

文章编号: 0258-7025(2007)01-0061-03

# 电子在多层膜摇摆器中的辐射

孟现柱, 王明红

(聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘要** 提出了利用多层膜作自由电子激光器的摇摆器, 利用虚光子和康普顿散射讨论了运动电子在多层膜摇摆器中的自发辐射。(Fe/Cr)<sub>N</sub> 等铁磁-非磁层状材料的铁磁层之间存在反铁磁耦合, 因此可以利用磁性多层膜制作自由电子激光器的摇摆器。考虑到静磁场的空间周期只有 7.8 nm, 要精确计算电子在多层膜摇摆器中运动的自发辐射的波长和辐射功率就必须考虑电子的反冲。给出了运动电子在多层膜摇摆器中的自发辐射波长和辐射功率的精确计算表达式。结果发现, 自发辐射波长和辐射功率表达式中都含有康普顿波长。

**关键词** 激光技术; 自由电子激光器; 自发辐射; 康普顿散射; 虚光子

**中图分类号** TN 248.6 **文献标识码** A

## Radiation of the Motion of an Electron in the Multilayer Film Wiggler

MENG Xian-zhu, WANG Ming-hong

(School of Physics Science & Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

**Abstract** A novel free electron laser with multilayer film wiggler is reported, and the spontaneous radiation of the motion of an electron in the multilayer film wiggler has been discussed by using virtual photon and Compton scattering method. Antiferromagnetic coupling in ferromagnetic-nonmagnetic (such as (Fe/Cr)<sub>N</sub>) multilayers has been observed in experiments. Therefore the wiggler can be made of magnetic multilayers (MLs). Considering the space cycle of magnetostatic field is only 7.8 nm, the precise wavelength calculation and the precise radiating power calculation should consider the reaction propulsion of electron. The precise computing formulas of wavelength and radiating power are investigated, the results show that the formulas of both wavelength and radiating power include Compton wavelength.

**Key words** laser technique; free-electron laser; spontaneous radiation; Compton scattering; virtual photon

## 1 引言

自由电子激光器是利用相对论性电子通过空间周期性静磁场产生受激辐射的<sup>[1~7]</sup>, 小型化和向短波长方向发展是目前自由电子激光器的理论和实验研究的主要课题。这两个发展方向都要求摇摆器有较小的空间周期, 这就使利用普通永磁铁制作摇摆器更加困难。因此, 必须探索制作摇摆器的新机制和新方案。

本文讨论了利用多层膜作自由电子激光器的摇摆器的可行性, 并利用虚光子和康普顿散射分析了其自发辐射的波长和辐射功率。结果发现, 利用多

层膜作摇摆器的自由电子激光器的自发辐射波长和辐射功率必须考虑电子的反冲, 其自发辐射波长和辐射功率表达式应该含有康普顿波长项。

## 2 多层膜磁场的周期性

由铁磁性材料(如 Fe)和非铁磁性材料(如 Cr)交替沉积形成的磁性多层膜(如 (Fe/Cr)<sub>N</sub> 多层膜), 在不加外磁场( $H=0$ )和非磁层厚度合适的情况下, 两个相邻铁磁层会产生反铁磁耦合<sup>[8,9]</sup>, 即一层中原子磁矩基本沿同一方向排列, 而相邻层原子的磁矩反平行排列。图 1 给出了 (Fe/Cr)<sub>N</sub> 多层膜铁磁

收稿日期: 2006-06-23; 收到修改稿日期: 2006-09-13

基金项目: 聊城大学科研基金(X041047)资助项目。

作者简介: 孟现柱(1968—), 男, 山东平邑人, 副教授, 硕士, 主要从事康普顿散射和自由电子激光方面的研究。

E-mail: mengxz12@yahoo.com.cn

层中磁矩方向示意图,其中 Cr 的薄层用黑色表示,没有磁性。显然这种多层膜中铁磁性材料的排列方式和摇摆器中磁铁的排列方式相同。如果按照图 2 所示在多层膜中制作一条直径为  $d$  的小孔(图中虚线代表磁场线),当相对论电子沿小孔运动时,就会受到多层膜中铁磁性材料产生的周期性磁场的作用,产生自发辐射。因此该小孔相当于静磁摇摆器。

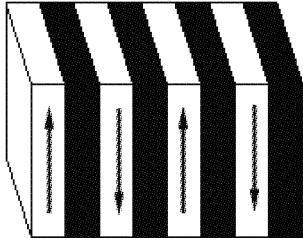


图 1 (Fe/Cr)<sub>N</sub> 多层膜中磁矩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic moment in (Fe/Cr)<sub>N</sub> multilayer film

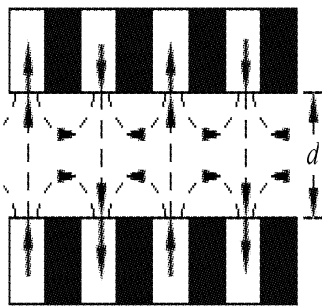
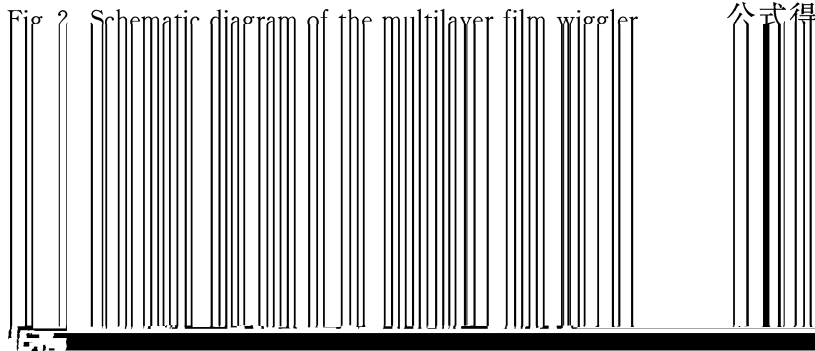


图 2 利用多层膜制作的摇摆器的示意图



以写为

$$\mathbf{B} = B_0 \sin(k_u z) \mathbf{e}_y, \tag{2}$$

其中  $k_u = 2\pi/\lambda_u$ 。

### 3 自发辐射波长

建立与电子纵向运动  $V_z$  静止的坐标系  $\Sigma'$ , 其中  $\Sigma'$  系的  $z'$  轴和  $\Sigma$  系的  $z$  轴重合且同向,  $y'$  轴与  $y$  轴平行且同向。从  $\Sigma'$  系中观察, 电子是静止的, 周期静磁场沿负  $z'$  轴方向运动。根据洛伦兹(Lorenz)变换和电磁场的相对论变换可得  $\Sigma'$  系中的电场和磁场

$$\begin{aligned} \mathbf{E}' &= V_z B_0 \sin[k_u \gamma(z' + V_z t')] \mathbf{e}_x, \\ \mathbf{B}' &= B_0 \sin[k_u \gamma(z' + V_z t')] \mathbf{e}_y, \end{aligned} \tag{3}$$

由(3)式知,在  $\Sigma'$  系中磁场和电场都是随时间  $t'$  变化的,按照电磁理论,这种变化的电场和磁场产生电磁波,由于该电磁波是在  $\Sigma'$  系中观察到的,在  $\Sigma$  系中不能观察到,因此叫虚光子。由(3)式知  $\Sigma'$  系中变化的电场和磁场的圆频率  $\omega = k_u \gamma V_z$ , 所以  $\Sigma'$  系中虚光子的波长为

$$\lambda'_u = \lambda_u / (\gamma \beta), \tag{4}$$

其中相对速度  $\beta = V_z/c$ 。

当这个虚光子与电子发生康普顿散射时,该虚光子就会转换为自发辐射光子辐射出去。设在  $\Sigma'$  系中观察到的自发辐射光子的波长为  $\lambda'$ , 利用康普顿公式得

(1)式,这种多层膜摇摆器中周期性静磁场的空间周期  $\lambda_u$  只有7.8 nm.当在其中运动的相对论电子的能量为1 GeV时,如果不考虑电子的反冲,按照经典自由电子激光的自发辐射公式计算得自发辐射波长为  $1.01 \times 10^{-15}$  m,辐射光子能量为1.216 GeV,比相对论电子的能量都大,显然是错误的;而考虑电子的反冲,由(7)式可以算出自发辐射波长为  $2.25 \times 10^{-15}$  m,辐射光子能量为0.557 GeV,不大于相对论电子能量.可见对于利用多层膜作摇摆器的自由电子激光器必须考虑电子的反冲,不能忽略  $\frac{h}{\gamma m_0 c}$  一项。

#### 4 单电子在多层膜中运动的辐射功率

根据电磁理论,波长为  $\lambda_u$  的光波是频率为  $c/\lambda_u$  的电磁场在空间的传播,设空间某体元的体积为  $d\tau$ ,光子数密度为  $n_c$ ,对应电磁场的能量密度为  $w = B^2/4\pi$ (高斯制,下同),其中  $B$  为磁感应强度,按光子来计算  $d\tau$  内的能量应该为  $(hc/\lambda_u)n_c d\tau$ ,按电磁场来计算  $d\tau$  内的能量应该为  $w d\tau$ ,所以光子数密度为

$$n_c = w\lambda_u/hc = B^2\lambda_u/4\pi hc, \quad (8)$$

在  $\Sigma$  系中电子的经典半径

$$r_e = e^2/m_0 c^2, \quad (9)$$

根据电动力学,自由电子的散射截面为

$$\sigma = \frac{8}{3}\pi r_e^2. \quad (10)$$

由于电子和光子都运动,因此  $dt$  时间内只有处在离散射截面  $(c + V_z)dt$  薄层内的光子才可能与电子碰撞而发生散射,该薄层的体积为  $\sigma(c + V_z)dt$ ,该薄层内光子数为  $n_c\sigma(c + V_z)dt$ .由于磁场的方向在  $y$  轴变化,因此电磁波的传播在  $xz$  平面,这些光子中只有  $1/4$  迎着电子传播与电子散射,对辐射有贡献.另外的  $3/4$  远离电子或垂直电子运动方向传播,因此辐射光子数为  $n_c\sigma(c + V_z)dt/4$ ,即  $dt$  时间内单电子自发辐射的光子产额,因此  $dt$  时间内辐射的能量为

$$\epsilon = \frac{1}{4} \frac{hc}{\lambda} n_c \sigma (c + V_z) dt, \quad (11)$$

(11)式对时间求导,得电子辐射的功率为

$$P = \frac{1}{4} \frac{hc}{\lambda} n_c \sigma (c + V_z), \quad (12)$$

将(7)~(10)式代入(12)式,并考虑  $V_z \approx c$ ,得

$$P = \frac{1}{3} \frac{B^2 e^4}{\left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{h}{\gamma m_0 c \lambda_u}\right) m_0^2 c^3}, \quad (13)$$

如果忽略  $\frac{h}{\gamma m_0 c}$  一项,  $P \approx \frac{2}{3} \frac{\gamma^2 B^2 e^4}{m_0^2 c^3}$ ,就是经典静磁摇摆器的自由电子激光器自发辐射的结果。

## 5 结 论

讨论了利用多层膜作自由电子激光器的摇摆器的可行性,并利用虚光子和康普顿散射分析了其自发辐射的波长和辐射功率.结果发现,利用多层膜作摇摆器的自由电子激光器的自发辐射波长和辐射功率必须考虑电子的反冲,其自发辐射波长和辐射功率表达式应该含有康普顿波长项。

### 参 考 文 献

- 1 S. Pinhas. Proposal for a novel wiggler [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(8):1332~1334
- 2 Li Fuli. Higher Laser Physics [M]. 1th. Hefei: Publisher of Chinese Science Technique University, 1992. 506~520  
李福利. 高等激光物理学[M]. 第1版. 合肥:中国科技大学出版社, 1992. 506~520
- 3 Minghong Wang, Xiaoguang Xiao, Guangying Ge *et al.*. Free electron laser amplifier with elliptic-groove waveguide [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(9):1872~1877
- 4 Meng Xianzhu. Research of free-electron laser using compton scattering [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(1):11~13  
孟现柱. 利用康普顿散射对自由电子激光器的研究[J]. 量子光学学报, 2004, **10**(1):11~13
- 5 Wang Mingchang. The news progress of free electron lasers [J]. *Chineses J. Lasers*, 1994, **A21**(5):391~393  
王明常. 自由电子激光新进展[J]. 中国激光, 1994, **A21**(5):391~393
- 6 Hu Suxing, Fu Ensheng. Possible generation of ultrashort optical pulse in far-infrared free electron [J]. *Chineses J. Lasers*, 1996, **A23**(3):193~197  
胡素兴,傅恩生. 远红外自由电子激光器中超短光脉冲的产生[J]. 中国激光, 1996, **A23**(3):193~197
- 7 Chen Min, Chen Jianwen, Xu Zhizhan. Analysis of higher harmonics for FEL with a novel electrostatic wiggler [J]. *Chineses J. Lasers*, 1998, **A25**(8):677~680  
陈敏,陈建文,徐至展. 静电摇摆器自由电子激光器的高次谐波分析[J]. 中国激光, 1998, **A25**(8):677~680
- 8 Liu Mingsheng, Jiang Enyong, Liu Yuguang. Magnetic multilayers: theories and experiments [J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 1994, **14**(2):147~154  
刘明升,姜恩永,刘裕光. 磁性多层膜研究进展:理论与实验[J]. 真空科学与技术, 1994, **14**(2):147~154
- 9 Ni Guangjiong, Wang Yansen, Qian Jinghua *et al.*. Physics Changing the World [M]. 2nd. Shanghai: Publisher of Fudan University, 1999. 262~263  
倪光炯,王炎森,钱景华等. 改变世界的物理学[M]. 第2版. 上海:复旦大学出版社, 1999. 262~263
- 10 Meng Xianzhu. Research of synchrotron radiation by virtual photon and Compton scattering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3):477~480  
孟现柱. 利用虚光子和康普顿散射对同步辐射的分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3):477~480