

引用格式: LIN Hongxiang, WEI Xiaohui, LIAO Tianfa, et al. Free Electron Laser Undulator Based on Grating Structure (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1014008

林宏翔,魏晓慧,廖天发,等.基于光栅结构的自由电子激光波荡器(特邀)[J].光子学报,2022,51(10):1014008

基于光栅结构的自由电子激光波荡器(特邀)

林宏翔^{1,2},魏晓慧^{1,2},廖天发^{1,3},王文轅¹,杜娟¹,杨明亮⁴

(1 惠州学院 电子信息与电气工程学院, 广东 惠州 516007)

(2 广东省电子功能材料与器件重点实验室, 广东 惠州 516007)

(3 广东省重离子加速器工程技术研究中心, 广东 惠州 516007)

(4 广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

摘要:波荡器是自由电子激光器的关键技术部件,目前常规的波荡器主要由磁体构成,利用磁场实现电子束偏转振荡,将电子束能量耦合至激光场。本文提出一种基于光栅表面电场的电波荡器机制,以发展自由电子激光器的小型化技术。阐述了该波荡器的基本原理及电子束在波荡器中的运动规律,推导了该方案下的自由电子激光波长及增益,对所采用的光栅表面电场进行二维仿真,并对电子束进行了跟踪仿真,计算了能量 10 MeV 电子束产生的激光增益为 0.43,验证了基于光栅结构的微纳波荡器方案的可行性。

关键词:自由电子激光;光栅;波荡器;电子束;微纳技术

中图分类号:TN24

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225110.1014008

0 引言

自由电子激光光源是一种新型相干光源,它具有工作波长范围广、频谱纯、高功率等诸多优点,在生物、材料、医学等领域都有重大的应用需求,因此从 20 世纪 70 年代自由电子激光理论发明以来,自由电子激光技术得到了快速的发展。1971 年 MADEY J M J 提出了在波荡器中,利用相对论电子束产生相关辐射的自由电子激光(Free Electron Laser, FEL)装置,随后其在斯坦福大学试验证实了 FEL 的放大器和振器原理,在 10 μm 波长实现了 7% 的增益^[1]。此后,世界范围内多家研究机构也都开展了红外和太赫兹波段 FEL 振荡器研究,随着光阴极微波电子枪及束团压缩技术的发展,直线加速器的束流品质不断提升,为短波长(nm)和超短波长(小于 0.1 nm)的自由电子激光奠定了基础^[2]。1983 年 BONIFACIO R, PELLEGRINI C 和 NARDUCCIL M 提出利用电子束尾部的自发辐射作为种子激光,与头部电子束相互作用,从而利用高增益方式,实现 X 射线相干辐射的自发放大自发辐射(Self-amplified Spontaneous Radiation, SASE)方案^[3]。1992 年 PELLEGRINI C 提出利用斯坦福直线加速器产生高品质电子束实现 SASE^[4]。在 2009 年,第一台 X 射线自由电子激光-直线相干光源(Linac Coherent Light Source, LCLS)在美国诞生^[5]。2010 年以后,世界范围内掀起了一股自由电子激光光源建设热潮,诸多高性能自由电子激光装置先后调试出光,如韩国 PAL-XFEL^[6],瑞士 Swiss-FRL^[7],欧洲 European-XFEL^[8]等。在自由电子激光器中,高能电子束通过周期排列的磁场(波荡器),产生激光增益,因此波荡器是自由电子激光器中必不可少的器件,目前建成的自由电子激光器都采用周期磁体构成的波荡器。

1988 年,我国中科院高能物理研究所的研究人员提出了基于铁电晶体产生横向偏转电场的自由电子激光方案^[9-10],并估算该方案的能量效率为 0.03。近三十年来,激光技术和微纳加工技术得到了快速的发展,

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11605202, 61372064),广东省教育厅重点建设学科能力提升项目(No. 2021ZDJS078),广东省基础与应用基础研究联合基金重点项目(No.2019B1515120046),惠州学院创新科研团队项目(No.IRTHZU)

第一作者:林宏翔(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为新型加速器技术。Email: linhongxiang145236@163.com

通讯作者:魏晓慧(1969—),女,教授,博士,主要研究方向为光电技术。Email: weixh0509@hzu.edu.cn

收稿日期:2022-06-10; **录用日期:**2022-09-06

<http://www.photon.ac.cn>

由此带来了一系列微型加速器的革新,诸多新型加速器不断涌现,如金属表面激光加速器^[11]及介质激光加速器^[12-13]等,大量研究人员不断推进微型加速器技术向前发展。受到横向偏转电场自由电子激光方案的启发,并得益于近年来激光、微纳技术的发展,本文提出了一种基于光栅结构的微型波荡器,采用飞秒激光脉冲照射光栅,在光栅表面形成周期变化的横向偏转电场,高能电子束受到周期电场的调制作用,产生周期振荡并对外辐射相干电磁波,形成自由电子激光增益。对光栅结构的自由电子激光波荡器进行了理论分析,得到了电子束的轨迹方程,并对该结构进行了电场仿真得到了光栅表面横向电场分布,最后以电流 10 mA、能量 10 MeV 电子束为例,进行带电粒子跟踪,计算了其激光增益。

1 基本原理及理论分析

由于光栅结构的自由电子激光波荡器(以下简称为微纳波荡器)采用横向电场进行电子束偏转,诸多已有的自由电子激光基本理论并不适用于微纳波荡器。例如,自由电子激光的相干辐射波长 λ_s 和波荡器磁极周期 λ_u 存在辐射共振关系 $\lambda_s = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$ ^[14],其中 K 为波荡器磁场参数, γ 为相对论因子 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, $\beta = v/c$ 为相对论速度。为研究微纳波荡器的辐射波长特性,从最基本的电子束运动方程出发,推导微纳波荡器辐射波长。

采用 X 方向偏振光照射光栅表面,则可以在光表面沿 Z 方向,形成正弦周期的横向电场分布 $E = E_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\omega z + \phi_0)$,同时与时间具有相关性。由于入射激光的偏振特性及光栅沟槽方向均沿 X 方向,则有 $E_z = E_y = 0$ 。根据电子束运动方程 $\gamma m_e \frac{dv}{dt} = Eq$,将电场表达式代入该方程,可得 $\ddot{x} = \frac{q}{\gamma m_e} E$ 。进而求得 X 方向的电子束轨迹方程

$$x = \frac{qE_0}{2\gamma m_e} \left[\frac{1}{(\omega_0 + \omega \bar{v}_z)^2} \cos(\omega_0 t + \omega \bar{v}_z t) - \frac{1}{(\omega_0 - \omega \bar{v}_z)^2} \cos(\omega_0 t - \omega \bar{v}_z t) \right] \quad (1)$$

令 $k_1 = \omega_0 + \omega \bar{v}_z, k_2 = \omega_0 - \omega \bar{v}_z, G = \frac{qE_0}{2\gamma m_e c}$,则有

$$\beta_x = \frac{v_x}{c} = \frac{\dot{x}}{c} = -\frac{G}{k_1} \sin(k_1 t) + \frac{G}{k_2} \sin(k_2 t) \quad (2)$$

根据速度合成关系,并对其进行泰勒展开,保留一级近似,则有

$$\beta_z = \sqrt{\beta^2 - \beta_x^2} \approx \beta - \frac{1}{2\beta} \beta_x^2 = 1 - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2} \beta_x^2 \quad (3)$$

为了使电子束的辐射相关加强,光栅周期 λ_u 与相干辐射波长 λ_s 之间应具有特定关系 $d = \frac{\lambda_u}{\beta_z} - \lambda_u \cos\theta = N\lambda_s$,即相隔距离 λ_u 的两次电子束辐射具有波长的整数倍关系,由此可得 $\lambda_s = \lambda_u \left(\frac{1}{\beta_z} - 1\right)$ (傍轴近似,取辐射角为零),结合式(2)、(3)可得

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \lambda_u \left(\frac{1}{\beta_z} - 1\right) \approx \lambda_u (1 - \beta_z) = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left[1 + \frac{\gamma^2 G^2}{k_1^2} \sin^2(k_1 t) - 2 \frac{\gamma^2 G^2}{k_1 k_2} \sin(k_1 t) \sin(k_2 t) + \frac{\gamma^2 G^2}{k_2^2} \sin^2(k_2 t) \right] \\ &= \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left\{ 1 + \frac{\gamma^2 G^2}{2} \cdot \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2 k_2^2} - \frac{\gamma^2 G^2}{2} \cdot \frac{k_1^2 \cos(2k_2 t) + k_2^2 \cos(2k_1 t)}{k_1^2 k_2^2} + \frac{\gamma^2 G^2}{k_1 k_2} [\cos(k_1 - k_2)t - \cos(k_1 + k_2)t] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

对比自由电子激光的辐射共振公式,不难发现微纳波荡器具有类似的解析形式,但具有更多的高阶谐波项。在常规波荡器中,可以利用高能电子束($\gamma \gg 1$)来产生辐射波长 λ_s 远小于波荡器周期 λ_u 的自由电子激光,而对于微纳波荡器,由于其波荡器周期远小于常规波荡器周期,从其辐射波长的形式中可知,产生同等波长的自由电子激光,微纳波荡器所需的电子束能量较低。

2 光栅表面电场

与常规波荡器类似,微纳波荡器通过对高能电子束的偏转实现辐射光输出。通过采用 X 方向的线偏激光照射光栅表面,形成周期变化的电场,如图1(b)所示。在系统设计中,选取激光波长等于光栅周期的结构($\omega_0 = \omega$),且光栅栅脊与光栅周期的占空比为50%,这样当电子束通过半个光栅周期长度时,激光形成的表面电场刚好反向。此种情况下,若不考虑由横向速度导致相位滑移(波荡器周期数较少时),在一个光栅周期长度内,电场力对电子束做功为零,在经过两个光栅周期长度后,电子束回到轨迹中心。

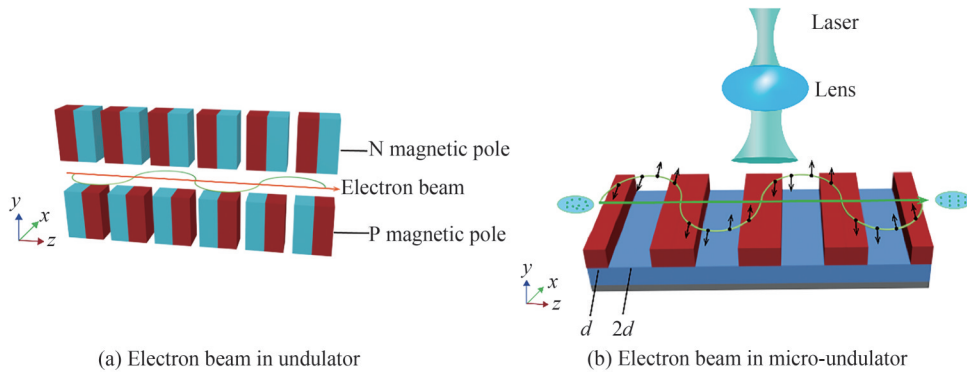


图1 磁极波荡器及微纳波荡器中电子束轨迹示意

Fig. 1 The electron beam trajectory in undulator and micro-undulator

为了使电子束受到较大的横向偏转电场,显然电子束应该尽可能靠近光栅表面。同时,为了使束流中心位置处的电场相干加强,需要设计合适的电子束入射高度及光栅高度。取电子束中心与光栅表面距离为 $\lambda/4$,此时垂直入射激光和光栅表面反射激光在束流中心位置 A 、 B 处的相位差为 $\frac{\pi}{2} + \pi + \frac{\pi}{2} = 2\pi$,即得到相干加强。由光栅底面反射出的激光也是偏转电场的主要贡献之一,需要使其与入射激光在束流中心相干加强。根据前文所述的时序要求, A 、 B 两点应具有相反相位关系。如图2(a)所示,可得光栅结构与波长的关系,即

$$\begin{cases} \frac{\lambda}{2} + 2n(H + W) = N\lambda \\ 2H(n - 1) = \frac{2m + 1}{2} \lambda \end{cases} \quad (5)$$

所用的光栅材料为 SiO_2 ,根据上述关系,选取其折射率 n 为3.5,并在下表面镀银提高其反射率,进而可以确定光栅结构参数如表1所示。根据表1中的光栅、激光参数,在电磁场仿真软件(Lumerical FDTD)中模拟得到了光栅表面的电场分布情况。从仿真结果图2(b)、(c)可知,在电子束轨迹中心($y = 1.875 \mu\text{m}$)处, E_x 分量较大且呈现周期变化,而 E_z 分量接近于零,符合预期设计要求。电子束受到电场作用与相位(空间位置、时间)具有相关性,对此研究了中心粒子在6个光栅周期内随时间变化时感受到的电场作用,中心粒子在运动过程中受到的横向偏转力如图2(d)所示,可见相位合适的电子束将在周期变化的电场中受到横向偏转力作用,进而产生自由电子激光辐射。

表1 激光及光栅参数

Table 1 Parameter of laser and grating

Parameter	Value	Note	Parameter	Value	Note
λ	1 500 nm	Wavelength of laser	τ	100 fs	Pulse length
n	3.5	Refractive index	m	2	Integer
h	$\lambda/4$	Distance between beam and grating surface	H	$\lambda/2$	High of grating
$4d$	λ	Constrain of grating	W	$3\lambda/7$	Thickness of substrate

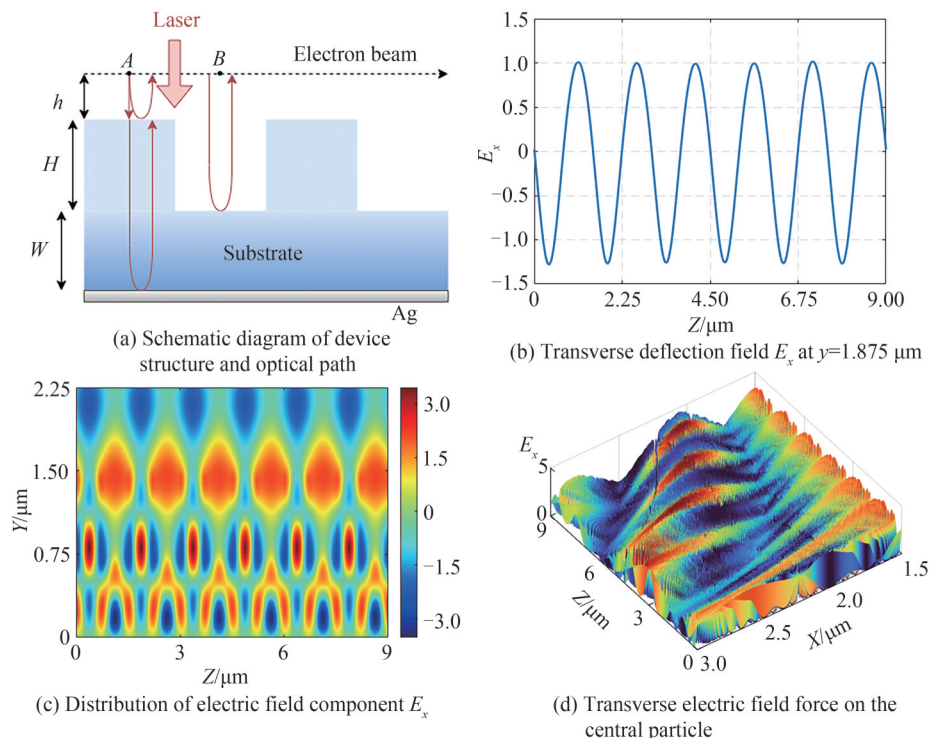


图2 光栅表面电场分布

Fig. 2 Distribution of electric field on grating surface

3 带电粒子束跟踪及增益计算

为进一步研究微纳波荡器的增益放大特性,将得到的光栅表面电场代入GPT软件(General Particle Tracer)进行电子束跟踪计算。该软件是粒子束动力学研究的重要仿真工具之一,能够准确计算粒子束能量、空间分布、粒子束轨迹等重要参数^[15-16]。在仿真模型中,束流的初始能量为10 MeV,起始束团在XY平面呈均匀分布,如图3(a)所示,观测到在通过表面光栅后,在特定的相位电子束产生了明显的群聚,如图3(b)所示。根据推导的电子束轨迹方程式(1),可以绘制出电子束在微纳波荡器中的轨迹,经横向位置归一化后,其轨迹与常规波荡器(常规波荡器中电子束轨迹为正弦函数)仅有细微的区别,如图4(a)所示。由此可见电子束在微纳波荡器、常规波荡器中具有极其相似的归一化运动轨迹,因此,微纳波荡器也形成极强的相干辐射。根据电子束跟踪仿真,得到电子束的平均轨迹如图4(b)。由轨迹图可知,电子束在6个周期中大致进行了6次振荡,但由于电子束自身具有一定的空间分布,部分粒子的初始位置和相位会对后期的偏转造成一定的影响,因此,电子束的轨迹并不是严格的平抛运动轨迹(图4(a)中的蓝色曲线)。电子束沿切线

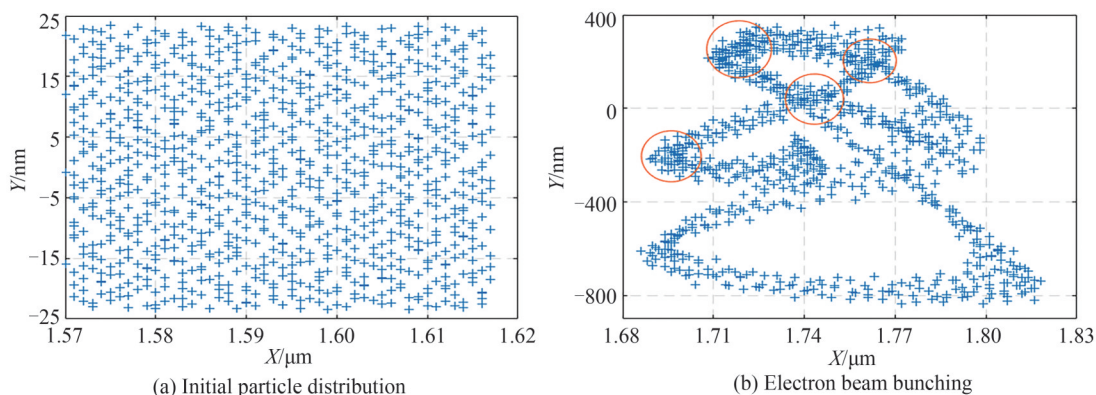


图3 电子束群聚

Fig. 3 Electron beam bunching

方向辐射电磁波,产生自由电子激光,导致电子束能量下降。对粒子数为1 000,能量为10 MeV的短束团电子束进行跟踪计算,经过6个光栅周期后,电子束的相对论因子下降0.385,如图5(a)所示,随能量分布的粒子数统计如图5(b)所示。由此可以推算微纳波荡器的光场小信号增益,仿真所采用的参数如表2所示。

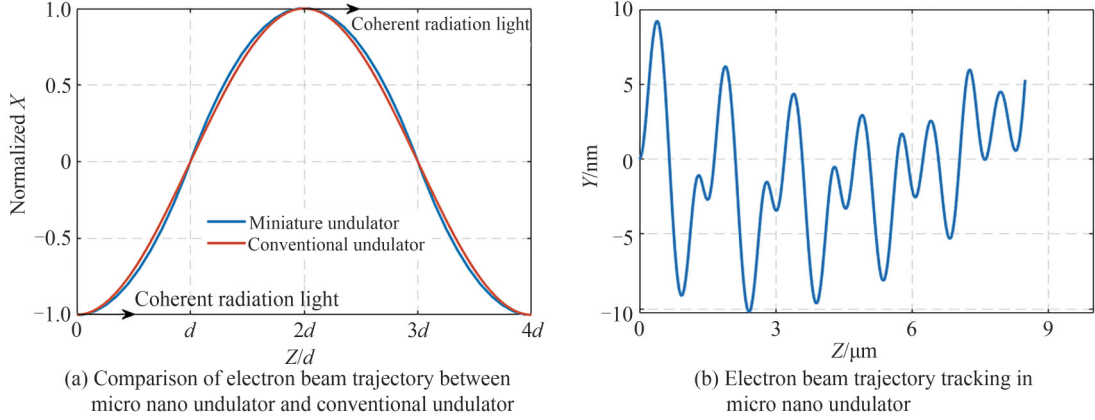


图4 电子束轨迹

Fig. 4 Electron beam trajectory

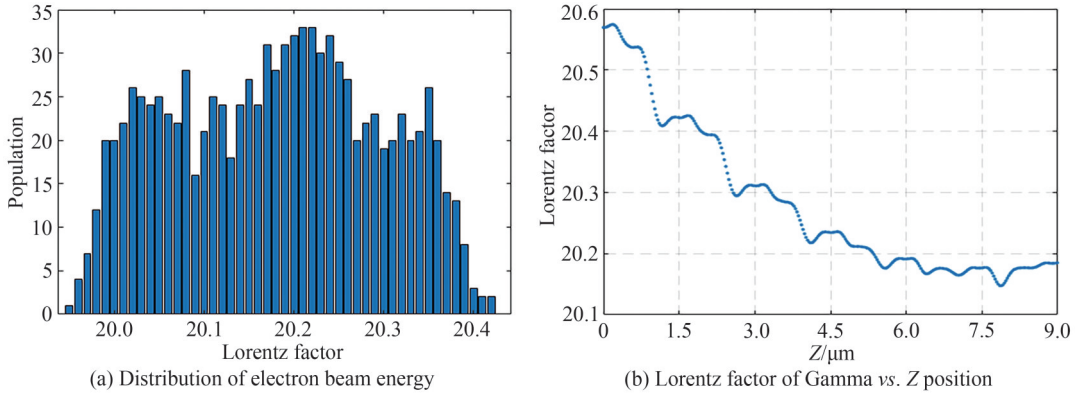


图5 电子束能量分布及电子束能量变化过程

 Fig. 5 Distribution of electron beam energy and variation of beam energy vs. Z position

表2 电子束跟踪计算参数

Table 2 Parameter of particle tracking

Parameter	Value	Note	Parameter	Value	Note
E_0	10 MeV	Average initial energy of electron beam	E	800 MV/m	Laser amplitude
γ_0	20.57	Lorentz factor of initial beam	γ	20.185	Lorentz factor of final beam
L	9 μm	Undulator length	Distribution	uniformm	Distribution of initial bunch

根据自由电子激光理论中的 Madey 定理^[17-18]

$$\langle (\gamma_f - \gamma_i)_2 \rangle = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \gamma_i} \langle (\gamma_f - \gamma_i)_1^2 \rangle \quad (6)$$

式中, γ_f, γ_i 分别为电子在相互作用前后的能量, 下标 1、2 分别表示光场的幂展开是的一级和二级微扰项, $\langle \rangle$ 表示对所有电子相对光场的初始相位求平均。由于该定理从电子相互作用的能量变化出发, 并不涉及波荡器磁矢量运算, 故亦可以用于微纳波荡器。等式左边为电子束平均能量损失, 等式的右边为能量变化的离散, 又根据自发辐射强度^[16], $\frac{d^2 P}{d\Omega d\omega} \Big|_{\theta=0} = \frac{m_e^2 c \omega^2}{4\pi^2 \bar{E}_s^2} \langle (\delta\gamma)^2 \rangle$, 结合能量守恒, 可以得到光场小信号增益^[17],

$g = -\frac{n_e m_e c^2 \langle \delta\gamma \rangle}{\bar{E}_s^2 / 4\pi}$, 代入仿真得到的相对论因子及其余参数可得, 归一化的能量增益约为 0.43, 其结果略优

于微型电扭摆器^[9-10]。

4 结论

本文提出了一种基于光栅结构的微型波荡器,阐述了该波荡器的基本原理,从最基本的电子束运动方程出发,推导了电子束在光栅波荡器中的轨迹方程及辐射波长。通过电磁场仿真给出了光栅表面横向偏转电场的分布,并以电流 10 mA、能量 10 MeV 电子束为例,结合仿真得到的电场分布结果进行带电粒子跟踪,计算了其激光增益。光栅微纳波荡器由于其极小的结构,为小型化的自由电子激光提出了一种新的方案。相比于常规波荡器光栅微纳波荡器的周期较小,在产生短波辐射光时,一定程度上能够降低对电子束能量的要求。

参考文献

- [1] ELIAS L R, FAIRBANK W M, MADEY J M J, et al. Observation of stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a spatially periodic transverse magnetic field[J]. *Physical Review Letters*, 1976, 36(13): 717.
- [2] DEACON D A G, ELIAS L R, MADEY J M J, et al. First operation of a free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 1977, 38(16): 892.
- [3] BONIFACIO R, PELLEGRINI C, NARDUCCI L M. Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser[J]. *Optics Communications*, 1984, 50(6):373-378.
- [4] PELLEGRINI C, ROSENZWEIG J, TRAVISH G, et al. The SLAC soft X-ray high power FEL [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1994, 341(1-3): 326-330.
- [5] WHITE W E, ROBERT A, DUNNE M. The linac coherent light source [J]. *Journal of synchrotron radiation*, 2015, 22(3): 472-476.
- [6] KANG H S, MIN C K, HEO H, et al. Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(11): 708-713.
- [7] PATTERSON B D, ABELA R, BRAUN H H, et al. Coherent science at the SwissFEL X-ray laser [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(3): 035012.
- [8] ALTARELLI M. The European X-ray free-electron laser facility in Hamburg [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, 269(24): 2845-2849.
- [9] SONG Yu. Analysis of motion behaviors of electrons in a miniature FEL [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1989(4):367-370.
宋煥. 微型自由电子激光电子运动特性分析 [J]. *强激光与粒子束*, 1989(4): 367-370.
- [10] SONG Yu. A miniature free electron laser-electric undulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1988(1):9-11+8.
宋煥. 微型自由电子激光——电扭摆器 [J]. *中国激光*, 1988(1): 9-11+8.
- [11] BAR-LEV D, ENGLAND R J, WOOTTON K P, et al. Design of a plasmonic metasurface laser accelerator with a tapered phase velocity for subrelativistic particles [J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, 22(2): 021303.
- [12] PERALTA E A, SOONG K, ENGLAND R J, et al. Demonstration of electron acceleration in a laser-driven dielectric microstructure [J]. *Nature*, 2013, 503(7474): 91-94.
- [13] LIN Hongxiang. Study of a dielectric internal laser accelerating structure [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1020: 165904.
- [14] ELIAS L R, FAIRBANK W M, MADEY J M J, et al. Observation of stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a spatially periodic transverse magnetic field [J]. *Physical Review Letters*, 1976, 36(13): 717.
- [15] DE LOOS M J, VAN DER GEER S B, VAN DER GEER C A J, et al. The general particle tracer code applied to the fusion free-electron maser [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1998, 139(1-4): 481-486.
- [16] CURRY E, FABBRI S, MUSUMECI P, et al. Simulation of 3-D effects in THz-based phase space manipulation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, 865: 67-70.
- [17] 贾启卡. 自由电子激光物理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [18] MADEY J M J. Relationship between mean radiated energy, mean squared radiated energy and spontaneous power spectrum in a power series expansion of the equations of motion in a free-electron laser [J]. *Il Nuovo Cimento B*, 1979, 50(1): 64-88.

Free Electron Laser Undulator Based on Grating Structure (Invited)

LIN Hongxiang^{1,2}, WEI Xiaohui^{1,2}, LIAO Tianfa^{1,3}, WANG Wenyuan¹, DU Juan¹,
YANG Mingliang⁴

(1 *College of Electronic Information and Electrical Engineering, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007, China*)

(2 *Guangdong Key Laboratory of Electronic Functional Materials and Devices, Huizhou, Guangdong 516007, China*)

(3 *Guangdong Heavy Ion Accelerator Engineering Research Center, Huizhou, Guangdong 516007, China*)

(4 *School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

Abstract: Free electron laser light source is a new type of coherent light source. It has many advantages such as wide wavelength range, pure spectrum, high power and so on. It has significant application requirements in biology, materials, medicine and other fields. Therefore, since the invention of free electron laser theory in the 1970s, free electron laser technology has been developed rapidly. The principle of free electron laser is to make use of electron beam oscillation in periodic electromagnetic field to produce electromagnetic radiation. By controlling the oscillation period, the magnetic radiation light forms coherent radiation. The undulator is a key technical component of free electron laser, which is used to generate the periodic electromagnetic field that oscillates the electron beam. At present, the undulator is usually composed of magnets, and uses magnetic field to realize deflection oscillation of electron beam, coupling the energy of electron beam to the laser field. In 1988, researchers at the Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences proposed a free electron laser scheme based on ferroelectrics generating transverse deflecting electric fields. Nearly 30 years, laser technology and processing technology have obtained fast development, leading to a series of micro accelerator innovation, with many new accelerators constantly emerging, such as metal surface laser accelerators and medium-sized laser accelerators, and a large number of researchers around the world constantly promoting micro accelerator technology forward. Inspired by lateral deflection field free electron laser solutions, and benefit from the development of laser, micro-nano technology in recent years, this paper puts forward a kind of miniature undulator, based on the structure of grating with femtosecond laser pulses irradiation grating. The periodic transverse deflection electric field is formed on the surface of the grating, and the high energy electron beam is modulated by the periodic electric field, which generates periodic oscillation and radiates coherent electromagnetic wave to form a gain of free electron laser. In this paper, the free electron laser vibrator with grating structure is theoretically analyzed, the trajectory equation of electron beam is given, and the electric field simulation of the structure is carried out to obtain the transverse electric field distribution on the surface of the grating. Finally, a 10 MeV electron beam with 10 mA intensity is tracked, and the laser gain is calculated.

Key words: Free electron laser; Grating; Undulator; Electron beam; Micro-nano technology

OCIS Codes: 140.2600; 350.4990; 350.2770