

喇曼自由电子激光振荡器

王明常 陆载通 张立芬 陆 宾
周慧芬 冯诚士 陈基忠 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 本文报道喇曼自由电子激光振荡器的研究结果. 脉冲加速器电子束能量 0.4 MeV, 束流 800 A. 采用满足布喇格条件的分布反馈谐振腔, 取代传统的激光器反射镜. 理论上进行了分析和设计, 采用正弦形波纹结构选择振荡模式. 喇曼自由电子激光振荡器实验表明, 输出光谱显著变窄. 频率分布半高宽度, 超辐射下范围为 7.5 mm~9.2 mm, 分布腔下范围为 8.6 mm~8.9 mm.

关键词 自由电子激光器, 分布反馈, 谐振腔.

1 引 言

苏联的 Bratman 首先将波在周期性介质中传播的分布反馈机制^[1]运用到喇曼自由电子激光振荡器中^[2]. 本文作者之一在美国较早地进行了理论研究, 并为马里兰大学的电磁波泵浦自由电子激光振荡器^[3]和海军实验室的回旋自共振微波激射器^[4]进行了设计研究.

上海光机所自由电子激光器课题组于 1985 年建成了我国第一台 8 mm 波段、脉冲功率为兆瓦级的喇曼自由电子激光器. 近几年来, 在光学速调管、分布反馈谐振腔和小周期波荡器等几项自由电子激光新技术方面开展了理论和实验研究. 从 1987 年开始, 开展具有分布反馈谐振腔的喇曼自由电子激光振荡器研究, 后得到国家自然科学基金资助. 在国内首次研制成功分布反馈谐振腔^[5], 用于喇曼自由电子激光器的振荡实验. 且实验结果和日本大阪大学的 Mima 教授同时在 1990 年第 12 届国际自由电子激光会议上^[6]报道, 比美国麻省理工学院实验早一年^[7]. 输出功率日本为 0.6 MW, 美国为 0.99 MW, 而我们的实验结果为 6.6 MW.

本文介绍喇曼自由电子激光器分布反馈谐振腔的理论分析、设计和实验结果. 推导了波的耦合系数方程, 提出了腔的等效 Q 值概念. 采用正弦形波纹结构选择振荡模式, 漂移管波纹周期满足布拉格条件, 其分布反馈机理使前向波相干地散射到后向波中, 作用类似普通激光谐振腔的反射镜. 该腔既可有效地选定中心频率, 又可提高自由电子激光器电子效率. 由于省略了传统的谐振腔反射镜, 可同时解决反射镜阻挡电子束同轴通过及反射镜激光损伤两个关键技术问题.

收稿日期: 1993 年 8 月 18 日

* 国家自然科学基金资助课题.

2 理论模型

为了保证喇曼自由电子激光器处于单模工作状态,要求激光器漂移管内壁波纹具周期起伏,使正向行波 E_+ 的散射波与反向行波 E_- 相干. 设漂移管内壁波纹为正弦形(也可为三角形、矩形等). 图 1 所示的正弦形波纹具有小振幅起伏,即满足 $l_0 \ll r_0$, $l_0 \ll \lambda$ 条件

$$r - r_0 = l_0 \cos(K_b z + m\phi) \quad (1)$$

式中 r 为波导半径, r_0 为波导平均半径; 圆柱波导结构中, 边界微扰相应于波导半径的变化. 波数 $K_b = K_z^+ - K_z^-$, $m = m_+ - m_-$, K_z^\pm , m_\pm 分别为正向行波 E_+ 与反向行波 E_- 的波数和方

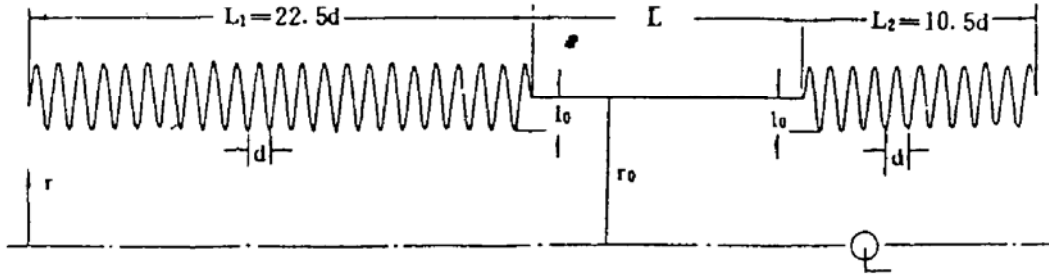


Fig. 1 Schematic of a Bragg cavity

位指数. 假定 $m_+ = m_-$, 则波纹方程近似为

$$r - r_0 = l_0 \cos(K_b z) \quad (2)$$

如果漂移管内壁波纹周期 d 满足布拉格条件

$$K_b = 2\pi/d$$

则正向行波 E_+ 会相干地散射到反向行波 E_- 中. 正反向行波场可写为

$$E_\pm = A_\pm(z) E_\pm(r) \exp(i\omega t - ik_z^\pm z) \quad (3)$$

波场的复振幅满足下面的波匹配方程

$$dA_+/dz + (i\Delta + \alpha_+)A_+ = -i\sigma_-A_-, \quad dA_-/dz - (i\Delta - \alpha_-)A_- = i\sigma_+A_+ \quad (4)$$

式中 $\Delta = (1/2)(K_z^+ - K_z^- - 2\pi/d)$ 为布拉格失配系数, $K_z^\pm = [(\omega/c)^2 - (K_T)^2]^{1/2}$, K_T 为波导模截止频率对应的波数, ω 为工作角频率, α_\pm 为波导壁对正反向行波损耗系数.

1) 对于 TM 模,

正向行波和反向行波的耦合系数可由(4)式解出

$$\sigma_\pm = \frac{l_0}{2r_0} \frac{(\omega/c)^2 + |K_z^+ K_z^-|}{|K_z^\pm|} \quad (5)$$

2) 对于 TE_{nm} 模,

$$\sigma_{nm} = \frac{l_0}{2r_0^3} \frac{-X_{nm}^4 + n^2 r_0^2 [(\omega/c)^2 + |K_z^+ K_z^-|]}{|K_z^\pm| (X_{nm}^2 - n^2)} \quad (6)$$

式中 $X_{nm} = K_T r_0$ 为相应 TE_{nm} 模贝塞尔函数的根.

为简化起见, 假定前向波和后向波具有相同的横向结构, 因此 $K_z^+ = -K_z^- = K_z$, $\sigma_+ = \sigma_- = \sigma$. 以一段长 L 的波纹波导为例, 假设波 E_+ 从入口端 ($Z=0$) 射入, 其在出口端 ($Z=L$) 的反射波 $A_-(L)$ 为零, 即 $A_-(L) = 0$, 则得波的反射系数 R

$$R = \frac{A_-(0)}{A_+(0)} = R(\omega) \exp[-i\phi(\omega)] = \frac{i\sigma \sinh(\gamma L)}{(i\Delta + \alpha) \sinh(\gamma L) + \gamma \cosh(\gamma L)} \quad (7)$$

式中 $\gamma^2 = \sigma^2 + (i\Delta + \alpha)^2$. 计算表明, 反射系数 R 和失配系数 Δ 的关系曲线有明显的“频率禁

带”，如图 2 所示。选择的工作频率落在该禁带内时，波纹波导作用如同反射镜，同时具有高反射率和选频特性。将两端这样的波纹波导组合，中间插入一平滑波导，即是图 1 所示的分布反馈腔。其增益来自自由电子激光器的作用机理。该腔的振荡条件是回路增益等于 1，即

$$R_1(\omega)R_2(\omega) \exp \{-i[\phi_1(\omega) + \phi_2(\omega)]\} \cdot \exp \{2[g(\omega) - iK]L\} = 1 \quad (8)$$

式中 R_1 和 R_2 分别为全反射端和输出端的反射系数。

事实上，在实际设计中，总是取最理想的情况 $\Delta L = 0$ ，以此作为所要求设计的布拉格腔的工作点。这是因为尽管喇曼自由电子激光器具有一定的工作频谱宽度，其中心频率可以通过计算或实测来确定。本文则是根据此中心频率来设计与之配合的分布反馈腔，使得辐射输出频谱向中心频率压缩，从而使激光器接近单模运转。

3 喇曼自由电子激光器中心频率

由喇曼自由电子激光器的耦合频率公式^[8]

$$\omega_s = \gamma_z^2(k_w v_z - \frac{\omega_s}{\gamma_z}) \cdot \{1 \pm [\beta_z^2 - \frac{\beta_z^2 \omega_{co}^2}{(\omega_s/\gamma_z - K_w v_z)^2 \gamma_z^2}]^{1/2}\} \quad (9)$$

及稳定轨道理论给出的电子横向运动速度公式

$$v_r = \Omega_w v_z / (\Omega_0 - \gamma_z v_z K_w) \quad (10)$$

式中 $K_w = 2\pi/\lambda_w$ ， λ_w 为波荡器周期，等离子体频率 $\omega_p = (4\pi n e^2/\gamma_z m)^{1/2}$ ， n 为电子束密度； $\gamma_z = 1/(1 - \beta_z^2)^{1/2}$ ， $\beta_z = v_z/c$ ， v_z 为电子束轴向速度。 $\omega_{co} = 2\pi c/\lambda_{co}$ ， λ_{co} 为波导管截止波长； $\Omega_{w,0} = e B_{w,0}/mc$ ， B_w 为波荡器磁场强度， B_0 为引导磁场强度。根据喇曼自由电子激光器的典型参数：加速电压 0.4 MV， $B_w = 1260$ G， $B_0 = 8950$ G，电子束直径 6 mm，当漂移管半径取为 9 mm 时，联合求解，可得本器件中心频率 $f_s = 34.7$ GHz，对应波长 $\lambda_s = 8.6$ mm

4 分布反馈腔实用化设计^[9]和振荡器实验

设波导管波纹满足布拉格条件(即 $\Delta L = 0$ 的情况)，得

$$K_z = \pi/d = (1/c)(\omega_s^2 - \omega_{co}^2)^{1/2} \quad (11)$$

选择 TM_{01} 模进行设计。此时 $r_0 = 9$ mm， $f_c = (TM_{01}) = 2.405 c/2\pi r_0 \approx 1.276 \times 10^{10}$ Hz，则得波纹周期 d 与工作频率 f_s 的色散关系曲线图 3。对应于本器件 f_s 的波纹周期 $d = 4.062$ mm。由耦合系数公式得

$$\sigma = \frac{l_0}{2r_0} \frac{(\omega_s/c)^2 + (\pi/d)^2}{(\pi/d)} = 89.73 l_0 \quad (12)$$

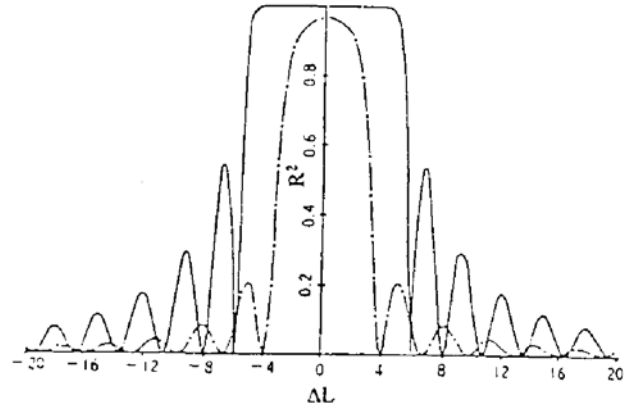


Fig. 2 Dependence of reflectance on Bragg resonance mismatch ΔL

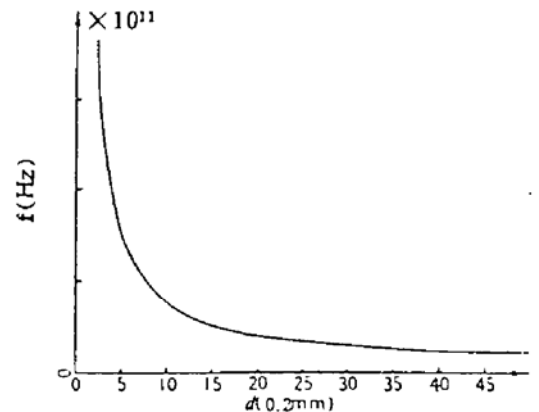


Fig. 3 Dependence of a ripple period d on radiation frequency

如果希望分布反馈腔的全反射端具有高反射率, 设 $R_1 = 99.99\%$, 而输出端则有一定的透射率. 使得既可让振荡模式通过, 又可使腔保持一定的 Q 值. 类似传统激光器, 分布反馈腔的等效 Q 值定义为

$$Q = \frac{\omega_s L}{c(1 - R_1 R_2)} \quad (13)$$

计算得 Q 与 R_2 的关系曲线, 如图 4 所示. 分布反馈腔实验参数列于表 1. 自由电子激光振荡器实验装置如图 5 所示, 工作参数列于表 2.

Table 1. The experimental parameters of distributed feedback cavity for a Raman free electron laser

Numbers of period	$N_1 = 22.5$	$N_2 = 10.5$	$N_3 = 6.$
Reflectance	$R_1 = 0.99$	$R_2 = 0.98$	$R_3 = 0.6$
Ripple amplitude (mm)	0.6	Cut-off freq. of waveguide (GHz) 13.84	
Mode structure	TM_{01}	Length of smooth section (cm) 10	
Drift tube radius (r_0 , mm)	8.9	Ripple shape cosine	
Bragg period (d, mm)	4.07		

Table 2. The working parameters of Raman free electron laser oscillator

Pulse line accelerator		Wiggler		Radiation wave	
Beam voltage V	400 KV	Wiggler period λ_w	22 mm	Wavelength λ_s	8.7 mm
Beam current I	800 A	Wiggler length L	600 mm	Output power P_0	6.6 MW
Beam radius r_e	3 mm	Wiggler field B_w	0.126 T	Efficiency η	2.1 %
Pulse duration τ	50 ns	Guided field B_0	0.895 T		

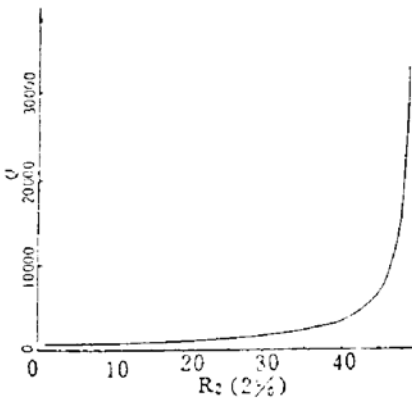


Fig. 4 The Q -factor of the cavity versus the reflectance at output side

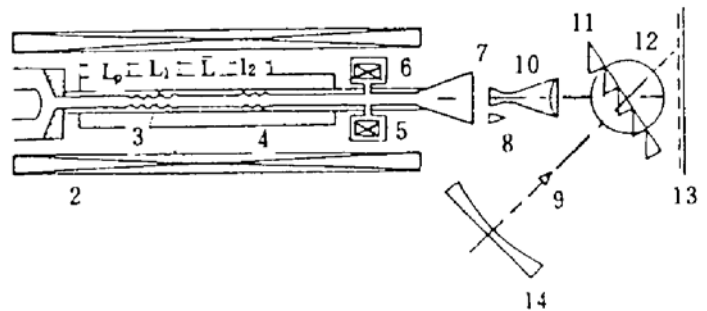


Fig. 5 The experimental setup for Raman free electron oscillator (1) Diode gun; (2) Guide magnet; (3) Bragg cavity; (4) Wiggler; (5) Rogowski coil; (6) Drift tube; (7) Polyethylene window; (8) and (9) Detectors; (10) Entrance horn and collimating lens; (11) Aluminum millimeter wave grating; (12) Rotary platform; (13) Microwave absorber; (14) Spherical mirror

在脉冲时间内, 光波能传播 18 m, 若腔长 $L = 10$ cm, 光波振荡 90 次. 对于高增益器件, 可以建立振荡.

结论 实验观测到振荡光谱显著变窄, 频率分布半高宽度, 超辐射下范围内为 7.5 mm~9.2 mm, 分布腔下为 8.6 mm~8.9 mm. 结果和理论研究一致.

参 考 文 献

- [1] A. Yariv, M. Nakamura, Periodic structure for integrated optics. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, QE-13(4): 233~253
- [2] V. L. Bratman, G. G. Denisov, N. S. Ginzburg *et al.*, FEL's with Bragg reflection resonators: cyclotron auto-resonance masers versus ubitron. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, QE-19(3): 282~296
- [3] M. C. Wang, V. L. Granatstein, R. A. Kesh, Design of a Bragg cavity for a millimeter wave free-electron laser. *App. Phys. Lett.*, 1986, 48(13): 317~319
- [4] 王明常, V. L. Granatstein, A. W. Fliflet *et al.*, 回旋自共振微波激光器布喇格谐振腔的设计. *中国激光*, 1989, 16(4): 193~197
- [5] 陈基忠, 王明常, 陆载通等, 喇曼自由电子激光器布喇格腔设计. *强激光与电子束*, 1990, 2(1): 79~84
- [6] M. C. Wang, Z. Wang, J. Chen *et al.*, Experiments of a Raman free-electron laser with distributed feedback cavity. *Nucl. Instrum. and Methods*, 1991, A304: 116~120
K. Mima, T. Akiba, K. Imasaki *et al.*, Distributed feedback and gas-loaded FEL's driven by induction linac SHVS. *Nucl. Instrum and Methods*, 1991, A304: 93~98
- [7] T. S. Chu, F. Hartmann, P. P. Legorburu *et al.*, High-power millimeter-wave Bragg free-electron maser oscillator experiments. *Nucl. Instrum. and Methods*, 1992, A318: 92~100
- [8] 褚成, 陆载通, 王之江等 Raman 自由电子激光器参量研究, *中国科学(A 辑)*, 1987, 11: 1211~1216
- [9] J. Chen, M. C. Wang, Z. Wang *et al.*, Study of a Raman free-electron laser oscillator with Bragg reflection resonators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, QE-27(3): 488~495

A Raman Free Electron Laser Oscillator

Wang Mingchang Lu Zaitong Zhang Lifen Lu Bing
Zhou Huifen Feng Chengshi Wang Zhijiang

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

(Received 18 August 1993)

Abstract A free electron laser oscillator with distributed feedback cavity (DFC) is developed. The theories and experiments of the Raman free electron laser (400 KeV/800 A) with DFC are studied. The spectral measurements using a microwave grating spectrometer are presented. The narrowed spectral bandwidth covered range of 8.6 mm~8.9 mm with central wavelength at 8 mm and output power enhancement show that oscillation happened.

Key words free electron laser, distributed feedback, cavity.