

# 永磁 Wiggler 磁场的设计和 小周期数装置的实验

王明常 周慧芬

(中国科学院上海光机所)

**提要:** Wiggler 磁场是自由电子激光器的重要组成部分。根据计算分析和自由电子激光器的总体设计要求,提出了 Wiggler 磁场的设计考虑。研制出小周期数装置,在改变磁隙、周期、磁块尺寸以及材料的情况下进行了测量,同时测量了磁场的正弦分布。结果表明,设计并研制的小周期数 Wiggler 磁场满足总体要求,可用于自由电子激光器。

## Design of permanent magnetic wiggler and the experiment of device with a few periods

Wang Mingchang, Zhou Huifen

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

**Abstract:** Wiggler is an important part of free-electron lasers (FEL). According to the calculation analysis and the over-all requirement of the FEL, the consideration in designing the wiggler is given, a simulation device with a few periods is developed and the effect of magnetic field intensity on magnetic gap, period, size, and material are measured, and the sinusoidal distribution of the magnetic field is investigated. It is concluded that the design and the device can be used in FEL.

### 一、引言

一台自由电子激光器包括相对论电子束源、Wiggler 磁场和激光辐射场三个部分。Wiggler 磁场是电子束和相干辐射场的相互作用区,是自由电子激光器的关键组成部分。它的设计和建造将直接影响到辐射的产生和输出。Wiggler 磁场的波长、场强等参

数与相干辐射的波长、辐射功率以及电子束的减速密切相关。为了增强特定波长的辐射,已将 Wiggler 装置用于产生同步辐射的电子储存环中。

Wiggler 磁场是一个交替改变方向的正弦横磁场,电子通过时会做正弦波的运动。它可以分为超导、电磁铁和永久磁铁三种结构。电磁铁改变场强容易,但对于自由电子

收稿日期: 1983年9月19日。

激光器所要求的 2~4 厘米的小周期, 却难以实现。超导具有体积小的优点, 但价格昂贵。永磁铁可以实现小周期, 而且结构简单。近年来发展起来的稀土钴 (REO) 永磁铁, 具有很高的剩磁和矫顽力, 适用于建造自由电子激光器所要求的 Wiggler 磁场。

K. Halbach 研究了 REC 的物理光学特性<sup>[1]</sup>, 推导了设计 Wiggler 磁场的有关公式。M. W. Poole 分析和数值计算了自由电子激光器用的 Wiggler 磁场<sup>[2]</sup>, 给出了平面周期电磁铁结构的参数。A. Hofmann 综述了普通 Wiggler 磁场和辐射的特性<sup>[3]</sup>。国内自由电子激光器处于起步阶段, 还没有关于 Wiggler 磁场方面的报导。

根据自由电子激光器的总体要求, 我们计算分析了 REC 的有关参数, 研制小周期数 (约 8 个周期) Wiggler 装置。用铝镍钴和钐钴永磁铁在改变磁隙、周期和磁块尺寸的条件下测量了中心场强的变化。同时测量了磁场沿轴向的正弦变化, 为研制和设计 Wiggler 磁场提供了实验参数。磁场上下两排有意不平行放置, 可使场强逐渐变弱。实验表明, 对正弦分布影响不大, 可成为研制渐变 Wiggler 磁场的一种方法。

## 二、设计考虑

平面周期磁场和电子轨道如图 1 所示。在  $z$  轴上磁场的  $y$  轴分量为

$$B_y = -B_\omega \sin \frac{2\pi z}{\lambda_\omega} \quad (1)$$

根据洛伦兹方程, 电子在  $x$  方向上随  $z$  的变化轨道为

$$X = \frac{K}{\gamma} \frac{\lambda_\omega}{2\pi} \sin \frac{2\pi z}{\lambda_\omega}, \quad (2)$$

其中

$$K = \frac{e B_\omega \lambda_\omega}{2\pi m_0 c} \\ = 0.0934 \lambda_\omega (\text{厘米}) B_\omega (\text{千高斯}), \quad (3) \\ \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

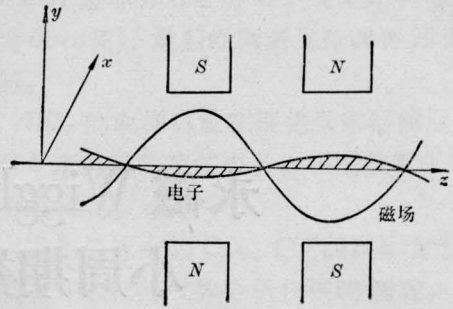


图 1 平面周期磁场和电子轨道的示意图

为电子动能与静止能量之比;  $B_\omega$  为  $z$  轴上的磁场强度;  $\lambda_\omega$  为周期磁场的波长;  $K$  为无量纲参量; 这是确定 Wiggler 磁场装置产生辐射特性的一个很重要的量。  $K$  值一般选在 0.5 和 3.0 之间。

由于激光的增益和磁场周期数  $N$  成正比, 为使  $N$  增大, 要求  $\lambda_\omega$  尽可能的小。而且有限的周期数会引起谱线的加宽, 加宽的数值为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_n} = \frac{1}{nN} \quad (4)$$

其中  $n$  为谐波数。若电子束能谱发散引起的辐射谱加宽在 0.02 左右, 则要求  $N > 50$ 。如果 Wiggler 设计为 2 米, 则要求  $\lambda_\omega < 4$  厘米。当  $\lambda_\omega$  进一步减少时, 轴上磁场强度  $B_\omega$  也减少, 而包含这两个因子的  $K$  值则迅速减少。因此, 根据自由电子激光器总体设计的要求,  $K$  取值在 0.7 和 1 之间, 再根据实验测量的场强  $B_\omega$ , 存在一最小周期值。

当然减少磁隙  $g$  可以增大  $B_\omega$  值。但  $g$  受电子束和真空室尺寸的限制, 也不能太小。目前多取  $\lambda_\omega/g \geq 2$ 。

对于如图 2 所示的两组磁块组合而成的周期磁场, 场强  $B_\omega$  与磁隙  $g$ 、磁块高度  $h$ 、材料的剩磁  $B_r$  及磁场周期  $\lambda_\omega$  的关系为<sup>[2]</sup>

$$B_\omega = 2B_r \frac{\sin \pi/4}{\pi/4} (1 - e^{-2\pi h/\lambda_\omega}) e^{-\pi g/\lambda_\omega}. \quad (5)$$

除了有限周期数和电子束能谱发散引起的辐射能谱加宽以外, 磁场不均匀也会引起

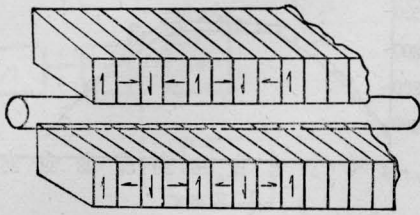


图2 Wiggler 磁场结构示意图

加宽。要求对所用的磁块进行挑选,使其不均匀的影响不超过前两项引起的加宽。我们要求不均匀度  $< 0.02$ 。

为了使 Wiggler 磁场引起的电子束转角偏转和位移最小,在 Wiggler 装置每一端固定一对可旋转极化方向的组合磁块。极化方向的角度取向要使通过 Wiggler 场的积分为零,并且使磁块相对于中心平面对称。

### 三、永磁体的特性

国产永磁铁的性能几乎与国际上同等水平。铝镍钴 8 型永磁材料(上海产)其剩磁  $B_r = 8$  千高斯。矫顽力  $H_c = 1.25$  千奥斯特。最大磁能积  $(BH)_{\max} = 4.0$  千奥斯特·千高斯。优点是价格便宜。最大缺点是矫顽力太低。装置成如图 2 所示结构会很快退磁,不能使用。

钐钴磁铁具有高的剩磁  $B_r = 8.0 \sim 10$  千高斯,高的矫顽力  $H_c \geq 8$  千奥斯特和高的磁能积  $\geq 20$  千奥斯特·千高斯。而且具有线性退磁曲线,易于计算场的分布,易于设计磁路。允许许多磁块如图 2 所示结构组合在一起,而不会退磁。经过实验,完全满足对 Wiggler 磁场的要求,是理想的材料。特别是它不消耗功率,不要求冷却。只是不象电磁铁那样方便地改变场强,通常是通过调节磁隙来改变场强。

设计 Wiggler 磁场,采用钐钴永磁铁。首先根据电子束聚焦能达到的最小束径加上真空室的壁厚来确定最小磁隙  $g$ 。我们选取  $g = 1.0 \sim 1.5$  厘米。然后根据式(3)和式(5)

来平衡其他参量。

若取  $g = 2$  厘米,  $K = 1.0$ ,  $B_r = 10$  千高斯,  $\lambda_w/g \geq 2.0$ 。则由式(5)得  $B_w = 2.6$  千高斯,由式(3)得  $\lambda_w = 4$  厘米。周期仍嫌大,进一步缩小则要进行一系列的计算,并结合实际测量来决定。

表 1 为不同磁场周期  $\lambda_w$ 、磁块高度  $h$ 、磁隙  $g$  时相对场强  $B_w/B_r$  的数值。根据式(5)的计算曲线示于图 3。可以明显看出场强随各参量的变化趋势。

$h = 1.2$  厘米时,  $g = 1.2$  厘米与  $g = 1.0$  厘米相比,  $B_w/B_r$  值减少 0.11。 $g$  值相同,

表 1 不同  $\lambda_w$ 、 $h$ 、 $g$  时的  $B_w/B_r$  值

$\lambda_w$ (厘米)	$g = 1.0$		$g = 1.2$		
	$h$ (厘米)				
	0.8	1.0	1.2	1.5	1.2
2.4	0.43	0.45	0.47		0.36
2.5	0.44	0.47	0.49	0.50	0.38
2.8	0.49	0.52	0.55	0.57	0.44
3.1	0.52	0.57	0.60	0.62	0.49
3.4	0.55	0.60	0.64	0.67	0.53
3.7	0.57	0.63	0.67	0.71	0.57
4.0	0.59	0.65	0.70	0.74	0.59
4.5	0.60	0.67	0.73	0.79	0.63
5.0	0.61	0.69	0.75	0.81	0.66
5.5	0.61	0.69	0.76	0.83	0.69
6.0	0.60	0.69	0.76	0.84	
7.0	0.59	0.68			

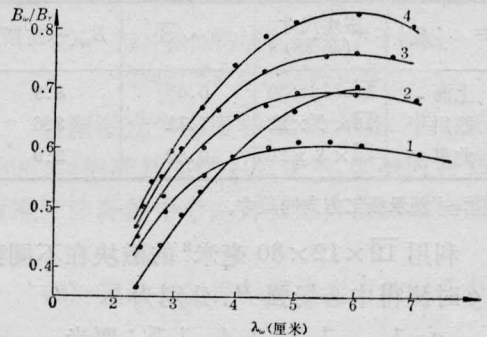


图3 不同参量情况下场强随磁场周期变化的计算曲线

曲线 1~4:  $g = 1.0$  厘米,  $h$  分别为 0.8、1.0、1.2 和 1.5 厘米; 曲线 5:  $g = 1.2$  厘米,  $h = 1.2$  厘米

$B_{\omega}$  值随  $h$  增加而变大。实际测量的  $B_{\omega}$  值远小于由公式(5)计算的值。例如在  $h=1.2$  厘米、 $\lambda_{\omega}=2.4$  厘米时, 测量得  $B_{\omega}=2.4$  千高斯, 而计算值为 3.76 千高斯。

#### 四、小周期数 Wiggler 磁场的测量

采用铝镍钴 8 和钐钴两种磁铁, 研制两台周期数为 8 的模拟 Wiggler 装置。每块磁块尺寸为  $6 \times 12 \times 30$  毫米<sup>3</sup>。在易磁化轴方向磁化, 图 2 中用箭头表示。

磁场测量用 CT3 型特斯拉计, 其测量精度为 2.5%。最小有效读数为几高斯。在测量极性方向变化的周期磁场时, 由于霍耳效应而产生的电流的方向变化在 CT3 上(指针零点不在中间)会引进测量误差。我们采取正、负两次平均的办法来消除这一系统误差。

在磁隙  $g=1.0$  厘米时, 同样尺寸的铝镍钴材料的中心场强  $B_{\omega}=0.95$  千高斯。而钐钴材料的场强  $B_{\omega}=2.4$  千高斯。

场强数值和磁块高度  $h$  及横截面面积  $S$  大小有关。 $h$  增加,  $B_{\omega}$  增大, 逐渐饱和。磁路设计采用  $h/\sqrt{S}=1.0 \sim 1.5$  的比例较好。

我们对上海、北京和四川等单位的 REC 样品进行了测试。由于尺寸不一致, 采用  $h/\sqrt{S}$  来归一比较。具体条件是  $g=1.0$  厘米。

产地	磁块尺寸 (毫米 <sup>3</sup> )	$h/\sqrt{S}$	$B_{\omega}$ (千高斯)
上海	$12 \times 12 \times 30$	0.63	3.8
四川	$16 \times 9 \times 23$	1.11	3.6
北京	$12 \times 8 \times 28$	0.80	2.9

其中“—”表示极化方向的尺寸。

利用  $12 \times 12 \times 30$  毫米<sup>3</sup> 的磁块在不同磁隙  $g$  时测得中心场强  $B_{\omega}$  分别为

$$g=1 \quad 1.2 \quad 1.4 \quad 1.5 \quad \text{厘米}$$

$$B_{\omega}=3.8 \quad 3.5 \quad 3.0 \quad 2.85 \quad \text{千高斯}$$

与前面  $h=12$  毫米的数值比较, 只是磁块宽度由 6 变为 12 毫米,  $B_{\omega}$  由 2.4 提高到 3.8

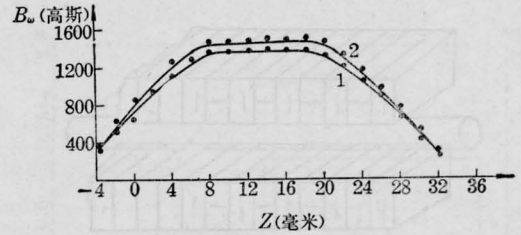


图4 场强横向分布的测量曲线

曲线 1—磁块高 12 毫米; 曲线 2—磁块高 24 毫米

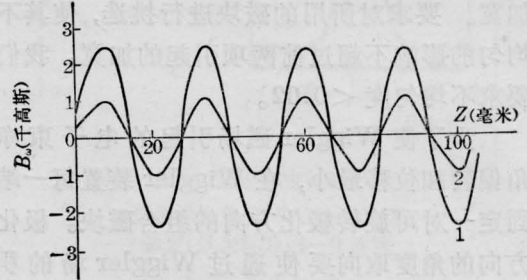


图5 磁场沿  $z$  轴的正弦分布

曲线 1 为钐钴磁铁; 曲线 2 为铝镍钴磁铁

千高斯, 在如图 3 所示的周期排列的情况下, 场强还可以增加。

场强横向分布的均匀性也是一关键指标。为保证电子束各部分都获得均匀的磁场, 选择磁铁的横向尺寸远大于电子束径。实验测量了不同情况下场强的横向分布, 图 4 示出测量曲线。在 30 毫米的横向尺寸中, 大约磁块中心有 10 毫米以上的区域能保证均匀度  $\leq 0.02$ 。

两种材料的小周期 Wiggler 磁场场强沿  $z$  轴的变化呈正弦分布, 测量曲线示于图 5。磁场的正弦波形保证辐射的单色性, 磁场的谐波分量也会引起辐射产生谐波。磁场参量和辐射波长  $\lambda_s$  有如下关系

$$\lambda_s = (\lambda_{\omega}/2\gamma^2) \left[ 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right] \quad (6)$$

其中,  $\gamma$  为电子束的动能与静止能量之比;  $\theta$  为相对于电子束方向的辐射角。

在图 2 所示结构中, 将上下两排有意不平行放置, 成一定的楔角, 则场强会逐渐变弱。在斜率为 0.01 时, 测量的最大场强变化从 2.2 降低到 1.9 千高斯。实验表明, 对磁

(下转第 269 页)

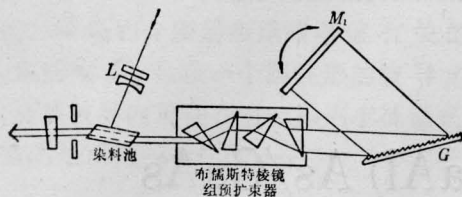


图2 布儒斯特棱镜组预扩束掠入射光栅腔脉冲染料激光器

表2 三种腔型输出线宽、激光效率和调谐范围的比较

腔型	光栅入射角	激光线宽	效率	调谐范围
棱镜组预扩束腔	78°	0.11 厘米 <sup>-1</sup>	10%	600 Å
开腔	89°	0.15 厘米 <sup>-1</sup>	8%	500 Å
闭腔	89°	0.26 厘米 <sup>-1</sup>	1%	450 Å

此外,对简单掠入射光栅腔,实验结果与理论计算结果相差较大。

还测量了上述三种腔型的脉冲染料激光光谱特性。对开腔结构,虽然能得到较宽的调谐范围,但存在强而宽的放大自发辐射背景(ASE);闭腔结构虽能基本上消除 ASE 背景,但调谐范围较窄,且激光效率低;只有布儒斯特棱镜组预扩束光栅腔,能获得宽的调谐范围,又基本消除了 ASE 背景,且输出的激光为线偏振光,偏振方向与光栅刻槽垂直。

图3是用 F-P 标准具拍得的预扩束光栅腔的激光干涉图。测量用 F-P 标准具的自由光谱范围是 1.1 厘米<sup>-1</sup>,精细度为 50。由干涉环测得激光输出线宽为 0.11 厘米<sup>-1</sup>。



图3 预扩束掠入射光栅腔输出激光干涉图

## 四、结 论

在我们的实验条件下,采用布儒斯特棱镜组预扩束掠入射光栅腔,用若丹明 6G 甲醇溶液为激光染料,可以较容易地获得输出线宽约 0.1 厘米<sup>-1</sup>的染料激光,效率大于 10%;调谐范围 600 Å(由 5500 Å 至 6100 Å);输出功率大于 100 千瓦的偏振光,而且在染料激光中基本上消除了自发辐射。

在本工作完成之时,我们见到了与我们结果类似的报导<sup>[8]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] I. Shoshan *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, No. 11, 4495.
- [2] M. G. Littman, H. J. Metcalf; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 14, 2224.
- [3] A. Corney *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **31**, No. 3, 354.
- [4] 张培林,赵朔嫣;《激光》, 1980, **7**, No. 11, 21
- [5] F. J. Duarte, J. A. Piper; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 12, 2113.
- [6] 许祖彦,邓道群;《光学学报》, 1981, **1**, No. 6, 575.
- [7] 可调谐激光器研制组;《激光》, 1982, **9**, No. 5, 51.
- [8] R. Trebino *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**, 1208.

(上接第 266 页)

场的正弦分布影响不大,可成为研制渐变 Wiggler 磁场的一种方法。

为了使电子在 Wiggler 磁场中处处满足共振条件,更精确的研制渐变 Wiggler 磁场的方法是测量电子在不同位置的速度,通过调节磁路来改变场强。

感谢王之江同志对本工作的指导。

## 参 考 文 献

- [1] K. Halback *et al.*; *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-26**, 1979, 3882.
- [2] M. W. Poole *et al.*; *Nucl. Instrum. and Meth.*, 1980, **176**, 487.
- [3] A. Hofmann; *Nucl. Instrum. and Meth.*, 1978, **152**, 17.