

CNIC-01326

CAEP-0014

# 微型摇摆器

刘庆想

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

## 摘 要

摇摆器是自由电子激光的重要组件, 为了使自由电子激光的输出波长更短或降低其对电子束能量的要求, 必须减小摇摆器的周期。我们对钹铁硼和 A3 钢构成的混合式微型摇摆器首次进行实验研究。由于采用钹铁硼新材料、槽形定位和半周期磁场调节, 使得定位精度高, 装调方便, 从而大大提高了磁场强度和磁场分布均匀性, 为变参数摇摆器、光腔速调管结构和摇摆器入口区设计奠定了基础。该微型摇摆器其周期为 10 mm, 当磁极间隙为 5 mm 时, 峰值磁感应强度为 0.35 T, 峰值磁场强度的最大偏差为 1.22%, 达到国际同类型摇摆器的研制水平。

# **Microwiggler**

*(In Chinese)*

LIU Qingxiang

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

## **ABSTRACT**

The hybrid microwiggler is an important assembly in free electron laser device. In order to reduce the free electron laser devices output wavelength or to lower its electron beam power requirement, one has to reduce the wiggler period. The hybrid Microwiggler made of neodymium, iron, boron and A3 steel has been investigated. The new material neodymium, iron, boron used and groovy orientation and half period magnet field adjust technique adopted have improved the orientation precision, and let the wiggler easy to assemble and adjust, thereby greatly strengthened the magnet field and made the magnet distribution more counterpoise. This study found a good base to the varied-parameter design, optical cavity klystron construction design and wiggler area design. The weaver period is 10 mm, when the magnet pole gap is 5 mm, the peak magnet field intensity is 0.35 T with a maxim windage 1.22%.

# 引言

自由电子激光在科学研究和现代技术中有很多潜在应用,但是,现在的自由电子激光系统庞大,结构复杂,而且造价很高,这些不利因素严重地阻碍了自由电子激光应用的发展,因此,缩小自由电子激光的系统尺寸对自由电子激光的应用是很有利的。根据自由电子激光的谐振公式  $\lambda_s = (\lambda_w / 2\gamma^2)(1 + \alpha W^2)$ , 如果输出波长  $\lambda_s$  给定,减小摇摆器周期  $\lambda_w$ , 则所需电子能量因子  $\gamma$  将相应降低,电子能量的降低又导致对 X 射线屏蔽和中子屏蔽要求的减小,从而使加速器成本和复杂性下降,因此进一步研究短周期摇摆器(微型摇摆器),可能对自由电子激光应用于科学研究和现代技术有深远的意义。现在,微型摇摆器在 Maryland 大学, California 大学的 Santa Babera 分校,麻省理工学院, Brookhaven 国家实验室和 Los Alamos 国家实验室正在进行研究。我们用钨铁硼和 A3 钢做了周期为 10 mm 的混合型微型摇摆器的实验研究,本文将给出我们最近的实验结果,介绍该微型摇摆器的物理设计以及结构设计特征,并给出测量结果,对实验结果进行分析讨论。

## 1 微型摇摆器的物理设计

Halbach 于 1983 年首次提出混合型摇摆器结构,其原理图如图 1 所示。我们试验采用这种结构进行微型摇摆器研究。在设计时,我们考虑了以下几个问题。

### 1.1 材料选择

摇摆器永磁块一般选择  $\text{SmCo}_5$  和  $\text{NdFeB}$ , 对于较大的周期/间隙比,  $\text{NdFeB}$  产生的磁场比  $\text{SmCo}_5$  高 20% 左右。因此,我们选择了  $\text{NdFeB}$ 。软磁材料种类更多,但多用高导磁材料 Vanadium permendure,由于时间关系,我们采用了 A3 钢软磁材料。

### 1.2 边结构

Halbach 分析了三种边结构,如图 2 所示。根据 Halbach 的分析,我们选择了外伸结构。

### 1.3 磁极厚度的选择

很显然,周期一定,永磁块越厚,产生的中心磁场越高,就这一点而言,永磁块越厚越好,但是,软磁极越薄,磁场周期分布的谐波分量越强,这是我们所不希望的。另外,永磁块太厚会造成软磁极饱和,综合考虑,我们取永磁块和软磁块厚度比为 1.5:1。

综上所述,我们取永磁材料钨铁硼尺寸为  $35 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。软磁材料 A3 钢尺寸为  $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

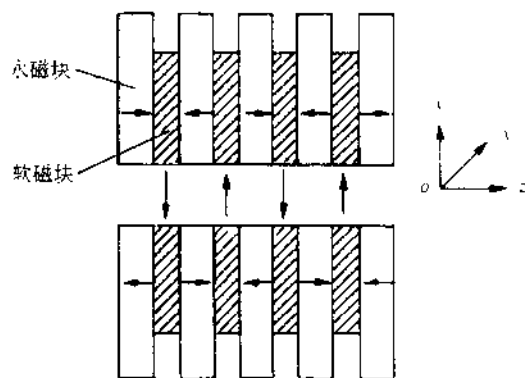


图 1 混合型摇摆器磁极结构原理图

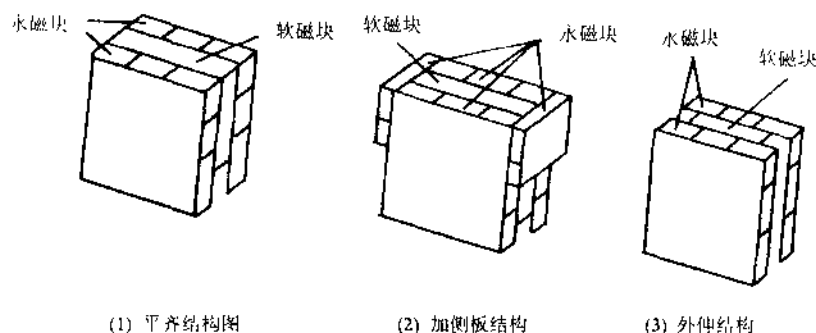


图2 混合型摇摆器二种边结构小意图

## 2 微型摇摆器的结构设计

微型摇摆器的机械结构如图3所示,该结构通过粗调螺钉实行整间隙调节,永磁块连同框夹一起镶在槽板内,框夹与调节套相联接,通过细调螺钉实行半周期间隙细调。软磁块夹在永磁块之间并用压板压住,使其固定不动。

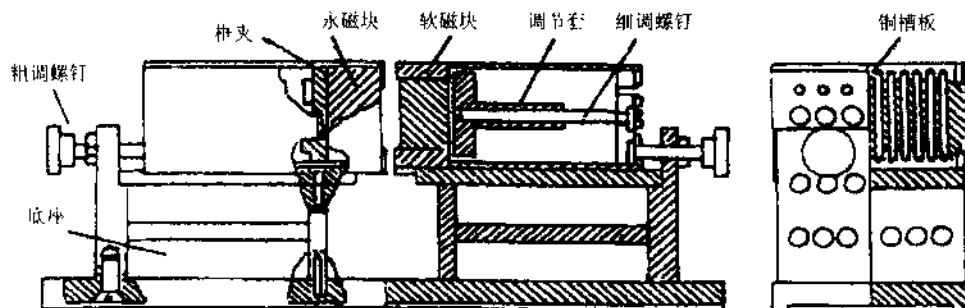


图3 微型摇摆器机械结构示意图

## 3 磁场测量

我们用有效面积  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$  的微型霍耳片测量磁块和微型摇摆器磁场。测量线路如图4所示,用 WL-1 直流稳流器提供霍耳片的控制电流,用 8520 A 数字式多用测试仪测量输出电压。控制电流  $I$ 、输出电压  $V_o$  以及磁场强度  $B$  的关系是

$$B = V_o / KI$$

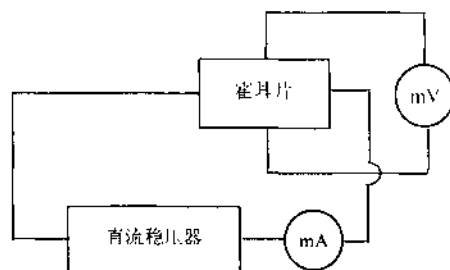


图4 磁场测量原理图

其中  $K$  为霍耳片的霍耳系数, 电流的单位为  $\text{mA}$ , 电压的单位为  $\text{mV}$ , 磁场  $B$  的单位为  $\text{T}$ 。

第一次装调后, 我们经过逐块测量, 得到如图 5、图 6 所示磁场分布曲线, 图 4 所示的测量结果与 D.C. Quimby 等人设计的混合型摇摆器测量结果 (如图 7 所示) 相比, 其磁场分布规律基本一致, 只是周期大小和磁感应强度高低不同而已。不过, 峰值磁场误差仍然较大, 约为 3.2%, 我们认为, 这是由对应的所有磁块磁场的最大偏差为 25% 所致。

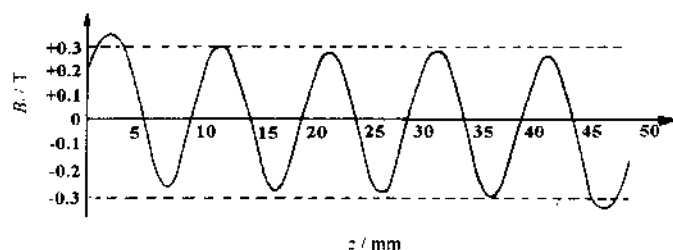


图 5 调整过的微型摇摆器五周期实验单元中心磁场  $B_z$  沿  $z$  轴的分布

$$\lambda_{\text{ex}} = 10 \text{ mm}, \delta = 5.6 \text{ mm}.$$

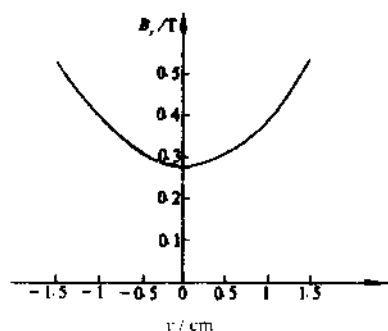


图 6 调整过的微型摇摆器五周期实验单元中心磁场  $B_z$  沿  $y$  方向的分布曲线

$$\lambda_{\text{ex}} = 10 \text{ mm}, \delta = 5.6 \text{ mm}.$$

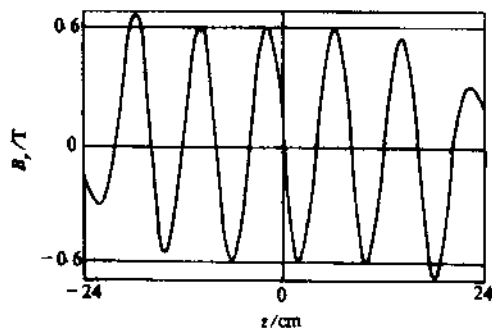


图 7 摇摆器实验单元中心磁场  $B_z$  沿  $z$  轴的分布

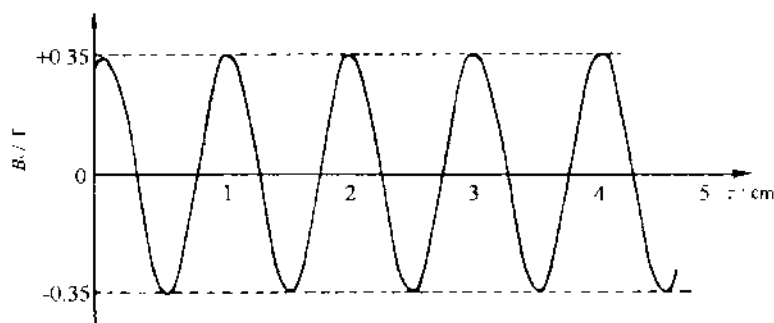


图 8 微型摇摆器五周期实验单元中心磁场  $B_z$  沿  $z$  轴的分布曲线

$$\lambda_{\text{ex}} = 10 \text{ mm}, \delta = 5 \text{ mm}$$

经过一段时间的努力,我们得到图 8 所示的磁场误差进一步减小,约为 1.7%,并解决了图 5 中的终端效应问题。

## 4 结 论

我们将实验结果与国外现有微型摇摆器实验结果相对比,结果如表 1 所示。

表 1 微型摇摆器实验结果对比

| 研究单位         | 类 型     | 周期/mm  | 间隙/mm | 峰值磁感应强度/T | 峰值误差    |
|--------------|---------|--------|-------|-----------|---------|
| Maryland     | 电磁平面偏振  | 5.4~15 | 2.2~7 | 0.2       | 5%      |
| MIT          | 电磁平面偏振  | 10.2   | 5.1   | 0.32*     | 1%      |
| Santa Babera | 永磁平面偏振  | 4      | 2.2   | 0.12      | 2.76%** |
| Los Alamos   | 超导电磁圆偏振 | 8.5    | 2.2   | 1.0       |         |
| CAEP***      | 混合型平面偏振 | 10     | 5     | 0.35      | 1.7%    |

\* 采用低温冷却,峰值磁感应强度可达 0.5 T. \*\* 该值为均方根误差; \*\*\* 中国工程物理研究院。

由表可见,我们的实验结果好于 Maryland 大学和 Santa Babera 的实验结果,与 MIT 和 Los Alamos 的实验结果基本相当。不过,我们的磁场强度有待进一步提高,峰值磁场误差有待进一步减少。

## 参 考 文 献

- 1 Deslter WW J Appl. Phys., 1986, July, 60(2) 15
- 2 Chenn SC Appl. Phys. Lett., 1989, April, 54(14) 1299
- 3 Batchelor K. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1990, A296, 239~243
- 4 Luis R Elias Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1990, A293
- 5 Roger Warren Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1990, A296
- 6 Halbach K Journal De Physique, 1983, 44, C1-211
- 7 Billaraon M Journal De Physique, 1983, 44, C1-29
- 8 Quimby DC Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1988, A272, 192~198
- 9 Halbach K IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, NS-32(5):3640
- 10 Kim SH IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, NS-32(5):2386