

文章编号: 1001-3806(2003)02-0088-02

## 一种 SASE-FEL 用摇摆器机制探讨

刘圣广 李永贵

(中国科学院高能物理研究所,北京,100080)

**摘要:** 利用带电粒子在均匀等离子体中传播时,在其后激发的尾波场作为自发辐射自放大自由电子激光(SASE-FEL)的摇摆器,称为尾波摇摆器。分析了此摇摆器在工作机制及其相应的周期、场强度,根据 SASE-FEL 理论计算了其增益长度  $L_g$ ,并和 APS 的 SASE 实验参数作了比较。

**关键词:** 自发辐射自放大;摇摆器;尾波;增益长度

中图分类号: O432.1<sup>+</sup>2 文献标识码: A

### A wiggler mechanism for SASE-FEL

Liu Shengguang, Li Yonggui

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing, 100080)

**Abstract:** The wake field is stimulated when a slice electron bunch transfers in the homogeneous plasma, and it transfers forward after the bunch. The wake field can be used to be the wiggler for SASE-FEL. The wiggler mechanism is analyzed and its space period, field intensity and the gain length are calculated. Based on SASE theory, this kind of wiggler is compared with APS wiggler. The result shows that the wake field wiggler is superior to the normal wiggler used currently.

**Key words:** self amplified spontaneous emission (SASE); wiggler; wake field; gain length

## 引 言

获得短波长、高亮度激光输出,填补常规激光的空白谱区一直是自由电子激光的一个重要的发展方向。由于找不到在 X 射线范围高反材料作谐振腔镜,一条新的技术路线成为研究热点, SASE (self amplified spontaneous emission) 自由电子激光,被人们称为第 4 代光源<sup>[1]</sup>。SASE 对电子束品质提出了近乎苛刻的要求, GeV 量级的电子束能量, kA 量级的峰值电流, 大约  $(1 \sim 1.5) \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  的归一化发射度。对摇摆器的要求也是空前的,高精度、高增益、超长度, LCLS 为其 SASE 设计的摇摆器长度近百米。高的电子束能量意味着更大的加速器、更高的造价;摇摆器的高的磁场强度是实现高增益的有效途径。但是,正在运行的大多数自由电子激光装置的摇摆器均是静磁摇摆器,其空间周期  $\lambda_w$  是确定的,运行过程中不可调,并且受加工工艺限制,  $\lambda_w$  不可能很小,磁场强度也是有限的。文中讨论了一

种利用等离子体静电波场<sup>[2]</sup>作为摇摆器的设想。空间周期  $\lambda_w$  很小 ( $30 \mu\text{m}$ ), 由公式  $\lambda_s = \lambda_w (1 + K^2) / 2\gamma^2$  可知,有利于实现短波输出;强度大 (相应的  $B = 3 \times 10^2 \text{T}$ ), 有利于实现高增益;且调节灵活、方便。

## 1 等离子体尾波场

极短的脉冲式电子束射入均匀等离子体中,由于束与等离子体的相互作用,电子束的动能通过其内部的负能量波耦合给等离子体中的静电波,因而在电子束后就会激起场强很高的静电波场。如果脉冲式电子束是薄片状,那么其后

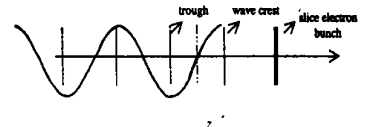


Fig. 1 The wake field after the slice electron bunch

所激起的静电波场可形象地表示在图 1 中。

静电波场沿  $y$  轴以  $\vec{V}$  传播,可表示为:

$$\vec{E} = E_p e^{-i(k_p \cdot y - \omega_p \cdot t)} \vec{e}_y \quad (1)$$

式中,  $E_p$  为电场的振幅,  $k_p$  为静电波波数,  $\omega_p$  为等离子体频率,有:

$$\omega_p = \left( \frac{4\pi n_0 e^2}{m_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $n_0$  为等离子体密度,  $m_0$  为电子质量。

作者简介:刘圣广,男,1968 年出生。博士。从事加速器、自由电子激光的理论和实验研究工作。

收稿日期:2002-01-30;收到修改稿日期:2002-08-16

### 2 摇摆器工作原理

现在将相对论电子束沿  $z'$  方向注入尾波场中, 因为对于  $z'$  轴  $y$  是确定的, 所以相对论性电子束所感受的电场可写为:  $\vec{E} = E_p \sin(\omega_p t) \vec{e}_y$  (3)

注入尾波场的电子在场力作用下, 做摇摆运动, 图 2 可以形象地表示这种摆动, 图 2a 中, 相对论性电子在场力作用下向右偏转。当相对论性电子向  $z'$  方向运动距离  $\pi c/\omega_p$  时, 沿  $y$  传播的等离子体尾波也恰好沿  $y$  运动了  $\pi c/\omega_p$  距离, 因而作用在电子上的电场改变方向, 电子向左偏转, 如图 2b, 电子向前运动  $\pi c/\omega_p$ , 尾波场又沿  $y$  传播了  $\pi c/\omega_p$  距离, 作用在电子上的电场再次改变方向, 电子又向右偏转, 如图 2c。如此往复, 电子将沿  $z'$  轴方向摇摆运动。

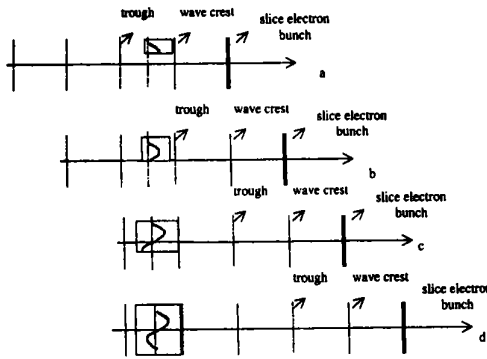


Fig. 2 Electron motion in the wake field

### 3 摇摆器参数

由上述分析可推知, 尾波场摇摆器的周期:

$$\lambda_w = 2\pi c/\omega_p \quad (4)$$

将(2)式代入(4)式, 并将  $e, m_0$  数值代入, 可得:

$$\lambda_w = 3 \times 10^6 / \sqrt{n_0} (\text{cm}^{-3}) \quad (5)$$

现在的技术条件可以使得  $n_0$  在  $10^{13} \text{cm}^{-3} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$  取值, 所以  $\lambda_w$  最小可以取得  $30 \mu\text{m}$ , 和常规的静磁摇摆器  $\lambda_w = 3 \text{cm}$  相比, 缩短了 3 个量级。

当  $n_0 = 10^{18} \text{cm}^{-3}$  时, 容易换算出对应的场强度:

$$B = 3 \times 10^2 \text{T} \quad (6)$$

相应的调制系数:

$$K = 0.934 \times 30 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^2 = 0.8406 \quad (7)$$

如此短的摇摆周期  $\lambda_w$ , 如此高的场强, 对常规的静磁摇摆器, 是远远达不到的。

### 4 SASE 增益讨论

相对论性电子束团注入摇摆器, 在摇摆场作用下, 做摇摆运动, 自发辐射出电磁波。电子束在摇摆场和辐射电磁波的共同作用下群聚, 并产生相干的受激辐射。此辐射电磁波作为种子, 诱发电子束进一步放出能量, 电磁波得到放大、直至饱和输出。在摇摆器中, 辐射能量为:

$$P_{\text{laser}} = \begin{cases} P_{\text{spont}} \propto z^2, z \ll L_g \\ P_0 e^{z/L_g}/9, z \gg L_g \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_0$  为摇摆器中  $2L_g$  处辐射光强度,  $L_g$  被称为增益长度, 见图 3。由分析可知, 增益长度  $L_g$  是表示 SASE 增益的一个重要参数。每经过  $L_g$ , 光能量将增加  $e$  倍。

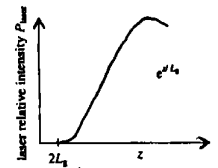


Fig. 3 The laser intensity vs  $z$  (in wiggler)

由文献知道:

$$L_g = \lambda_w / (4\pi\sqrt{3}\rho) \quad (9)$$

$$\text{式中, } \rho = \left( \frac{j_0 K^2 A_{JJ}^2 \lambda_w^2}{32\pi I_A \gamma^3} \right)^{1/3} \text{ 或 } \rho^3 \propto \frac{j_0 K^2 \lambda_w^2}{\gamma^3} \quad (10)$$

下面将此种 wiggler 与 APS-LEUTL 的 wiggler 做一比较(增益长度  $L_g$  是在相同的激光波长输出条件下), 见表 1。

Table 1 The parameters of two wigglers

	APS-LEUTL wiggler parameter	SASE wiggler parameter
wiggler period $\lambda_w/\text{cm}$	3.3	$3 \times 10^{-3}$
magnetic intensity $B/\text{T}$	0.84	$3 \times 10^2$
modulated parameter $K$	3.1	0.84
gain length $L_g/\text{m}$	0.206	$5.76 \times 10^{-4}$

等离子体静电波摇摆器, 其空间周期小、调节方便, 电子束能量可以在相对很低的情况下获得极短的激光输出; 增益长度极小, 激光可以在几个厘米达到饱和, 显示出极大的优越性。

### 参 考 文 献

[1] 张令翔, 庄杰佳, 赵 夔. 强激光与粒子束, 2001, 13(1): 51-55.  
 [2] Chen P, Dawson J M, Huff R W *et al.* Phys Rev Lett, 1985, 54(7), 693-696.