

不用导引磁场的虚火花束源拉曼自由电子激光器的数值计算*

杨 斥 王明常 黄 羽 于金辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放实验室, 上海 201800)

摘 要 采用非线性模型对拉曼自由电子激光器进行数值模拟, 发现虚火花束源自由电子激光器可以去掉导引磁场, 用小周期摇摆器, 实现器件的小型化和高功率。

关键词 自由电子激光器, 虚火花放电, 导引磁场, 摇摆器。

1 引 言

自由电子激光器(FEL)具有高功率、高效率和波长可调谐等特点, 因而在通讯、毫米波雷达和反隐形目标等科学研究及军事、医学上有广泛的应用前景。自由电子激光器今后的发展方向是小型化和实用化, 只有达到结构紧凑、价格低廉, 才能发挥其高功率和可调谐的特长而走向实用化。为实现小型化, 可通过以下几种途径: 加速器小型化, 去掉导引磁场, 控制系统小型化, 缩短摇摆器周期等。为此已经研制出了虚火花放电装置^[1]和小周期摇摆器^[2], 目前我们已获得能量 300 keV, 束流为 10 kA 的电子束^[3], 为实现小型化和高效率打下了很好的基础。

为了了解激光器小型化的可能性以及器件性能, 为小型化自由电子激光器实验工作做指导, 就需要对这种新型电子束产生激光的过程进行精确模拟。尤其需要研究进行无导引磁场自由电子激光器实验的可能性。虽然胡克松等人在脉冲线加速器上已成功地进行了无导引磁场自由电子激光器实验^[4], 但因为无导引磁场实验要求高质量束流, 而脉冲线加速器产生的束流质量差, 难以满足要求。因此需要附加设备来改善束流质量, 但这不利于小型化。而本文所述的虚火花放电装置, 既能产生高质量束流, 又可不需要附加设备而实现无导引磁场实验。

本文对采用双绕螺旋摇摆器的虚火花束源拉曼自由电子激光器进行了数值模拟, 研究了有导引磁场、无导引磁场和不同摇摆器磁场下激光器的辐射功率、辐射波长和饱和点位置的变化, 得到了小型化虚火花束源拉曼自由电子激光器的最佳工作参数。

2 理论模型

自由电子激光器的数值模拟方法有一维弗拉索夫(Vlasov)方程、科尔森(Colson)的单粒子计算、Freund 等的三维非线性自治理论^[5]。非线性模型^[6,7]充分考虑波导和空间电荷的作

* 国家自然科学基金(69337010)资助项目。

收稿日期: 1998-12-30; 收到修改稿日期: 1999-04-09

用, 更接近实际情况, 故本文采用它来对带轴向导引磁场和双螺旋摇摆器的拉曼自由电子激光器进行数值模拟。

电子在轴向和螺旋磁场中运动, 轴向导引磁场为

$$\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{e}_z. \quad (1)$$

双绕螺旋摇摆器磁场为

$$\mathbf{B}_w(r, \varphi, z) = 2B_w \{ I_1'(\lambda) \sin(\chi) \mathbf{e}_r - [I_1(\lambda)/\lambda] \sin(\chi) \mathbf{e}_\varphi + I_1(\lambda) \sin(\chi) \mathbf{e}_z \}, \quad (2)$$

式中 $\lambda = k_w r$, $\chi = \varphi - k_w z$, $k_w = 2\pi/f$ 为摇摆器波数, f 为摇摆器周期, I_1 是修正的贝塞尔函数。

当电子在稳定轨道上运动时, 其运动轨道为圆柱螺旋线轨道, 径向速度为零, $x = \pm \pi/2$ 。其横向运动速度 v_w 和纵向运动速率 $v_{//}$ 可以由下面方程联立求解

$$v_w = \frac{2\Omega_w v_{//} I_1(\lambda)/\lambda}{\Omega_0 - k_w v_{//} \pm 2\Omega_w I_1(\lambda)}, \quad (3)$$

$$v_w^2 + v_{//}^2 = (1 - 1/\gamma^2) c^2, \quad (4)$$

式中 $\Omega_w = eB_w/mc$, $\Omega_0 = eB_0/mc$, e 为电子电荷, m 为电子质量, c 为光速, 相对论能量因子 $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$ 。

该螺旋线轨道的参量约束条件是

$$\lambda = \frac{v_w}{v_{//}}. \quad (5)$$

$$\sqrt{\frac{1 - \gamma^{-2}}{1 + \lambda^2}} = \frac{\Omega_0}{ck_w} \pm 2 \frac{\Omega_w}{ck_w} \left[\frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} \right] I_1(\lambda). \quad (6)$$

当 $x = +\pi/2$, $\Omega_0 < k_w v_{//}$ 时, 电子处于第 I 轨道, (3) 式和(6) 式中取正号(+), $\lambda = -v_w/v_{//}$; 当 $x = -\pi/2$, $\Omega_0 > k_w v_{//}$ 时, 电子处于第 II 轨道, (3) 式和(6) 式中取负号(-), $\lambda = v_w/v_{//}$ 。

在圆柱型波导中, 拉曼自由电子激光的模式主要为 TE₁₁ 模, 其耦合频率为

$$\omega = ck_w \gamma_{//}^2 \beta_{//} \left[1 - \frac{k}{k_w} \right] \left[1 \pm \left[\beta_{//}^2 - \frac{k_{11}^2}{\gamma_{//}^2 (k_w - k)^2} \right]^{1/2} \right], \quad (7)$$

其中电子归一化纵向速度 $\beta_{//} = v_{//}/c$, $\gamma_{//} = (1 - \beta_{//}^2)^{-1/2}$, $k = \omega_p/\gamma^{1/2} \gamma_{//} v_{//}$, $\omega_p^2 = eI/\epsilon_0 m v_{//} \pi r_e^2$ 是等离子体频率。 I 为电子束流强度, r_e 为电子束半径。虚火花电子束的束流比二极管产生的电子束的束流大, 而束半径比其小。 $k_{11} = X_{11}/r_g$ 为 TE₁₁ 的截止波数, X_{11} 是 $J_1'(X_{11}) = 0$ 的第 l 个零点, $J_1'(X_{11})$ 是 l 阶第一类贝塞尔函数对 X_{11} 的导数。对 TE₁₁ 模, $X_{11} = 1.841$, r_g 为波导半径。

电子的运动可以由 $\gamma\Psi$ 的方程给出^[6]

$$\frac{d\gamma}{dz} = -C_1 \frac{\beta_w}{\beta_{//}} a_s \sin \Psi - \frac{e}{m_0 c^2} E_z, \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi}{dz} = k_w + k_z - \frac{\omega}{c\beta_{//}} + \frac{d\varphi}{dz}, \quad (9)$$

其中

$$C_1 = \left[\frac{k_0 x_{11}^2}{2\pi k_z r_g^2 (x_{11}^2 - 1) J_1^2(x_{11})} \right]. \quad (10)$$

$k_0 = \omega/c$ 为辐射电磁波波数, k_z 是纵向电磁波波数, J_1 为贝塞尔函数, φ 为电磁波相位, Ψ 为电子相位。 E_z 为电子束纵向的自生电场, 且有

$$\frac{E_z}{m_0 c^2 / e} = \frac{2\omega_p^2}{c^2(k_w + k_z)} \sum_{n=1}^{N_h} \frac{\langle \sin n\Psi \rangle \cos n\Psi - \langle \cos n\Psi \rangle \sin n\Psi}{n}, \quad (11)$$

式中 $\langle \dots \rangle$ 表示对所有电子求平均, n 为谐波数。 N_h 为谐波的最高阶数, 取为 5。 $a_s = (PZ_0)^{1/2} / (mc^2/e)$ 代表电磁波振幅, P 为电磁波功率密度, Z_0 为真空阻抗。

电磁波振幅 a_s 和相位 Φ 由下面方程给出

$$\frac{da_s}{dz} = \frac{2\pi C_1 I}{I_A} \frac{\beta_w}{\beta_{//}} \langle \sin \Psi \rangle, \quad (12)$$

$$\frac{d\Phi}{dz} = \frac{2\pi C_1 I}{I_A a_s} \frac{\beta_w}{\beta_{//}} \langle \cos \Psi \rangle, \quad (13)$$

其中 $I_A = 17 \text{ kA}$ 。

3 模拟结果

(8) 式、(9) 式、(11) 式和(12) 式描述了电子和辐射场的特性, 构成了一组自治的微分方程组。求解这组方程就可以得到自由电子激光器的输出功率和效率。我们采用二阶龙格-库塔法求解方程。激光器以自发辐射放大方式工作, 模拟 2000 个电子。电子束初始能量在 $\mathcal{Y} \pm \Delta\mathcal{Y}$ 范围内均匀分布, 电子初始相位 Ψ 在 $0 \sim 2\pi$ 内均匀分布。

虚火花束源拉曼自由电子激光器的工作参数如表 1 第一列所示, 第二列为原来装置工作参数, 其中 B_w 、 B_0 是实验中的可调节参数。通过模拟得出了输出功率随轴向作用距离的变化与摇摆器磁场强度的关系以及与导引磁场的有无、强度的关系。

Table 1. Experimental parameters

parameter	past device	present device
λ_w / m	0.022	0.012
B_0 / T	0.0~ 2.0	0
B_w / T	0.0~ 0.2	0.0~ 0.3
length/m	1.19	~ 0.8
E_b / MeV	0.0~ 0.5	0.0~ 0.3
$\Delta\mathcal{Y}$	~ 0.05	~ 0.02
I / A	~ 800	~ 2000
r_g / m	0.01	0.006
r_e / m	0.003	0.0015
induced power/W	0.01	0.03

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, 虚线代表原来装置的实验结果。数值模拟的饱和点位置约为0.20 m, 饱和功率为98 MW, 而以前实验的饱和点位置约为0.72 m, 饱和功率为11 MW。

现在装置功率高是因为虚火花电子束的功率高、束流强、发射度低、亮度高; 饱和点位置靠前是因为虚火花电子束的质量好, 束流强, 小周期摇摆器的磁场密度比以往大, 导致输出增益曲线上比以往快, 更容易达到饱和。可见在虚火花放电装置和小周期摇摆器的作用下, 不需要导引磁场也可以在较近的位置得到较高的输出功率。

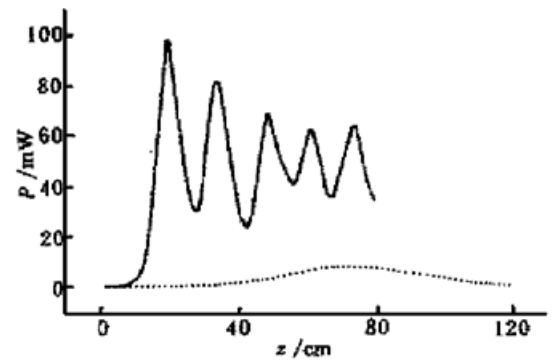


Fig. 1 Radiation power versus interaction length. The solid line is from simulation for $E_b = 0.3 \text{ MeV}$, $B_w = 0.15 \text{ T}$ and $B_0 = 0$. The dashed line is from the experiment of the past device for $E_b = 0.4 \text{ MeV}$, $B_w = 0.098 \text{ T}$ and $B_0 = 0.935 \text{ T}$

图2给出了输出功率随横向磁场的变化, 从中可看出增大摇摆器磁场能大幅度提高功率(大约30%)。辐射波长也随摇摆器磁场变化(图3)。当电子束能量 E_b 为0.3 MeV 时辐射波长在4.9 mm 到6.7 mm 之间, 当电子束能量 E_b 为0.45 MeV 时辐射波长2.9 mm 到3.6 mm 之间, 可见改变摇摆器磁场能实现拉曼自由电子激光器的调谐。但与以往装置相比调谐范围要小。这是因为根据共振方程 $\lambda_s = \lambda_w(1 + a_w^2)/2\gamma^2$ 可知, 输出波长与摇摆器的周期和大小成正比, 而现在的摇摆器周期(1.2 cm)比以前(2.2 cm)小了很多, 摇摆器磁场的大小因条件限制不能有大幅度的提高, 因此输出波长较短。

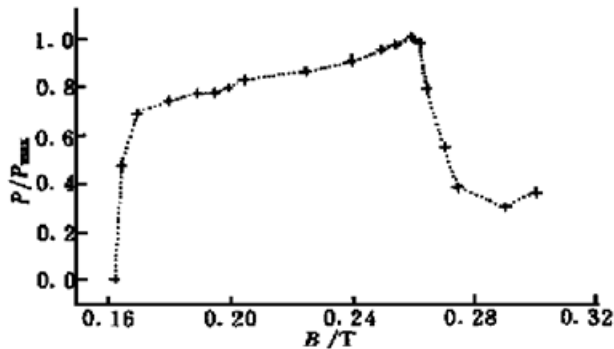


Fig. 2 Radiation power versus wiggler field for $E_b = 0.3$ MeV and $B_0 = 0$

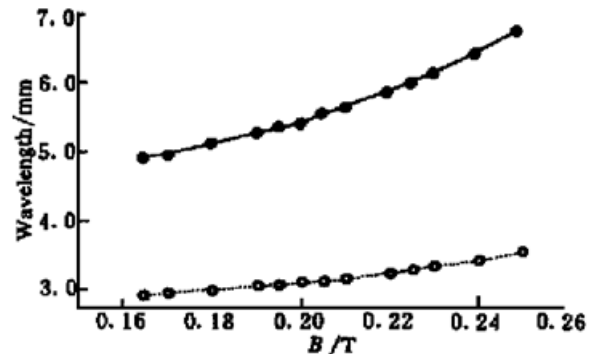


Fig. 3 Wavelength versus wiggler field. The solid line is from simulation for $E_b = 0.3$ MeV, $B_0 = 0$. The dashed line is from simulation for $E_b = 0.45$ MeV, $B_0 = 0$

图4给出了饱和点的位置随摇摆器磁场的变化关系。可以看出摇摆器磁场越强, 饱和点位置越靠前, 并且位置前移较多。当电子束能量 E_b 为0.3 MeV 时前移50 cm, 当电子束能量 E_b 为0.45 MeV 时前移近40 cm。这是因为磁场越强, 电子与磁场相互作用越强, 光强增大越快, 达到饱和越早。因此可以在允许的范围内增加摇摆器磁场, 在较近的位置实现增益饱和, 从而可以使用尺寸较短的摇摆器。

图5给出了辐射功率与导引磁场的关系。可看出加上导引磁场 B_0 后随着 B_0 增大, 功率没有增加, 当 B_0 大于0.2 T 时, 功率反而大幅度地下降, 可见导引磁场对功率的提高没有影响。这首先是因为在拉曼自由电子激光器中, 轴向导引磁场是用来约束电子束在相互作用区中的发散。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, 磁场的方向由电子束

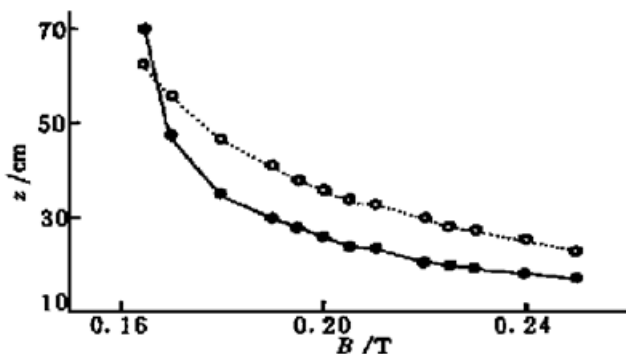


Fig. 4 Location of saturating point versus wiggler field. The solid line is from simulation for $E_b = 0.3$ MeV, $B_0 = 0$. The dashed line is from simulation for $E_b = 0.45$ MeV, $B_0 = 0$

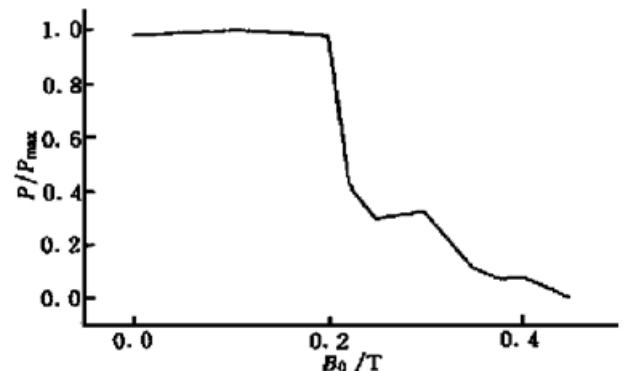


Fig. 5 Radiation power versus guide field for $E_b = 0.3$ MeV and $B_w = 0.2$ T

在磁场中运动时的螺旋轨道来确定。而实际测量表明, 导引磁场对双绕螺旋摇摆器的横向磁场的周期性没有影响, 只是在一定程度上降低了横向磁场的幅值。其次, 双绕螺旋摇摆器对束流也有一定的聚集作用, 它的横向场随半径递增, 对束流有聚焦作用; 而当电子离轴时, 摇摆器场的纵向分量对束流也有聚焦作用。另外, 虚火花放电产生的电子束具有较低的发散度, 而且该电子束束流较大, 可以产生较强的磁自箍缩力, 从而使电子束可以在漂移管内能传输到较远的距离而保持发射度等特性变化不大。因此虚火花电子束在摇摆器中传输时, 可以不必加上庞大的轴向导引磁场, 这就减小激光器的体积, 实现小型化。

结 论 采用非线性模型对拉曼自由电子激光器进行了数值模拟, 入射的自发辐射功率为 0.03 W, 其它参数采用器件能够达到的数值, 得到的饱和点位置比以往装置更近, 辐射功率更强。对于该激光器的功率和饱和点位置, 摇摆器比导引磁场影响要大得多。在虚火花放电装置和小周期摇摆器的作用下, 不需要导引磁场也可以在较近的位置得到相当高的输出功率。因此可以去掉导引磁场, 缩短并同时增强摇摆器, 这将使激光器的小型化成为可能。激光器的工作波长在 4 mm 到 7 mm 之间。

今后应致力于两方面的工作: 一是把背景气体和强流电子束对放电和传输的影响考虑进去。虚火花电子束是在低气压气体中产生和传输的低发射度强流电子束, 在程序中加入气体和自身场的因素, 将使模拟更接近真实情况。二是进行虚火花束源自由电子激光器实验, 将模拟结果和实验结果相比较, 逐步完善模拟程序。我们近期进行的电子束实验已经证明, 摇摆器确实对电子束有聚焦作用, 它可以大大提高电子束的聚束性能。

参 考 文 献

- [1] 王明常, 朱俊彪, 王之江等. 虚火花电子束源研制成功. 光学学报, 1995, **15**(2) ·255
- [2] 封碧波, 王明常, 王之江等. 新型小周期 Wiggler 的研制. 物理学报, 1992, **41**(3) ·442~ 447
- [3] 黄 羽, 王明常, 陆 宾等. 300 kV 电压虚火花放电实验. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2) ·635~ 637
- [4] 胡克松, 黄孙仁, 陈裕涛等. 拉曼型无引导场自由电子激光实验. 强激光与粒子束, 1990, **2**(2) ·158~ 167
- [5] Freund H P, Antonsen T M. *Principles of free-electron lasers*. London, Glasgow, Now York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman & Hall, 1992. 40~ 52
- [6] Wurtele J S, Chu R, Fajans J. Nonlinear theory and experiment of collective free electron lasers. *Phys. Fluids. (B)*, 1990, **2**(7) ·1626~ 1634
- [7] 张世昌. 自由电子激光导论. 成都: 西南交通大学出版社, 1993. 26~ 33

Study of a Raman Free Electron Laser with Pseudospark Discharge Without Guide Field

Yang Chi Wang Mingchang Huang Yu Yu Jinhui
(Laboratory for High Intensity Optics,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 30 December 1998; revised 9 April 1999)

Abstract A Raman free electron laser (FEL) beam with a pseudospark discharge has been simulated numerically by nonlinear model. It proves that the Raman FEL can obtain high power without guide field.

Key words free electron laser, pseudospark discharge, guide field, wiggler.