

# 集体区自由电子激光器增益特性的研究\*

陆载通 张立芬 赵东焕 王明常 王之江

(中国科学院上海光机所, 201800)

**提要:** 工作在超辐射模式下的集体区自由电子激光器的增益特性研究可以通过改变相互作用区长度及泵浦强度来进行。我们利用偏转磁场可以获得任意的相互作用区长度。实验结果证明, 工作在集体区的自由电子激光的辐射增益随泵浦磁场近似呈 1.7 次方关系, 实验测得的增益系数范围为 0.4 dB/cm 到 1.38 dB/cm。

**关键词:** 自由电子激光, 增长速率

## Study on gain characteristics of a free electron laser operating in the collective regime

*Lu Zaitong, Zhang Lifen, Zhao Donghuan, Wang Mingchang, Wang Zhijiang*  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract:** The gain characteristics of the collective free electron laser operating in a superradiant amplifier have been studied through the variation of the interaction length and pumping magnetic field. We could obtain arbitrary interaction length by means of an axially movable "kicker" magnetic field that deflected the electron beam. The experimental results showed that the radiation gain of collective FEL was approximately 1.7th power of the pumping magnetic field with gain ranging from 0.4 dB/cm to 1.38 dB/cm.

**Key words:** free electron laser, growth rate

### 一、引言

自由电子激光器中给出的波放大的物理过程是由相对论电子束与一个空间周期磁场(即波荡磁场)的相互作用来完成。波荡磁场提供了电子束与电磁辐射场之间的耦合, 形成沿电子束轴的有质动力。工作于集体区的自由电子激光器, 其存在的空间电荷势与以上的有质动力势可以相比较, 因而必须考虑它的参与作用。集体区自由电子激光因此可以被看作由负能的空间电荷波和正能的电磁波通过存在的波荡磁场实现耦合作用。这类自由电子激光器还利用一轴向磁场来导引强流(千安培量级)相对论电子的传输。此外, 轴向磁场的引入还明显地提高辐射的增益。对于这样一个比较复杂的系统, 研究其增益特性与各组成参量之间的关系, 有助于更深入地理解工作于集体区的自由电子激光器的工作机理及其特点。本文仅就自由电子激光器的增益特性与波荡磁场强度和相互作用区长度之间的关系进行讨论。

收稿日期: 1990年1月24日。

\*国家自然科学基金资助项目。

## 二、实验装置

用于增益特性研究工作于集体区的自由电子激光器的实验系统示意图见图 1。

脉冲线加速器提供  $0.4\sim 0.45$  MeV, 近 1 kA 的强电子束流<sup>[1]</sup>, 在 10 kG 左右的引导磁场的作用下, 电子束通过 6 mm 的阳极孔进入内径为 20 mm 的不锈钢漂移管内的相互作用区。在漂移管外壁用右螺旋双绕法绕制波荡场线圈, 脉冲波荡磁场在  $0\sim 2$  kG 的范围内连续可调, 波荡磁场周期为 22 mm, 共 59 个周期。在入口端的 5 个周期是绝热过渡段, 为了避免端磁场扰动的影响, 在端部加接  $\phi 30$  mm、1 mm 厚的回流环。

改变相互作用区长度的方法是在产生引导磁场的螺线管脉冲磁体内部, 安装一偏转铁心, 从而改变了螺线管内部磁场的均匀分布状态, 产生局部的磁场偏转, 这种磁场的局部偏转达到一定程度就可以使被引导的电子束发生严重的偏向而终止于漂移管管壁上由管壁所吸收。移动偏转铁心的位置可以获得任意的相互作用长度。偏转铁心的形状做成半圆环形, 内径 35 mm, 外径 130 mm。它可以沿螺线管内壁移动并被固定在某一位置。

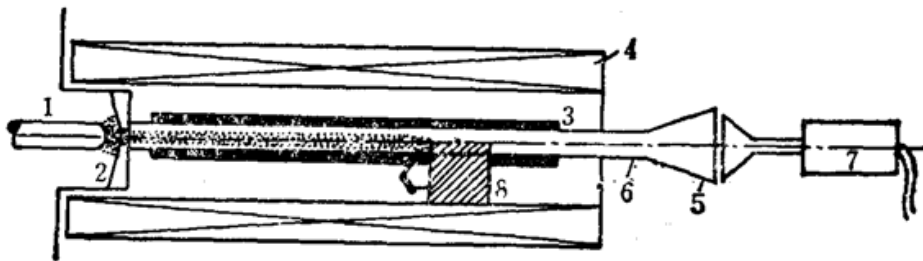


Fig. 1 Configuration of a Raman free electron laser to measure gain characteristics

1-cathode; 2-anode; 3-wiggler magnet; 4-guide magnetic field; 5-microwave horn; 6-drift tube; 7-calorimeter; 8-movable "kicker" magnet

经过相互作用区, 被大大放大的辐射信号在圆波导内传输一定距离以后, 由微波喇叭输出, 由微波接收喇叭接收后经高通滤波器进入能量计测量或由晶体检波器检出, 毫米波时间信号由示波器显示。

## 三、偏转磁场分布测量及相互作用长度的确定

如前所述, 我们是利用偏转铁心插入引导磁场线圈的内部来获得磁场的偏转特性。偏转铁心引入以后, 相互作用区内轴向磁场分布状况可以参阅图 2 给出的轴向磁场的测量结果。这一结果表明, 铁心的引入仅仅对铁心附近局部的相互作用区的磁场强度带来影响。轴向磁场变化到正常值的 90% 处的位置相当于在偏转铁心端面位置前 2 cm 处。为了验证偏转磁场对电子束传输的影响, 同时也为了比较准确地确定相互作用区长度, 在偏转铁心插入的情况下, 我们在轴向的几个位置上用酸敏片测量电子束的截面分布, 由电子束截面靶像位置的移动可以推断电子束的偏转状况。图 3 是三个不同位置上酸敏片的束截面靶像的显示照片。图 3(1) 表示在电子束正常传输条件下, 即偏转铁心无任何影响时得到的束截面靶像, 其对应的测量位置

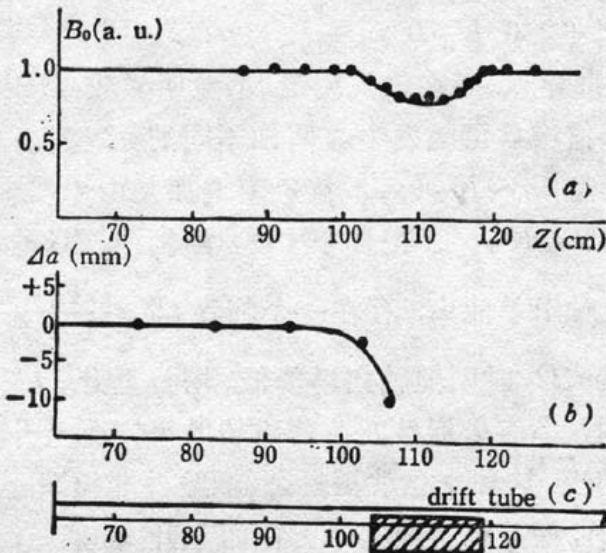


Fig. 2 Axial magnetic field distribution and deflected distance of *e*-beam versus "kicker" magnet position  
(a) axial magnetic field distribution; (b) deflected distances of *e*-beam from central axis; (c) corresponding position of the "kicker" magnet

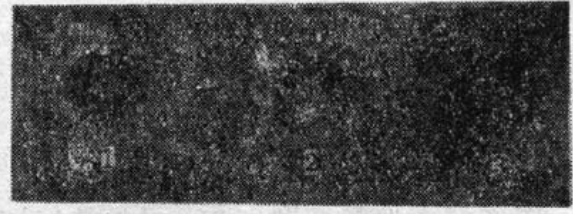


Fig. 3 Photograph of *e*-beam cross-section on witness target  
(1) at 5cm point in front of the "kicker" magnet; (2) at 2cm in front of it; (3) at 5cm behind it

处于铁心端面前 5 cm 处。在偏转铁心端面前 2 cm 处，其电子束截面中心已偏离了正常情况下电子束轴心 2~3 mm (见图 3(2))，而在偏转铁心后端面后的 2 cm 处，酸敏片已不能显示靶像 (图 3(3))，可以推断在此位置前电子束已偏向管壁，对应位置附近的 X 线剂量测量的剧烈上升证明了这一推断。

上述磁场测量和电子束靶像显示的结果表明：由铁心端面位置来确定相互作用区的长度，其不确定性小于  $\pm 2$  cm。

#### 四、辐射的增益特性

自由电子激光的有关理论<sup>[2~4]</sup>讨论了在波荡场和引导场的共同作用下，求解符拉索夫方程和麦克斯韦方程导得增益的结果。

如果泵浦周期比系统的长度短，那么对于频率为  $\omega \simeq (K + K_w)v_f$  的辐射，其在相互作用长度  $L$  上辐射的增益可以写成

$$G_L \simeq \beta_w^2 \frac{\omega_b^2 L^3 K}{16 \gamma_0 \gamma_z^2 v_{11}^2} \left[ 1 - \frac{\gamma_z^2 \beta_w^2 \Omega_0}{\Omega_0 (1 + \beta_w^2) - K_w v_{11}} \right] \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\sin x}{x} \right]^2 \quad (1)$$

(1) 式中， $\omega$ ， $K$  为电磁波的频率和波数； $\omega_b$  为等离子体特征频率， $\omega_b^2 = 4\pi n_b e^2 / m$  ( $n_b$  为电子密度)； $\beta_w = v_{\perp} / v_f$  为电子速度的横向分量与轴向分量之比； $K_w = 2\pi / \lambda_w$ ，其中  $\lambda_w$  为波荡器的周期长度； $\gamma_0$  为相对论因子，其轴向分量  $\gamma_z = (1 - \beta_z^2)^{-1/2}$ ； $v_f$  为电子轴向速度， $x = (\omega / v_f - K - K_w) L / Z$ ；而电子在轴向磁场  $B_0$  中的回旋频率  $\Omega_0 = e B_0 / \gamma m c$ ； $L$  为增益长度。

$G_L$  的极值产生在  $x \simeq \pm 1.3$  处， $\frac{\partial}{\partial x} (\sin x / x)^2 \simeq \mp 0.54$ ，此时增益峰值为

$$(G_L)_{\max} \simeq \pm 0.0675 \beta_w^2 \frac{\omega_b^2}{\gamma_0 K_w^2 \mathcal{O}^2} (K_w L)^3 \left[ 1 - \frac{\gamma_z^2 \beta_w^2 \Omega_0}{\Omega_0 (1 + \beta_w^2) - K_w v_f} \right] \quad (2)$$

对应的频率

$$\omega \approx 2\gamma_z^2 K_w v_f (1 \pm 2.6/K_w L) \quad (3)$$

(2)式表明,当  $K_w v_f \approx \Omega_0(1 + \beta_w^2)$  时,出现奇异点,而在该点附近,增益明显较高,因此加入引导磁场有提高增益的作用。由(3)式可见峰值增益可能发生在两种不同的频率下。

轴向场对增益的影响可以简单地归纳为<sup>[3]</sup>:当  $\Omega_0 \sim K_w v_f$ , 增益急剧增加是由于横向速度  $v_{\perp}$  急剧增加(因为  $v_{\perp} \equiv \Omega_w v_f / \Omega_0 - K_w v_f$ )。当  $\Omega_0 < K_w v_f$ , 工作于 I 支, 随轴向磁场的增加, 增益相应提高; 在  $\Omega_0 > K_w v_f$ , 工作于 II 支, 对于单能束, 存在一个临界  $\Omega'_0 = \frac{K_w v_f}{1 + \beta_w^2}$ , 当  $\Omega_0 > \Omega'_0$  时其增益变化规律与 I 支相似。而当  $\Omega_0 < \Omega'_0$  时则随轴向场降低, 增益上升。

增益与波荡磁场的关系, 当不存在轴向场时, 小信号增益随波荡磁场的平方而上升, 即随  $v_{\perp}$  的平方而上升。然而对于存在引导磁场时的情况, 这种变化就更复杂, 增益并非随  $\Omega_w / K_w \Omega$  单调变化, 在某一条件下, 在较小的横向场参量时, 增益确实随其平方律而上升, 在某一磁场参量下达到峰值, 其后增益迅速下降。

## 五、增益特性实验结果

增益的实验测量可以通过改变相互作用区长度, 在不同的波荡场强度下测量辐射的输出特性来得到。图 4 给出了四种不同的相互作用长度下, 激光辐射随横向磁场强度的变化, 在我们的实验条件下, 横向磁场增加到 1000 G 以上, 明显地显示出输出功率的下降, 电子束的单能性越好, 这种下降就越陡。这种迅速下降的现象可以认为就发生在理论可预言的奇异点附近。固定泵浦强度条件, 实验可以得到输出与相互作用区长度之间的关系(图 5), 由图可见在低泵浦强度下, 随相互作用长度的增加, 输出缓慢进入饱和的过程。而在高泵浦强度下, 显示了较快进入饱和的特性, 其饱和功率的大小在 5~10 MW 的范围内变化。辐射的指数增涨长度在 50 cm 左右, 视不同的泵浦强度而有所区别。出现饱和以后, 随相互作用区长度的增加, 辐射出现波动起伏的变化规律。文献[5]认为这一现象的出现是由于电子在有质动力阱中同步运动时, 位相

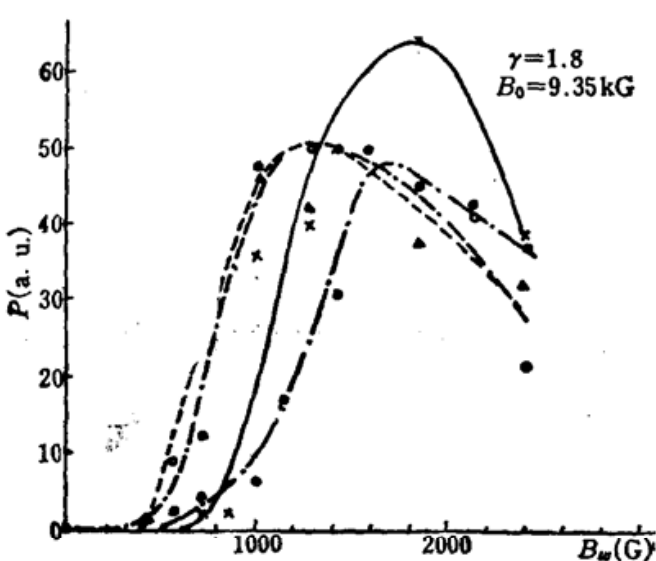


Fig. 4 mm wave radiation power versus wiggler magnetic field at various interaction lengths

x—interaction length  $L=30$  cm; ●— $L=40$  cm;  
○— $L=60$  cm; △— $L=80$  cm

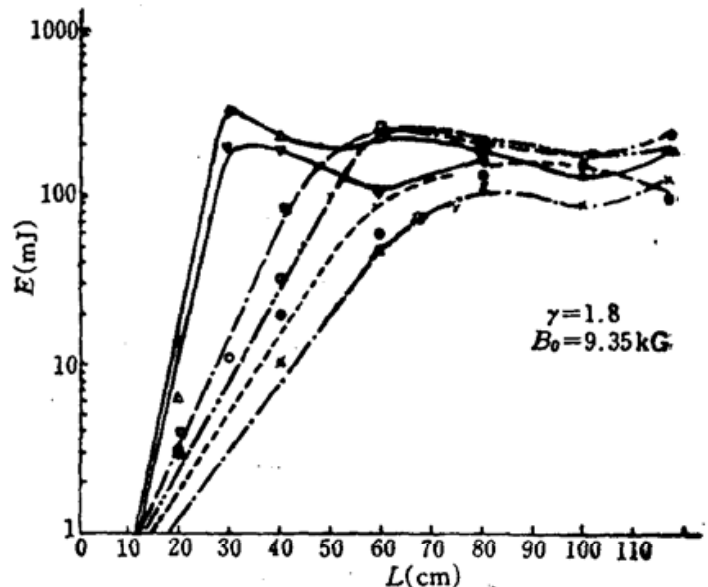


Fig. 5 Interaction on length versus radiation output energy

$B_w$ : x—560 G; ●—700 G; ○—980 G; ■—1260 G;  
△—1.8 kG; ▽—2.3 kG



条件所导致的结果。为了避免过快地进入饱和,提高输出辐射的转换效率,波荡场强度或波荡器周期可以做成渐变型,利用这一方法可以使在运动中失去能量的电子能够继续保持共振条件,电磁波从而也有可能从电子束获取更多的能量,提高其转换效率。

从图 4 中也可见,随相互作用区长度的增加出现峰值功率的横向磁场强度逐渐降低,说明增益的波荡磁场特性。图 6 中给出了辐射增益与波荡磁场之间的实验测定结果,其变化规律显示,当泵浦强度超过某一值后,增益呈下降趋势,与集体区自由电子激光的有关理论相符的。

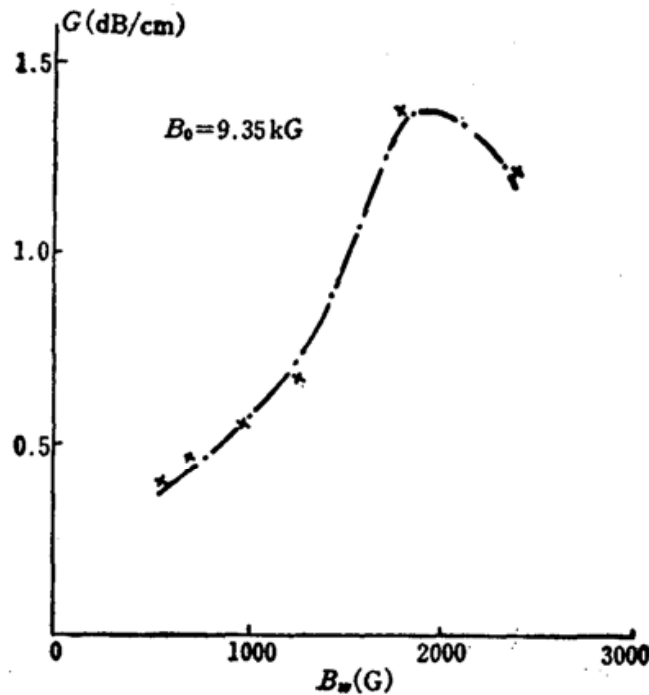


Fig. 6 Growth rate as a function of wiggler magnetic field for  $\gamma \approx 1.8$ ,  $B_0 \approx 9.35$  kG

## 六、结 论

1) 小信号增益长度与泵浦强度的关系表明(见图 5),在低泵浦磁场下,小信号增益长度在 70 cm 左右;而在高泵浦磁场下,其长度约为 30 cm。为了在同样的泵浦强度下增加线性增益区,可以采用渐变型波荡磁场,从而提高电子转换效率。

2) 我们的实验参量满足  $K_w v_l < \Omega_0$  的条件,器件工作于第 II 支,理论分析指出,随  $\Omega_w$  的提高,增益也随之增加,并在某一泵浦条件下出现增益峰,随后增益急剧下降。实验结果证实了这一变化规律。实验是在泵浦场和引导磁场共同作用下进行的,在低泵浦强度下增益随泵浦磁场呈 1.7 次方律上升,与理论预计的平方律稍有差异,峰值增益为 1.38 dB/cm,达到峰值以后增益呈下降趋势,与理论预言基本相符。幕次的微小差别及下降较缓的原因可能与电子束具有一定的能谱宽度有关。

## 参 考 文 献

- 1 陆载通 *et al.*, 光学学报, **9**(9), 780~786(1989)
- 2 H. P. Freund *et al.*, *Phys. Rev. A*, **24**(4), 1965(1981)
- 3 L. Friedland *et al.*, *Phys. Rev. A*, **25**(5), 2693~2706(1982)
- 4 H. P. Freund *et al.*, *Phys. Rev. A*, **26**(4), 2004~2015(1982)
- 5 T. J. Orzechowski *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(17), 2172~2175(1986)