

新型小周期 wiggler 的研制

封碧波 王明常 王之江 陆载通 张立芬 冯诚士

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800

1991 年 3 月 1 日收到

本文提出一种新型小周期 wiggler 结构, 它是由带铁芯的双绕螺旋片组成, 产生圆极化磁场。对周期为 10mm, 长 100mm 的 wiggler 原型的磁场进行测量, 横向磁场可达 1KG。根据现有的加速器, 加速电压为 400—500keV, 提出了输出频率为 190GHz 的小周期 wiggler 自由电子激光放大器设计。

PACC: 4255T

一、引 言

小周期 (1—10mm) wiggler 在自由电子激光器 (FEL) 应用研究中具有很大的优越性。FEL 的输出波长和 wiggler 的周期与电子束的能量间有如下的关系:

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

其中 λ, λ_w 分别为激光输出波长和 wiggler 周期, γ 为电子能量因子。对于给定的激光输出波长, 采用小周期 wiggler 的 FEL 对电子能量要求较低。因此, 小周期 wiggler FEL 的优点表现为: 降低了电子的能量要求; 对系统的辐射屏蔽要求相对较低; 系统的总体积减小及其成本降低。另一方面, 由于 wiggler 的周期减小, wiggler 的磁场成指数衰减。为了得到较大的磁场, 必须减小 wiggler 间隙, 因此, 限制了电子束电流强度, 从而 FEL 的增益和功率有所降低。

小周期 wiggler FEL 是 FEL 小型化的途径之一, 它可作为高功率的毫米波源, 在基础科学研究和军事上具有极其重要的应用价值。它可用于以电子回旋共振加热磁约束等离子体; 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, 制盲的相干发射源及反隐形目标等电子对抗方面的研究。对毫米波可调谐的小周期 wiggler FEL 的研究正是适应了这一发展的需要。

目前, 已有多种小周期 wiggler FEL 设计和实验^[1]。美国马里兰大学提出了片状电子束小周期 wiggler^[2,3], $\lambda_w = 5—10\text{mm}$, 场强 $B_w = 1—2\text{KG}$ 。在此基础上, (美国海军实验室 NRL) 研制了类似于马里兰大学的 wiggler, 称之为减边效应线性的 wiggler, 其磁场可达到 2—4KG^[4]。美国麻省理工学院 (MIT) 采用细导线绕在 C 型 Fe-Si 线圈上, 得到类似于录像机磁头式的小电磁 wiggler^[5]。另外, 美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 研制了超导 wiggler, 以及 LLNL 和美国加州大学圣·巴巴拉分

校 (UCSB) 研制的小周期永磁 wiggler^[1,6]。我们曾在 1984 年研制成 3m 长、周期为 24mm 的永磁 wiggler, 磁场为 3kG^[7]。

在小周期 wiggler FEL 研究中, 国外常采用线极化的波荡器。[这种结构磁极间隙较小, 不利于电子束的传输, 通常要求片状电子束, 束流强度受到极大的限制, 使得激光输出功率降低。我们设计了一种新型结构的小周期波荡器, 它是由带铁芯的双绕螺旋片组成, 将产生圆极化周期磁场。这种小周期 wiggler FEL 可以采用较大束流强度的实心或空心圆柱电子束, 因而它的激光输出功率较其它小周期 wiggler FEL 有较大的提高。本文首先讨论这种新型 wiggler 的结构及其磁场, 然后根据 wiggler 磁场, 给出小周期 wiggler FEL 实验的一组设计参量。

二、小周期 wiggler 的结构及其磁场

小周期 wiggler 的结构如图 1 所示, 它是由带铁芯的双绕螺旋片组成, 此结构类似于双绕螺旋线组成的 wiggler。螺旋片由铜片制成, 两组铜片旋绕在一起, 中间插入软铁芯。铜片与软铁芯之间采用绝缘漆或绝缘薄膜进行绝缘。两组铜片在一端相互连接, 另一端通以相反的电流。图 1 中, λ_w 为 wiggler 的周期, R 和 r 分别为螺旋片的外径和内径, h_1, h_2 分别为铜片和软铁芯片的厚度。

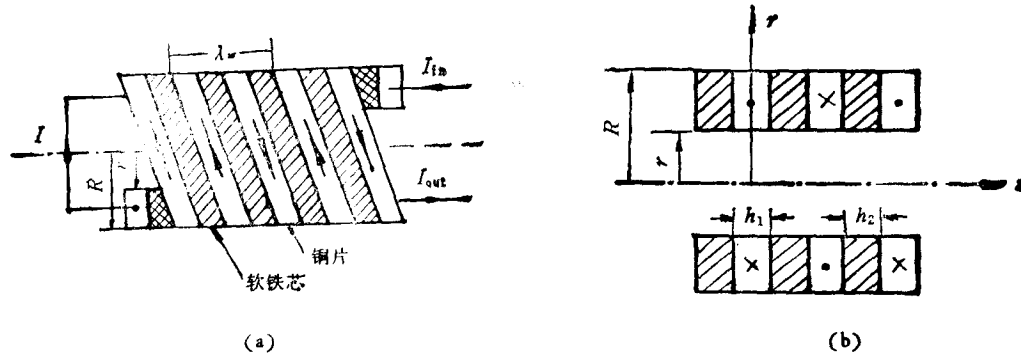


图 1 带铁芯的双绕螺旋片小周期 wiggler 的结构示意图

在无铁芯的情况下, 两组螺旋片中通以相反的电流, 在螺旋管内部将产生周期性变化的圆极化磁场。经计算其磁场近似为^[8]

$$B_r = 2B_w \left[I_0(k_w r) - \frac{I_1(k_w r)}{k_w r} \right] \sin(\theta - k_w z);$$

$$B_\theta = \frac{2B_w I_1(k_w r)}{k_w r} \cos(\theta - k_w z); \quad B_z = -2B_w I_1(k_w r) \cos(\theta - k_w z), \quad (2)$$

其中 B_w 是管内轴线上横截面方向的磁场,

$$B_w = \frac{8\pi I}{10\lambda_w} \left[\frac{2\pi r}{\lambda_w} k_0 \left(\frac{2\pi r}{\lambda_w} \right) - k_1 \left(\frac{2\pi r}{\lambda_w} \right) \right], \quad (3)$$

$k_w = 2\pi/\lambda_w$, I_0, I_1, k_0, k_1 分别为零阶和一阶变形 Bessel 函数。

在近轴附近(即 $r \approx 0$ 时)的磁场近似为

$$\begin{aligned} B_r &= B_w \sin(\theta - k_w z); \\ B_\theta &= B_w \cos(\theta - k_w z); B_z = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

从以上讨论可知,双绕螺旋 wiggler 的横向磁场强度随距离 z 成周期性变化,在轴线上的场强幅值一定。

在螺旋片间加上软铁芯之后,螺旋管内的磁场将大大提高。磁场分布与无铁芯的 wiggler 的相比有所改变,但其磁场的周期性结构将不会改变。定性分析表明,加上软铁芯后, B_r 方向的磁场将得到加强。

三、实验结果

我们研制了带铁芯双绕螺旋片状小周期 wiggler,图 2 是其实物照片。wiggler 的周期 $\lambda_w = 10\text{mm}$,总长度为 100mm ,周期数 $N = 10$ 。螺旋片的内径和外径分别为 10mm 和 20mm ,铜片和铁芯厚度均为 2mm 。螺旋片上电流输入和输出端的电阻为 $30\text{m}\Omega$ 。铁芯采用硅钢材料,铜片和铁芯间用薄膜绝缘。

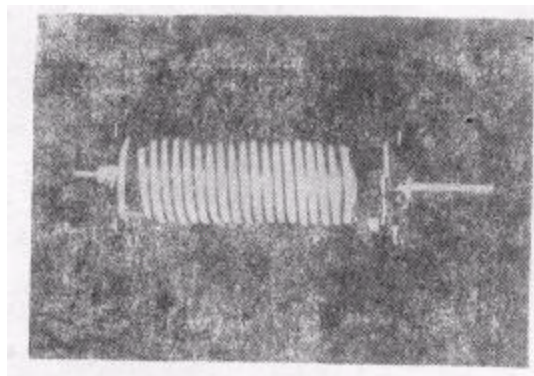


图 2 双绕螺旋片小周期 wiggler 实物照片
周期为 10mm ,长度为 100mm

加在 wiggler 两端的电流是由一电容组提供。利用一分压线圈测量出放电回路中的电流强度。实验表明,电容器上的电压与回路中峰值电流强度的关系为 $I \approx 13U_0$ 。采用自制感应线圈沿轴线测得 wiggler 磁场的微分信号 (dB_w/dt);该信号通过密勒积分器后,测得 wiggler 轴线上的横向磁场。

图 3 显示磁场随时间变化的波形曲线,其中电容器上的充电电压为 500V 。图 3 中比较了在螺旋片中加上铁芯和未加铁芯

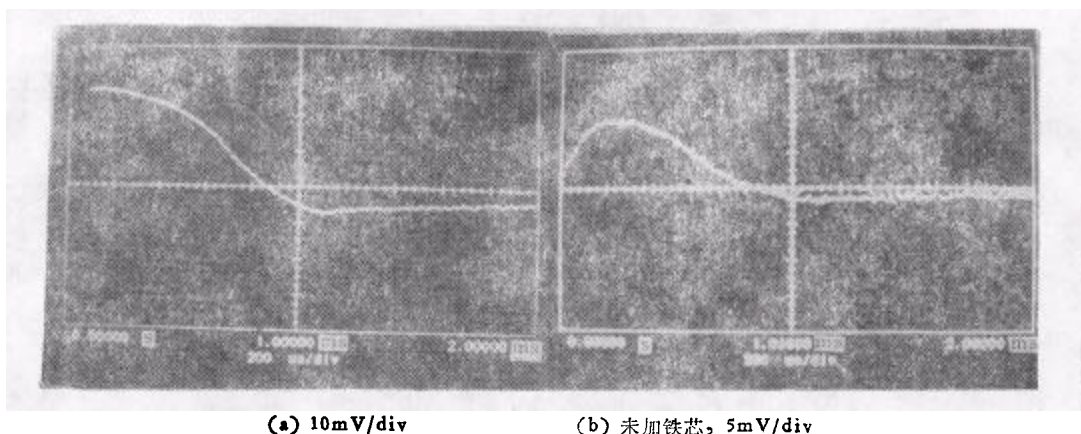


图 3 双绕螺旋片小周期 wiggler 磁场随时间变化波形 加铁芯,电容器充电电压 500V

的情况。由于铁芯的影响, 波形曲线有了较大的改变, 到达最大峰值的前沿时间从未加铁芯的 0.2ms 缩短到 0.086ms, 且峰值处波形变得更为平整, 有利于自由电子激光总体实验。脉冲宽度均约为 0.83ms。磁场的幅值有了显著的提高, 为未加铁芯的 3 倍左右。

改变电容器的充电电压, 得到一组实验数据, 如图 4 所示。wiggler 磁场强度可以通过调节电容器电压改变, 总体实验所要求的 1kG 磁场是可以达到的。

保持探测线圈在 wiggler 磁场中的探测方向不变, 使其沿轴向移动, 测出 wiggler 磁场随轴向 z 呈周期性变化, 如图 5 所示。wiggler 的周期为 10mm, 电容器充电电压为 500V。

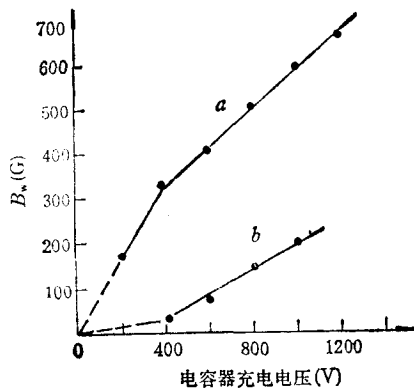


图 4 wiggler 磁场(峰值) B_w 与电容器充电电压 曲线 a 为加铁芯; 曲线 b 为未加铁芯

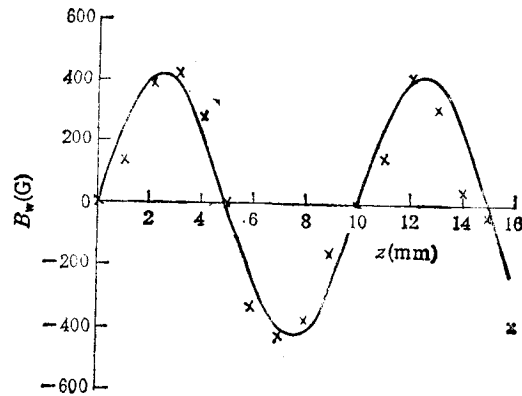


图 5 带铁芯的双绕螺旋片小周期 wiggler 磁场 B_w 沿 z 轴变化测量值 电容器充电电压为 500V 'x' 为测量值

四、小周期 wiggler FEL 设计

众所周知, Raman 型 FEL 是波导模与电子等离子体中负能空间电荷波相互耦合的结果, 且满足关系式

$$\omega = (k + k_w)v_z - \omega_p/\gamma \approx (k + k_w)v_z, \quad (5)$$

其中 ω_p 为电子等离子体频率, ω 和 k 分别为激光频率及波数。

另一方面, 由于电子束是在波导中传输, 电磁波的色散关系必须进行修正, 其近似结果为

$$\omega^2 - c^2 k^2 = \omega_{co}^2, \quad (6)$$

其中 ω_{co} 为波导管截止频率。当 $\omega_p \ll \omega_{co}$ 时, 根据 (5) 和 (6) 式, 可以得到自由电子激光的输出频率为

$$\omega = k_w v_z \gamma^2 \left[1 \pm \beta_z \left(1 - \frac{\omega_{co}^2}{k_w^2 \beta_z^2 \gamma^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (7)$$

图 6 中给出输出频率随 wiggler 磁场 B_w 变化关系曲线。图 6 中选取了如下的计算参量, 电子能量因子为 $\gamma = 2$, $\lambda_w = 10\text{mm}$, 漂移管半径为 $r_g = 7.5\text{mm}$ 。由图 6 可知, 当 $B_w = 1\text{kG}$ 时, 输出的激光频率为 $f \approx 190\text{GHz}$, 即 $\lambda \approx 1.6\text{mm}$ 。

目前,对具有集体效应的 Ramam 型 FEL 理论分析表明^[9,10],无外加引导磁场的 Raman 型 FEL 的增益及其效率分别可以表示为

$$(\text{Im}K)_{\max} \approx \frac{1}{2} |\beta_{\perp}| (\omega_p k_w \gamma_s / v_s)^{\frac{1}{2}}$$

和

$$\eta = \omega_p / (\gamma^{\frac{1}{2}} \gamma_s c k_w). \quad (8)$$

选取图 6 中相同的参量,当 $B_w = 1\text{kG}$ 时, FEL 的增益约为 0.11cm^{-1} , 其效率约为 9%.

双绕螺旋 wiggler 产生的磁场随半径增大而增大,对电子束有聚焦作用.

另外,当电子离轴运动时,将受到 B_s 的

聚焦作用. 因此,对于这种小周期 wiggler FEL, 在无外加轴向引导磁场时, 也可实现 Raman 型 FEL 的超辐射放大实验.

表 1 中给出我们设计的新型 wiggler 及相应的无外加轴向引导磁场的 Ramam 型 FEL 的一组参数.

表 1

加 速 器	加速电压 V	500keV
	电子能量因子 γ	1.98
	束流半径	3mm
	束流强度	1kA
	脉冲宽度	60ns
	外径 R	20mm
	内径 r	9mm
	铜片厚度 h_1	2mm
	铁芯厚度 h_2	2mm
	周期 λ_w	10mm
wiggler 参量	周期数 N	10
	磁场强度 B_w	1000G
	输出频率 f	190GHz
	增益 $(\text{Im}K)_{\max}$	0.11cm^{-1}
计 算 值	效率 η	9%

- [1] R. L. Sheffield *et al.*, Digest of 11th International Conference on Free-Electron Laser, Naples, Aug. (1989), p. 100.
- [2] V. L. Granatstein *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 47(1985), 643.
- [3] W. W. Destler *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 60(1986), 521.
- [4] R. H. Jackson, R. H. *et al.*, Digest of 11th International Conference on Free-Electron Laser, Naples, Aug. (1989), p. 146.
- [5] S. C. Chen *et al.*, *SPIE, Conference Digest*, 13th International Conference on Infrared and Millimeter Waves 1039(1989), 39.
- [6] G. Ramian *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 272 (1988), 81.

- [7] 王明常、周慧芬, 中国激光, 11, (1984), 263,
- [8] J. P. Blewett *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 48 (1977), 2692.
- [9] H. P. Freund *et al.*, *Phys. Rev.*, A24 (1981), 1965.
- [10] P. Sprangle *et al.*, *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. I: *Sources of Radiation*, K. J. Button Ed. (1979) p. 279.

A NOVEL SMALL-PERIOD WIGGLER FOR FREE-ELECTRON LASERS

FENG BI-BO WANG MING-CHANG WANG ZHI-JIANG

LU ZAI-TONG ZHANG LI-FEN FENG CHENG-SHI

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

(Received 1 March 1991)

ABSTRACT

A novel small-period wiggler configuration constructed by sheet of bifilar-helix with ferro-core for free-electron lasers is proposed. The performance characteristics of the wiggler prototype with 10mm period are measured. The field as high as 500G to 1kG have been obtained. The amplifier designs for operation at 190 GHz using modest electron beam energies in the range of 400—500 keV are presented.

PACC: 4255T