

# 1.19 米相互作用长度的喇曼自由 电子激光器实验

陆载通 张立芬 陈基忠 施瑞根 王之江  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

利用新研制的1.3米双螺线波荡器以及与此相配合的引导场磁体,使自由电子激光相互作用长度从308 mm可以最大增加到1190 mm。总体实验证明,最大的激光辐射峰值功率达12MW 电子转换效率是3.7%。

关键词: 自由电子激光器。

## 一、引 言

具有能量约兆电子伏,低发射度的强流(KA)相对论电子束进行的喇曼自由电子激光器的实验业已证明<sup>[1~3]</sup>,这类激光器可以提供作为高功率、高效率、连续可调谐的毫米波或亚毫米波相干辐射源。因此可以预见,它将在国民经济中乃至军事上开辟其广阔的应用前景。

以前我们曾报道过工作在集体区,超辐射模式的喇曼自由电子激光器的实验结果<sup>[4]</sup>。这些实验工作都是在有效相互作用长度为308 mm的情况下进行的,所获得的激光辐射峰值功率近1 MW,对应的转换效率约1.4%。所进行的测量主要集中在该自由电子激光器的输出特性及其优化工作方面。超辐射模式的自由电子激光器能够得到兆瓦量级甚至更高的功率输出,这也就提出需要研究这种模式下,辐射的初始条件,线性增涨,非线性增涨和饱和效应等问题。具体做法上可以通过改变相互作用区的有效长度,研究由于这一变化对自由电子激光输出辐射的影响。为此,作为第一步我们研制了1.3 m电阻旁路型结构的双螺线波荡器以及与此相应的引导场磁体,从而使得相互作用长度最大可以提高到1.2 m左右。为这一研究工作的开展创造了条件。

## 二、实 验 装 置

加长相互作用区的喇曼自由电子激光器实验装置简图表示在图1中,0.4 MeV, 800 A, 6 mm直径的实心电子束通过20 mm内径的不锈钢漂移管与直接绕制在漂移管外壁上的波荡器线圈所产生的横向波荡磁场在1.19 m有效长度范围内相互作用。实验中利用几种不同的波荡磁场线圈长度与引导磁场的作用长度相结合可以实现几种不同的相互作用区长度(参阅图3)。具有低轴向速度分散度的电子束是由特殊设计的无箔二极管产生的。轴向

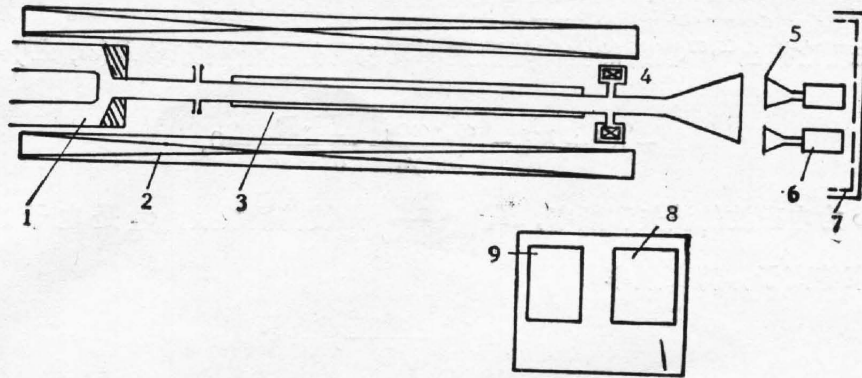
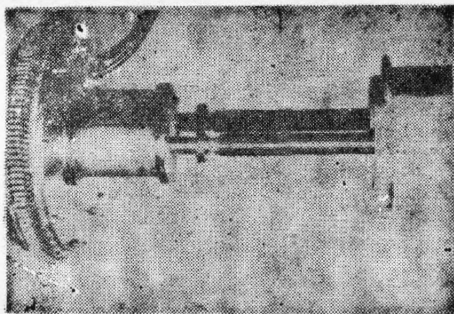


Fig. 1 Experimental setup for interaction length study of a Raman FEL

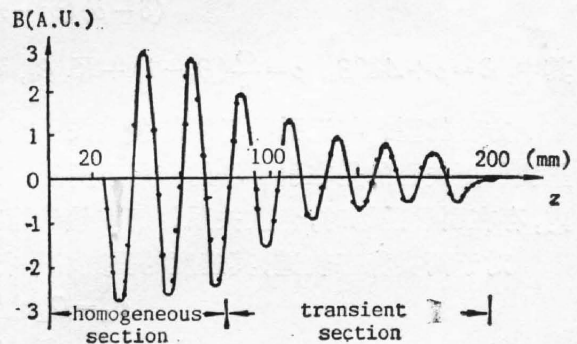
- 1) diode; 2) guide field solenoid with variable intensity 0~20 KG; 3) 1.3 meter length wiggler; 4) current probe; 5) calorimeter; 6) crystal detector, 7) microwave absorber; 8) measurement system for millimeter wave; 9) measurement device for e-beam parameters

引导磁场可以从 0~20 KG 范围内可调, 它的作用是约束电子束并用以提供对波荡磁场的回旋增强作用。

新设计的波荡器 (图 2(a) 照片) 长 1.3 m, 提供 0~2 KG 范围内可调的横向波荡磁场, 它共有 59 个周期, 每周期长 22 mm, 其中入口端有 5 个周期的绝热过渡段。为了避免端部磁场的扰动, 入口端端部加接  $\phi 30 \times 1$  mm 的回流环, 从而将端部扰动磁场减小到相当于峰值磁场的百分之三以下。采用旁路电阻获得的端部过渡特性比喇叭型骨架所得到的过渡特性更均匀 (见图 2(b))。



(a)



(b)

Fig. 2 Photograph of bifilar helix wiggler winding on the outer wall of the drift tube (a) and its transverse magnetic field distribution (b)

激光辐射由锥型喇叭输出后, 部分进入加装截止波导管的炭锥量热计测量激光能量, 也可以由矩形波导传输经晶体检波器检出后在示波屏上显示激光波形。未被接收的部分辐射由微波吸收屏所吸收。

### 三、辐射的空间增涨

无论是运转在超辐射模式还是放大器模式, 随空间相互作用长度变化的辐射增涨关系

是研究具有轴向磁场工作在集体区的自由电子激光器所关注的重要问题。毫米波自由电子激光的有关理论指出<sup>[5,6]</sup>辐射的空间增涨规律可以通过解色散方程  $D(\omega, K) = 0$  求得, 即求解方程

$$-K^2 + K_w^2 - \frac{\omega_p^2 \cdot \omega v_{\perp}}{2c^2 \gamma_0} \frac{K \cdot R}{\delta^2 - \eta^2} = 0, \quad (1)$$

式中,  $K, \omega$  为电磁波的波矢和频率,  $K_w \left( = \frac{2\pi}{\lambda_w} \right)$  是波荡器波数,  $v_{\perp}$  是电子的横向速度,  $\omega_p$  是电子束等离子体特征频率

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n e^2}{m},$$

考虑到  $K = K_w + \Delta K$  且  $|\Delta K| \ll K_w$ , 则  $\delta$  可表示为:

$$\delta = \frac{\omega}{c} [\beta_z - 1] + K_w \beta_z + \Delta K \beta_z$$

(此式中  $\beta_z = \frac{v_z}{c}$ ),

$$\eta^2 = \frac{\omega_p^2}{c^2 \gamma_0} \left[ \frac{1}{\gamma_z^2} + \frac{\Omega_z \beta_w^3}{\Omega_{\perp} - \Omega_z \beta_w^3} \right],$$

$$R = \beta_w \left[ \frac{1}{\gamma_z^2} + \frac{\Omega_z \beta_w^3}{\Omega_{\perp} - \Omega_z \beta_w^3} \right]$$

(两式中  $\beta_w \equiv \frac{v_{\perp}}{v_z}$ ,  $\Omega_{z,\perp} \equiv \frac{eB_{z,\perp}}{mc^2}$ )。

方程(1)可以改写成:

$$(\delta - \rho)(\delta^2 - \eta^2) + \alpha^2 \eta^2 = 0. \quad (2)$$

其中:  $\delta = \rho + \Delta K \beta_z$ ,  $\rho = \frac{\omega}{c} (\beta_z - 1) + K_w \beta_z$ ,  $\alpha^2 = \frac{\omega v_{\perp}^2}{4c^3}$ 。

方程的型式与无引导场时的色散关系相同。文献[5, 6]已对它作了详细的讨论。在这里我们更关心的是在引导场的作用下所附加的影响, 引导场的影响可以体现在参量  $\eta^2$  之内, 存在引导磁场时, 色散关系的解依赖于稳态轨道的工作支(I支或II支)。

对于两类稳态轨道, 其速度的垂直和平行分量可以表示为:

$$v_{\perp} = \Omega_{\perp} v_z / \Omega_z - K_w v_z, \quad (3)$$

$$v_z^2 + v_{\perp}^2 = (1 - \gamma_0^{-2}) c^2. \quad (4)$$

当  $\Omega_z < K_w v_z$ , 工作于 I 支, 随磁场值的上升空间增涨速率  $I_m K$  相应升高, 其工作的上限频率不变而下限频率降低。当  $\Omega_z > K_w v_z$ , 工作于第 II 支, 情况比第 I 支更为复杂, 对于  $(1 - \gamma_z^2 v_{\perp}^2 / c^2) \Omega_z < K_w v_z < \Omega_z$  这一区域, 方程(1)的色散关系描写了辐射和空间电荷模之间的耦合。同时应该指出的是这一支上存在某个特定的  $\Omega_z$  值, 达到此值时, 模之间的耦合消失, 空间不稳定性也随之消失。临界的  $\Omega_z$  可以由强泵浦理论导得的增益表达式(5)中求得<sup>[7]</sup>, 即

$$G_L \equiv \frac{\omega_0^2}{8\gamma_0} \frac{L^3 \beta_w^2 K_w}{v_z^2} \left[ 1 - \frac{\gamma_z^2 \Omega_w^2 \Omega_z}{\Omega_z (1 + \beta_w^2) - K_w v_z} \right] \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\sin x}{x} \right]^2, \quad (5)$$

式中,  $L$  为增益长度,

$$x \equiv \left( \frac{\omega}{v_z} - K - K_w \right) L / 2,$$

$$\beta_w = \frac{v_{\perp}}{v_z}$$

由增益表达式可见, 存在引导磁场的情况下可明显地提高信号增益。在单能束的条件下可求得临界  $\Omega'_z$ 。

$$\Omega'_z = \frac{K_w \cdot v_z}{1 + \beta_w^2} \quad (6)$$

当  $\Omega_z > \Omega'_z$  时, 模的参量特性与 I 支相似。对于  $\Omega_z < \Omega'_z$  时, 随轴向场的降低, 其空间增涨速率  $I_m K$  上升, 与 I 支相比 (也与 II 支  $\Omega_z > \Omega'_z$  相比), 其不稳定性的频率范围明显地向较高和较低方向扩展。

## 四、实验结果与分析

### 1. 有关辐射增涨

根据自由电子激光在不同的相互作用长度下激光输出特性, 可以估计辐射的空间增涨速率大小。

在实验中, 相互作用长度的确定是由双螺线波荡场均匀段长度来决定的, 也可以由引导磁场的“喇叭”段半磁场点的长度来决定 (图 3)。由图可见实验中采用的不计及绝热过渡段的有效相互作用长度分别为 790 mm 和 1190 mm。实验中还取用了 308 mm 的相互作用区长度 (在图中未表示出), 它是由包括 12 个周期的渐变段, 总长 580 mm 的螺线波荡器来实现。在保持基本实验条件不变的前提下, 测得的不同相互作用长度下输出辐射的变化可以认为是由于作用长度的改变引起的辐射增涨变化。当然这些测量都是在没有出现明显的非线性效应时才是有效的。

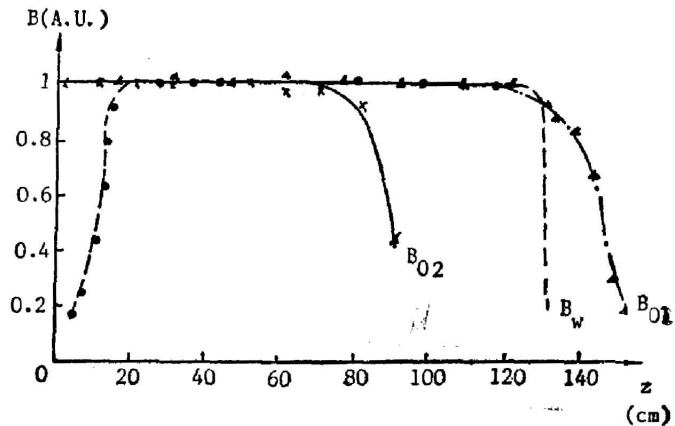


Fig. 3 Magnetic field distribution along Z axis for guide field  $B_{01}$ ,  $B_{02}$  and for bifilar helix wiggler of 1.3 meter length  $B_w$

对于作用长度为 308 mm, 790 mm 和 1190 mm 的三种情况, 辐射输出功率随横向波荡磁场的变化规律基本上是相似的 (图 4), 在较小横向场作用下, 由于增益较小, 出现辐射输出功率随磁场增加而缓慢上升, 当横向场达到 900~1200 高斯范围内出现了最大输出峰, 可以算得此时对应的  $\beta_{\perp}$  约在 0.26~0.36 的范围内, 这与海军实验室的观测结果基本相符。当横向场进一步增加, 输出开始明显下降。我们在波荡器线圈入口端 55 cm 处测量了漂移管壁上的 X 射线剂量 (图 5)。结果表明: 在横向磁场 1200 高斯附近出现了 X 射线剂量的突变且很快饱和, 可以认为此时由于横磁场作用产生的横向速度足以使得大量电子打到漂移管壁上, 最后导致总体输出功率的明显下降。

在同样的实验条件下, 相互作用长度为 308 mm, 790 mm 和 1190 mm 的激光辐射的最大输出功率分别近似为  $0.45 \times 10^6$  W,  $3.5 \times 10^6$  W 和  $1.2 \times 10^7$  W。用这几个另星的数据可

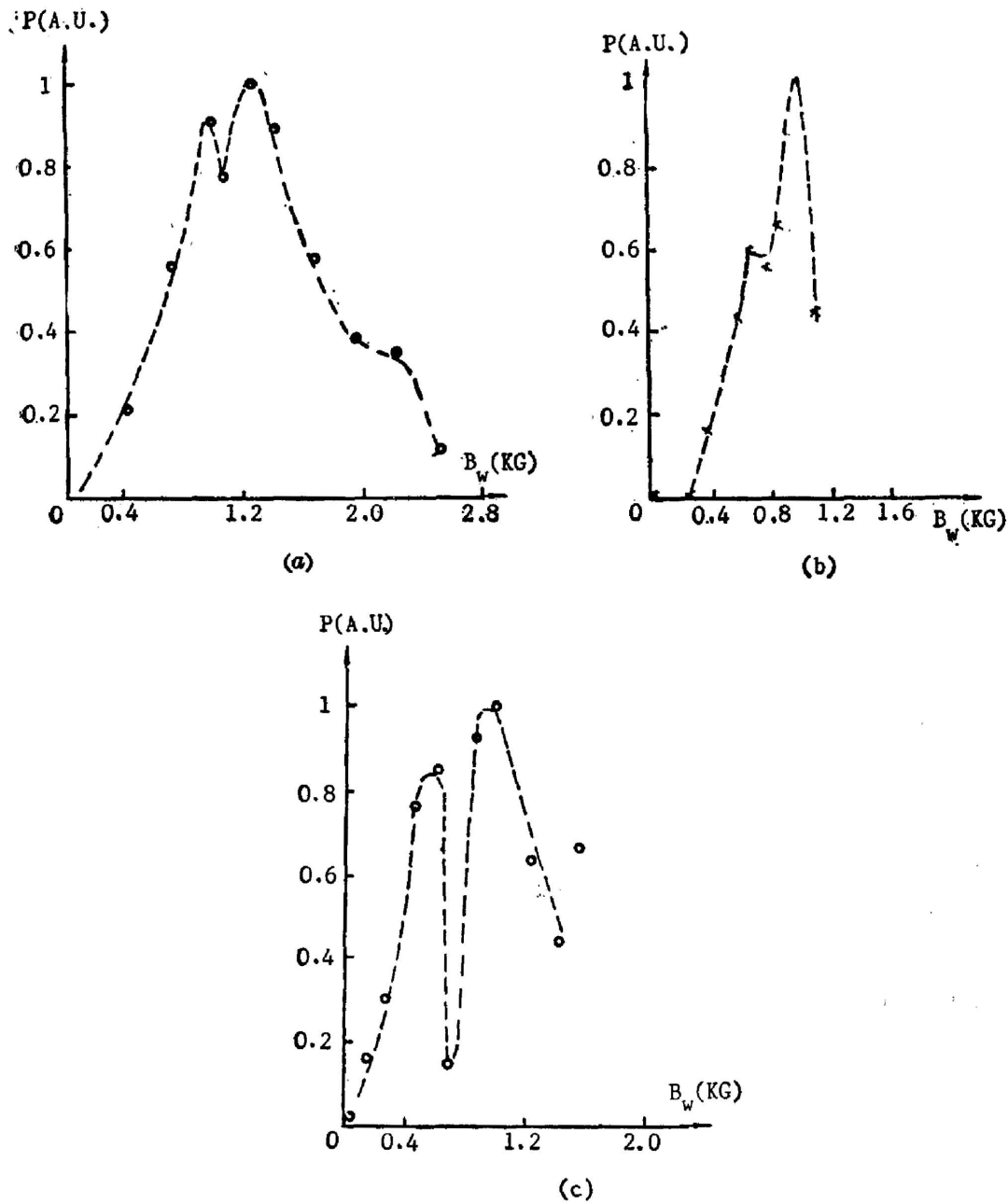


Fig. 4 Relationship between millimeter wave power and wiggler magnetic field for variable interaction length experiment

experimental condition:  $\gamma=1.8$ ,  $B_0 \approx 10$  KG (a)  $l=1190$ mm, (b)  $l=308$ mm (c)  $l=790$ mm

以近似估算得辐射的增涨速率在  $15.9$  dB/m, 数值也在合理范围之内。由此可见辐射还处于增涨阶段, 器件还有发展的潜力。

## 2. 辐射随轴向磁场的输出特性

图 6 是相互作用区长度为  $790$  mm 和  $1190$  mm 两种情况下, 输出的激光功率随轴向引导磁场的变化特性。无论在哪一种相互作用长度下实验数据点的变化规律明显地存在着与理论预言相符的两组工作支的特点。两种情况所对应的回旋共振点磁场在  $7$  KG 附近, 而理

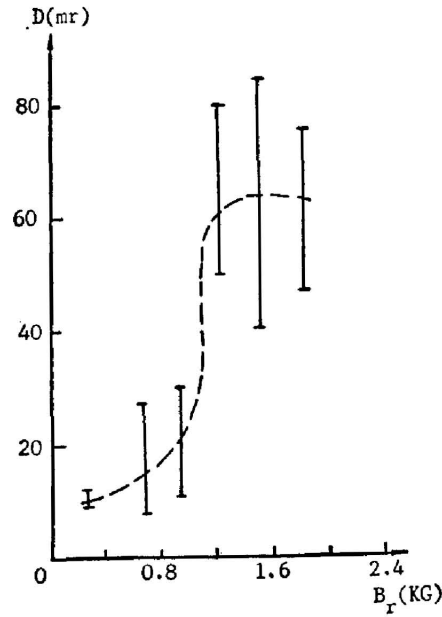


Fig. 5 X-ray dose vs. wiggler magnetic field  $B_r$ , measured on the outer wall of the drift tube 55 cm from entrance of wiggler

论共振点磁场值在 7.8 KG, 所存在的差别可以归结为电子能量的不确定性以及在实验测量中一系列误差的统计结果。在回旋共振点以下, 即在低磁场情况下, 随着轴向场  $B_0$  的增加, 传输的工作电流上升, 输出辐射也随之增加, 在达到 7 KG 附近, 由于电子束很快“热化”, 导致输出辐射的迅速下降。在回旋共振点以上, 工作点位于  $II$  支, 此时随引导磁场  $B_0$  的增加, 辐射能量上升, 继续增加磁场, 由于增益的下降输出能量相应降低。这一变化规律与理论预言是一致的<sup>[4]</sup>。在图 6 中给出的两不同作用长度下的输出特性的差别, 只是由于两者

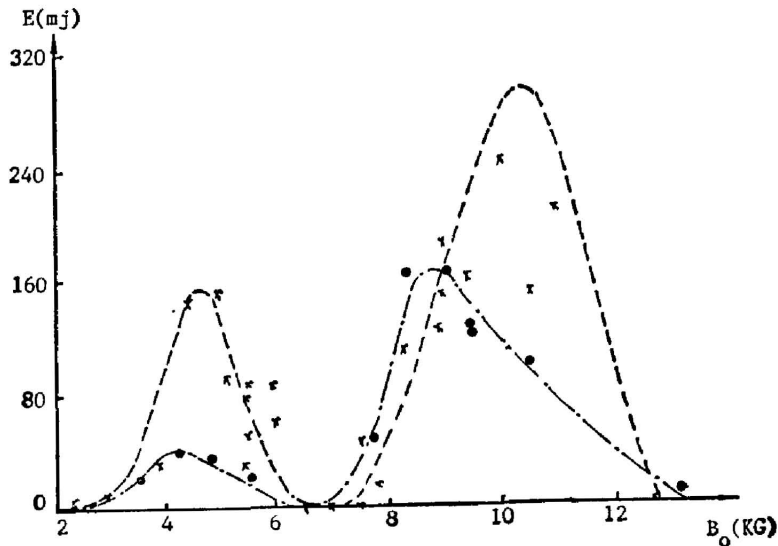


Fig. 6 FEL output energy vs. guide magnetic field  $B_0$   
 x: interaction length 1190mm ; ●: interaction length 790mm;  $B_w = 980G$

增益大小不同所造成的结果,图中圆点对应相互作用长度 290 mm,叉点相应 1190 mm。

### 3. 有关转换效率

如图 1 所示,电子束的有关参量测量是与自由电子激光器总体实验同步进行的。为了



Fig. 7 Oscillogram of e-beam current transmitted in the drift tube with interaction length 1190 mm  $B_0=10$  KG,  $B_w=0.98$  KG oscilloscope: Time 100 ns/div, Volts 5V/div

监测在漂移管内输运的电子束工作电流的大小,在波荡器线圈的出口端,安装了一只 Rogowski 测量线圈,该测量线圈经脉冲定标电路进行幅值定标,其幅值灵敏度为 25mV/A。为保证测量值能真正反映被测工作电流的大小,该测量线圈应准确位于引导磁场均匀区的轴线上。用此线圈测得工作长度 1190 mm 时工作电子束电流波形图表示在图 7 中。由图 7 的波形照片可换算得工作电子束电流峰值约 800 A。与此同时实验中测得的二极管管电压为 0.4 MV,测得的激光峰值功率为 12 MW,于是电子转换效率约为

3.7%,差不多是作用长度 308 mm 得到的电子转换效率 1~1.4% 的三倍。

### 参 考 文 献

- [1] T. J. Orzechowski *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**, No. 17 (Oct), 2172~2175.
- [2] J. A. Pasour *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1985, **21**, No. 7 (Jul), 845~859.
- [3] 诸成等;《中国科学》(A), 1986, No. 9 (Sep), 992~998.
- [4] 诸成等;《中国科学》(A), 1987, No. 11 (Nov), 1211~1216.
- [5] H. P. Freund *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1982, **26**, No. 4 (Oct), 2004~2015.
- [6] L. Friedland *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1982, **25**, No. 5 (May), 2693~2706.
- [7] H. P. Freund *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1981, **24**, No. 4 (Oct), 1965~1979.

## Experimental study of a Raman free electron laser with 1.19m interaction length

LU ZAITONG, ZHANG LIFEN, CHEN JIZHONG, SHI RUIGEN AND WANG ZHIJIANG  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 10 October 1988; revised 13 February 1989)

### Abstract

The free-electron laser interaction length has been increased to 1190 mm from 308 mm by using a recently developed bifilar-herix wiggler with length 1.3 m and a appropriate axial magnetic coil.

The laser radiation output peak power of 12 MW and electronic efficiency of 3.7% have been obtained in our experiment.

**Key words:** free electron laser.