

# '97 第六届中南、西南、西北地区激光学术报告会 论文汇编

## 行波磁场摆动器产生自由电子激光的初步研究

周予生 刘圣广 祝家清  
(华中师范大学物理系, 武汉, 430079)

摘要: 在一定放置的线圈中通以正弦交流电时,其附近空间就会产生一个正弦行波磁场,磁场的极距和行波的速度都可以通过输入的频率加以调节。相对论性电子在这种摆动器中的散射波长比较短,而能量因子值可以变,这既有利于向短波长方向发展,又有助于自由电子激光器的小型化。

关键词: 行波磁场 摆动器 自由电子激光

### Preliminary research on walking wave magnetic field wiggler giving off FEL

Zhou Yusheng, Liu Shengguang, Zhu Jiaqing  
(Department of Physics, Central China Normal University, Wuhan, 430079)

**Abstract:** About a coil being charged with a sine-alternation, there is a sine-walking wave magnetic field. The distance between N and S of the field and the speed of the walking-wave all can be regulated by changing the frequency of the sine-alternation. We get the result that the relativistic electron can get off shorter scattering wavelength from the wiggler, the energy-factor can be changed. Therefore the wiggler can be beneficial to the development of shorter wavelength and can contribute to the realization of the miniaturization of FEL.

**Key words:** walking-wave magnetic field wiggler FEL

### 引言

以往的自由电子激光器中,摆动器大体分为静磁摆动器和电磁波摆动器。静磁摆动器是用永磁体交替排列而成的一种周期性的横向磁场结构,当相对论性自由电子穿过时,能产生横向摆动,从而发出辐射<sup>[1]</sup>。电磁波摆动器则是电磁波在波导管内壁来回反射,而以某种方式将这些反射波中的电磁场叠加,形成沿波导管传播的电磁波,且几乎不衰减,当相对论性电子横向穿过时,产生摆动,并发出辐射<sup>[2]</sup>。

提出的行波磁场摆动器模型是,当正弦交流电通过一定结构的线圈时,在其气隙中产生一个行波磁场。该磁场的空间周期性可以用正弦函数形式表述,在一维时磁场强的表达式为<sup>[3]</sup>:  $B_x = B_{ax} \sin[\omega t - (z\pi/\lambda)]$ 。如果采用直线电机定子结构的形式,行波的波速可以用  $v = 2f\lambda$  表示,其中  $f$  为输入正弦交流电的频率,在相当宽的范围内可调;  $\lambda$  为线圈的空间周期结构决定的磁场极距(亦即行波磁场波长),数量级可达  $10^{-2}$  m。显然,当相对论性自由电子通过这个周期性磁场时,也会产生像静磁场摆动器中那样的横向运动,从而产生自发辐射。下面从两方面探讨一下这种行波磁场摆动器产生自由电子激光的一些特点。

### 一、相对论性电子的散射频率和散射波长

有一列行波磁场以波速  $v$  沿  $z$  轴负方向运动,该行波磁场一维表达式为:  $B_x = B_{ax} \sin[\omega t - (z\pi/\lambda)]$ ,  $\lambda$  为波长,其波数为  $k = 2\pi/\lambda$ 。在实验室坐标系中,行波磁场的频率为  $\omega = vk$ , 而  $v = 2f\lambda$ 。设在  $z$  轴方向上有一束相对论性自由电子以  $v_{\parallel}$  速度射入该磁场。

在电子静止坐标系中,行波磁场的频率和波数做洛伦兹变换,由公式<sup>[4]</sup>  $\omega' = \gamma_{\parallel} (\omega - v_{\parallel} k)$  (1)

$$k' = \gamma_{\parallel} [k - (v_{\parallel} \cdot k/c)]$$
 (2)

在(1),(2)式中,  $v_{\parallel}$  是电子在实验室坐标系中的纵向速度。  $\gamma_{\parallel}$  是  $(1 - v_{\parallel}^2/c^2)^{-1/2}$  为电子纵向相对论能量因子。由于  $v_{\parallel}$  与  $k$  方面相向,故(1)式、(2)式改写为:

$$\omega' = \gamma_{\parallel} (\omega + v_{\parallel} k)$$
 (3)

$$k' = \gamma_{\parallel} (k + kv_{\parallel} / c) \quad (4)$$

为讨论方便,将行波磁场看做一个虚光子,其频率和波长为 $(\omega', -k')$ 。这样行波磁场与相对论性自由电子的相互作用可视为虚光子与电子的弹性碰撞过程。由于电子质量比光子质量大得多,故在碰撞前后可以近似地把碰撞前“静止”不动的电子,在碰撞后也仍然看做静止的。设虚光子与电子碰撞后,电子产生的自发辐射波与波数为 $k'_s$ ,频率为 $\omega'_s$ 的虚光子等效。并设碰撞后行波磁场虚光子能量为 $E' = h\omega'$ ,动量为 $P' = hkZ$ ,电子因碰撞产生的自发辐射波所等效的虚光子能量为 $E'_s = h\omega'_s$ ,动量为 $P'_s = hk'_s Z$ ,根据动量能量守恒定律得<sup>[5]</sup>:

$$\omega'_s = \omega' = \gamma_{\parallel} (\omega + v_{\parallel} k) \quad (5)$$

$$k'_s = -k' = -\gamma_{\parallel} [k + (kv_{\parallel})/c] \quad (6)$$

(5)、(6)式中的 $\omega'_s$ 和 $k'_s$ 在实验室坐标中的值 $(\omega_s, k_s)$ 可用狭义相对论中电磁场变换的洛伦兹变换式求得,即

$$\omega'_s = \gamma_{\parallel} (\omega_s - v_{\parallel} \cdot k_s) \quad (7)$$

$$k'_s = \gamma_{\parallel} [k_s - (v_{\parallel} \cdot k_s)/c] \quad (8)$$

由(5)和(7)式即可解出 $\omega_s$ ,运算中应注意到: $\omega_s = ck_s$ ,且 $k_s \parallel v_{\parallel}$ ,

$$\therefore \omega_s = (\omega + kv_{\parallel}) / [(1 - v_{\parallel})/c] \quad (9)$$

又

$$1 - v_{\parallel} / c = 1 - \beta_{\parallel} = (2\gamma_{\parallel}^2)^{-1} \quad (10)$$

$$\therefore \omega_s \cdot 2\gamma_{\parallel}^2 (\omega + kv_{\parallel}) \quad (10)$$

若通过调节 $f$ 的大小,可以实现 $v_{\parallel} = v \cdot c$ 时,并由 $\omega = kv$ ,代入(10)式可得

$$\omega_s \cdot 4\gamma_{\parallel}^2 \omega \quad (11)$$

或改写为波长形式

$$\lambda_s \cdot \lambda / (4\lambda_{\parallel}^2) \quad (12)$$

(11)式揭示了一个重要现象:相对论性电子在行波磁场中产生的自发辐射频率比静磁摆动器中相对论性电子的自发辐射频率提高了一倍,发生了“双重”多普勒频率上移。也就是相对论性电子在行波磁场中辐射的波长比在静磁摆动器中的辐射波长出现了“双重”缩短。即在其它条件不变的情况下,用行波磁场做摆动器比静磁摆动器更容易实现短波长的自由电子激光。

## 二、行波磁场摆动器中相对论性电子的能量因子 $\gamma$

从建立的相对论性电子与行波磁场相向运动模型出发,如图所示,设相对论性电子以 $v_{\parallel}$ 的速度沿 $z$ 轴负方向运动,速度大小为 $v$ ,由相对论的速度合成公式,电子相对于行波的速度为:

$$v' = (v_{\parallel} + c) / [1 + (v_{\parallel} v / c^2)] \quad (13)$$

对应的相对论能量因子为  $\gamma = 1 / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$  (14)

下面通过几个数据计算简要说明一下(13)式和(14)式

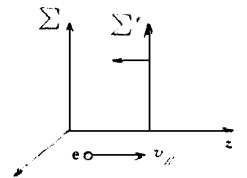
设当 $v_{\parallel} = 0.8c$ 时

$$(1) \text{ 当 } v = 2 \times 10^7 \text{ m/s 时, 计算可得 } v'_1 = 0.823c \quad \gamma_1 = 1.76$$

$$(2) \text{ 当 } v = 2 \times 10^8 \text{ m/s 时, 计算可得 } v'_2 = 0.995c \quad \gamma_2 = 14.3$$

$$(3) \text{ 当 } v = 0 \text{ 时, 计算可得 } v'_3 = 0.8c \quad \gamma_3 = 1.67$$

可见,当行波磁场速度 $v$ 比光速 $c$ 小一个数量级时, $\gamma_1 \cdot \gamma_3$ ;而当行波磁场 $v$ 与光速 $c$ 同数量级时, $\gamma_2 > \gamma_3$ 。即当行波磁场速度与 $v_{\parallel}$ 跟光速 $c$ 同数量级时,相对论性电子对于行波磁场的能量因子值大大提高。换句话说,如果采用行波磁场做摆动器后,用 $0.8c$ 的相对论性电子,达到了在静磁摆动器中用 $0.995c$ 相对论性电子的能量状态。降低了对电子束的要求,有助于自由电子激光的小型化,有利于实现短波长自由电子激光。



## 三、小 结

综上所述,用行波磁场做摆动器从初步的理论分析来看是可能的。其特点是在实现短波长自由电子激光和自由电子激光器小型化方面有优势,这也正是目前自由电子激光器发展的两个主要方向。做为一种新的自由电子激光的摆动器,我们还需要在行波磁场摆动器中电子的自发辐射和受激辐射的特性及其关系;行波磁场摆动器自由电子激光的小信号增益分析;如何通过调节行波磁场的波速实现辐射的共振等问题作进一步

的研究。

### 参 考 文 献

- 1 祝家清著. 自由电子激光引论(第一版). 武汉:湖北教育出版社, 1994
- 2 张世昌著. 自由电子激光导论(第一版). 成都:西南交大出版社, 1993
- 3 惠钟锡主编. 自由电子激光(第一版). 北京:国防工业出版社, 1995
- 4 Joshi C. IEEE J Q E, 1987; 23: 1578
- 5 Camel Y. Phys Rev Lett, 1983; 51: 566

## 高功率 CO<sub>2</sub> 激光作用下硅镜热畸变的动态过程研究

张耀宁 库 耕 张小莉 杜泽明 程祖海

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 以光学干涉方法, 实验研究了在 CO<sub>2</sub> 激光束入射在硅镜上, 硅镜热畸变的动态过程。在变形之初, 硅镜镜面的位移量变化迅速。对于一面直径 70mm, 厚 8mm 的硅镜, 吸收激光功率 140W, 作用时间 4s 时最大挠变形 0.76μm。这对于高功率短波长激光器而言是不可忽略的。

**关键词:** 热畸变 高功率激光器 硅镜 挠变形

## The investigation of the dynamic process on thermal distortion of silicon mirror

Zhang Yaoning, Ku Geng, Zhang XiaoLi, Du Zeming, Cheng Zuhai

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Used optical interferometry, the dynamic process of thermal distortion of the silicon mirror was investigated experimentally, while the 2kW CO<sub>2</sub> laser beam is used as incident source. The displacement of surface of the silicon mirror is varying rapidly in the beginning of the distortion. For a silicon mirror, that is 70mm in diameter and 8mm in thickness, the maximum deflection introduced by thermal distortion is 0.76μm, when the absorbed laser power is 140W and the acting time is 4s. It is not a negligible problem to a high power short wavelength laser.

**Key words:** thermal distortion, high power laser, silicon mirror, deflection

### 引 言

至今为止, 硅镜和铜镜仍是高功率激光器中最常用的腔镜基片材料。然而腔镜吸收了激光功率将产生热应力和热畸变。如果在镜面上有灰尘或缺陷时, 在这些地方上的热应力将变大到足以使镜子破坏。另一方面, 功率足够高时, 激光镜的热畸变将较严重, 当热畸变达到一定程度时激光束质量将变坏。G. L. Herriot 和 H. E. Reedy 以有限元法分析了铜镜和硅镜的稳态热变形<sup>[1]</sup>。我们已对铜镜的变形作了实验研究, 硅镜的热变形作了数值模拟分析<sup>[2,3]</sup>。然而硅镜热变形的实验数据, 特别是动态过程的数据很少。本文将介绍最近实验验证了的硅镜热变形动态过程。

### 一、热 畸 变 理 论

激光器腔镜受到腔内振荡的受激辐射作用被加热。由于热流是从镜子的镀膜面传导到背面、侧面, 镜子内将呈现不均匀的温度分布。而且, 硅的热导率较低, 对通常用作腔镜的硅镜, 这种轴向热流的热弛豫常数在数秒量级。因此, 分析硅镜热畸变需解含时热传导方程:  $\Delta T = (1/a)(\partial T/\partial t)$  (1)

考虑到激光束在镜面上强度分布是以镜子的轴线为对称轴的轴对称分布, 则三维的热传导和热变形问题可以简化为二维问题  $\partial^2 T/(\partial z^2) + \partial^2 T/(\partial r^2) + (1/r)(\partial T/\partial r) = (1/a)[\partial T/(\partial \tau)]$  (2)

式中,  $a = \lambda/\rho \cdot C$ ,  $\lambda$  为硅镜的热导率,  $\rho$  为它的密度,  $C$  为它的比热;  $\tau$  为照射时间。

结合边界条件就可解出各个时刻中硅镜内的温度场。镀膜面吸收的受激辐射, 可以简化为高斯分布, 也