

北京大学 SASE FEL 的参数优化研究*

丁原涛¹⁾ 黄森林 赵夔 全胜文 向蓉 王宇刚 陈佳洱

(北京大学物理学院重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 SASE FEL 是获得短波长 X 射线激光的最佳途径, SASE FEL 的理论和实验研究是当前 FEL 研究的热点. 本文利用北京大学超导加速器装置提供的电子束, 通过解析理论和 3D 模型的数值模拟方法得到了实现 SASE FEL 的扭摆器的优化参数, 并讨论了电子束的束流品质参数对 SASE FEL 的饱和长度和功率的影响, 对加速器的设计和调试有重要的参考意义.

关键词 SASE FEL 饱和长度 外聚焦平面扭摆器 增益长度

1 引言

从 20 世纪 80 年代开始自由电子激光的研究得到了全面展开, 自由电子激光能够覆盖全部的电磁波谱, 其波长连续可调, 可以获得高亮度、皮秒到飞秒量级的超短激光脉冲, 在生物、材料、物理、化学等领域具有广阔的应用前景^[1]. 目前, FEL 主要有两个发展方向, 高平均功率 FEL 和短波长 FEL. 高平均功率 FEL 的目标是提供波长范围从红外到紫外、平均功率达到几千瓦至几十千瓦的相干光源, 其最理想的工作模式为由超导直线加速器(SRF)驱动的行波腔式 FEL, 存在的主要物理和技术问题是强流电子束的不稳定性和提高速调管功率源的平均功率等^[2]. 这种行波腔式 FEL 向短波长发展则遇到了困难, 由于在真空紫外到 X 波段的 FEL 缺乏高反射率的端镜使得光腔内的损失很大, 不能获得足够有效的增益. 自放大自发辐射(SASE)的工作模式克服了短波长 FEL 的上述困难, 在 SASE 模式下, 电子一次通过超长扭摆器, 由开始阶段产生的自发辐射信号与电子束相互作用得到放大, 并逐步发展使辐射沿扭摆器呈指数增益, 直到达到饱和, 其代价是高品质的电子束和高精度超长扭摆器^[3]. 光阴极微波电子枪的发展极大的提高了电子束品质, 成为驱动 SASE

FEL 的首选电子源. 到目前为止, SASE FEL 是实现波长连续可调的 X 射线激光的最佳途径, 许多实验室都在不同的波段上研究 SASE FEL 的物理和技术^[4]. 北京大学超导加速器装置(PKU-SCAF)采用光阴极超导注入器和超导主加速器结合, 可以产生 40MeV 的强流、高亮度电子束, 将为进行 SASE FEL 物理和技术问题的研究提供很好的实验平台^[5].

本文利用北京大学超导加速器提供的电子束进行了红外 SASE FEL 实验装置的参数优化研究. 图 1 为北京大学 SASE FEL 实验装置示意图, 超导注入器和超导主加速器产生 40MeV 高亮度电子束, 经磁压缩后进入扭摆器, 在周期性磁场的作用下, 电子束与其自发辐射相互作用, 辐射光场呈指数增益直到产生饱和 FEL.

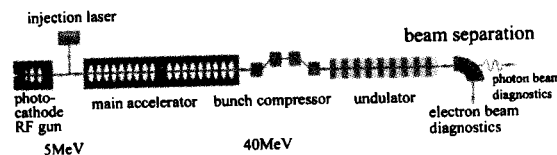


图 1 北京大学 SASE FEL 实验装置示意图

2 SASE FEL 的理论模型

当相对论电子束沿扭摆器运动时, 在扭摆器磁

2003-08-22 收稿, 2003-10-17 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2002CB713601)资助

1) E-mail: dingy tao@yahoo.com

场的作用下,电子束在水平方向做周期性的横向扭摆运动.当电子的能量、扭摆器的周期及磁感应强度和光波长之间满足一定条件的时候,电子和辐射光之间的能量交换不会互相抵消,这种共振条件可表示为

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K_w^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right), \quad (1)$$

$K_w = 0.934 B_w [T] \lambda_w [cm]$, λ, λ_w, B_w 分别为共振辐射波长、扭摆器的周期和峰值磁感应强度, θ 为观测角.通过电子束在扭摆器里的振荡,电子束与其产生的自发辐射相互作用,使得电子能量沿轴向以光波长为周期受到调制,形成电子束的群聚.每个群聚的小束团内的电子主要集中在光波长内比较窄的相区间内.这样,辐射具有一定相干性,其强度要比自发辐射高很多.被增强的辐射光电磁场又会反过来进一步加剧电子束团密度的轴向群聚,电子束的群聚越来越强,相干性也越来越好,于是光场的强度将沿轴向呈指数型增长直到饱和,形成 SASE FEL.

高增益 FEL 的理论分析一般是通过耦合的 Maxwell-Vlasov 方程来研究, Kim^[6], Yu^[7], Chin^[8] 和 Xie^[9] 等人分别用不同的方法研究了方程的求解.描述 SASE 的性能,可以先从最简单的一维模型分析.一维模型假设了一种理想的情况:电子束具有不变的横向空间分布,发射度和能散度均为零,电子束团相对辐射波长非常大,不存在短脉冲效应.一维模型下,

$$L_{1d} = \lambda_w / 4\pi\sqrt{3}\rho, \quad L_{sat} = L_{1d} \ln(P_{sat} / \alpha P_n),$$

$$P_n \approx \rho^2 c E_0 / \lambda, \quad P_{sat} \approx \rho P_{beam}, \quad (2)$$

其中 $L_{1d}, L_{sat}, P_n, P_{sat}$ 分别为一维模型下的增益长度、饱和长度、噪音功率和饱和功率, ρ 为皮尔斯参数: $\rho = [(I/I_A) \cdot (\lambda_w A_w / 2\pi\sigma_x)^2 \cdot (1/2\gamma_0^3)]^{1/3}$, $I_A = 17.045 kA$, 称为 Alfvén 电流;对于平面扭摆器, $A_w = a_w [J_0(\xi) - J_1(\xi)]$, J_0, J_1 是 Bessel 函数 $\xi = a_w^2 / 2(1 + a_w^2)$, σ_x 为电子束 RMS 半径, $\alpha = 1/9$.

对于实际的电子束,当考虑电子束的发射度和能散以及辐射光的衍射时,可以对一维模型进行修正.通过理论分析及三维数值计算得到增益长度对一维模型和三维模型的比例关系为^[7-9]

$$\frac{L_{1d}}{L_g} = F(\eta_d, \eta_e, \eta_\gamma), \quad (3)$$

其中 $\eta_d, \eta_e, \eta_\gamma$ 分别反应了衍射损耗、电子束发射度、能散等因素对自由电子激光增益长度的影响.

(3)式中的比例关系可以通过联立求解 Max-

well-Vlasov 方程组得出. Xie 通过数值拟合的方法求解给出了这一比例关系^[9]:

$$\frac{L_{1d}}{L_g} = \frac{1}{1 + \eta}, \quad (4)$$

式中 $\eta = a_1 \eta_d^2 + a_3 \eta_e^4 + a_5 \eta_\gamma^6 + a_7 \eta_e^8 \eta_\gamma^8 + a_{10} \eta_d^{11} \eta_\gamma^{12} + a_{13} \eta_d^{14} \eta_e^{15} + a_{16} \eta_d^{17} \eta_e^{18} \eta_\gamma^{19}$, a_1, a_2, \dots, a_{19} 为拟合参数,如表 1 所示.

表 1

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
0.45	0.57	0.55	1.60	3.00	2.00	0.35	2.90	2.40	51.0
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	
0.95	3.00	5.40	0.70	1.90	1140	2.20	2.90	3.20	

由(4)式可以看出, $F(\eta_d, \eta_e, \eta_\gamma)$ 取最大值时, $L_{1d}/L_g = F(0, 0, 0) = 1$. 此时的 L_g 对应一维模型下的最短增益长度, $\eta_d = \eta_e = \eta_\gamma = 0$ 对应一维模型的假设:不考虑衍射损耗,电子能散和发射度均为零.

相应地,也可以在三维分析里定义 $\tilde{\rho} = \frac{\rho}{1 + \eta}$, 这样,大部分一维的分析结果可以通过简单的替换 (ρ, L_{1d}) \rightarrow ($\tilde{\rho}, L_g$), 过渡到三维来.

3 外聚焦平面扭摆器的参数优化

设计扭摆器时,希望获得最短的饱和长度.利用上面的 3D 理论模型和 Xie 的拟合公式(4),可以计算得到产生一定波长的 FEL 时,饱和长度、电子束能量与扭摆器参数的关系.图 2 为获得波长为 $7\mu m$ 的 SASE FEL 时饱和长度 L_{sat} 对 λ_w 和 K 的等高线图,计算时其他参数为电子束峰值流强 200A, RMS 发射度 $5 mm \cdot mrad$, RMS 能散 80 keV, 最优的 β

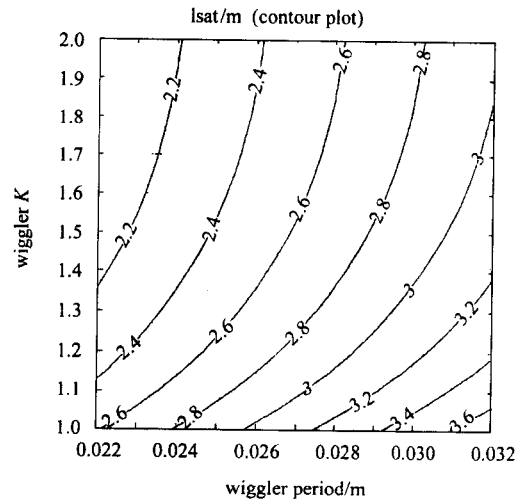


图 2 饱和长度与扭摆器周期和磁场参数的关系

函数. 从图 2 可以看到, λ_w 越小, K 越大时, 饱和长度越小. 但在选择扭摆器参数时, 要考虑实际因素的限制^[10]. 我们采用混合型平面扭摆器, 对于混合型 Nd-Fe-B 扭摆器, K 和 λ_w 与扭摆器间隙 g 的关系可以表达为 $K = 3.2\lambda_w [\text{cm}] \exp[-5.08g/\lambda_w + 1.54(g/\lambda_w)^2]$. 这里主要考虑 2 个限制因素: 一是扭摆器间隙 g , 它限制了束流管道的尺寸, 间隙太小会带来较强的尾场效应; 另一个是电子束能量和辐射波长. 根据 PKU-SCAF 的加速器能量和扭摆器结构要求, 我们选择 $K = 1.5$, $\lambda_w = 2.7\text{cm}$, 在该参数下最优平均 β 函数为 5.7cm , 但这需要非常高的聚焦梯度场, 技术难度很大. 图 3 给出了在该选定的扭摆器参数下饱和长度和饱和功率随平均 β 函数的变化. 聚焦方案采用带有四极透镜的多功能扭摆器(图 4), 目前这种结构的最大场梯度一般不超过 19T/m ^[11]. 考虑到平面扭摆器在 y 方向具有自然聚焦力, 通过优化计算, 采用的 FODO 结构参数为: x 方向聚焦场梯度为 17T/m , 散焦场梯度为 14T/m , 聚焦段、散焦段和漂移段均为 2 个周期长度. 通过数值模拟电子束在这种聚焦结构的平面扭摆器里的运动, 得到在扭摆器的外聚焦和自然聚焦力的共同作用下, x 方向和 y 方向的平均 β 函数基本相同, 大约为 26cm .

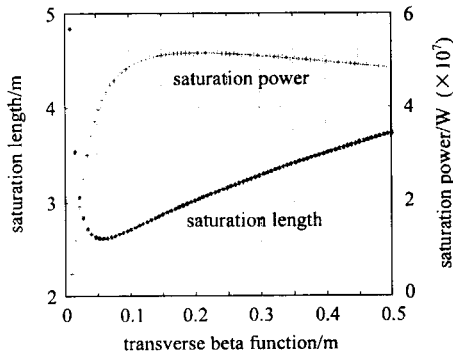


图 3 饱和长度、饱和功率与 beta 函数的关系

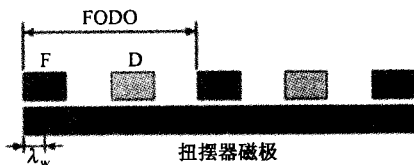


图 4 扭摆器聚焦方案示意图

4 电子束品质的影响

确定了扭摆器参数后, 根据 PKU-SCAF 电子束

的参数, 可以利用 SASE FEL 的 1D 和 3D 模型来分析北京大学 SASE FEL 的物理过程. 本文同时采用解析方法和数值模拟程序 GENESIS 研究了 FEL 的增益. GENESIS 程序是目前模拟 SASE FEL 最常用的程序之一, 分为稳态运行模式和时间关联运行模式^[12]. 稳态模式假设电子束团和辐射脉冲无限长, 不考虑短脉冲效应. 时间关联模式考虑辐射脉冲的滑移, 可以得到有限长度束团对饱和的影响. 表 2 列出了计算时采用的电子束、扭摆器的基本参数及采用 Xie 的 3D 模型拟合公式(4)得到的 FEL 饱和长度和饱和功率, 图 5 为在该电子束和扭摆器参数下由 GENESIS 稳态模式得到的 FEL 功率的增益曲线. 可见两种方法得到的饱和功率和饱和长度是一致的.

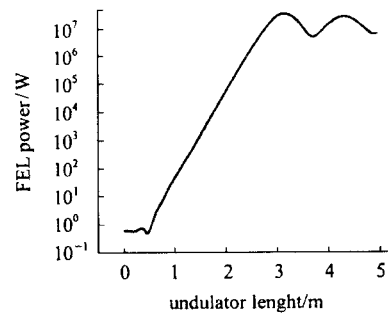


图 5 SASE FEL 的功率增益曲线

表 2 PKU-FEL 系统的基本参数

电子束	
能量	32.7MeV
峰值流强	> 200A
RMS 发射度	5mm·mrad
RMS 能散	80keV
扭摆器	
周期长度	27mm
磁场参数 K	1.5
平均 β 函数	25cm
周期数	186
FEL	
波长	7 μm
饱和长度	3.16m
饱和功率	51.4MW

电子束的束流品质对 FEL 的饱和长度和饱和功率有很大的影响. 利用表 2 的基本参数, 在一定范围内改变电子束能散、峰值流强和发射度, 通过 Xie 的 3D 模型拟合公式(4)和 GENESIS 程序稳态运行模式分别对 FEL 的饱和长度进行了研究. 图 6(a), (b), (c)分别是能散、峰值流强、发射度在设计值附近变化时对饱和长度的影响(当电子束一个参

数变化时,其他参数采用表 2 所列的值)。可见,解析方法和 GENESIS 模拟的结果是一致的,增大束流峰值流强、降低发射度可以明显的减小饱和长度。

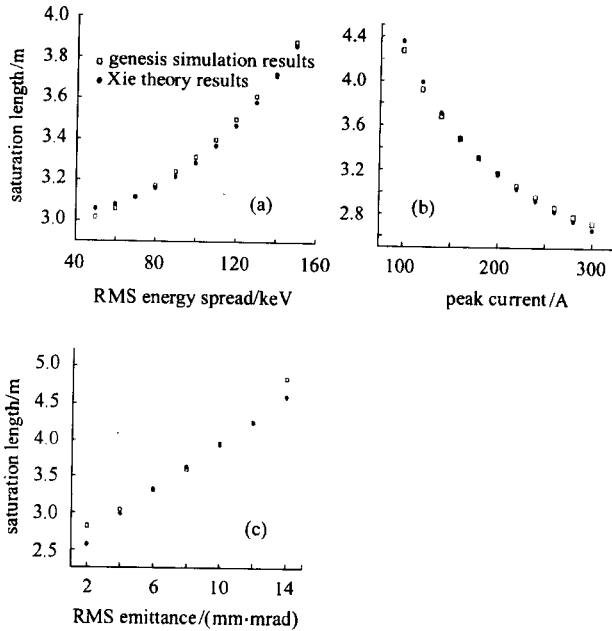


图 6 电子束能散(a)、峰值电流(b)、发射度(c)对饱和长度的影响

5 考虑短脉冲效应时对饱和长度的修正

前面已经指出,上面的计算是在假设束团长度无限长,忽略了束团的短脉冲效应条件下得到的。对于短波长 FEL,由于波长在真空紫外到 X 射线波段,在目前超短电子束团产生技术范围内(几十 fs),短脉冲效应一般可以忽略,前面的讨论结果是合理的。但在红外波段,由于 FEL 波长较大,就要考虑对前面计算结果的修正^[13]。引入协作长度 l_c 讨论短脉冲效应,协作长度表征了纵向相干长度的大小,其定义为 $l_c = \lambda/2\bar{\rho}$ 。对于非常短的束团 ($\sigma_z \leq \frac{l_c}{2}$),辐

射脉冲只会出现一个时间尖峰。由于辐射脉冲相对电子束的滑移,辐射脉冲会较快的脱离与电子束的相互作用区。在这种极限情况下,会导致饱和功率的下降,可以用一个滑移因子来表征这种影响^[13], $K_s \equiv \sqrt{2\sigma_z/l_c} \leq 1$ 。随机出现的时间尖峰其重要的特点是会带来 SASE 强度的波动起伏。对于短束团的情况,饱和长度的起伏会有几个增益长度的大小。按照 PKU-SCAF 的设计,电子束团经磁压缩进入扭摆器时,束团半高宽(FWHM)为 1ps,则 $K_s \approx 0.8$ 。因此,前面得到的饱和长度按照该因子修正,大约为 4m;也可提高光阴极注入器单束团的电荷量,就可以在保持束团峰值电流不变的条件下,减小磁压缩的比例,延长束团长度,从而减小辐射的短脉冲效应的影响。前面的计算是假定理想扭摆器展开的,考虑到实际扭摆器的加工安装误差和电子束参数的影响,表 2 采用的扭摆器长度为 5m,这样可以适当降低电子束品质和扭摆器精度的要求,并有足够的空间来研究 FEL 饱和以后的物理过程,保证 FEL 实验的进行。

6 结论

根据 SASE FEL 的理论模型,通过解析方法和数值模拟程序,得到了优化的扭摆器参数和聚焦结构,并讨论了电子束参数对 FEL 的饱和长度和功率的影响,解析方法和数值模拟的结果是一致的。扭摆器磁场和聚焦磁铁的误差研究及精度要求将在今后的工作中展开。优化计算的结果和束流参数的影响对于扭摆器的设计和 PKU-SCAF 的设计调试具有重要的意义。

在本工作优化设计中,得到了 LBL 实验室谢明博士和 BFEL 庄杰佳研究员的指导和建议,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 1 O'Shea P G, Freund H P. *Science*, 2001, **292**: 1853—1858
- 2 Neil G R, Merminga L. *Rev. Modern Phys.*, 2002, **74**: 685—701
- 3 HUANG Zhi-Rong, Kim K J. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.*, 2001, **A475**: 59—64
- 4 Colson W B. *Nucl. Instrum Methods in Phys. Res.*, 1999, **A429**: 37—40
- 5 ZHAO Kui et al. *Nucl. Instrum Methods in Phys. Res.*, 2002, **A483**: 125—128
- 6 Kim K J. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**: 1871
- 7 YU L H, Krinsky S, Gluckstern R L. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**: 3011—3014
- 8 Chin Y, Kim K J, XIE M. *Phys. Rev.*, 1992, **A46**: 6662—6683
- 9 XIE Ming. *Nucl. Instrum Methods in Phys. Res.*, 2000, **A445**: 59—66
- 10 Plufger J. *Nucl. Instrum Methods in Phys. Res.*, 2000, **A445**: 366—372
- 11 Nikitina Y M, Plufger J. *Nucl. Instrum Methods in Phys. Res.*, 1996, **A375**: 325—328
- 12 Biedrou S G et al. *Particle Accelerator Conference*, 1999, **4**: 2486—2488
- 13 Bonifacio R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**: 70—73

Study on Optimization of PKU SASE FEL *

DING Yuan-Tao¹⁾ HUANG Sen-Lin ZHAO Kui QUAN Sheng-Wen XIANG Rong
WANG Yu-Gang CHEN Jia-Er

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract We present the layout of Peking University SASE FEL facility (PKU-FEL) to be driven by a superconducting accelerator currently under construction. PKU-FEL is a test facility to study the physical and technical issues of single pass SASE FEL. The study of theoretical model and numerical simulation for the design of PKU-FEL is described. Optimized hybrid planar undulator parameter are got in this paper. The influences of electron beam properties including peak current, emittance, energy spread and pulse duration are discussed. With the optimized parameter, PKU FEL is designed to get saturation at 7 micron with a 5-meter long hybrid undulator.

Key words SASE FEL, saturation length, combined focusing planar undulator, gain length