

doi: 10.3788/gzxb20164504.0423003

基于史密斯-帕赛尔效应的太赫兹振荡器的原理与特性分析

孟现柱, 王明红, 张黎明, 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:提出了一种基于史密斯-帕赛尔效应的太赫兹振荡器,该器件由电子枪、调制腔、输出腔、收集极等部分构成。在器件调制腔中,电子注的速度调制通过史密斯-帕赛尔效应完成的,当群聚电子注通过输出腔时,群聚电子注会在输出腔的间隙处激励起高频电场,该高频电场会使电子注的一部分动能转换为高频能量,并完成太赫兹振荡。模拟发现:当金属光栅的空间周期为 0.6 mm、电子注能量为 100 keV 时,利用史密斯-帕赛尔效应调制的太赫兹振荡器可以输出频率为 349.017 GHz 和 346.324 GHz、功率谱密度接近 4 kW/GHz、最大输出峰值功率超过 2 kW 的太赫兹波。

关键词:物理电子学;太赫兹;粒子模拟;振荡器;史密斯-帕赛尔效应;调制;群聚

中图分类号:O434

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)04-0423003-5

Principle and Characteristics Analysis of a Terahertz Oscillator Based on Smith-Purcell Effect

MENG Xian-zhu, WANG Ming-hong, ZHANG Li-ming, REN Zhong-min
(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 terahertz oscillator based on Smith-Purcell effect was presented. The terahertz oscillator is composed of an electron gun, a modulation cavity, an output cavity and a collector. In the modulation cavity of the novel terahertz oscillator, electron beam was modulated by Smith-Purcell effect. As bunching electron beam passes through output cavity, high-frequency electric field is produced in the gap of output cavity. By the high-frequency electric field, part of the kinetic energy of electron beam can be transformed into the energy of high-frequency field, and the terahertz radiation can be emitted. The simulation results show that when the length of the grating period is 0.6 mm, and energy of electron beam is 100 keV, the terahertz radiation frequency at 349.017 GHz and 346.324 GHz, power spectral density approach 4 kW/GHz, and maximum output peak power over 2 kW can be generated in the terahertz oscillator based on Smith-Purcell effect.

Key words: Physical electronics; Terahertz; Particle-in-cell simulation; Oscillator; Smith-Purcell effect; Modulation; Bunching

OCIS Codes: 230.4910; 300.6495; 300.6380; 270.3430

0 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波。早期太赫兹在不同的领域有不同的名称,在光学领域被称为远红外,而在电子学领域,则被称为亚

毫米波、超微波等。太赫兹波在电磁波频谱中占有很特殊的位置,其长波段与毫米波相重合,短波段与红外光相重合,是宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,也是电子学向光子学的过渡区。在 20 世纪 80 年代中期之前,由于 THz 正好处于科学技术发展相对较好的微

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 11275089, 11375081) 和山东省自然科学基金 (No. ZR2011FQ001) 资助

第一作者:孟现柱 (1968-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为史密斯-帕赛尔辐射。Email: mengxz@luc.edu.cn

收稿日期: 2015-12-14; 录用日期: 2016-03-04

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

波毫米波与红外线光学之间的一个相对落后“空白区”,因此,被称为电磁波谱的“太赫兹空隙(THz gap)”^[1-3].在太赫兹技术和应用中,太赫兹源是太赫兹技术发展的关键技术.目前对于太赫兹源的研究除了传统的太赫兹非相干的热辐射源(高压汞弧灯和碳硅棒)外,还有基于光学方法的太赫兹源、基于电子学方法的太赫兹源、基于等离子体方法的太赫兹源.随着太赫兹科学技术的发展,基于电子学方法的太赫兹源的研究取得了很大的进展,当前返波振荡器(Backward-Wave Oscillator, BWO)、回旋管以及 THz 速调管都是主要研究方向^[4-6].BWO 是一种能满足毫瓦级输出、结构紧凑、具有高迁移率的慢波器件,可以在 0.1~1.5 THz 频率范围产生连续波功率.但是 BWO 装置的缺点是需要水冷却系统和高偏置电压外设.回旋管是一种在毫米波长范围可以产生兆瓦量级连续能量,同时在太赫兹范围也可以产生高能相干辐射源的快波器件,回旋管可以在强磁场下,获得太赫兹频段的高能量的相干辐射.但是其强磁场系统过于庞大、造价昂贵.太赫兹纳米速调管是将纳米技术、微电子加工技术以及真空电子器件技术融合在一起的新型器件.它不仅产生毫瓦级的功率输出,而且工作电压低(通常只有几十至几百伏),不需要磁场,还具有低色散、长使用寿命等特点.而且可以组成纳米速调管阵列,大大提高输出功率.其它真空器件如扩展互作用振荡器(EIA)、绕射辐射振荡器(Ortron)、切伦科夫辐射器件等真空器件,其工作频率也已经接近或达到 1THz,连续波功率在 0.1W 到数十瓦^[7-8].

为了寻找有可能更实用的太赫兹源,本文设计了一种利用史密斯-帕赛尔(Smith-Purcell, S-P)效应调制电子注速度、利用群聚电子注通过输出腔间隙产生高频振荡的 THz 振荡器,并对这种 THz 振荡器进行了理论分析和三维模拟验证.

1 工作原理和模拟验证

1.1 史密斯-帕赛尔效应

当电子注紧贴着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 S-P 效应,这种辐射被称为 S-P 辐射^[9].S-P 辐射的波长取决于电子的运动速度 v 、光栅周期 l 、同步波的空间谐波次数 n ,高频振荡反馈或输出方向与电子运动方向的夹角 θ ,S-P 辐射公式为

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

式中 $\beta = v/c$, c 为光速.根据式(1),只要选取适当电子的运动速度和光栅周期,就可以实现太赫兹波段的 S-P 辐射.

S-P 效应在产生 S-P 辐射的同时能够调制电子注

速度,使电子发生群聚.众所周知,群聚电子注通过输出腔的间隙时可以产生高频电场,形成高频振荡.因此可以利用 S-P 效应调制电子注速度以及输出腔的间隙实现高频振荡的太赫兹振荡器.

1.2 THz 振荡器结构与原理分析

THz 振荡器由电子枪、调制腔、输出腔、收集极等部分构成,如图 1.其中调制腔内有金属光栅;输出腔为双重入式谐振腔.电子枪采用一负高压脉冲作用在其阴极上,其阳极接地,100KeV 的加速电压从阴极引出电子,经过阳极孔后,随着引导磁场进入调制腔^[10],并紧贴着调制腔中的金属光栅的表面飞行,这时电子注在金属光栅上感应出电荷,形成周期性库仑场,周期性库仑场与电子作用,电子的运动状态会随之变化,从而产生 S-P 辐射.调制腔内腔壁可以将产生的 S-P 辐射反射回电子注,使电子注与 S-P 辐射进行相互作用,对电子注的速度进行调制.当电子的运动速度与某一空间谐波的相速度同步,注一波相互作用将会迅速增强,对电子注的速度调制也会迅速增强,在电子注的运动漂移过程中,电子注的速度调制会转变为电子注的密度调制,使电子注发生群聚.当群聚电子注通过输出腔时,群聚电子注会在输出腔的间隙处产生高频感应电流.该高频感应电流在输出腔的间隙处激励起相应的高频纵向电场,该高频纵向电场使电子注的一部分动能转换为高频能量,完成高频振荡的功能^[11-13].电子注在此过程中经历了发射、速度调制、群聚、高频振荡换能,电子注的一部分能量转换为高频能量,而剩余的能量在电子轰击收集极时转化为了热能^[14].

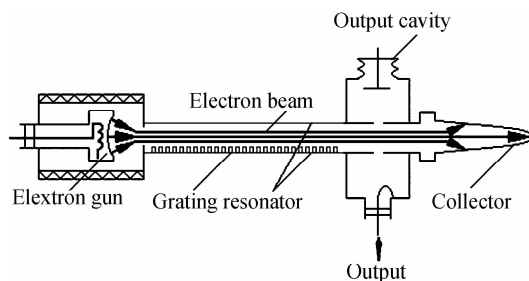


图 1 THz 振荡器原理

Fig.1 Schematic diagram of the THz oscillator

在 THz 振荡器中,输出腔在群聚电子注的作用下感应电流的过程类似于受迫振荡.每当输出腔的间隙通过一个群聚电子束团,输出腔的间隙的感应电流就变化一次,因此高频感应电流的频率 f_i 等于单位时间内通过的间隙的群聚电子束团个数,即等于电子注的群速度 v 与群聚电子注的空间周期 d 的比值,其表达式为

$$f_i = \frac{v}{d} \quad (2)$$

由于是利用 S-P 辐射调制电子注速度的,所以群聚电子注的空间周期 d 等于 S-P 辐射的波长 λ_{sp} .因此

高频感应电流的频率为

$$f_i = \frac{v}{\lambda_{sp}} = \frac{v}{c} f_{sp} \quad (3)$$

式中 f_{sp} 为 S-P 辐射的频率, c 为光速. 根据式(3), 高频感应电流的频率 f_i 与 S-P 辐射的频率 f_{sp} 成正比, 考虑 $v \sim c$, 高频感应电流的频率 f_i 就等于 S-P 辐射的频率 f_{sp} . 高频感应电流在输出腔的间隙中激励起的高频纵向电场的频率也等于 S-P 辐射的频率 f_{sp} , 而高频纵向电场与电子作用, 可以将电子注的一部分动能转换为高频场能量, 完成高频振荡, 高频振荡的频率也等于 S-P 辐射的频率 f_{sp} . 根据式(1), 当金属光栅的空间周期 $l = 0.6 \text{ mm}$ 、电子注能量 $E = 100 \text{ keV}$ 时, 能够产生波长介于 0.494 mm (对应频率 603.2 GHz) $\sim 1.692 \text{ mm}$ (对应频率 176.26 GHz) 的太赫兹波段的 S-P 辐射. 因此输出腔也就能够产生波长介于 0.494 mm (对应频率 603.2 GHz) $\sim 1.692 \text{ mm}$ (对应频率 176.26 GHz) 的太赫兹波段高频振荡.

为了获得最大输出, 输出腔的固有谐振频率也应该是 f_i , 这样高频振荡可以在输出腔中形成共振. 要获得太赫兹波段的输出, 输出腔的谐振范围还必须在太赫兹波段. 输出腔的参数可以利用场分析的方法, 通过求解腔内的 Helmholtz 方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (5)$$

得到腔内各模式场的分布, 方程中 k 是腔中各模式对应的角波数. 腔的谐振频率可由

$$f = \frac{k}{2\pi \sqrt{\epsilon\mu}} \quad (6)$$

得到, 但是求解 Helmholtz 方程组的方法非常繁琐, 本

文在近似求解基础上, 通过反复修改腔体参数得到了谐振范围在太赫兹波段的输出腔.

1.3 THz 振荡器结构参数

THz 振荡器的特性可以利用粒子模拟 (Particle-In-Cell, PIC) 软件进行三维模拟分析. 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^[15-17]. 它利用时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 对电磁问题进行求解, 有限差分法的原理是把电磁场连续域内的问题变为离散系统的问题, 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, 所以又叫时域有限差分法^[18-20]. 在 THz 振荡器的模拟中, 采用的参数如表 1. 选取金属光栅的空间周期 $l = 0.6 \text{ mm}$ 、电子注能量 $E = 100 \text{ keV}$, 主要是为了产生波长介于 0.494 mm (对应频率 603.2 GHz) $\sim 1.692 \text{ mm}$ (对应频率 176.26 GHz) 的太赫兹波段的 S-P 辐射. 图 2 为 THz 振荡器的三维模拟图.

表 1 模拟中采用参数

Table 1 Parameters of the simulations	
Parameters	Values
Period of metallic grating	0.60 mm
Depth of metallic grating	0.71 mm
Metallic width of metallic grating	0.20 mm
Number of period	50
Beam voltage	100 kV
Current	10 A
Transverse size of beam	0.25 mm
Axial magnetic field	2.0 T

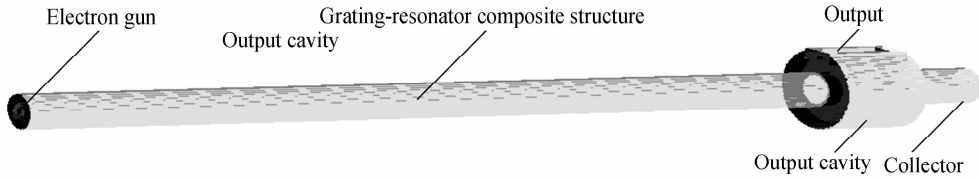


图 2 THz 振荡器的模拟图

Fig. 2 The simulation geometry of the THz oscillator

1.4 模拟结果与特性分析

图 3 为 THz 振荡器在 z - y 平面上的电子密度分布. 从图 3 可以观察到电子注在运动过程中发生明显的群聚, 说明当电子注紧贴着调制腔中的金属光栅的表面飞行时, 电子与高频电场进行了相互作用, 电子注的速度受到了调制. 这说明可以利用 S-P 效应调制电子注速度. 从图 3 可以观察到群聚电子注的空间周期大约 0.85 mm 左右, 范围在太赫兹波段. 这说明可以利用 S-P 效应调制电子注速度获得空间周期范围在太赫兹波段的群聚电子注. 这为实现太赫兹输出提供了条件.

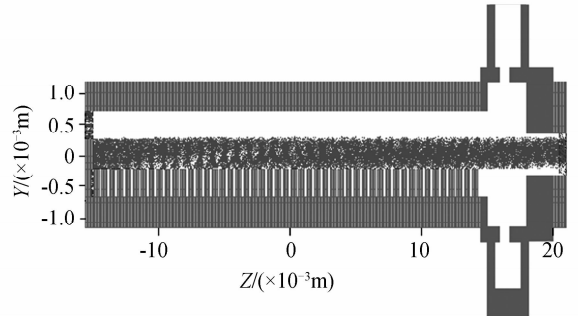


图 3 THz 振荡器在 z - y 平面上的电子密度分布
Fig. 3 Density of electrons in the z - y plane of the THz oscillator

图4为THz振荡器中电子注的动能沿 z 轴分布图。从图4可以观察到在调制腔处,有一部分电子的动能大于电子注的入射动能,也有一部分电子的动能小于电子注的入射动能,这也说明调制腔能够对电子注的速度进行调制。观察电子注动能的空间周期大约也是0.85mm左右,范围在太赫兹波段。进一步说明可以利用S-P效应调制电子注速度获得空间周期范围在太赫兹波段的群聚电子注。从图4进一步可以观察到的间隙处,群聚电子注的动能有一个整体下降,这说明群聚电子注能够与输出腔的间隙作用,在这个过程中,电子注将失去的纵向动能转换为高频感应电流并由此产生了高频场。

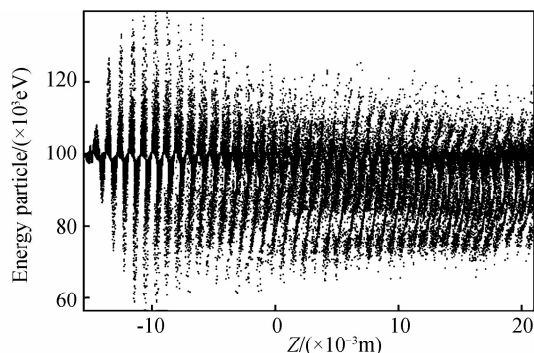


图4 THz振荡器中电子注的动能沿 z 轴分布

Fig. 4 The kinetic energy of electrons in bunching state of the THz oscillator

由于群聚电子注的空间周期范围在太赫兹波段,因此,当该群聚电子注通过输出腔时,在输出腔的间隙处会产生范围在太赫兹波段的高频感应电流,高频感应电流进而在输出腔的间隙激励起太赫兹波段的高频纵向电场,如果输出腔是谐振范围在太赫兹波段的输出腔,就能够与此高频场谐振,输出稳定的太赫兹波。图5为THz振荡器的频谱分布图。从图5可以观察到THz振荡器的辐射频率为349.017 GHz和346.324 GHz,功率谱密度接近4 kW/GHz。图6给出了THz振荡器的功率变化图。从图6可以观察到在表1所给数据情况下,这种THz振荡器对外输出为纳秒太赫兹波脉冲,峰值输出功率超过2 kW,这说明表1所给腔体参数基本能够达到谐振要求,能够使新型THz振荡器能够对外输出太赫兹。从图6中可以看出,0~4 ns期间,THz振荡器输出功率变化较大,结合图5可以看出,其原因应该是输出中含有杂频成分造成的,导致杂频的原因有多种,被输出腔间隙电场反射的电子束扰乱了前面的调制过程,就会导致其它频率成分的振荡;输出腔加载电子束后谐振频率偏离冷腔谐振频率,使得输出腔不工作在谐振频率点上,也会导致其它频率成分的振荡,导致输出不稳定。随着输出腔间隙电场和电子束的互作用,4 ns后,被输出腔间隙电场反射的电子束对前面的调制影响趋

于稳定,输出功率变化也就趋于稳定,但是输出腔加载电子束后谐振频率偏离冷腔谐振频率不会随时间改变,所以杂频成分仍然存在,由于输出腔半径、间隙长度都会影响输出腔的谐振频率,要减小杂频成分的出现,可以通过优化输出腔半径、间隙长度实现^[21]。

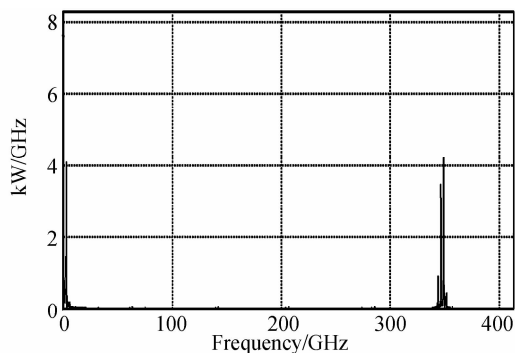


图5 THz振荡器的频谱分布

Fig. 5 Frequency spectra of the THz oscillator

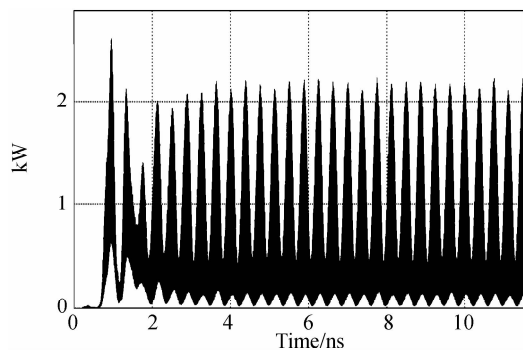


图6 THz振荡器的功率变化

Fig. 6 Output power evolution of the THz oscillator

2 结论

当金属光栅的空间周期 $l=0.6$ mm,电子注能量 $E=100$ keV时,THz振荡器可以输出频率为349.017 GHz和346.324 GHz,功率谱密度接近4 kW/GHz,最大输出峰值功率超过2 kW的太赫兹波;模拟结果表明利用S-P效应调制电子注速度可实现太赫兹振荡器。

参考文献

- [1] LIU Sheng-gang, ZHONG Ren-bin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, **38**(5): 481-486.
刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展 [J]. *电子科技大学学报*, 2009, **38**(5): 481-486.
- [2] SUN Bo, YAN Jian-quan. Generation of terahertz wave based on optical methods [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10): 1349-1359.
孙博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1349-1359.
- [3] MA Ju-cheng, CHEN Yan-ting, XIANG Jun, et al. Progress in generation of terahertz radiation [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4): 56-61.
马成举, 陈延伟, 向军, 等. 太赫兹辐射产生技术进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(4): 56-61.

- [4] HE Zhong-jiao. Fiber Bragg grating based on a polymer terahertz fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0406006.
何忠蛟. 聚合物太赫兹光纤布喇格光栅[J]. 光子学报, 2015, **44**(4): 0406006.
- [5] CHENG Wei, LI Jiu-sheng. A dual-wavelength terahertz wave power splitter based on photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 123002.
程伟, 李九生. 基于光子晶体的双波长太赫兹波功分器研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(1): 123002.
- [6] XU De-gang, YU Hong, ZHANG Hao, *et al.* Theoretical study on sombining model of terahertz beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0319001.
徐德刚, 于红, 张昊, 等. 太赫兹波合束技术的理论研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(3): 0319001.
- [7] MENG Xian-zhu; WANG Ming-hong; REN Zhong-min. Analysis on picosecond pulses of terahertz radiation using Compton scattering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(8): 1125-1128.
孟现柱, 王明红, 任忠民. 利用康普顿散射实现太赫兹皮秒脉冲的分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(8): 1125-1128.
- [8] WANG Ming-hong, XUE Qian-zhong, LIU Pu-kun. Review of THz vacuum electronic devices and development[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, **30**(7): 1766-1771.
王明红, 薛谦忠, 刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及发展评述[J]. 电子与信息学报, 2008, **30**(7): 1766-1771.
- [9] SMITH E J , PURCELL E M. Visible light from localized surface charges moving across a grating[J]. *Physics Review*, 1953, **92**(4): 1069.
- [10] ZHAO Jun-ping; TIAN Jin-shou; BAI Yong-lin, *et al.* Parameters measurement of 100 keV gyral electron beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(03): 487-490.
赵军平, 田进寿, 白永林, 等. 100keV 回旋电子束参数测量[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(03): 487-490.
- [11] 丁耀根. 大功率速调管的理论与设计模拟[M]. 北京: 国防科技工业出版社. 2008: 325-346.
- [12] FAN Zhi-kai, LIU Qing-xiang, LIU Xi-san, *et al.* The small signal analysis of the transit-time effect in the three-cavity resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(4): 482-486.
范植开, 刘庆想, 刘锡三, 等. 三腔谐振腔通过时间效应的小信号分析[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(4): 482-486.
- [13] 谢家麟, 赵永翔. 速调管群聚理论[M]. 北京: 科学出版社. 1996: 180-186.
- [14] LIU Zhen-Bang, JIN Xiao, HUANG Hua, *et al.* Preliminary study of the characteristic of multi-beam in intense multi-beam relativistic klystron[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012, **61**(24): 248401.
刘振帮, 金晓, 黄华, 等. 强流多注相对论速调管中电子束特性的初步研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(24): 248401.
- [15] MENG Xian-zhu. Smith - Purcell free electron laser based on a semi-conical resonator [J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 975 - 979.
- [16] MENG Xian-zhu. Smith - Purcell free electron laser based on a multilayer metal-dielectric stack[J]. *Optik*, 2013, **124**(17): 3162.
- [17] MENG Xian-zhu, WANG Ming-hong, REN Zhong-min. Smith - Purcell free electron laser based on the semi-elliptical resonator[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(5): 05072.
- [18] GAO Xi, YANG Zi-qiang, QI Li-mei, *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.
- [19] LIU Wen-Xin, TANG Chuan-Xiang, HUANG Wen-Hui. Characteristics of terahertz coherent transition radiation generated from picosecond ultrashort electron bunch [J]. *Chinese Physics B*, 2010, **19**(6): 062902.
- [20] BEI Hua, DAI Dong-dong, DAI Zhi-min. Simulation of Smith-Purcell radiation from compact terahertz source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 2067-2072.
- [21] ZHANG Ze-hai, SHU Ting, ZHANG Jun, *et al.* Three dimensional particle-in-cell simulation of L-band relativistic klystron amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(3): 613-617.
张泽海, 舒挺, 张军, 等. L波段相对论速调管的3维粒子模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(3): 613-617.