

# 喇曼自由电子激光器辐射谱的测量\*

陆载通 张立芬 王明常 王之江

(中国科学院上海光机所, 201800)

**提要:** 本文报道了利用微波栅摄谱仪测量在超辐射工作条件下的喇曼自由电子激光器辐射谱的初步结果。观察到了毫米波自由电子激光器的调谐特性。实验结果表明, 辐射谱的中心频率随波荡场强度的增加而减小, 这与考虑波导模影响的集体制式自由电子激光的有关理论预言相符。

**关键词:** 自由电子激光器, 摄谱仪

## Spectral measurement of a Raman free electron laser

*Lu Zaitong, Zhang Lifen, Wang Mingchang, Wang Zhijiang*

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

**Abstract:** Frequency-resolved measurement of the emission from a Raman free electron laser under superradiation condition by a microwave grating spectrometer are presented. The tunability of millimeter wave free electron laser was observed. The experimental results have shown that the central frequency of the spectra decreased with increasing the wiggler magnetic field, which are in accordance with the theoretical predictions concerned with waveguide mode effects on the collective free electron laser.

**Key words:** free electron laser, spectrometer

### 一、引言

喇曼自由电子激光器输出的高功率毫米波辐射是重要的高功率毫米波源之一。由于高功率毫米波在军事上和科学研究中有许多重要的应用, 因此深入研究喇曼型自由电子激光器已成为发展高功率毫米波器件的重要一环。

我们以前的喇曼自由电子激光器的实验研究工作<sup>[1,2]</sup>, 已充分显示了它所具有的高功率、高效率和可调谐的特点。对于辐射波长的测量采用过截止波导测量法<sup>[3]</sup>。由此确定激光辐射波段是  $K$  波段, 同时也利用这一方法初步观测了波长的调谐情况<sup>[1]</sup>。为深入研究喇曼自由电子激光器的辐射机理及其物理规律, 需要获得更为准确的辐射频率和它的谱分布信息, 为此我们研制了高功率毫米波摄谱仪来测量自由电子激光的频谱特性。

## 二、耦合频率

集体制式自由电子激光的工作频率是由负能的静电束模的色散关系 (1) 和电磁波导模的色散关系 (2) 的相交来求得, 即

$$\omega = (K + K_w)v_z - kv_z \quad (1)$$

$$\omega^2 = c^2 K^2 + \omega_{co}^2 \quad (2)$$

式中的  $\omega$ ,  $K$  表示辐射的频率和波数,  $\omega_{co}$  是波导中传播的辐射所对应的截止频率,  $K_w \equiv 2\pi/\lambda_w$  是波荡器磁场的波数,  $kv_z$  是等效的等离子体频率。在我们的实验条件下, 实验参量满足  $(1 - \gamma_z^2 v_z^2/c^2)\Omega_0 < K_w v_z < \Omega_0$ , 此时等效的等离子体频率是虚数, 其对静电束模的实部无贡献, 因此 (1) 式可改写为

$$\omega = (K + K_w)v_z \quad (3)$$

于是满足方程 (2), (3) 的耦合频率可以写作

$$\omega \cong \gamma_z^2 K_w v_z \left[ 1 \pm \left( \beta_z^2 - \frac{\omega_{co}^2}{\gamma_z^2 \cdot K_w \cdot c} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

如果忽略波导模的影响, 那么可得

$$\omega \approx \beta_z (1 + \beta_z) \gamma_z^2 \cdot K_w \cdot c \quad (5)$$

式中  $\gamma_z \equiv (1/1 - \beta_z^2)^{\frac{1}{2}}$ ;  $\beta_z \equiv v_z/c$ ,  $v_z$  为电子轴向速度;  $\Omega_0 \equiv \frac{eB_0}{\gamma \cdot m \cdot c}$ ,  $m$  为电子静止质量;  $\gamma$  为相对论因子,  $c$  为光速。

## 三、实验装置

测量喇曼自由电子激光器辐射谱的实验系统见图 1。

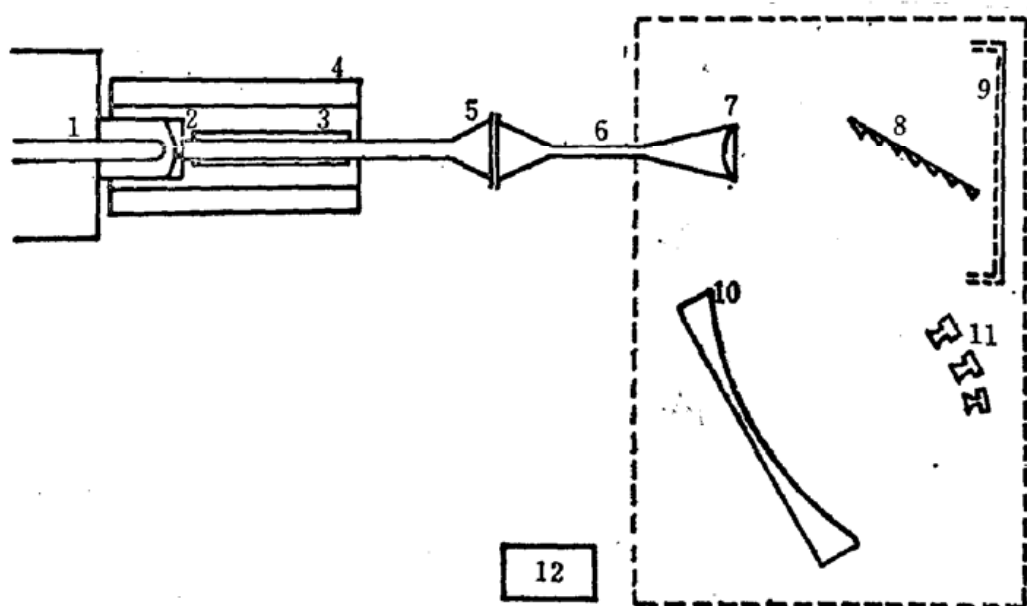


Fig. 1 Schematic diagram of the radiation spread measurement for a high power pulsed mm wave free electron laser

1—cathode; 2—anode; 3—wiggler magnet; 4—guide magnet; 5—output horn; 6—input horn with the cut-off waveguide; 7—microwave lens; 8—reflection grating; 9—absorbntion material; 10—cylindrical mirror; 11—detector; 12—mm wave measurement device

脉冲线加速器无箔二极管中由场发射引发的等离子体的发射所获得的电子束其电子能量为  $0.4 \sim 0.45 \text{ MeV}$ , 在漂移管相互作用区内的工作电子束电流近  $1 \text{ kA}$ <sup>[2]</sup>。电子束在  $10 \text{ kG}$  左右的引导磁场作用下通过孔径为  $6 \text{ mm}$ , 厚度为  $12 \text{ mm}$  的带孔阳极或发射度选择器进入相互作用区, 相互作用区内的波荡器磁场在  $0 \sim 2 \text{ kG}$  范围内连续可调, 波荡器线圈直接绕在漂移管外壁, 在所进行的频谱测量的实验中采用的相互作用区长度为  $790 \text{ mm}$ 。所产生的自由电子激光辐射经波导管最后由输出喇叭输出。

毫米波波谱仪接收自由电子激光器的输出辐射, 为了达到一定的分辨波长的要求, 先将波束扩束到直径  $100 \text{ mm}$  的束截面, 然后经一块聚四氟乙烯的平凸透镜获得准直平行波束输出, 波束再以入射角  $\alpha$  照射到闪耀角  $\theta = 30^\circ$  的微波栅上, 微波栅常数  $d = 7.5 \text{ mm}$ , 刻槽数  $N \approx 30$ , 典型的入射角  $\alpha = 60^\circ$ 。在对应的微波栅条件下, 波长的复盖范围为  $5 \text{ mm}$  到  $10 \text{ mm}$ 。柱面凹反镜的曲率半径  $1.5 \text{ m}$ , 高  $20 \text{ cm}$ , 它是用硬质基底复上抛光铜皮制成。衍射光经柱面镜会聚后进入到与波长位置一一对应的各接收喇叭口, 通过  $K_0$  波导进入屏蔽室内的衰减器及高通滤波器, 由晶体检波器检出毫米波辐射信号, 最后由示波器显示。如果测量设备不足以同时测量多个波长位置的毫米波信号, 从而不可能通过一次测量获得超辐射状态下喇曼自由电子激光的谱分布情况, 那么在激光器输出比较稳定即重覆性较好的情况下, 亦可采用转动微波栅的单色仪测量法, 由此也可得到满意的谱分布结果。

由波谱仪的具体设计参量和各元部件加工精度, 我们可以估计谱仪的波长分辨率及谱分布测量的误差。如果从透镜射到微波栅的波束是平行的, 那么当入射角  $\alpha$  固定时, 由角色散  $d\beta/d\lambda$  和底点半宽  $\Delta\beta = \lambda/N \cdot d$ , 可求得可分辨波长  $\Delta\lambda = \lambda/m \cdot N$ , 式中  $\lambda$  为被测毫米波波长,  $m$  为干涉级数, 取为  $1$ ,  $N$  为刻槽数,  $\alpha$  为入射角。代入实际的设计参量并取  $m = 1$  则实际的中心波长  $8 \text{ mm}$  处的可分辨波长  $\Delta\lambda = \frac{\lambda \cdot d \cos \alpha}{100} = 0.3 \text{ mm}$ 。

估计微波栅常数  $d$  的加工误差  $< 0.1 \text{ mm}$ , 因此而造成的波长读数误差  $< 0.1 \text{ mm}$ , 而入射角  $\alpha$  的调正误差取决于调整机构的精度, 我们所使用的调整机构的角度调节误差为  $4'$ , 其造成的波长读数误差是  $0.02 \text{ mm}$ , 远小于分辨波长值。

接收器的宽度所导致的波长分辨误差为:  $d\lambda = \frac{2 \cdot d \cdot \cos \beta \cdot dl}{r}$ , 式中  $d$  是微波栅常数,  $\beta$  为对应波长的衍射角,  $dl$  为  $d\beta$  衍射角在接收平面上的分布宽度,  $r$  是微波栅与会聚镜之间的距离。根据实际的结构参量, 可以算出在中心波长上由于接收器宽度所造成的分辨误差为  $0.06 \text{ mm}$ 。综合误差为  $\Delta\lambda \approx 0.32 \text{ mm}$ 。

#### 四、实验结果与讨论

利用微波栅波谱仪测量喇曼自由电子激光的谱分布的初步实验的目的是验证中心频率的理论预言, 初步观测它的频谱分布。图 2(a) 的谱分布曲线是对应于引导磁场  $B_0 = 9.35 \text{ kG}$ , 波荡器磁场  $B_w = 980 \text{ G}$ , 其  $\beta_{\perp} \approx 0.3$ ; (b) 对应于  $B_0 = 9.35 \text{ kG}$ ,  $B_w = 1260 \text{ G}$ ,  $\beta_{\perp} \approx 0.34$ 。根据耦合频率表达式 (4) 求得在两种实验条件下的  $\text{TE}_{11}$  模的耦合频率分别为  $44 \text{ GHz}$  和  $38.9 \text{ GHz}$ ;  $\text{TM}_{01}$  模的耦合频率分别为  $41.7 \text{ GHz}$  和  $36.3 \text{ GHz}$ 。从谱分布实验测量曲线 (见图 2) 的峰点所对应的频率值分别为  $42.8 \text{ GHz}$  和  $37.5 \text{ GHz}$ 。与计算值的差别一种可能是计算时取用的实

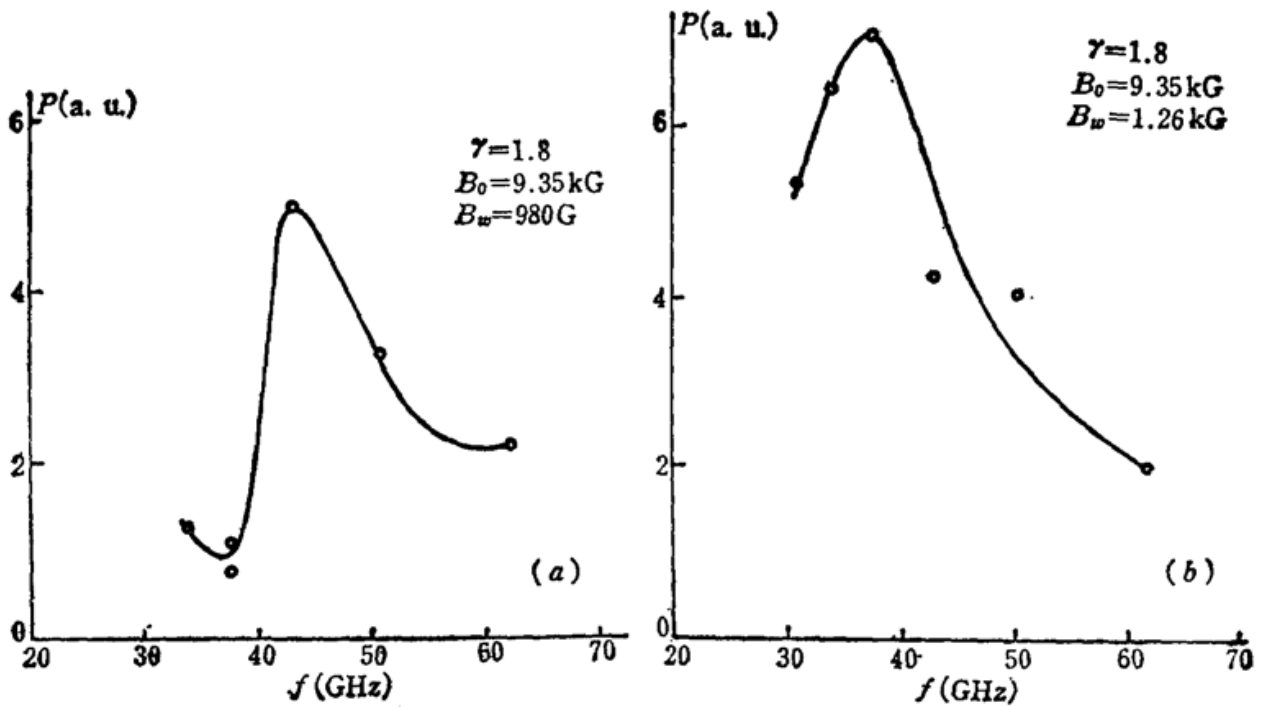


Fig. 2, Frequency spread of a Raman free electron laser as a superradiation amplifier

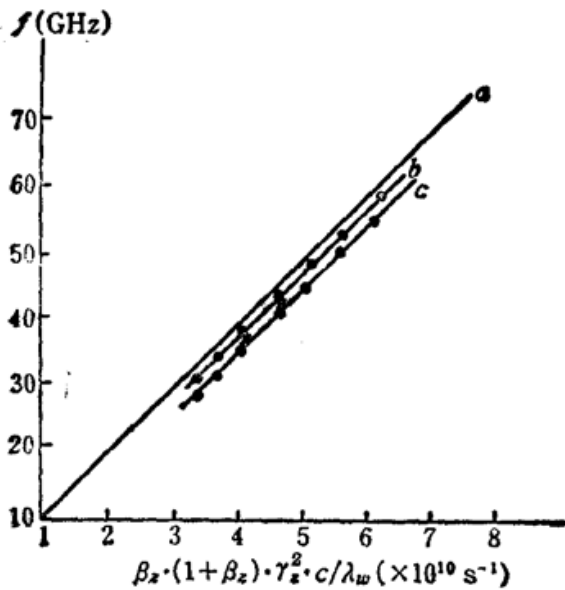


Fig. 3 Emission frequencies versus

$$\beta_z \cdot (1 + \beta_z) \cdot \gamma_z^2 \cdot c / \lambda_w$$

a—without waveguide; b—TE<sub>11</sub> mode;  
c—TM<sub>01</sub> mode

验参量的测量值本身的误差所造成, 另一种可能是谱仪本身的分辨误差所造成。

图 3 给出了超辐射工作条件下, 集体制自由电子激光器在电子束参量和引导磁场  $B_0$  不变的情况下即  $\gamma=1.8$ ,  $B_0=9350$  G 时, 输出辐射的频率变化规律的计算结果。图中  $a$  代表忽略波导模影响时的频率变化,  $b$  表示 TE<sub>11</sub> 模的频率变化规律,  $c$  为 TM<sub>01</sub> 模的频率特性。图中的“·”点分别表示在上述条件下, 当  $B_w$  为 980 G 和 1260 G 时谱分布测量峰值所对应的频率位置点。两个实验点位置恰好落在 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>01</sub> 模特性曲线之间, 因此需要进一步的谱分布的实验研究, 在获得更多实验数据的基础上寻找有可能导致误差的原因, 从而使得辐射模式的判断更趋准确。

在超辐射工作状态下的毫米波自由电子激光器上进行的谱分布的初步测量工作, 除了揭示了与理论

预言基本相符的随实验参量改变而出现的频率特性变化规律以外, 同时也指明了由多模圆波导所输出的自由电子激光辐射的模式是两个最低阶模(TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>01</sub> 模)之一。线宽较宽达到了 0.3。由此证明相互作用的增益带宽较宽。对于运转于第 II 类轨道的喇曼自由电子激光器的这一实验结果与有关的理论预言是相符的。初步的谱测量工作也显示了自由电子激光的调谐特性。

### 参 考 文 献

- 1 褚成 *et al.*, 中国科学 A, (11), 1211~1216 (1987)
- 2 陆载通 *et al.*, 光学学报, 9 (9), 780~786 (1989)
- 3 褚成 *et al.*, 中国激光, 13 (8), 41~44 (1986)