

# W-band 光注入器的模拟研究

朱雄伟

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 模拟研究了 1.6 个腔、高梯度的 W-band 光阴极微波电子枪系统,该系统能产生和加速 300pC 的电子束团. 设计系统由频率 91.392GHz 光阴极微波电子枪以及频率 91.392GHz 行波加速结构组成. 基于射频直线加速器标度律与数值模拟结果,设计系统能产生能量 1.74MeV,电量 300pC,束团长度 0.72ps,归一化横向发射度  $0.55\text{mm}\cdot\text{mrad}$  的电子束团. 研究了高频、高梯度下的束流动力学. 由于高梯度,有质动力效应在束流动力学中起重要作用,且由于横向与纵向之间的耦合,在基次空间谐波的情形下,仍然存在着有质动力聚焦效应.

**关键词** W-band 光注入器 标度律 有质动力

## 1 引言

近年来,具有毫米波尺度的高频、高梯度射频加速器成为先进加速器研究的一个热点<sup>[1]</sup>,研究集中在 90GHz(W-band)的射频直线加速器,包括高频、高梯度下的束流动力学、毫米波源、毫米波高功率运行、毫米波加速器的测量与制造等.

自 80 年代微波电子枪发明以来,先进加速器中高束流品质(高亮度、低发射度)的要求使得光阴极微波电子枪<sup>[2,3]</sup>成为有吸引力的电子注入器,各种概念的光注入器(photoinjector)用在激光尾场加速器实验、背散射短脉冲 X-Ray 产生装置、SASE FEL 实验中. 本文模拟研究了 W-band 光注入器.

## 2 W-band 光注入器的设计

W-band 光注入器的设计系统由 1.6 个腔光阴极微波电子腔、电场平均梯度取  $1\text{GV/m}$ 、发射度补偿漂移段、60 个  $2\pi/3$  行波腔. 我们用射频直线加速器标度律从 S-band BNL 型光阴极微波电子腔、S-band SLAC  $2\pi/3$  行波腔得到以上结果. 光阴极微波电子腔长度 0.469cm、漂移段长度 2.2cm、行波段长度 6.55cm,如图 1 所示,漂移段长度由光阴极微波电子腔、行波段之间的优化匹配所决定.

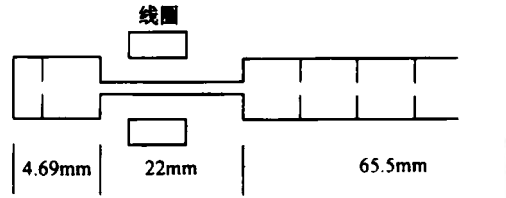


图 1 光注入器设计系统

表 1 与表 2 给出了微波电子腔、行波腔的结构参数,它们的特征阻抗与标度律符合很好。

表 1 微波电子腔参数

腔内半径/mm	1.3
盘片孔半径/mm	0.39
盘片厚度/mm	0.689
腔长/mm	4.69
$\pi$ 模频率/GHz	91.392
分路阻抗/(M $\Omega$ /m)	269.67
品质因数	2806

表 2 行波腔参数

腔内半径/mm	1.303
盘片孔半径/mm	0.409
盘片厚度/mm	0.182
腔长/mm	1.092
$2\pi/3$ 模频率/GHz	91.392
分路阻抗/(M $\Omega$ /m)	284.5
品质因数	2435

### 3 W-band 光注入器的模拟研究

用 PARMELA 研究 W-band 光注入器的束流动力学.微波电子腔工作在  $\pi$  模,行波腔工作在  $2\pi/3$  模,表 3 给出了 W-band 光注入器的典型参数.

表 3 W-band 光注入器的典型参数

线圈峰值磁场/T	5.8	发射度/(mm·mrad)	0.55
电场梯度/(GV/m)	1	能量/MeV	1.74
电量/pC	300	能散	7.8%
束团长度/ps	0.72		

由于高频率(小尺寸),得到高电量的束团非常困难,模拟中得到的束团最大电量 300pC,高于此电量,由于空间电荷效应束团迅速破裂.图 2 给出了归一化发射度与束团电量之间的关系(补偿线圈磁场 5.8T,腔电场平均梯度 1GV/m).单束团电量受到束团破裂限制,Zimmermann<sup>[4]</sup>估计了 W-band 结构中的纵向与横向尾场,横向尾场几乎完全决定于加速结构尺寸.对于 60pC 的束团,束团破裂是可以忽略的.

为了获得低发射度束团,用 POISSON 程序计算了发射度补偿线圈磁场,其峰值磁场强度 5.8T,图 3 给出了在电量 300pC,平均加速梯度 1GV/m 条件下发射度与补偿线圈磁场之间的关系.图 4 给出了归一化发射度随位置的变化曲线.

迄今为止,关于高频高梯度情形下的束流动力学工作很少.由于高梯度,射频聚焦与射频散焦将变得更为重要.根据 Hartman, Rosenzweig<sup>[5,6]</sup>发展的射频有质动力聚焦理论,在行波状态下,高次空间谐波存在横向有质动力聚焦,仅存在基模则不然.然而在模拟中,

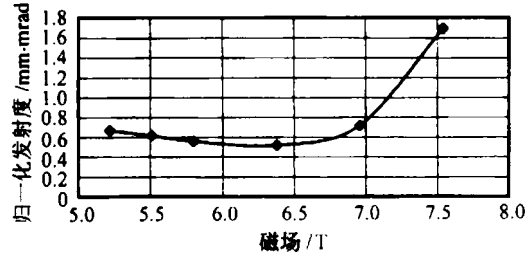
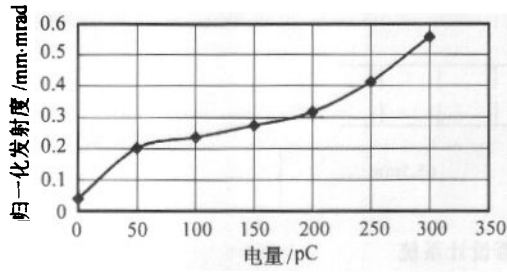


图 2 归一化发射度与束团电量之间的关系

图 3 归一化发射度与补偿线圈磁场之间的关系

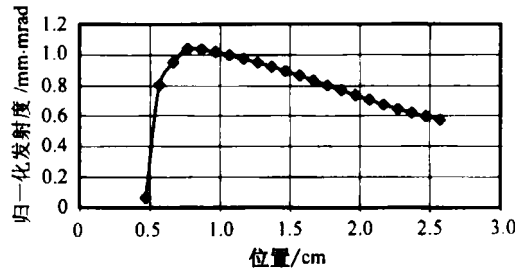


图 4 归一化发射度随纵向位置的变化

我们用 60 个行波腔工作在 1GV/m,  $2\pi/3$  模式下模拟束流动力学, 用 SUPERFISH 计算射频频场系数, 不包括高次空间谐波, 仍然观察到束包络振荡, 而且振荡周期近似与电场振幅平方成正比, 与束团电量几乎无关. 因此, 可以断定对于基模也存在着横向有质动力效应, 这一效应由纵向位相运动耦合引起. 在具有周期长度的行波加速结构中, 加速电场可表述为

$$E_z = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n \exp(i(\omega t - \beta_n z)),$$

其中  $\beta_0 = \beta_0 + (2\pi n/d)$ , 常数  $\beta_0 d = \psi$  为每周期相移. 对于同步电子  $\beta_0 = \omega/c = k$ ,  $b_0$  为同步模振幅.  $\omega t = \beta_0 z$  为最大加速同步条件, 可以得到有质动力横向聚焦力

$$\overline{F}_r = -r \frac{(2eE_0)^2}{\gamma m_e c^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |b_n|^2, n \neq 0.$$

从上式可以看出, 如果仅存在基次模, 则没有有质动力效应. 然而, 如果考虑纵向与横向运动的耦合,  $\omega t = \beta_0 z + \psi_0(z)$ , 在仅存在基次行波模下, 加速电场为

$$E_z = E_0 \exp(i\psi_0),$$

那么有质动力横向聚焦力为

$$\overline{F}_r = -r \frac{e^2 E_0^2}{\gamma m \omega^2} \left\langle \left( \frac{d\psi_0}{dz} \right)^2 \exp(i2\psi_0) \right\rangle,$$

其中  $\langle \dots \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d \dots dz$ , 因此存在基模的有质动力聚焦效应.

## 4 讨论与结论

模拟结果显示 1.6 个腔 W-band 高梯度的光注入器可产生 300pC 电子束团. 为了维持如此高的束团电量,束团电流密度须达  $\text{MA}/\text{cm}^2$  量级. 由于如此高的电流密度,Palmer<sup>[7]</sup> 采用多腔结构的 W-band 光注入器设计,其优化束团电量为 30pC. 然而,近来实验报道了<sup>[8]</sup> 在  $1\text{GV}/\text{m}$  电场梯度下  $\text{MA}/\text{cm}^2$  量级束团电流密度,这一结果支持我们的模拟计算结果. 由于高梯度,有质动力效应在束流动力学中起重要作用,且由于横向与纵向之间的耦合,在基次空间谐波的情形下,仍然存在有质动力聚焦效应.

### 参考文献 (References)

- 1 Siemann R H. *Advanced Electron Linacs*, 1997
- 2 Palmer D. *The Next Generation Photoinjector*, Ph. D Dissertation, Stanford University, 1998
- 3 Gai W. *Nuclear Instruments and Methods*, 1998, **A410**:431
- 4 Zimmermann F, Whittum D H, Ng C K. *Wake Fields in a mm-wave Linac*, SLAC-PUB-7899, 1998
- 5 Rosenzweig J, Serafini L. *Transverse Particle Motion in Radio Frequency Linear Accelerators*, *Physical Review*, 1994, **E49**(2): 1599
- 6 Hartman S C, Rosenzweig J. *Pondermotive Focusing in Asymmetric RF Linacs*, *Physical Review*, 1993, **E47**(3):2031
- 7 Palmer D et al. *A 90GHz Photoinjector*, PAC99, New York, 1999
- 8 Inoue T. *Study of High-Bright Needle Photocathode for FEL*, *Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meetings in Japan*, 2000

## Beam Dynamics Simulation of W-band Photoinjector

ZHU Xiong-Wei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** We present a beam dynamics simulation study on 1.6 cell, high gradient W-Band photocathode RF gun which is capable of generating and accelerating 300pC electron bunch. The design system is made up of 91.392GHz photocathode RF gun and 91.392GHz travelling wave linac cells. Based on the numerical simulation using SUPERFISH and PARMELA and the conventional RF linac scaling law, the design will produce 300pC at 1.74MeV with bunch length 0.72ps and normalized transverse emittance 0.55mm mrad. We study the beam dynamics in high frequency and high gradient; due to the high gradient, the ponderomotive effect plays an important role in beam dynamics; we found the ponderomotive effect still exist with only the fundamental space harmonics (synchrotron mode) due to the coupling of the transverse and longitudinal motion.

**Key words** W-band, photoinjector, scaling law, ponderomotive effect