

# 加速器噪声对远红外 FEL 振荡器影响的模拟研究\*

傅世年 陈银宝 黄志斌

(中国原子能科学研究院, 北京275信箱17分箱 北京102413)

**摘要** 采用 FEL 一维脉冲模型, 针对中国原子能研究院的远红外 FEL 振荡器, 模拟研究了加速器噪声对 FEL 的影响。对电子束微脉冲的时间晃动和能量波动所引起的光功率波动及光谱中心晃动进行了模拟计算, 在计算中还分别考虑了噪声频率、振幅的大小产生的直接影响以及腔失谐的间接影响。

**关键词** 电子束微脉冲, 时间晃动, 能量波动, 远红外自由电子激光

**ABSTRACT** An 1-D pulse FEL simulation code is applied to study the accelerator noise effects on CIAE far-infrared FEL oscillator. The laser power instability and spectral center shift due to the time jitter and energy ripple of the electron micropulse are modeled by the code, and the roles of the noise frequency, amplitude as well as the optical cavity detuning in the noise effects on the FEL are exhibited in the simulation.

**KEY WORDS** electron micropulse, time jitter, energy ripple, far-infrared FEL.

## 0 引言

要成功地运行一台 FEL 振荡器, 需要加速器提供高品质的电子束, 有足够高的流强、小的能散度和发射度, 并有足够长的宏脉冲。还要求电子束具有相当好的稳定性<sup>[1]</sup>。Los Alamos 国立实验室的实际运行经验告诉我们<sup>[2]</sup>, 若不加以控制, 加速器噪声带来的束流不稳定性, 会严重地影响 FEL 的正常运行。特别是为解决光品质要求很高的 LBL 的 CDRL-FEL 用户装置的噪声问题, 最终放弃了常温加速器方案, 而改用超导加速器技术<sup>[3]</sup>。

目前, 我院正在建造一台远红外 FEL 振荡器<sup>[5]</sup>, 要用一台 L 波段的 RF-linac 来驱动。在已建成的注入器实验中, 已发现有加速器噪声的存在。我们利用一维脉冲程序, 模拟研究加速器噪声对这台远红外 FEL 振荡器的影响。首先, 在分析加速器和光腔的滤波特性的基础上, 找到噪声进入 FEL 的“窗口”频率范围, 然后, 分别模拟研究在这个范围中的电子束微脉冲时间晃动和能量波动对 FEL 的影响。同时, 考虑了不同光腔失谐下的 FEL 对噪声的响应。

## 1 加速器噪声

由 RF-linac 提供的电子束宏脉冲中, 包含若干个微脉冲。在 FEL 振荡器中, 光脉冲在光腔中来回反射, 每次正向通过摇摆器时, 都再次与相继进入摇摆器的一个电子束微脉冲相互作用

\* 国家自然科学基金和核工业科学基金资助课题,  
1995年9月14日收到原稿, 1996年11月22日收到修改稿。  
傅世年, 男, 1956年11月出生, 硕士, 副研究员。

用,使光脉冲在振荡中逐汽车增强,直至饱和。由于光腔长度为定值,因而,为使光脉冲能与电子束脉冲在纵向相遇并很好地重叠,电子束微脉冲的周期应保持恒定。此外,由于光增益谱的有限宽度以及反对称特性,为保持光功率和光谱中心的稳定,电子束微脉冲能量也应保持恒定。

但实际上,加速器存在各种不稳定因素,使束流在宏脉冲时间尺度发生波动。特别是微脉冲的周期和能量发生改变,对 FEL 的工作特性产生影响,这早已在 Los Alamos 的中红外 FEL 振荡器实验中观察到<sup>[2]</sup>。这种宏脉冲时间内的加速器噪声主要源于电子枪电源和栅控线路以及聚束器、加速器的功率源。电子枪流强的变化,会通过加速腔中的束流负载效应,使电子束能量变化;电子枪栅控触发的时间晃动,会使电子束在加速场中的相位变化,进而导致电子束微脉冲的能量和周期的不稳定性。聚束器、加速器的功率源的不稳定,使加速相位和场强变化,从而引起电子束微脉冲的时间间隔和能量不能保持恒定。根据文献[6],我们采用 PARMELA 程序,就我们的加速器各部件的噪声对束流稳定性的影响进行了计算。不过,计算中只考虑了噪声的幅值,而未考虑噪声的频率。实际上,由于加速器是一低通滤波器,高频噪声不会在束流参数中得到响应。我们的加速器的响应时间约为 $0.16\mu\text{s}$ ,短于这个时间内的机器参数变化,不会对束流参数产生影响。但电子枪栅控不稳定性不在这个限制之列。因此,更快的束流参数变化仍然是可能发生的。又由于光腔也是一个低通滤波器,其响应时间为微脉冲周期与光腔总损耗之比。在光腔总损耗约为 $7\% \sim 10\%$ 时,对 $108\text{MHz}$ 的电子束微脉冲,双束团运行下的光腔的响应时间约为 $0.19\mu\text{s}$ ,只有大于这个时间常数的束流变化,才会在激光中得到响应,表现为光功率和光谱中心的不稳定性,小于它的束流参数变化在激光中虽不呈现不稳定性,但仍然会降低电子束与光束的有效相互作用,使光功率水平下降。本文主要讨论光对束流不稳定性的响应,因此,应考虑由光腔的滤波特性所决定的频率范围的加速器噪声对 FEL 的影响,即考虑频率低于 $0.9\text{MHz}$ 的噪声。

由于电子束微脉冲时间晃动和能量波动是纵向一维问题,采用一维脉冲模型<sup>[7]</sup>,通过反复求解自洽的 Maxwell 方程和 Lorentz 力作用下的电子运动方程,来跟踪模拟光脉冲在振荡过程中的演化。电子束脉冲取为抛物线型,它相对于光脉冲的滑移采用插值方法计算,以获得比较精确的描述。在横向,用一个复数填充因子来描述一定发射度的电子束与高斯基模光束的横向耦合。通过在振荡过程中,改变电子束的初始位置和能量的方法,模拟加速器噪声对 FEL 的影响。一般都将噪声以正弦函数形式来表示<sup>[2,4,8]</sup>,它代表噪声的一个傅里叶分量。

## 2 加速器噪声对 FEL 的影响

根据表1所列的基本参数,就低于 $0.9\text{MHz}$ 的噪声对这台远红外 FEL 的影响进行了数值模拟。

表1 CIAE 远红外 FEL 主要参数

Table 1 CIAE far-infrared FEL Parameters

electron energy $E$ :	5 MeV	optical wavelength $\lambda$ :	$200\mu\text{m}$
micropulse current $I$ :	40A	wiggler mag. field $B_w$ :	1.4kG
energy spread $\Delta E/E$ :	< 1%	wiggler length $L_w$ :	1.5m
normalized emittance $\epsilon_n$ :	$0.03\text{cm} \cdot \text{rad}$	period number $N$ :	50
micropulse length $\sigma$ :	45 ps		

### 2.1 电子束微脉冲的时间晃动

首先, 在同一晃动幅度下, 对不同频率的时间晃动进行了模拟, 结果如图1。10ps 的晃动幅度, 在0.9MHz, 0.54MHz 和0.36MHz 晃动频率下, 分别产生约18%、25% 和30% 的饱和光功率波动。可见在相同的晃动幅度下, 频率越低所引起的光功率波动越大。这是由于电子束的时间晃动使电子束和光脉冲一会耦合得比无晃动时更好, 一会耦合得更坏, 时间晃动频率越低, 意味着处于这两种状态的时间越长, 因而光功率的起伏越大。在0.9MHz 时, 将晃动幅度减半, 我们发现饱和光功率的波动幅度也随之减半。

由于束时间晃动的影响还与光腔的失谐有关, 图2是在光腔失谐长度为50μm 时的结果。当光腔处于最大饱和光功率的失谐状态下时, 进入饱和后, 电子束和光脉冲有最好的纵向耦合。因此, 电子束的时间晃动总是使耦合度降低, 而很少有提高耦合度的时间。这样, 产生的结果是光功率波动较小, 且光功率基本上总是低于无晃动时的水平(如图2)。在该图中, 曲线1为电子束有0.9MHz, 10ps 时间晃动时的光功率, 曲线3为无时间晃动时的光功率, 它们是在光腔失谐长度为20μm 时的结果, 此时对应于最佳饱和光功率。图中还画出了失谐长度为400μm 时的曲线2, 它对应于最佳小信号增益的腔失谐状态, 此时饱和后电子束与光脉冲纵向耦合较差, 因此, 相同的电子束时间晃动产生的光功率波动较大, 约为25%。

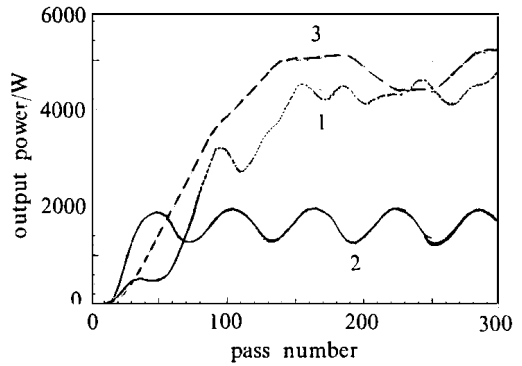
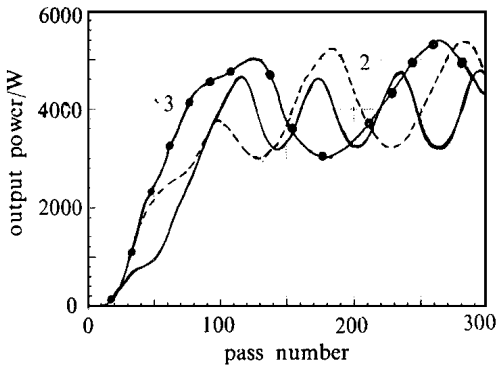


Fig 1 Effects on the FEL of electron pulse time jitter at different frequencies

1.  $f = 0.9\text{MHz}$ ; 2.  $f = 0.54\text{MHz}$ ; 3.  $f = 0.36\text{MHz}$

图1 不同频率的电子束时间晃动对 FEL 的影响

Fig 2 Time jitter effects on the FEL at different cavity detuning lengths

1.  $\delta L = -20\mu\text{m}$ ; 2.  $\delta L = -400\mu\text{m}$ ; 3. no time jitter at  $\delta L = -20\mu\text{m}$ .

图2 在不同腔失谐时电子束时间晃动对 FEL 的影响

除了与电子束时间晃动的频率、幅度直接相关并与腔失谐间接相关外, 时间晃动的影响还与电子束本身的情况有关。我们计算了电子束微脉冲长度为22.5ps 的情况下时间晃动对光功率的影响(如图3)。由图可见, 在10ps, 0.9MHz 的时间晃动下, 40A 电流时的光功率波动幅度与80A 电流时的情况差不多, 分别为45% 和42%。但由于电子束脉冲缩短了一倍, 使时间晃动的影响增强了一倍多, 这是十分自然的结果。

根据以上模拟计算可知, 电子束时间晃动引起 FEL 的光功率不稳定。晃动频率越低, 幅度越大, 光腔失谐越大, 电子束微脉冲越短, 所引起的光功率波动越大。

本文只模拟了200μm 波长的情况, 对于更短波长的 FEL 振荡器, 电子束时间晃动的影响将变得更强。这可以由光腔的失谐特性来推断。由光腔失谐参数 $\theta = -\frac{4\delta L}{g_0 N \lambda}$ , 其中  $\delta L$  为失谐长度,  $g_0$  为无滑移时的均匀展宽小信号增益,  $N$  为摇摆器周期数,  $\lambda$  为光波波长, 我们知道,

光波长越短, 相同  $\theta$  值对应的  $\delta L$  越小, 即 FEL 对光腔失谐越敏感. 由于光腔失谐长度的变化与电子束时间晃动对 FEL 有相同的作用机制, 因此, 可以推断短波长的 FEL 振荡器必然对电子束时间晃动更加敏感. 这与文献[4]中的模拟结果一致.

### 2 2 电子束微脉冲的能量波动

由 FEL 增益曲线知道, 电子束能量的变化, 会引起光增益大小改变, 从而产生光功率的变化. 图4是在电子束能量波动幅度为0.05%时, 不同频率下的电子束能量波动所产生的光功

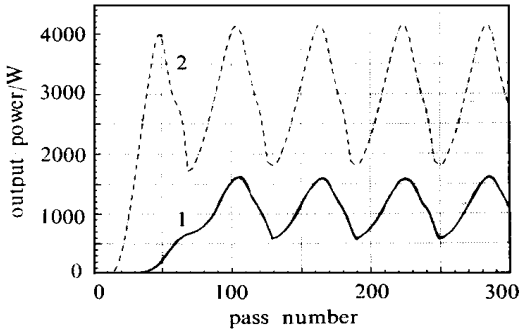


Fig 3 Time jitter effect on the FEL with half electron pulse length ( $\alpha = 22$  ps)  
1. current  $I = 40A$ ; 2 current  $I = 80A$ .

图3 电子束微脉冲长度减半时 ( $\alpha = 22$  ps), 时间晃动对 FEL 的影响

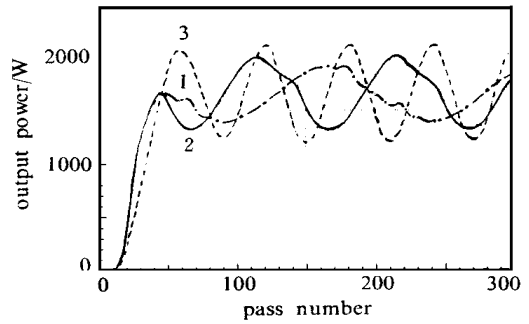


Fig 4 Effects on the FEL of electron energy ripple at different frequenc ( $\delta Y/Y = 0.05\%$ )  
1.  $f = 0.36MHz$ ; 2  $f = 0.5MHz$ ; 3  $f = 0.9MHz$

图4 不同频率的电子束能量波动对 FEL 的影响 ( $\delta Y/Y = 0.05\%$ )

率波动情况. 由图4可见, 频率低的能量波动比高的对 FEL 的影响小一些. 若增大电子束能量波动幅度到0.5%, 我们发现不同频率的能量波动的影响效果差异较大. 当波动频率高于0.36MHz时, FEL 不能起振. 在0.36MHz的结果(如图5)下, 光功率波动的频率不再像图4那样与电子束能量波动频率一样, 而是它的两倍. 对此结果, 我们认为: 在无电子束能量波动的情况下, 电子束的能量值是在最大小信号增益处, 随着光功率的上升, 增益谱的峰降低并向高能方向移动. 当稳定能量所对应的增益值等于腔中的总损耗时, 即达到饱和状态, 但此时的增益并不是增益曲线上的最大值. 此时, 若降低电子束能量, 必然使光增益小于腔总损耗, 而使光功率下降; 若略增大电子束能量, 则可靠向增益峰, 使光增益大于腔总损耗, 带来光功率的上升. 这是在电子束能量波动幅度不大的情况, 电子束能量波动与光功率波动频率才是一致的. 但若电子束能量波动太大, 在 高能方向跨过了增益峰而后再进入到低于腔总损耗以下的区间, 则也会出现光功率下降, 即发生倍周期的光功率波动. 另外, 在电子束能量波动太大, 小信号增益不大而腔损较大的情况下, 太快的能量波动使光在小信号增长时间内, 进入吸收和增益的状态的时间相当, 不能将光放大到足够高的强度, 因而不能起振.

在不同腔失谐状态下, 电子束能量波动对 FEL 的影响大小也不一样. 如图6所示, 这是在电子束能量波动的幅度为0.05%, 频率为0.9MHz的情况. 此时, 在腔长失谐为 $50\mu m$ 时, 光功率波动为16%, 而失谐为 $400\mu m$ 时, 波动为27%, 即相同电子束能量波动, 对 FEL 的影响随腔失谐长度的增加而增大, 这与电子束时间晃动的影响时的规律一致. 另外, 若增加电子束能量波动幅度一倍, 光功率波动的幅度也增加近一倍. 这种规律只在晃动较小时存在, 因为增益谱有峰, 随能量波动幅度的增加, 最终存在光功率波动幅度的上限.

电子束能量波动不仅引起光功率的波动, 还带来光谱中心的晃动. 如图7所示, 图中虚线是

在电子束能量波动幅度为0.05%、频率为0.9MHz时的结果,谱中心晃动不大,小于微脉冲自身的谱宽的2%。若增大电子束能量波动幅度至0.5%,在频率为0.36MHz时,谱中心波动较大,如图7中实线中所示,是微脉冲谱宽的五倍。

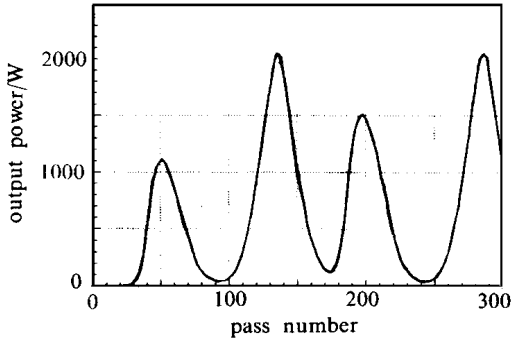


Fig 5 Effect of electron energy ripple with large amplitude on the FEL ( $\delta\gamma/\gamma = 0.5\%$ ,  $f = 0.36\text{MHz}$ )

图5 大的电子束能量波动对 FEL 的影响

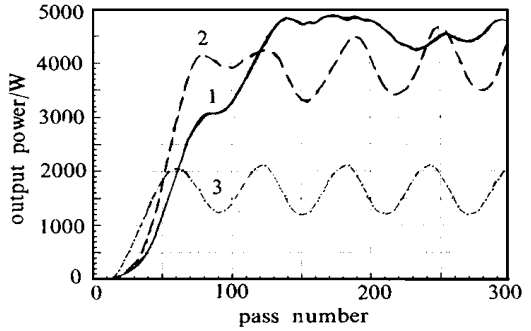


Fig 6 Energy ripple effect on the FEL at different cavity detuning lengths ( $\delta\gamma/\gamma = 0.05\%$ ,  $f = 0.9\text{MHz}$ )

1.  $\Delta L = -20\mu\text{m}$ ; 2.  $\Delta L = -50\mu\text{m}$ ; 3.  $\Delta L = -400\mu\text{m}$

图6 不同腔失谐时,电子束能量波动对 FEL 的影响

### 3 结束语

加速器噪声带来的电子束微脉冲时间晃动和能量波动,会使自由电子激光振荡器产生光功率和光谱中心的波动。通过模拟研究发现,对于时间晃动,除了要尽量减小晃动幅度外,避免低频晃动十分重要;而对于电子束能量波动,则必须控制其波动幅度,使之远小于0.5%,才能保证我们的 FEL 起振。在计算中,还没有考虑束流输运线上的能量狭缝的作用,加上它后,能量波动还会使电流大为下降。因此,稳定微脉冲能量,对这台 FEL 的成功运行尤为重要。模拟结果还表明,除了束流不稳定的幅度大小、频率高低对光的稳定性有直接影响外,光腔的失谐状态也是一个重要因素。在使饱和光功率最大的腔失谐下,加速器噪声对 FEL 的影响较小。

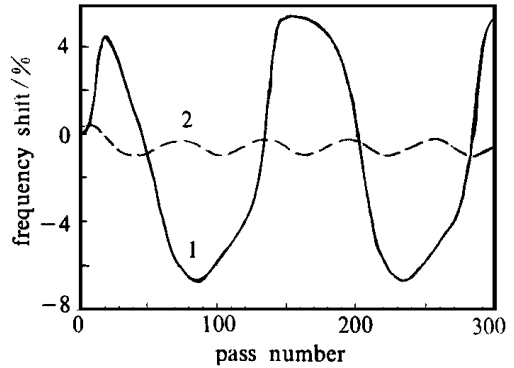


Fig 7 Shift of the laser spectral center due to electron energy ripple,

1.  $\delta\gamma/\gamma = 0.5\%$ ; 2.  $\delta\gamma/\gamma = 0.05\%$

图7 电子束能量波动所引起的光谱中心移动

### 参考文献

- 1 惠钟锡 强激光与粒子束, 1994, 6(1): 136
- 2 Lynch M L, Warren R W, et al *IEEE J. Quantum Electronics*, 1985, QE-21: 904-908
- 3 Kim K J, Byrns R, et al *Nucl Instr. & Meth in Phys Res* 1994, A341: 280-284
- 4 Kim K J, Xie M. *Nucl Instr. & Meth in Phys Res*, 1991, A304: 146-154
- 5 Yang Tianlu Zhou, Wenzhen, Fu Shinian et al *Nucl Instr. & Meth in Phys Res* 1996, A375: ABS77
- 6 Fu Shinian, Chen Yinbao, Yang Tianlu et al Proc of 1994 Int Linac conf (T sukuba, Japan) Ang 1994, 511-513
- 7 Colson W B and Ride S K. *Physics of Quantum Electronics*, 1980, 7: 377
- 8 Pinkley W R, Wilkenson W, et al *Nucl Instr. & Meth in Phys Res*, 1994, A341: ABS70

9 Dattoli G, Hem sen T & Jaroszynski D. *N ucl Instr & M eth in Phys Res*, 1990, **A296**: 316

## **SMULATION STUDY ON THE ACCELERATOR NOISE EFFECTS ON THE FAR- INFRARED FEL OSC LLATOR**

Fu Shinian, Chen Yinbao, and Huang Zhibin

(*China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275 (17), Beijing 102413*)

It is well known that the performance of an FEL oscillator has a strong dependence on the electron pulse stability during a macropulse. At CIAE a far-infrared FEL oscillator is now under construction. It is necessary to understand the role of the accelerator noise in the FEL. 1-D pulse propagation model is adopted to study the effects of the noises, including micropulse time jitters and energy ripple. The influence of time jitters at different frequencies are shown in Fig. 1. And we also study the effect at different cavity detuning lengths, as given in Fig. 2. It is found the laser power is very much dependent on the energy ripple, as shown in Fig. 4 and Fig. 5, which depict the effects of the noise at different frequency and amplitude. In fact, the energy ripple not only fluctuates the laser power, but also undulates the spectrum center of the laser as shown in Fig. 7. It can be drawn out from the simulations that the frequency of time jitters plays an important role in the laser power instability, while the amplitude of energy ripples is of significance in the fluctuation of laser power and spectrum. This work provides us some margins of our accelerator noise, which will be controlled in the machine construction.