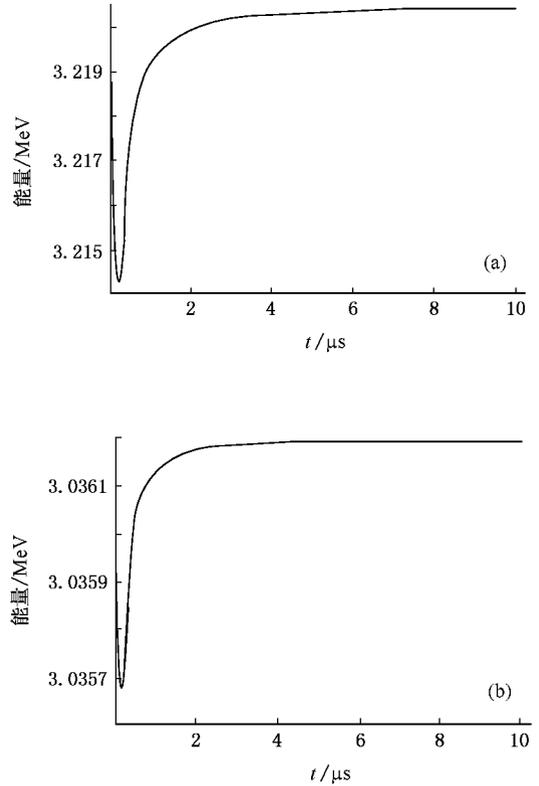


图 6 不同耦合时,电子能量随时间的变化 (a) $\beta_c = 1.0$ (b) $\beta_c = 2.0$

6. 结 论

在光阴极 RF 腔注入器中,尽管电子束的微脉冲束团的电荷较大,峰值流强较高,但是由于电子束微脉冲结构的站空比较大,其平均流强较低,其负载效应也较低,在微波腔的耦合设计时,其最佳耦合度较为接近 1.通过比较图 6 中不同耦合系数时,电子束的能量变化,即使耦合度为 1 时,由于负载效应使得微波腔中微波场变化而引起的电子束微脉冲之间的脉间能散也很小,而且耦合度越接近 1,电子能量增益越大.

- [1] Li Z H , Chang A B , Ju B Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2603 (in Chinese) [李正红、常安碧、鞠炳全 2007 物理学报 **56** 2603]
- [2] Li Z H , Hu K S , Zhang H 2002 *High Power Laser and Particle Beam* **13** 99 (in Chinese) [李正红、胡克松、张红 2002 强激光与粒子束 **13** 99]
- [3] Li Z H , Meng F B , Hu K S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3627 (in Chinese) [李正红、孟凡宝、胡克松 2004 物理学报 **53** 3627]
- [4] Li Z H , Huang H , Meng F B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1564 (in Chinese) [李正红、黄 华、孟凡宝 2005 物理学报 **54** 1564]
- [5] Huang H , Fan Z K , Tan J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄 华、范植开、谭 杰 2004 物理学报 **53** 1129]
- [6] Zhu M , Wu H S 1987 *Acta Electronics* **48** (in Chinese) [朱 敏、吴鸿适 1987 电子学报 **48**]
- [7] Wang S H , Luo Z H , Luo Y X 1980 *Principle of Linac for Proton* (Beijing : Atomic Energy Press) p143 (in Chinese) [王书鸿、罗紫华、罗应雄 1980 质子直线加速器原理 (北京 : 原子能出版社) 第 143 页]
- [8] Wu H S 1986 *Principle of Microwave Electronics* (Beijing : Science Press) p250 (in Chinese) [吴宏适 1986 微波电子学原理 (北京 : 科学出版社) 第 250 页]
- [9] Li Z H 2000 *Ph. D. Thesis* , (Mianyang : CAEP) [李正红 2000 博士论文 (绵阳 : 中国工程物理研究院研究生部)]

Microwave processes in a RF photoinjector^{*}

Yang Zhen-Ping^{1)†} Li Zheng-Hong²⁾

¹⁾ *Science College , South-western University of Science and Technology , Mianyang 621021 , China)*

²⁾ *Institute of Applied Electronics , China Academic Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)*

(Received 29 May 2007 ; revised manuscript received 18 August 2007)

Abstract

The equivalent-circuit method is adopted to study microwave processes in an RF photoinjector , and the optimized coupling between the input microwave system and the RF cavity is theoretically obtained based on the micro-pulse properties of the RF photoinjector. A CAEP RF photoinjector is theoretically analyzed , and the electron beam energy spread of micro-pulses induced by beam load is also investigated.

Keywords : RF photoinjector , photocathode , injector , energy spread

PACC : 0200 , 4100

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10347009) and the National High Technology Project (Grant No. 863-803-403).

[†] Corresponding author. E-mail : yzhenp@yahoo.com.cn