

可调谐拉曼自由电子激光器的研究*

黄羽 王明常 王之江 张立芬 朱俊彪

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 采用非线性理论对本所 8 mm 拉曼自由电子激光器进行数值模拟, 并通过改变工作参数来研究激光器的调谐特性, 证明激光器的波长从 5 mm 到 12 mm 连续可调, 所得结果与实验相吻合。

关键词 拉曼自由电子激光器, 调谐

1 引言

自由电子激光器具有高功率、高效率和可调谐等特点。目前世界上的自由电子激光器已经覆盖了从厘米到紫外的波段。上海光机所的拉曼自由电子激光器早在 1985 年就已经出光^[1], 最高电子抽取效率达到 4.4%^[2], 并且进行了辐射谱的测量, 得到较宽的频谱^[3]。自由电子激光器的数值模拟方法有 Colson 的单粒子计算^[4]、Kroll 等的 KMR 方程^[5]、Boscolo 的一维 Vlasov 方程和 Freund 等的三维非线性自治理论^[6]。本文采用非线性模型^[7], 考虑波导和空间电荷的作用, 对带轴向导引磁场和双绕螺旋 Wiggler 的拉曼自由电子激光器进行数值模拟, 研究了在不同的入射电子能量、导引磁场和 Wiggler 磁场下激光器的辐射波长和辐射能量的变化, 得到了连续调谐拉曼自由电子激光器的最佳工作参数。

2 理论模型

电子在轴向和螺旋磁场中运动, 轴向导引磁场为

$$B_o = B_o z \quad (1)$$

双绕螺旋 Wiggler 磁场为

$$B_w(r, \Phi, z) =$$

$$2B_w \{-I_1(\lambda) \sin(k_w z - \Phi) r + [I_1(\lambda)/\lambda] \times \cos(k_w z - \Phi) \Phi - I_1(\lambda) \cos(k_w z - \Phi) z\} \quad (2)$$

其中 $\lambda = k_w r$, $k_w = 2\pi/l$ 是 Wiggler 波数, l 是 Wiggler 周期, I_1 是修正的 Bessel 函数。

当电子处在稳定轨道运动时, 其横向运动速率 v_w 和纵向运动速率 $v_{//}$ 可以由下面方程联立求解

$$v_w = \frac{2\Omega_w v_{//} I_1/\lambda}{\Omega_o - \gamma k_w v_{//} - 2\Omega_w I_1(\lambda)} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年1月27日; 收到修改稿日期: 1995年4月7日

$$v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 = (1 - \gamma^2)c^2 \quad (4)$$

其中 $\Omega_w = eB_w/mc$, $\Omega_o = eB_o/mc$, e 是电子电荷, m 是电子质量, c 是光速, $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$, $\lambda = \pm k_w r$, 当 $\Omega_o > \gamma k_w v_{\parallel}$, 电子处于第 I 轨道, $\lambda = -k_w r$, 当 $\Omega_o < \gamma k_w v_{\parallel}$, 电子处于第 II 轨道, $\lambda = +k_w r$ 。

圆柱波导中, 拉曼自由电子激光的模式主要为 TE₁₁ 模, 其耦合频率为

$$\omega = ck_w \gamma_{\parallel}^2 \left(\beta_{\parallel} - \frac{k}{k_w} \right) \left[1 \pm \left(\beta_{\parallel}^2 - \frac{k_{in}^2}{\gamma_{\parallel}^2 (k_w^2 - k)} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

其中 $\beta_{\parallel} = v_{\parallel}/c$, $\gamma_{\parallel} = (1 - \beta_{\parallel}^2)^{-1/2}$, $k = \omega_r/\gamma^{1/2} \gamma_{\parallel} v_{\parallel}$, $\omega_p^2 = eI/\epsilon_0 m v_{\parallel} \pi r_s^2$ 是等离子体频率, I 为电子束流强度, r_s 是电子束半径, $k_{in} = x_{in}/r_s$, 对 TE₁₁ 模, $x_{in} = 1.841$, r_s 是波导半径。

电子的运动可以由 $\gamma - \Psi$ 的方程给出^[7]

$$\frac{d\gamma}{dz} = -C_1 \frac{\beta_w}{\beta_{\parallel}} a_s \sin\Psi - \frac{e}{m_e c^2} E_z \quad (6)$$

$$\frac{d\Psi}{dz} = k_w + k_z \frac{\omega}{c\beta_{\parallel}} + \frac{d\varphi}{dz} \quad (7)$$

其中

$$C_1 = \frac{k_w x_{in}^2}{2\pi k_z r_s^2 (x_{in}^2 - 1) J_1^2(x_{in})} \quad (8)$$

$k_o = \omega/c$ 是辐射电磁波波数, k_z 是纵向电磁波波数, J_1 是 Bessel 函数, φ 是电磁波位相, Ψ 是电子位相, E_z 是电子束纵向的自生电场, 且有

$$\frac{E_z}{m_e c^2} = \frac{2\omega_p^2}{c^2 (k_z + k_w)} \sum_{n=1}^{N_s} \frac{\langle \sin n\Psi \rangle \cos n\Psi - \langle \cos n\Psi \rangle \sin n\Psi}{n} \quad (9)$$

其中 $\langle \dots \rangle$ 代表对所有电子求平均, n 是谐波数, $a_s = (P Z_0)^{1/2} / (mc^2/e)$ 代表电磁波振幅, P 是电磁波功率密度, Z_0 是真空阻抗。

电磁波振幅 a_s 和位相 φ 由下面方程给出

$$\frac{da_s}{dz} = \frac{2\pi C_1 I}{I_A} \langle (\beta_w/\beta_{\parallel}) \sin\Psi \rangle \quad (10)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi C_1 I}{I_A a_s} \langle (\beta_w/\beta_{\parallel}) \cos\Psi \rangle \quad (11)$$

其中 $I_A = 17 \text{ kA}$ 。

3 模拟结果与实验的比较

方程(6)、(7)、(10)和(11)构成了一组自治的微分方程组, 描述了电子和辐射场的特性, 求解这组方程就可得到自由电子激光器的输出功率和效率。我们采用 Runge-Kutta 方法求解方程, 激光器工作方式自发辐射放大, 模拟电子数为 2000。电子束初始能量 γ 在 $\Delta\gamma$ 内均匀分布, 电子初始位相 Ψ 在 $0 \sim 2\pi$ 内均匀分布。

本所拉曼自由电子激光器的工作参数如表 1 所示, 其中 B_w 、 B_o 和 E_s 是实验中的可调节参数, 实验测量了辐射功率随轴向作用距离的变化、辐射功率与 Wiggler 磁场强度的关系和辐射功率与导引磁场强度的关系。

图 1 是辐射功率随作用距离的变化关系, 实线代表模拟结果, 虚线代表实验结果。饱和点的位置约为 0.6 m, 数值模拟的饱和功率为 17 MW, 实验的饱和功率为 12 MW。模拟结果比实

验结果偏高,这是因为数值模拟没有考虑初始电子束具有一定的发射度。

Table 1 Experimental parameters

Parameter	Value
λ_w (m)	0.022
B_w (T)	0.0~0.2
Length (m)	1.19
B_s (T)	0.0~2.0
E_s (MeV)	0.0~0.5
r_s (m)	0.003
I (A)	~800
Δy	~0.05
r_r (m)	0.01
Induced power (W)	0.01

Table 2 Beam current and power

E_s (MeV)	I (A)	P (MW)
0.50	1000	500
0.46	920	423
0.42	840	386
0.40	800	320
0.38	720	275
0.34	560	190
0.30	400	120

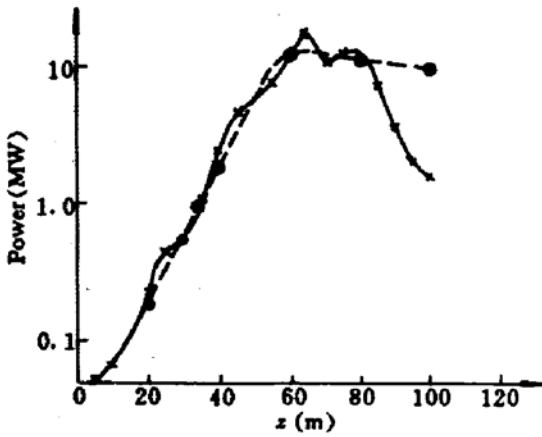


Fig. 1 Radiation power as a function of interaction length z for $E_s = 0.4$ MeV, $B_w = 0.098$ T, and $B_s = 0.935$ T. The solid line is from simulation and the dashed line is from the experiment

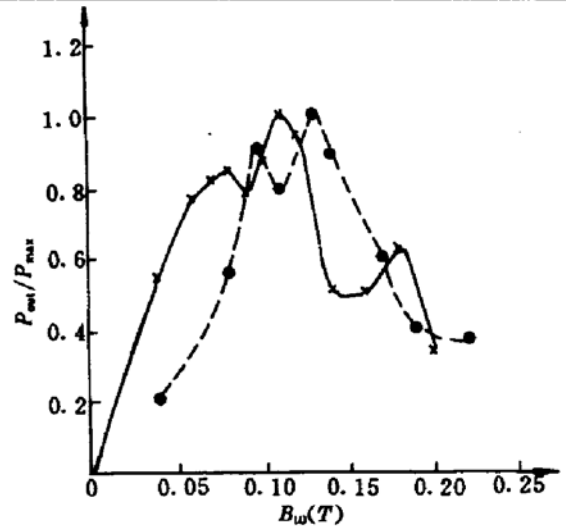


Fig. 2 Radiation power versus wiggler field for $E_s = 0.4$ MeV, and $B_s = 1.0$ T. The solid line is from simulation, and the dashed line is from the experiment

图 2 给出了输出功率随横向磁场的变化,数值模拟的结果与实验相吻合,只是数值模拟的峰值功率对应的 Wiggler 磁场为 0.11 T,比实验结果 (~0.12 T) 约低 10%。辐射波长也随 Wiggler 磁场变化(图 3),从 5.6 mm 到 11.7 mm,可见改变 Wiggler 磁场能在相当大的范围内实现拉曼自由电子激光器的调谐。

图 4 是辐射功率与导引磁场的关系,实验参量满足 $\Omega_s > \gamma k_w v_{\parallel}$,激光器工作在第 II 支(第 I 支的输出功率低,波长的改变也小^[2],本文不予讨论)。在 $B_s = 0.78$ T 处对应回旋共振点,由(3)式电子的横向速度 $v_{\perp} \rightarrow$ 无穷大,电子很快“热化”,导致辐射功率迅速下降。随着 B_s 的增大,辐

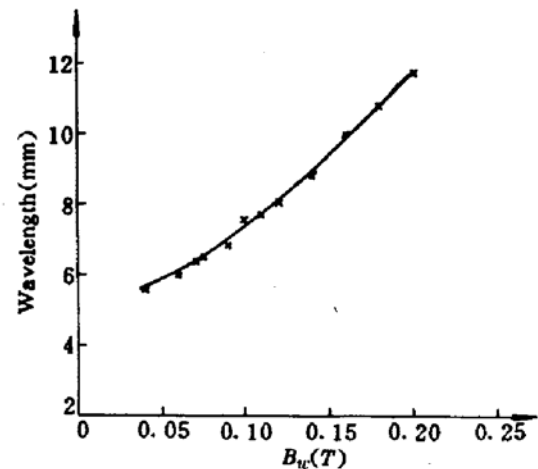


Fig. 3 Wavelength versus wiggler magnetic field for $E_s = 0.4$ MeV, and $B_s = 1.0$ T

射功率上升,继续增大 B_w ,由于增益下降辐射功率降低。在 $B_w = 1.05$ T 处实验得到的输出功率较小,与数值模拟结果相差较大,对此我们还未找到合理解释。导引磁场的变化也能改变辐射波长(图 5),从 5.6 mm 到 10.3 mm,对拉曼自由电子激光器的调谐性能也有很大影响。

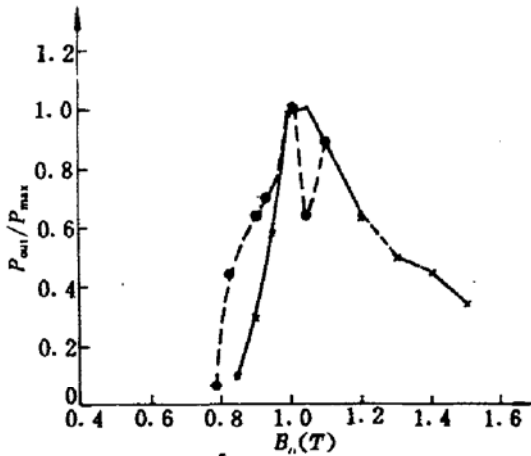


Fig. 4 Radiation power versus guide magnetic field for $E_b = 0.4$ MeV, and $B_w = 0.098$ T. The solid line is from simulation, and the dashed line is from the experiment

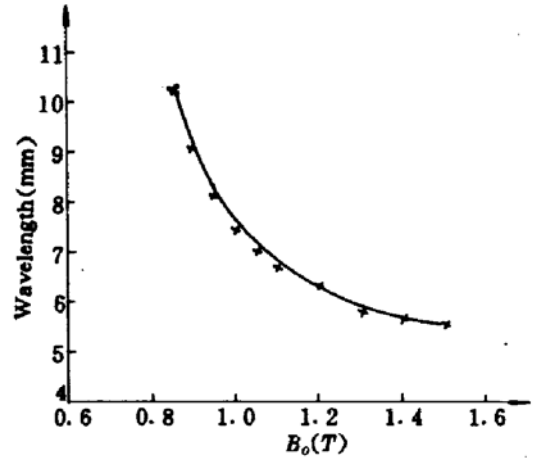


Fig. 5 Wavelength versus guide magnetic field for $E_b = 0.4$ MeV, and $B_w = 0.098$ T

图 6 是模拟计算不同 B_w 和 B_o 下辐射功率与电子束能量 E_b 的关系,四条曲线最大功率处的电子束能量都为 0.5 MeV,这是因为加速器的电压越高,电流就越大,电子束的功率越高(见表 2),辐射功率也就高。在 $E_b = 0.4$ MeV 附近的电子转换效率最高,此时 $B_w = 0.098$ T、 $B_o = 1$ T 对应的辐射功率最强,因此实验参数选在 $E_b = 0.4$ MeV、 $B_w = 0.098$ T 和 $B_o = 1$ T 附近是合理的^[1,2]。当电子束能量降低到 0.3 MeV,束流减少到约 400 I,电子转换效率也大大降低,所以辐射功率也减小。我们还计算了输出波长随电压的变化(图 7),可见改变电压能使波长产生变化,只是为了保证输出功率足够大,电压不能太低,所以波长的变化不大。

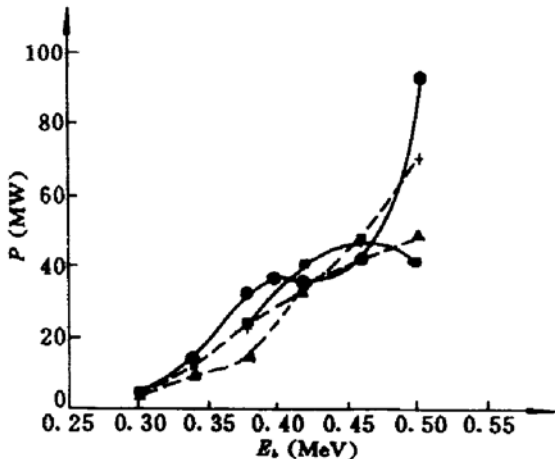


Fig. 6 Radiation power versus beam energy

- : $B_w = 0.098$ T, $B_o = 1$ T;
- : $B_w = 0.12$ T, $B_o = 1.2$ T;
- × : $B_w = 0.08$ T, $B_o = 1$ T;
- △ : $B_w = 0.1$ T, $B_o = 1.2$ T

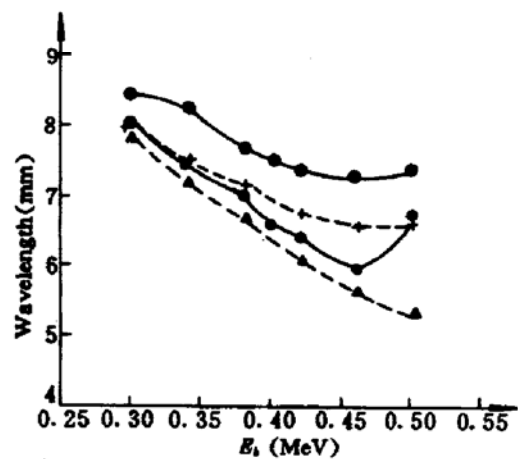


Fig. 7 Wavelength as a function of beam energy

- : $B_w = 0.098$ T, $B_o = 1$ T;
- : $B_w = 0.12$ T, $B_o = 1.2$ T;
- × : $B_w = 0.08$ T, $B_o = 1$ T;
- △ : $B_w = 0.1$ T, $B_o = 1.2$ T

4 结 论

采用非线性模型对本所拉曼自由电子激光器进行数值模拟,入射的自发辐射功率为 0.01

W, 其它参数采用器件能够达到的数值, 得到的饱和点位置和实验相同。改变 Wiggler 磁场、导引磁场和电子束能量, 输出波长分别约改变 81%、63% 和 14%, 且同时仍有相当强的辐射功率 (1 MW 以上)。这台激光器的波长工作在 5 mm 到 12 mm 之间, 具有相当宽的调谐范围。

致谢 本所姚裕贵和丁彦华为调试程序提供了帮助, 作者深表谢意。作者还要感谢周慧芬、冯诚士和陆宾等同志的帮助。

参 考 文 献

- 1 褚 成, 陆载通, 施瑞根 等. 拉曼自由电子激光器的实验研究. 中国科学(A), 1985, (9):992
- 2 M. C. Wang, Z. J. Wang, J. Z. Chen *et al.*. Experiments of Raman FEL with distributed feedback cavity. *Nucl. Instr. & Methods*, 1991, A304: 116
- 3 陆载通, 张立芬, 王明常 等. 拉曼自由电子激光器辐射谱的测量. 中国激光, 1991, 18(12):881
- 4 W. B. Colson. One-body analyses of free electron lasers. *Phys. Quant. Electr.*, 1977, 5: 157
- 5 N. M. Kroll, P. L. Morton, M. N. Rosenbluth. Free-electron lasers with variable parameter wiggler. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17(8):1436
- 6 H. P. Freund, A. K. Ganguly. Nonlinear analysis of efficiency enhancement in free-electron laser amplifiers. *Phys. Rev.*, 1986, 33(2):1060
- 7 J. S. Wurtele, R. Chu. Nonlinear theory and experiment of collective free electron lasers. *Phys. Fluids (B)*, 1990, 2(7):1626

Study of a Tunable Raman Free-electron Laser

Huang Yu Wang Mingchang Wang Zhijiang Zhang Lifeng Zhu Junbiao

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

Abstract. A 8 mm wavelength Raman Free-electron Laser has been investigated numerically with a nonlinear theory, and its tunable ability has been studied by varying the simulation parameters. The wavelength of the FEL is variable continuously from 5 mm to 12 mm. The general behaviour of the experiment is reproduced by the simulation.

Key words Raman Free-electron Laser, tune