

基于 T 形光栅的史密斯-珀塞尔自由电子激光器的研究

孟现柱*, 王明红

聊城大学物理科学与信息工程学院山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059

摘要 提出了一种基于 T 形光栅的新型史密斯-珀塞尔自由电子激光器。并利用理论分析和粒子 (Particle-in-Cell, PIC) 模拟的方法研究了光栅形状对史密斯-珀塞尔自由电子激光器输出特性的影响。理论分析发现, 基于 T 形光栅的史密斯-珀塞尔自由电子激光器的注-波相互作用较强, 电子束的群聚特性较强, 相应地有较强的注-波转换效率, 进而有较高的输出功率。PIC 模拟发现, 基于 T 形光栅的史密斯-珀塞尔自由电子激光器能够提高辐射功率。在电子束能量 $E=50$ keV、电子束电流 $i=10$ A、光栅周期 $D=0.3$ mm 的情况下: 基于 T 形光栅的史密斯-珀塞尔自由电子激光器可以得到 0.753949 THz、峰值输出功率约为 2 kW 的连续太赫兹辐射; 而基于矩形光栅的史密斯-珀塞尔自由电子激光器只能得到 0.723397 THz、峰值输出功率约为 0.3 kW 的连续太赫兹辐射。

关键词 激光器; 史密斯-珀塞尔自由电子激光器; T 形光栅; 矩形光栅

中图分类号 O463+.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1014001

Smith-Purcell Free Electron Laser Based on T-Shaped Grating

Meng Xianzhu*, Wang Minghong

Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics
Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

Abstract A novel Smith-Purcell free-electron laser based on T-shaped grating is proposed herein. The influences of grating shape on the output characteristics of the Smith-Purcell free electron laser are discussed through theoretical analysis and Particle-in-Cell (PIC) simulation calculation. Through the theoretical analysis, it is found that the beam-wave interaction of the Smith-Purcell free electron laser based on the T-shaped grating and the bunching of electron beam are strong. Accordingly, the beam-wave conversion efficiency is strong, and the output power is high. Through the PIC simulation calculation, it is found that the Smith-Purcell free electron laser based on the T-shaped grating can increase the radiation power. Results indicate that a continuous-wave terahertz radiation at 0.753949 THz with a peak output power of approximately 2 kW can be obtained for a grating of period $D=0.3$ mm operating at a beam energy of $E=50$ keV and beam current $i=10$ A in this novel device. However, in the Smith-Purcell free electron laser based on rectangular grating, continuous-wave terahertz radiation at 0.723397 THz with a peak output power of approximately 0.3 kW can only be generated by the same electron beam (energy $E=50$ keV and beam current $i=10$ A) passing through the grating with the same size ($D=0.3$ mm).

Key words lasers; Smith-Purcell free-electron lasers; T shaped grating; rectangular grating

OCIS codes 140.2600; 300.6495; 230.6080; 260.2110; 350.5610

1 引 言

史密斯-珀塞尔辐射 (Smith-Purcell radiation, SPR) 是指当电子束紧贴着周期性金属结构的表面飞行时产生的电磁辐射^[1]。然而这种自发的 SPR 是一种非相干的辐射, 辐射强度很弱, 不容易检测和应用。相干的 SPR, 通常利用相对论电子束激励由开放式谐振腔 (或封闭式谐振腔) 作为反馈元件连同

金属光栅组成的高频相互作用系统来获取, 这种实验结构被称为史密斯-珀塞尔自由电子激光器 (Smith-Purcell free-electron laser, SP FEL)^[2-4]。SP FEL 已经成功地在远红外、微波、太赫兹 (THz, 0.1~10 THz) 波段进行了实验^[5-9], 是开发大功率、高频率、可调谐、低成本 THz 光源的首选。

为了提高 SP FEL 的输出功率, 近几年研究者在优化谐振腔、电子束和光栅等方面开展了研

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2020-01-19; 录用日期: 2020-02-13

基金项目: 国家自然科学基金 (11275089, 11375081)

* E-mail: mengxz@lcu.edu.cn

究^[9-10]。其中在光栅优化方面,主要通过改进光栅的形状和结构来提高 SPR 的辐射功率。2016 年, Kumar 等^[11]报道了利用激光调制的电子束在金属光栅上产生的 SP THz 辐射。2017 年, Naumenko 等^[12]报道了一种基于凹面光栅的 SPR,发现凹面光栅可以显著增加相干 SPR 的空间密度。2015 年, Zhang 等^[13]通过优化光栅,利用预聚束和开放式谐振腔产生了一种增强相干的 THz 波段 SPR,发现改变光栅的凹槽宽度和高度可以减小起振电流数量级。2017 年,他们还研究了一种基于光栅凹槽阵列的增强 THz 波段 SPR,这种 SPR 功率比电子通过非常接近光栅表面时的功率高 10 倍^[14]。2016 年,刘维浩等^[15]提出了一种基于两个串联圆柱形光栅的改进 SP FEL,这种改进 SP FEL 能够增加辐射频率,提升辐射功率,其中辐射功率可提升至几十倍。

考虑到 SP FEL 的输出功率取决于注-波互作

用,而光栅形状对注-波相互作用影响很大,因此要提高 SP FEL 的输出功率,就应该重视光栅形状的研究。为了研究光栅形状对 SP FEL 的影响,本文提出了一种基于 T 形光栅的新型 SP FEL。采用理论分析和粒子 (Particle-in-Cell, PIC) 模拟的方法对比研究了基于 T 形光栅的新型 SP FEL 和基于矩形光栅的 SP FEL 的输出特性。

2 基本原理

2.1 基于 T 形光栅的 SP FEL 的结构

基于 T 形光栅的新型 SP FEL 装置的结构如图 1(a)所示,它由电子枪、谐振腔、T 形光栅和收集极组成。如图 1(a)所示,T 形光栅是一种光栅槽口窄、光栅槽腹宽的狭缝光栅,类似在谐振腔底部平面上竖立了一排 T 型窄条。作为对比,图 1(b)给出了基于矩形光栅的 SP FEL 的结构示意图,它由电子枪、谐振腔、矩形光栅和收集极组成。

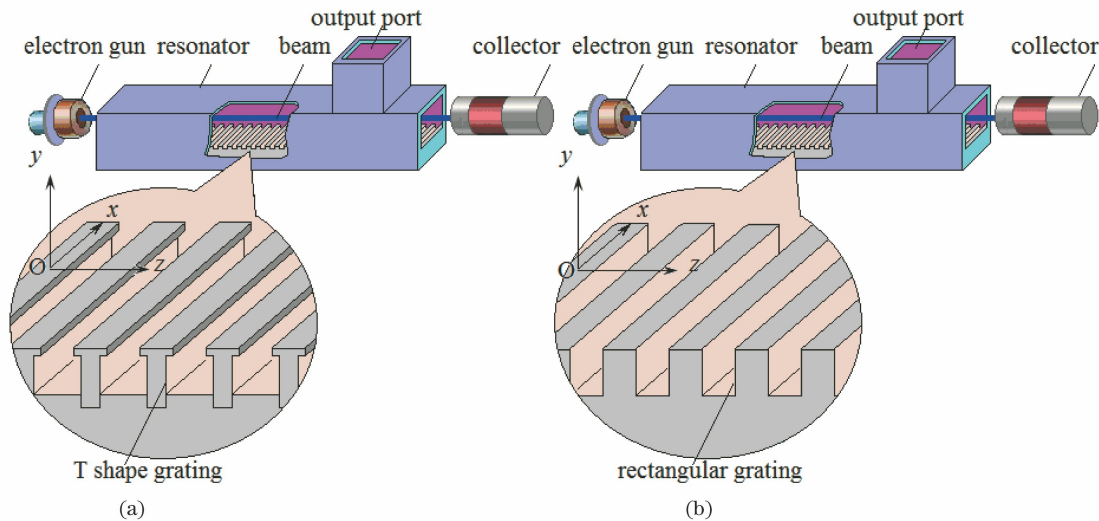


图 1 SP FEL 的原理图。(a)基于 T 形光栅的 SP FEL;(b)基于矩形光栅的 SP FEL

Fig. 1 Schematic diagram of the SP FEL. (a) SP FEL based on T shape grating; (b) SP FEL based on rectangular grating

无论是基于 T 形光栅的新型 SP FEL,还是基于矩形光栅的 SP FEL,光栅都位于谐振腔底部,光栅的光栅槽都与 x 方向平行,光栅和谐振腔都由导电良好的金属材料(如无氧铜)制成,光栅和谐振腔的表面都可以认为是理想导体。在制作工艺方面,矩形光栅可以采用刻痕的方式来制作。与矩形光栅相比,T 形光栅的制作工艺略微复杂。但由于本研究用到的 T 形光栅的光栅周期达 0.3 mm,故可以采用将长度为 1.5 mm、高度为 0.25 mm、T 的横笔部分宽度为 0.2 mm、T 的竖笔部分宽度为 0.1 mm 的 T 型金属条镶嵌到光栅周期为 0.3 mm、槽长为 1.5 mm、槽宽为 0.1 mm、槽深为 0.1 mm 的矩形光

栅上的方法制作,如图 2(a)所示。在 SP FEL 中,位于光栅左边阴极产生的电子束沿 z 轴紧贴着光栅的表面运动时,SPR 产生。SPR 的波长为

$$\lambda = \frac{D}{n} \left(\frac{1}{\beta} - \cos \theta \right), \quad (1)$$

式中: D 为光栅周期; n 为空间谐波数; θ 为发射角(即 SPR 与电子运动方向的夹角); $\beta = v/c$ 为电子运动速度与光速之比,其中 v 为电子的运动速度, c 为真空中的光速。根据(1)式,自发的 SPR 基波的波长范围为 $D \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \sim D \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right)$ 。

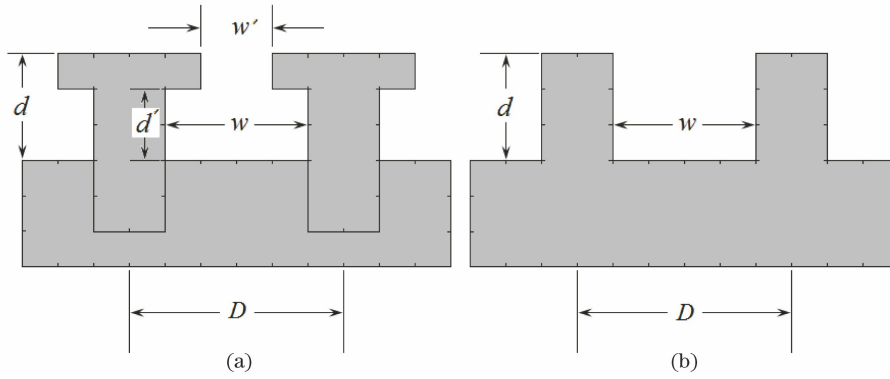


图 2 光栅的参数。(a) T 形光栅;(b)矩形光栅

Fig. 2 Parameters of gratings. (a) T shape grating; (b) rectangular grating

2.2 SP FEL 的功率分析

按照 SPR 理论,当电子束紧贴着光栅的表面运动时,光栅表面会产生感应电荷。光栅表面上的感应电荷密度为

$$\sigma_q = k_q i \frac{(D - w')}{D}, \quad (2)$$

式中: k_q 为比例常数,与光栅槽长、电子束与光栅距离以及电子束群聚情况等因素有关; i 为电子束的电流强度; w' 为光栅槽的口部宽度。对于矩形光栅槽的口部宽度 $w' = w$, w 为光栅槽底的缝隙宽度,如图 2 所示,此外 d 为光栅槽的缝隙深度, d' 为 T 形光栅槽的内深。

由于光栅的空间周期为 D ,因此感应电荷在光栅表面产生的周期性电场的空间周期也为 D 。利用傅里叶级数展开该周期性电场,其一阶近似为

$$\mathbf{E} = E_m \cos(kz) \mathbf{e}_y, \quad (3)$$

式中: $k = 2\pi/D$; E_m 为周期性电场的峰值,下角标 m 表示最大值。 E_m 正比于光栅表面上的感应电荷密度 σ_q ,故

$$E_m = k_E \sigma_q, \quad (4)$$

其中 k_E 为比例常数,它与电子束与光栅表面的距离等因素有关。电子束在运动中受到周期性电场的作用而辐射 SPR。电子束内某点的自发辐射功率 P_s 正比于该点的电场能量密度峰值,故

$$P_s = k_s \frac{1}{2} \epsilon_0 E_m^2, \quad (5)$$

其中 k_s 为比例常数, ϵ_0 为真空电容率。相干 SPR 的辐射功率 P_c 取决于 SP FEL 的注-波相互作用,注-波相互作用越强,换能特性越高,相干 SPR 的辐射强度就越大。而 SP FEL 的注-波相互作用正比于自发辐射功率 P_s 和电子束群聚后的密度 ρ_e ,故相干 SPR 的辐射强度表示为

$$P_c = k_c P_s \rho_e, \quad (6)$$

其中 k_c 为比例常数。综合(2)~(6)式得相干 SPR 的辐射功率为

$$P_c = \frac{1}{2} \epsilon_0 k_c k_s k_E^2 k_q^2 i^2 (D - w')^2 \rho_e / D^2. \quad (7)$$

可见,光栅表面的纵向长度越大,感应的周期性电荷越多,周期性电场越强,注-波相互作用越强,换能特性越高,相干 SPR 的辐射功率越大。T 形光栅与矩形光栅相比,光栅表面的纵向长度大,为了提高相干 SPR 的辐射功率,本研究提出了基于 T 形光栅的新型 SP FEL。

3 分析与讨论

为了验证上述分析,利用 PIC 软件对这两种形状光栅的 SP FEL 的特性进行了三维模拟。PIC 软件主要用于模拟电真空器件中电磁波与空间电荷的相互作用过程,计算和分析有空间电荷存在的复杂电磁问题。该软件是基于时域有限差分法(FDTD),把电磁场连续域内的问题变为离散系统的问题来求解电磁问题,即用各离散点上的数值解来逼近连续场域内的真实值。由于它在求解 Maxwell 方程组时,将对时间的偏微分也进行差分,因此又叫时域有限差分法。PIC 软件经过长期的发展和改进,模拟结果与实验结果非常吻合,误差很小,是进行 SP FEL 的特性研究的理想工具^[16-21]。

3.1 两种形状光栅的 SP FEL 的模拟参数

在进行模拟时,为了获得较强的相干的 SPR,光栅参数(包括光栅槽深、光栅槽长、光栅槽宽)、谐振腔参数(包括长度、宽度、高度)和电子束参数都必须是最优的。经过优化后的谐振腔参数和电子束参数如表 1 所示^[22]。如图 1 所示,谐振腔宽度和光栅槽长度相同,所以光栅槽长度等于表 1 中谐振腔宽度。根据(1)式,可以计算出表 1 参数对应的自发 SPR 基波的波长范围为 1.0269 mm(对应频率

291.94 GHz)到 0.4269 mm(对应频率 702.18 GHz), 处于 THz 波段。根据 (7) 式和表 1 参数,可以估算

出基于 T 形光栅的 SP FEL 的辐射功率约为矩形光栅的 SP FEL 辐射功率的 8 倍。

表 1 SP FEL 的谐振腔参数和电子束参数

Table 1 Resonator parameters and electron beam parameters of the SP FEL

Parameter	Width of resonator /mm	Length of resonator /mm	Height of resonator /mm	Transverse size of beam /mm	Beam voltage /kV	Current /A	Number of periods
Value	1.5	36.9	0.75	0.5	50	10	32

Parameter	Period length of grating D /mm	Slot width of grating w /mm	Slot depth of grating d /mm	Gate width of T grating slot w' /mm	Inner depth of T grating slot d' /mm
Value	0.3	0.2	0.15	0.1	0.1

3.2 两种形状光栅的 SP FEL 的模拟结果

图 3 给出了 SP FEL 的三维模拟图。图 4(a)给出了基于 T 形光栅 SP FEL 电子注的动能沿 z 轴分布图,图 4(b)给出了基于矩形光栅的 SP FEL 电子注的动能沿 z 轴分布图。从图 4 可以看出两种 SP FEL 都存在明显的群聚现象,这说明电子束都受到了明显的调制。比较图 4(a)和图 4(b)可以发现,基于 T 形光栅 SP FEL 中电子束有较强的群聚特性,这说明基于 T 形光栅的 SP FEL 的注-波相互作用较强。注-波相互作用较强,相应地就有较高的换能特性,进而有较高的辐射功率。图 5(a)给出了基于 T 形光栅的 SP FEL 场输出功率的变化曲线,图 5(b)给出了基于矩形光栅的 SP FEL 场输出功率的变化曲线。可以看出基于 T 形光栅的 SP FEL 的峰值输出功率和平均输出功率都较大。稳定状态下,基于 T 形光栅的 SP FEL 的峰值输出功率约为 2 kW,而基于矩形光栅的 SP FEL 的峰值输出功率仅为 0.3 kW。基于 T 形光栅的 SP FEL 峰值辐射功率是基于矩形光栅的 SP FEL 峰值辐射功率的 7 倍,与根据 (7) 式和表 1 参数估算的结果非常接近。

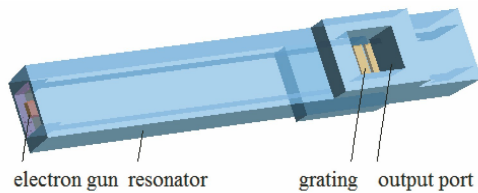


图 3 SP FEL 的模拟图

Fig. 3 Simulation geometry of SP FEL

此外,通过计算图 4(a)和图 4(b)中脉冲电子串的空间周期,可以看出基于 T 形光栅 SP FEL 的脉冲电子串的空间周期比较大。通过计算发现,基于矩形光栅 SP FEL 中脉冲电子串的空间周期 p_r 与基于 T 形光栅 SP FEL 中脉冲电子串的空间周期 p_T 的比为 $D_r/D_T \approx 0.7$ 。图 6(a)给出了基于 T 形

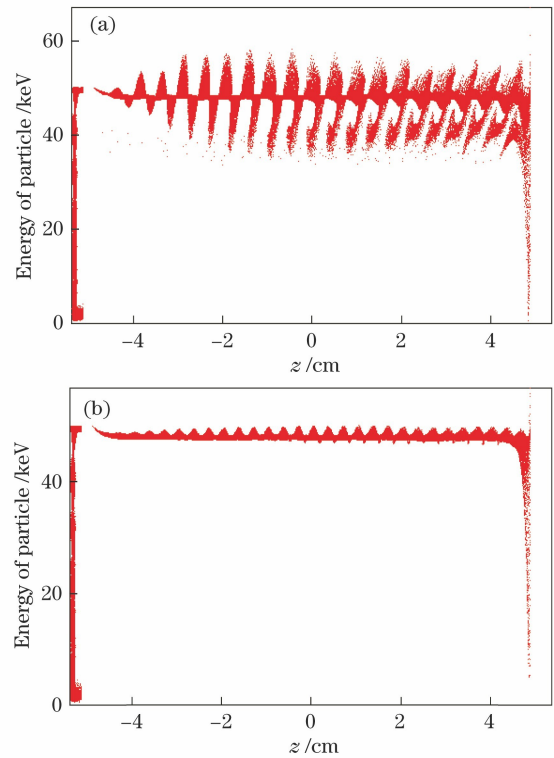


图 4 SP FEL 电子注的动能沿 z 轴分布图。

(a) 基于 T 形光栅的 SP FEL; (b) 基于矩形光栅的 SP FEL

Fig. 4 Distribution of kinetic energy along z axis of electron beam in SP FEL. (a) SP FEL based on T shape grating; (b) SP FEL based on rectangular grating

光栅的 SP FEL 的频谱分布图,图 6(b)给出了基于矩形光栅的 SP FEL 的频谱分布图。比较图 6(a)和图 6(b)可以看出;基于 T 形光栅的 SP FEL 的快速傅里叶变换(FFT)谱中主要存在三条谱线,分别对应 0.251319, 0.502629, 0.753949 THz 三种频率;基于矩形光栅的 SP FEL 的 FFT 谱中主要存在两条谱线,分别对应 0.361698 THz、0.723397 THz 两种频率。根据 SP 理论,这些谱线属于两种不同类型的辐射。频率最低的一种是源于隐失波的衍射发

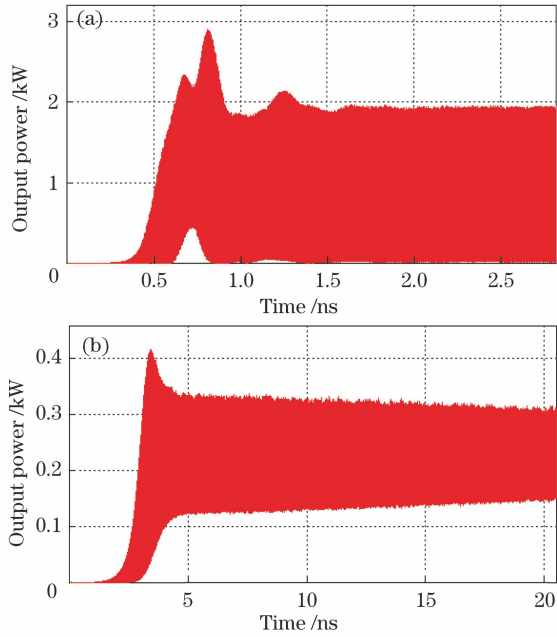


图 5 SP FEL 输出功率的变化曲线。

(a)基于 T 形光栅的 SP FEL;(b)基于矩形光栅的 SP FEL
Fig. 5 Evolution curve of output power of the SP FEL.
(a) SP FEL based on T shape grating; (b) SP FEL based on rectangular grating

射,其频率为隐失波的频率。通过计算发现,基于 T 形光栅的 SP FEL 的基波频率 f_r 与基于矩形光栅的 SP FEL 的基波频率 f_T 的比为 $f_T/f_r \approx 0.695$ 。与 $D_r/D_T \approx 0.7$ 非常接近。这说明电子串的空间周期对应隐失波的波长。另一种对应于隐失波的二次谐波或三次谐波,源于 SPR。其中在基于矩形光栅的 SP FEL 中优势谐波是二次谐波 0.723397 THz,在基于 T 形光栅的 SP FEL 中优势谐波是三次谐波 0.753949 THz。这说明基于 T 形光栅的 SP FEL 不仅有较高的输出功率,还有较高的输出频率。由于 SPR 是沿辐射角辐射的,且当谐振腔的高度为 0.75 mm 时,对应谐振频率是 0.4 THz 与辐射角正弦乘积的整数倍,故在基于矩形光栅的 SP FEL 中优势谐波是二次谐波,在基于 T 形光栅的 SP FEL 中优势谐波是三次谐波。

4 结 论

提出了一种基于 T 形光栅的新型 SP FEL。与基于矩形光栅的 SP FEL 相比,基于 T 形光栅的 SP FEL 的注-波相互作用较强,因此电子束有较强的群聚特性,相应地有较强的注-波转换效率,进而有较高的输出功率。这说明光栅形状对 SP FEL 的输出功率和辐射频率有重要影响,要提高 SP FEL 的输出

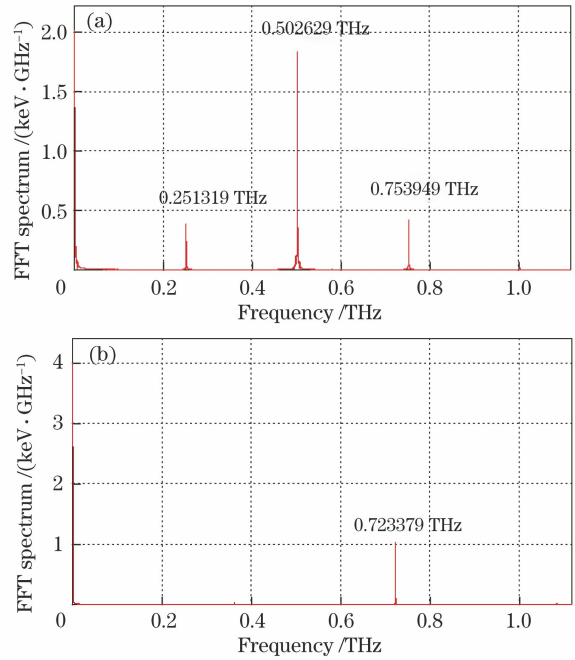


图 6 SP FEL 的频谱分布图。(a)基于 T 形光栅的 SP FEL;(b)基于矩形光栅的 SP FEL

Fig. 6 Corresponding FFT spectra of field power at output port of the SP FEL. (a) SP FEL based on T shape grating; (b) SP FEL based on rectangular grating

功率,必须重视光栅形状。PIC 模拟佐证了理论分析。例如,在电子束能量 $E = 50$ keV、电子束电流 $i = 10$ A、光栅周期 $D = 0.3$ mm 的情况下:基于 T 形光栅的 SP FEL 可以得到 0.753949 THz、峰值输出功率约为 2 kW 的连续 THz 辐射;而基于矩形光栅的 SP FEL 只能得到 0.723397 THz、峰值输出功率约为 0.3 kW 的连续 THz 辐射。

参 考 文 献

- [1] Smith S J, Purcell E M. Visible light from localized surface charges moving across a grating[J]. Physical Review, 1953, 92(4): 1069-1069.
- [2] Shi Z J, Yang Z Q, Liang Z. Smith-Purcell radiation from prebunched electron bunches[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(8): 1081-1085.
史宗君, 杨梓强, 梁正. 预群聚电子束团辐射特性[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1081-1085.
- [3] Meng X Z, Wang M H, Zhang L M, et al. Characteristic analysis of a Smith-Purcell terahertz source[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): 162-167.
- [4] Meng X Z, Wang M H, Sun G F, et al. Smith-Purcell free electron laser based on micro-resonator [J]. Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition), 2018, 31(4): 48-51.

- 孟现柱, 王明红, 孙桂芳, 等. 基于微型谐振腔的史密斯-帕塞尔自由电子激光[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 48-51.
- [5] Meng X Z, Wang M H, Zhang L M, et al. Principle and characteristics analysis of a terahertz oscillator based on Smith-Purcell effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 0423003.
孟现柱, 王明红, 张黎明, 等. 基于史密斯-帕塞尔效应的太赫兹振荡器的原理与特性分析[J]. 光子学报, 2016, 45(4): 0423003.
- [6] Liu W H, Lu Y L, Wang L, et al. A multimode terahertz-Orotron with the special Smith-Purcell radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(18): 183510.
- [7] Li D, Imasaki K, Yang Z, et al. Three-dimensional simulation of super-radiant Smith-Purcell radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(20): 201501.
- [8] Zhou Y C, Zhang Y X, Liu S G. Electron-beam-driven enhanced terahertz coherent Smith-Purcell radiation within a cylindrical quasi-optical cavity [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(2): 262-267.
- [9] Meng X Z. Effect of dielectric on Smith-Purcell free electron laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031405.
孟现柱. 史密斯-帕塞尔自由电子激光中的电介质效应[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031405.
- [10] Li W W, Xu Y F, Lu Y L, et al. Enhancement of coherent THz Smith-Purcell radiation by resonance overlapping[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38(1): 12-21.
- [11] Kumar P, Bhasin L, Tripathi V K, et al. Smith-Purcell terahertz radiation from laser modulated electron beam over a metallic grating[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(9): 093301.
- [12] Naumenko G A, Potylitsyn A P, Sergeeva D Y, et al. First experimental observation of conical effect in Smith-Purcell radiation[J]. *Jetp Letters*, 2017, 105: 1-8.
- [13] Zhang P, Ang L, Gover A. Enhancement of coherent Smith-Purcell radiation at terahertz frequency by optimized grating, prebunched beams, and open cavity [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2015, 18(2): 020702.
- [14] Zhang P, Zhang Y, Tang M. Enhanced THz Smith-Purcell radiation based on the grating grooves with holes array[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10901-10910.
- [15] Liu W H, Lu Y L, Jia Q K. Terahertz radiation source based on specific Smith-Purcell effect: CN201610220733.5[P]. 2016-04-08.
刘维浩, 陆亚林, 贾启卡. 一种基于特异 Smith-Purcell 效应的太赫兹辐射源, CN201610220733.5[P]. 2016-04-08.
- [16] Liang L B, Liu W H, Jia Q K, et al. High-harmonic terahertz Smith-Purcell free-electron-laser with two tandem cylindrical-gratings[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2960-2968.
- [17] Liu W X, Tang C X, Huang W H. Characteristics of terahertz coherent transition radiation generated from picosecond ultrashort electron bunches [J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(6): 062902.
- [18] Chen J Y, Zheng L, Zhang Y C, et al. A novel Smith-Purcell free electron laser[J]. *International Journal of Electronics*, 2001, 88(4): 467-471.
- [19] Chen J Y, Wang M H, Yang Z Q, et al. Novel Smith-Purcell tunable radiation source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1289-1292.
陈嘉钰, 王明红, 杨梓强, 等. 新型史密斯-帕塞尔效应可调辐射源研究 [J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1289-1292.
- [20] Shi Z J, Yang Z Q, Liang Z, et al. Smith-Purcell radiation from a train of line charges with reflection grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1517-1521.
史宗君, 杨梓强, 梁正, 等. 线电荷串产生的史密斯-帕塞尔辐射 [J]. 光学学报, 2006, 26(10): 1517-1521.
- [21] Gao X, Yang Z Q, Qi L M, et al. Three-dimensional simulation of a Ka-band relativistic Cherenkov source with metal photonic-band-gap structures[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(6): 2452-2458.
- [22] Meng X Z, Wang M H, Ren Z M. Smith-Purcell radiation in a grating-resonator composite structure [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(1): 21-24.
孟现柱, 王明红, 任忠民. 光栅-谐振腔复合结构中的史密斯-帕塞尔辐射 [J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 21-24.