

基于带状束的史密斯-帕塞尔自由电子激光模拟与分析

孟现柱 王明红 任忠民

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 采用三维数值模拟方法研究了基于带状束的史密斯-帕塞尔自由电子激光(S-P FEL)的辐射输出特性。当一束相对论带状束紧贴着矩形光栅表面飞行时,可以激励起非相干的史密斯-帕塞尔(S-P)辐射,而全反馈谐振腔可以将各个方位角的S-P辐射反射回带状束,同时进行速度调制,使电子注发生群聚,进而获得相干的S-P辐射。通过数值模拟发现,带状束可以提高S-P FEL的功率和功率谱密度;随着带状束宽高比的增大,电子束的速度调制和群聚更为明显,S-P FEL的功率和功率谱密度也越大。

关键词 激光光学; 史密斯-帕塞尔效应; 全反馈谐振腔; 带状束; 宽高比

中图分类号 O434 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061404

Simulation and Analysis of Smith-Purcell Free Electron Laser Based on Sheet-Beam

Meng Xianzhu Wang Minghong Ren Zhongmin

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

Abstract The radiation output characteristics of the Smith-Purcell free electron laser (S-P FEL) based on different sheet-beams are studied by the three-dimensional numerical simulation. As a sheet-beam flies closely to the rectangular gratings, it emits incoherent Smith-Purcell (S-P) radiation. The full feedback resonator reflects the radiation with a random azimuth angle back onto the sheet-beam and causes the electrons to be modulated, which leads to electron bunching and coherent S-P radiation. The numerical simulation results show that the power and power spectrum density of S-P FEL can be increased by the sheet-beams. The modulation of sheet-beam, the bunching state of sheet-beam, and the power and power spectrum density of S-P FEL, all increase with the increasing aspect ratio of sheet-beam.

Key words laser optics; Smith-Purcell effect; full feedback resonator; sheet-beam; aspect ratio

OCIS codes 140.2600; 300.6495; 300.6380; 270.3430

1 引言

当电子注紧贴周期性金属结构的表面飞行时,将激励起毫米波、远红外波段的电磁辐射,这种现象被称为史密斯-帕塞尔(S-P)效应,这种辐射被称为S-P辐射^[1]。这种非相干的辐射强度很弱,不易被检测和应用。为了获得相干的S-P辐射,通常利用相对论电子注激励由开放式谐振腔(或封闭式谐振腔)和衍射光栅组成的高频相互作用系统,这种实验结构被称为史密斯-帕塞尔自由电子激光(S-P FEL)^[2-4]。S-P FEL已经成功地在毫米波、远红外波段进行了实验^[5-9]。

以圆柱形电子注为主要特征的传统微波、毫米波真空电子器件在向高频率、高功率、高效率方向发展时,由于其自身几何尺寸和工作频率共度性的限制,面临一些技术障碍。为了克服这些障碍,1938年Kovalenko提出了带状束器件的概念。该类器件具有以下优点:首先,带状束在一个方向上具有小尺度,与其中的高频

收稿日期: 2015-12-17; **收到修改稿日期:** 2016-01-13; **网络出版日期:** 2016-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(11275089,11375081)

作者简介: 孟现柱(1968—),男,硕士,副教授,主要从事史密斯-帕塞尔辐射方面的研究。E-mail: mengxz@lcu.edu.cn

波长相匹配(共度性),可以使其工作在微波、毫米波甚至太赫兹波段,而在另一个方向上可以根据输出功率要求选择较大尺寸的器件,因此能够在维持较小的注内空间电荷力的前提下传输强流电子注,提高了注-波相互作用效率和功率容量,可以输出高峰值的功率和平均功率;其次,带状束空间电荷力小,可以降低强流电子注电流密度对聚焦磁场和工作电压的要求,突破空间电荷力对强流束的限制。

基于上述优点,同时为了扩大电子注与高频场的相互作用区域,提高输出功率,本文研究了基于带状束的 S-P FEL,并对基于带状束的 S-P FEL 进行了三维数值模拟和理论分析。

2 实验装置

图 1 所示为基于带状束的 S-P FEL 原理图,其中半椭圆反射镜和矩形光栅共同构成了全反馈谐振腔^[10-13]。当一束相对论带状束紧贴着矩形光栅的表面飞行时,可以激励起 S-P 辐射,辐射公式为

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

式中 λ 为辐射波长, n 为同步波的空间谐波次数, l 为光栅的节距, $\beta = v/c$, v 为电子的运动速度, c 为光速, θ 为高频振荡反馈或输出方向与电子运动方向的夹角。全反馈谐振腔可以将带状束产生的各个方位角的 S-P 辐射反射回带状束,对带状束进行调制,使电子注发生群聚。

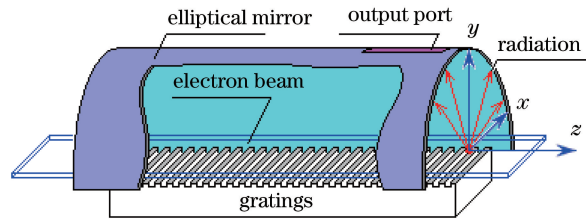


图 1 基于带状束的 S-P FEL 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of S-P FEL based on sheet-beam

图 2 为全反馈谐振腔的剖面图。根据椭圆反射镜的反射特性,任何从焦点 F_1 入射到椭圆反射镜的光线都被椭圆反射镜反射回另一个焦点 F'_1 。因此图 2 中从 F_1 辐射的任意 θ 角的 S-P 辐射 F_1a 入射到 a 点后,将被椭圆反射镜反射回 F'_1 ,光路为 abc ;在全反馈谐振腔中,光栅表面可以看作一个平面镜,因此光线入射到 c 点后,将被光栅表面反射回 F_1 ,光路为 cF_1d ;同理,光线入射到 d 点后,将被反射回 F'_1 ,光线入射到 g 点后,将被反射回 F_1 ,经过多次反射,光线最终射向输出端口,光路为 sF_1 。这表明从 F_1 辐射的任意方位角的 S-P 辐射都能被反射回带状束,并对带状束进行调制,使电子注发生群聚,并且经过多次反射后射向输出端口。

图 2 中椭圆反射镜的方程可以表示为 $\frac{y^2}{m^2} + \frac{x^2}{n^2} = 1$,其中 m 、 n 分别为椭圆反射镜的长半轴和短半轴。从焦点 F_1 辐射的发射角为 θ 的任意方位角的光线被反射回 F_1 的过程中,光程(例如光路 $F_1a \rightarrow abc \rightarrow cF_1$)可表示为

$$\delta = \sqrt{(y_a - f)^2 + x_a^2} + \sqrt{(y_a - y_c)^2 + (x_a - x_c)^2} + \sqrt{f^2 + x_c^2} = 2a / \sin \theta, \quad (2)$$

式中 f 为椭圆的焦距。当 S-P 辐射的波长满足

$$2a / \sin \theta = k\lambda \quad (3)$$

时^[12],该波长的 S-P 辐射将在全反馈谐振腔中因谐振而放大,式中 k 为正整数。

图 2 中,当从椭圆反射镜或光栅表面反射回的 S-P 辐射分别经过 b 、 e 、 i 、 l 、 o 、 r 各点和焦点 F_1 时,会发生注-波相互作用,这些点称为注-波互作用点。在注-波互作用点,当电子的运动速度与某一空间谐波的相速度同步时,注-波互作用将会增强;当注-波互作用达到自激状态,S-P FEL 将会形成稳定的受激辐射放大。可以看出带状束的宽高比越大,S-P 辐射经过的注-波互作用点越多,而注-波互作用点越多,受激辐射放大次数越多,因此采用带状束可以提高 S-P FEL 的功率和功率谱密度。

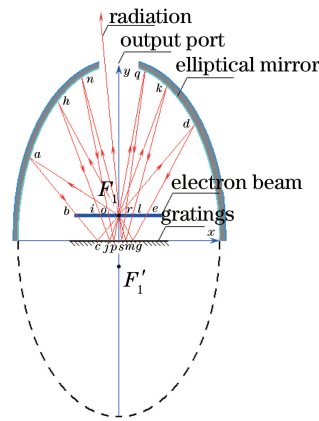


图 2 全反馈谐振腔的剖面图

Fig. 2 Cross-section view of full feedback resonator

3 模拟与分析

为了验证上述分析,利用粒子模拟(PIC)软件对基于带状束和全反馈谐振腔的 S-P 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,计算和分析存在空间电荷时的复杂电磁问题。采用时域有限差分法(FDTD)对电磁问题进行求解,FDTD 的原理是将电磁场连续域内的问题转换为离散系统的问题,即利用各离散点的数值解来逼近连续场域内的真实值,在求解 Maxwell 方程组时,由于对时间的偏微分也要进行差分,所以又称为时域有限差分法^[14-20]。模拟中采用的参数如表 1 所示。

表 1 模拟中采用的参数

Table 1 Parameters for simulation

Period of metallic grating	1.5 mm					
Depth of metallic grating	0.3959 mm					
Metallic width of metallic grating	0.5 mm					
Number of period	50					
Beam voltage	100 kV					
Current density	6.07 A/mm ²					
Height of sheet-beam	0.5 mm					
Width of sheet-beam	0.5 mm	1 mm	2 mm	3.139 mm	6.279 mm	8.235 mm
Aspect ratio of sheet-beam	1:1	2:1	4:1	6.279:1	12.558:1	16.438:1

在 S-P FEL 中,电子注受到光栅感应电荷的周期性库仑场的速度调制,使得一部分电子处于加速场中,另一部分处于减速场中,处于减速场中的电子将能量交给高频场,自身失去纵向动能,从而使高频场得到放大,完成电子注与高频场的能量交换。图 3 为 S-P FEL 在不同宽高比的带状束注入时电子注的动量沿 z 轴的分布。可以看出,宽高比越大,处于加速场和减速场中的电子越多,即电子束的速度调制越明显。说明宽高比越大,周期性库仑场越大,电子注与高频场的能量交换越好,注-波相互作用也越明显。当注-波相互作用达到自激状态,S-P FEL 将形成稳定的受激辐射放大,对电子注的速度调制也越明显。在电子注的运动过程中速度调制转变为电子注的密度调制,这一过程称为电子注的群聚。图 4 为 S-P FEL 在不同宽高比的带状束注入下 z - y 平面上的电子密度分布。可以看出,宽高比越大,电子束的群聚越明显,这也证明了宽高比越大,电子注的速度调制越明显。

图 5 为不同宽高比的带状束注入时 S-P FEL 的输出功率曲线。可以看出,宽高比越大,输出功率的峰值越大,S-P 辐射的受激辐射放大次数越多。图 6 为不同宽高比的带状束注入时 S-P FEL 的频谱分布。图 6 中显然存在两种不同类型的辐射。一种源自倏逝波和光栅端角衍射的衍射发射;另一种是源自特定方向的 S-P 辐射,其频率对应于倏逝波的二次谐波,可以看出,占主导地位的辐射正是该二次谐波。不同宽高比的 S-P FEL 的输出频率和功率谱密度如表 2 所示。

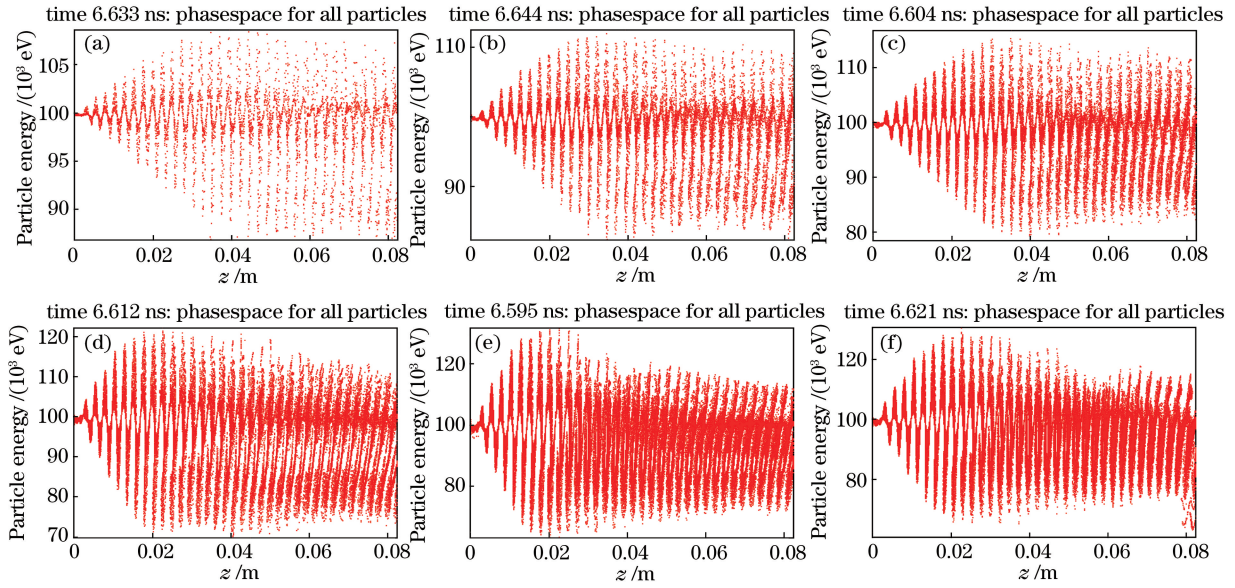


图 3 基于不同宽高比带状束的 S-P FEL 群聚电子动能。

(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1

Fig. 3 Kinetic energy of electrons in bunching state of S-P FEL based on sheet-beams with different aspect ratios.

(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1

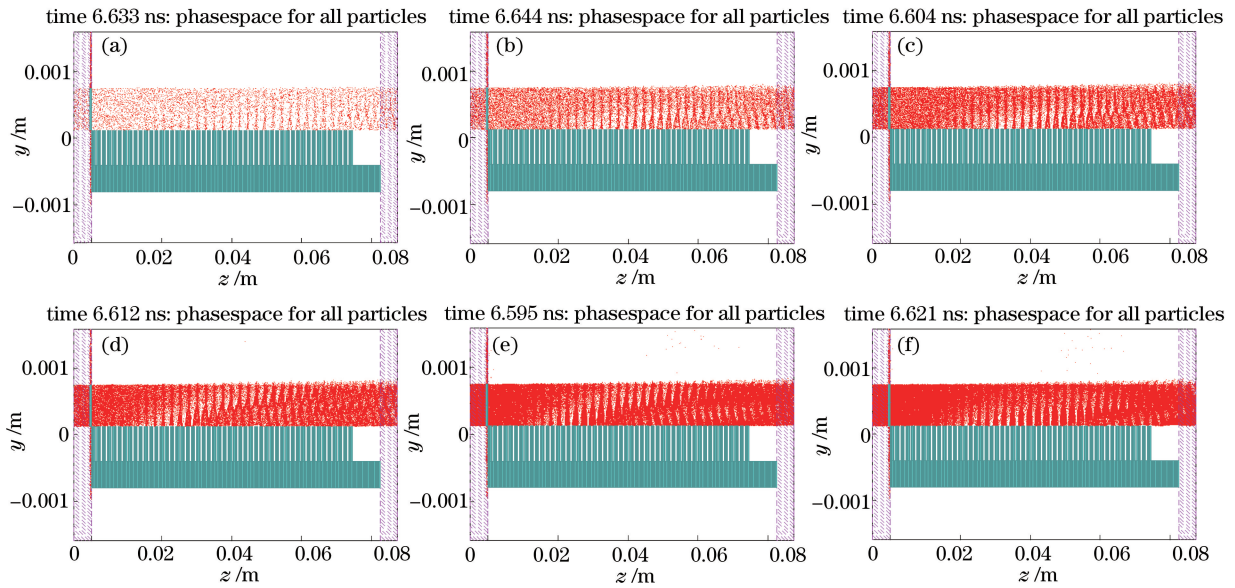


图 4 基于不同宽高比带状束的 S-P FEL 在 z-y 平面上的电子密度分布。

(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1

Fig. 4 Electron density on the z-y plane of S-P FEL based on sheet-beams with different aspect ratios.

(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1

表 2 基于不同宽高比带状束的 S-P FEL 的频率和功率谱密度

Table 2 Frequency and power spectrum density of S-P FEL based on sheet-beams with different aspect ratios

Aspect ratio	Frequency /GHz	Power spectrum density /($W \cdot GHz^{-1}$)
1:1	134.677	45
2:1	134.370	170
4:1	134.076	690
6.279:1	133.907	1700
12.558:1	133.281	6700
16.438:1	133.101	11300

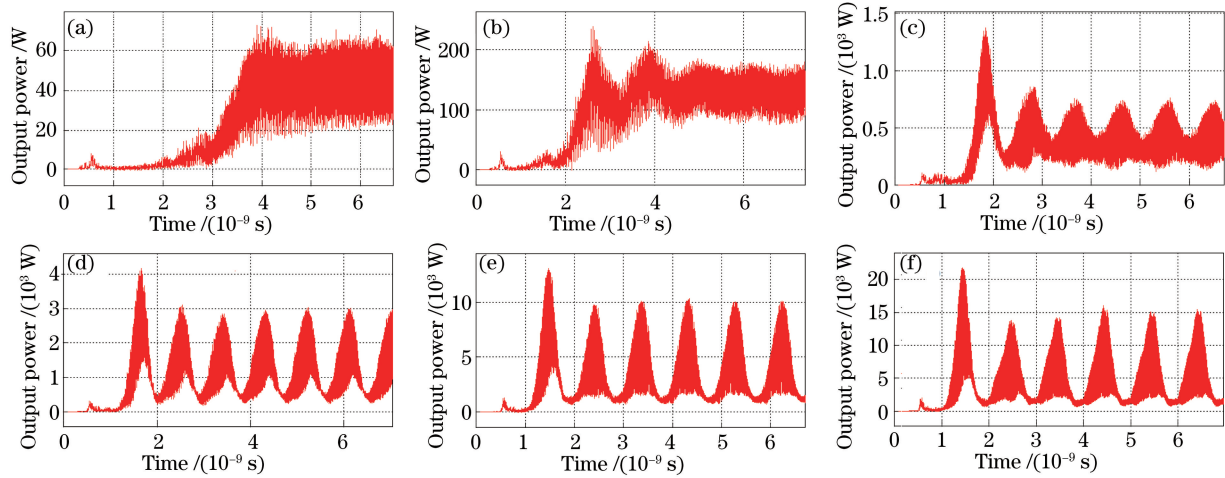


图 5 基于不同宽高比带状束的 S-P FEL 的输出功率。(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1
Fig. 5 Output power of S-P FEL based on sheet-beams with different aspect ratios.

(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1

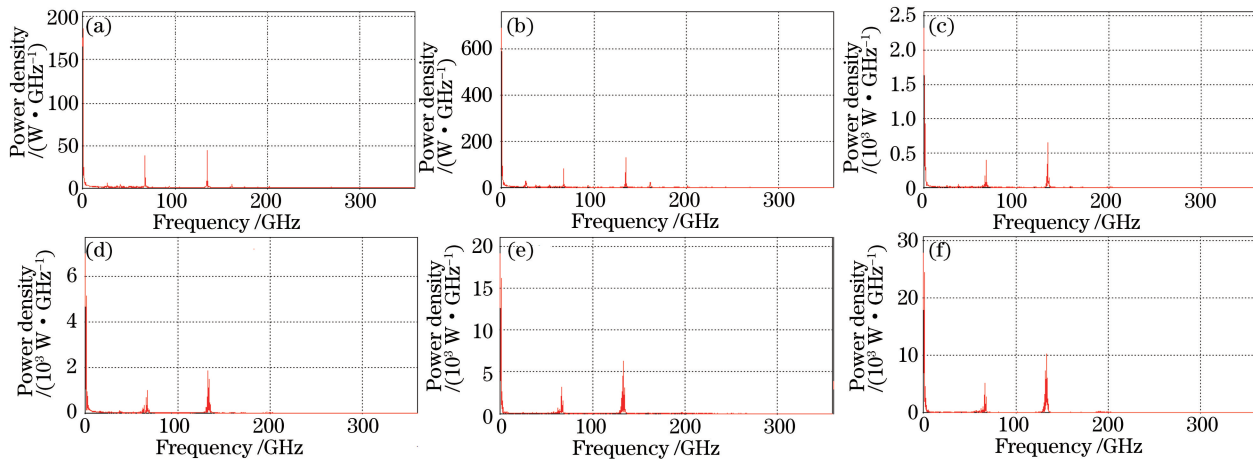


图 6 基于不同宽高比带状束的 S-P FEL 的频谱分布。(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1
Fig. 6 Frequency spectra of S-P FEL based on sheet-beams with different aspect ratios.

(a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 6.279:1; (e) 12.558:1; (f) 16.438:1

分析表 2 可以得出, S-P 辐射的功率谱密度除以宽高比的平方近似等于 43, 这说明功率谱密度与宽高比存在一种近似函数关系。设带状束的宽度为 w , 高度为 h , S-P FEL 的功率谱密度可以近似表示为

$$S(\omega) \approx A_s (\omega/h)^2 + S(\omega)_z, \quad (4)$$

式中 $A_s = 42.5$, $S(\omega)_z = 2.5$ 。说明宽高比越大, S-P FEL 的功率谱密度越大。

4 结 论

综上所述可以看出, 当一束相对论带状束紧贴着矩形光栅的表面飞行时, 可以激励起 S-P 辐射, 全反馈谐振腔可以将带状束产生的各个方位角的 S-P 辐射反射回带状束, 并进行速度调制, 使电子注发生群聚。通过三维数值模拟发现, 带状束的宽高比越大, S-P 辐射经过的注-波作用点越多, 进而 S-P 辐射的受激辐射放大次数越多, 电子束的速度调制和群聚也越明显, 同时, S-P FEL 的功率和功率谱密度也越大。

参 考 文 献

- Smith E J, Purcell E M. Visible light from localized surface charges moving across a grating[J]. Physical Review, 1953, 92(4): 1069-1070.
- Meng Xianzhu, Ren Zhongmin, Wang Minghong. Electromagnetic radiation from electron beam moving across a

- multilayer film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 881-884.
- 孟现柱, 任忠民, 王明红. 电子束沿多层膜表面运动时产生的电磁辐射[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 881-884.
- 3 Doria A, Gallerano G P, Giovenale E, *et al.*. Can coherent Smith-Purcell radiation be used to determine the shape of an electron bunch[J]. *Nuclear Instrument & Methods in Physics Research*, 2002, 483: 263-267.
- 4 Backe H, Lauth W, Mannweiler H, *et al.*. Investigation of far-infrared Smith-Purcell radiation at the 3.41 MeV electron injector linac of the Mainz Microtron MAMI[C]. *Advanced Radiation Sources and Applications*, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 2006, 199: 267-282.
- 5 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.
- 6 Urata J, Goldstein M, Kimmitt M F, *et al.*. Superradiant Smith-Purcell emissions[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(3): 515-519.
- 7 Liu C S, Tripathi V K. Diffraction-limited laser excitation of a surface plasma wave and its scattering on a rippled metallic surface[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(8): 1503-1507.
- 8 Marshall T C. *Free electron lasers*[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1985: 12-216.
- 9 Wachtel J M. Free-electron lasers using the Smith-Purcell effect[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(1): 49-56.
- 10 Meng X Z. Smith-Purcell free electron laser based on a semi-conical resonator[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 975-979.
- 11 Meng X Z. Smith-Purcell free electron laser based on a multilayer metal-dielectric stack[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(17): 3162-3164.
- 12 Meng X Z, Wang M H, Ren Z M. Smith-Purcell free electron laser based on the semi-elliptical resonator[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(5): 050702.
- 13 Meng Xianzhu, Wang Minghong, Ren Zhongmin. Analysis of high brightness laser synchrotron source based on the technique of oval supercavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1638-1642.
- 孟现柱, 王明红, 任忠民. 基于椭圆超腔的高亮度激光同步辐射分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1638-1642.
- 14 Gao X, Yang Z Q, Qi L M, *et al.*. Three-dimensional simulation of Ka-band relativistic Cherenkov source with metal photonic-band-gap structures[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(6): 2452-2458.
- 15 Liu W X, Tang C X, Huang W H. Characteristics of terahertz coherent transition radiation generated from picosecond ultrashort electron bunch[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(6): 062902.
- 16 Bei Hua, Dai Dongdong, Dai Zhimin. Simulation of Smith-Purcell radiation from compact terahertz source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(12): 2067-2072.
- 卑 华, 戴冬东, 戴志敏. 紧凑型 THz 源的史密斯-帕塞尔辐射模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(12): 2067-2072.
- 17 Meng Xianzhu. Numerical simulation of a double electron beam interaction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 072301.
- 孟现柱. 对双电子束相互作用的数值模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 072301.
- 18 Shi Zongjun, Yang Ziqiang, Liang Zheng. Smith-Purcell radiation from prebunched electron bunches [J]. *Chinese J 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.
- 19 Chen Jiayu, Wang Minghong, Yang Ziqiang, *et al.*. Novel Smith-Purcell tunable radiation source[J]. *Chinese J 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 Zongjun, Yang Ziqiang, Liang Zheng, *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.