

三毫米波喇曼自由电子激光器实验研究*

王明常 王之江 张立芬 陆 宾 冯诚士 周慧芬

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 研制出新型小周期波荡器,报道三毫米波拉曼自由电子激光器实验。采用 1 cm 周期双绕螺旋线波荡器,在相同加速器能量下,自由电子激光输出波长由 8 mm 缩短到 3 mm。输出功率为 1 MW,效率为 0.66%。

关键词 三毫米波,拉曼自由电子激光,小周期波荡器

1 引 言

高功率毫米波在基础科学研究和军事上均具有重要的应用价值,例如,它可用于磁约束等离子体加热;用于非线性光谱研究;研究分子,固体和液体中能量转换机理及其它瞬态效应;在军事上,可用于毫米波雷达,通讯、致盲的相干发射源及反隐形目标等电子对抗方面的研究。对毫米波段的小周期波荡器自由电子激光器的研究正是适应了这一发展的需要^[1]。

自由电子激光器的应用前景取决于器件能否小型化,小周期波荡器是自由电子激光器小型化的重要途径。自由电子激光器的输出波长

$$\lambda \approx \lambda_w / \gamma^2 \quad (1)$$

λ_w 是波荡器周期, γ 是电子束相对论能量因子。可以看出,对于相同的输出波长,缩短波荡器周期,可以降低电子束的能量要求,采用研制出的周期为 1 cm 的新型小周期波荡器^[2],成功地进行了三毫米波喇曼自由电子激光器实验。还利用研制出的高灵敏度毫米波能量探测器^[3],测量了自由电子激光器 3~4 mm 范围内的输出能量。研究了自由电子激光参量之间的关系。

2 工作频率

在拉曼自由电子激光器中,当静电束模的相速度与波导模相速度相等时,可以期望得到最强的相互作用。因此,可以从它们的色散关系的交点导出激光耦合输出,波导模色散关系可以写成

$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_w^2 \quad (2)$$

式中 ω_w 是波导截止频率, ω, k 分别代表辐射的频率和波数。

对于自由电子激光模的色散关系可表示为

* 国家自然科学基金资助项目。

** 参加本工作的还有封碧波、陆载通、孟志葱等同志。

收稿日期: 1994 年 8 月 12 日; 收到修改稿日期: 1995 年 1 月 25 日

$$\omega = (k + k_w)v_z - \omega_b/\gamma_z \quad (3)$$

其中,波荡磁场波数 $k_w = 2\pi/\lambda_w$, ω_b 表示等离子频率。

拉曼自由电子激光的工作频率是由静电束模的色散关系和电磁波波导模的色散关系的联立求解而得,即

$$\omega_{\text{FEL}} \approx \gamma_z^2 k_w v_z \left[1 \pm \left(\beta_z^2 - \frac{\omega_{\text{co}}^2}{\gamma_z^2 k_w^2 c^2} \right)^{1/2} \right] \quad (4)$$

其中, γ_z 为相对论因子的轴向分量, λ_w 为波荡器周期, v_z 为电子轴向速度分量。应该指出的是在我们通常的实验参量条件下,等离子体特征频率的影响可以忽略,因此,在表达式中未表示出。

依据实验中所采用的实际参量,自由电子激光输出波长可在 3~4 mm 范围内调谐。

3 实验装置和结果

拉曼型自由电子激光实验系统主要由加速器、导引磁场、波荡器磁场以及测量系统等几部分组成。实验系统简图如图 1 所示。电子束是由计算机设计的磁场浸没型无箔二极管产生。为了确保电子束有小的发射度,在阳极中心开孔 $\phi 6$ mm,这样电子束的外缘部分包括鞘层电子在内的热电子被隔断,由此起到了电子束发射度过滤选择作用。这与其它加速器中使用的方法类同。用这种方法达到自由电子激光实验对电子束低发射度的要求,这种由场发射引发的等离子体发射这一通常用于短脉冲($\ll 1 \mu\text{s}$)技术所形成的电子束电流密度在 $2\sim 5 \text{ kA/cm}^2$ 。

作为泵浦源的周期性波荡磁场,是用一组电容器向一只双绕螺旋线圈放电所产生的。形成了右旋圆偏振的泵浦磁场,泵浦磁场线圈的长度为 720 mm。其中入口段六个周期是磁场渐变区,以保证绝热不变性。波荡器场有效长度 600 mm,约有 50 个周期。相互作用长度可以通过附加偏转铁心来调节,波荡器磁场强度在 0.2 T 范围内可调节。

轴向引导磁场起约束电子束发散作用,因此进入相互作用区的电子束工作电流的大小是轴向磁场的函数。磁场的方向是由电子束在磁场中运动时的螺线轨道来确定,其大小在 0~2 T 范围内调节,通常的工作范围在 0.8~1 T。

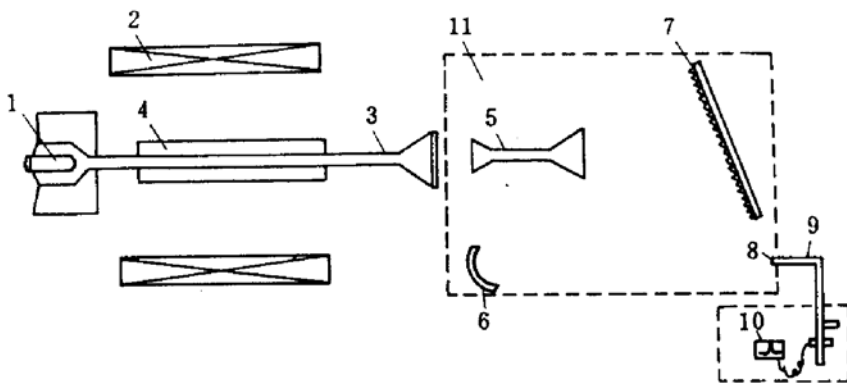


Fig. 1 Experimental setup of Raman FEL

1: Diode gun 2: Guide magnet; 3: Drift tube; 4: Wiggler; 5: Input horn with cut-off waveguide; 6: Cylindrical mirror; 7: Grating; 8: Detector; 9: Waveguide; 10: Oscilloscope

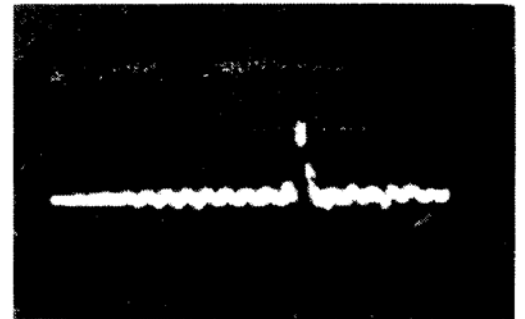


Fig. 2 Typical form of the laser pulse

图 2 为典型的自由电子激光辐射波形。从图中可以估计出辐射波的脉冲宽度大约为 15 ns,引导磁场为 0.621 T,波荡器场强为 0.124 T,周期为 1.2 cm,电子束电压为 4×10^5 eV。

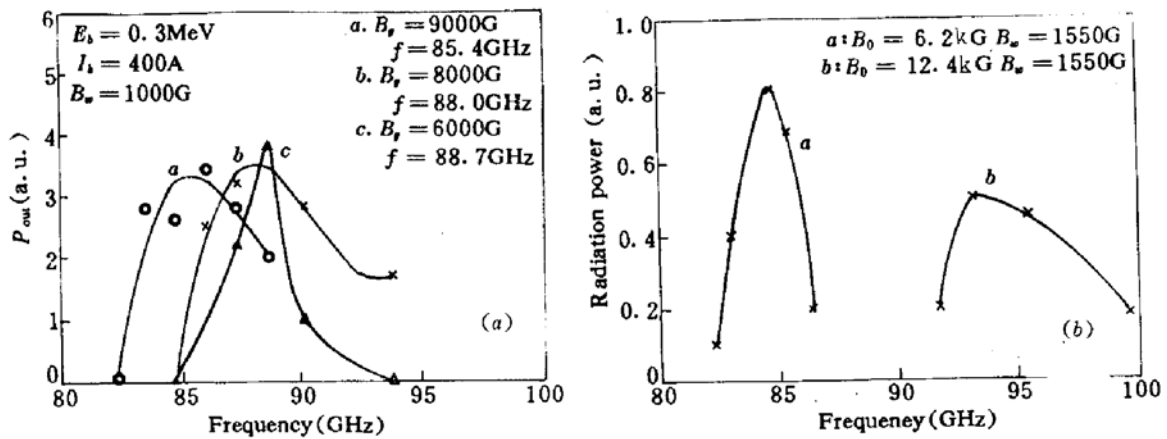


Fig. 3 Frequency spectrum of the FEL

(a) $\lambda_w = 12$ mm and $E = 400$ keV; (b) $\lambda_w = 10$ mm and $E = 300$ KeV

图 3 为自由电子激光器工作在不同的实验参数条件下所测出的辐射波波长分布曲线,可以看出,取导引磁场 $B_0 = 0.62$ T 时,辐射波的中心频率约为 84.5 GHz。根据耦合频率表达式(2)求得在相同条件下 TE_{11} 模的耦合频率为 83.1 GHz。实验与理论基本是一致的,两者的差别可能是计算时取用的电子和磁场参量与实验中实际测量值不同造成的,另一种可能是摄谱仪本身的分辨误差造成。图 3 也显示了当自由电子激光器的实验参数,即导引磁场和波荡器磁场改变,辐射波波长也在一定范围内变化。尽管实验所达到的波长调谐范围不大,但毫无疑问它已显示了自由电子激光输出波长可调谐性能。另外,自由电子激光波长调谐也可改变自由电子束能量来实现。

对于自由电子激光辐射波长进行的频谱分布的测量工作,除了揭示了拉曼型自由电子激光三波频率耦合理论结果与实验相符,以及输出频率特性随自由电子激光实验参数变化而变化外,同时也能指明由多模圆波导所输出的自由电子激光辐射模式是两个最低阶模(TE_{11} 模和 TM_{01} 模)之一。由于纵向磁场的引入,电子作回旋运动,因此,除自由电子激光辐射外,还可能其它回旋辐射。耦合频率的理论值与实验所测量的结果相符,同时也说明了所得到的辐射输出波是自由电子激光,而非其它的回旋辐射。

4 自由电子激光辐射功率

研制出热释电型能量探测器,测得自由电子激光的辐射输出功率,采用频率为 36.55 GHz 标准微波源对其定标,可以用于进行 3 mm 波段的自由电子激光器辐射能量的测量。根据所测得的激光能量,以及测量的激光波形脉冲宽度,可以推算出自由电子激光平均功率。

图 4 是典型的热释电型能量探测器对自由电子激光响应的电压波形,导引磁场强度为 1.24 T,波荡器磁场强度为 0.155 T。

图中能量计的响应电压峰值为 3.5 V,能量计响应灵敏度的定标值为 23.8 mV/ μ J,因此,能量计所吸收的入射脉冲能量为 0.147 mJ。考虑到能量计本身吸收效率约 65% 及 1/70 的预衰减,则拉曼自由电子激光输出的激光脉冲总能量约为 15.8 mJ。由于辐射波的脉冲宽度大约为 15 ns,因此激光输出的平均功率约为 1.05 MW。根据传统自由电子激光效率计算关系,可推算出相应的瞬时电子能量转换效率约为 0.66%。

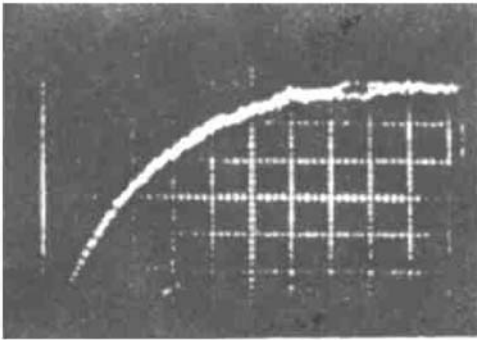


Fig. 4 Typical signal of a millimeter-wave energy meter

X-axis 50 ns/div; Y-axis 0.5 V/div

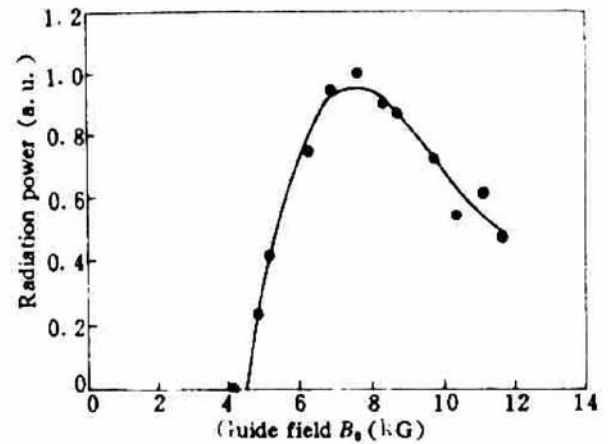


Fig. 5 The radiation power versus guide field

参 考 文 献

- 1 F. Ciocci, R. Bartolini, G. Dattoli *et al.*. Operation of a compact FEL in millimeter-wave region with a bunched electron beam. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(7):928
- 2 Feng Bibo, Wang Mingchang, Wang Zhijiang. Novel small-period wiggler for free-electron laser. *Rev. Sci. Instr.*, 1992, **63**(8):3849
- 3 孟志葱, 王明常, 陆载通 等. 毫米波高灵敏快响应热释电能量计. *中国激光*, 1994, **A21**(6):473
- 4 J. H. Booske, T. M. Antonsen, V. L. Granatstein *et al.*. Proof of principle experiment for a sheet-beam, near-millimeter FEL. *SPIE*, 1989, **1061**:273

Experiments of a 3 Millimeter Wave Free Electron Laser

Wang Mingchang Wang Zhijiang Zhang Lifen Lu Bin

Feng Chengshi Zhou Huifen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract It is reported that a novel small-period wiggler was developed. The experiments of a Raman free electron laser at 3 mm wavelength are presented. Using the bifilar helical wiggler with 1 cm period, the wavelength of the free electron laser has been reduced from 8 mm to 3 mm with the same beam energy. The radiation power is 1 MW and the efficiency is 0.66 %.

Key words 3 mm wavelength, Raman free electron laser, wiggler