

基于微型谐振腔的史密斯-帕赛尔自由电子激光^①

孟现柱 王明红 孙桂芳 吴立恒

(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 研究了一种由电子枪、微谐振腔、金属光栅和集电极组成的新型史密斯-帕赛尔自由电子激光. 利用 PIC 三维模拟, 讨论了该装置的特点. 发现在合理的电子能量和光栅参数下, 该装置可以产生 THz 频率范围内的相干高功率脉冲 SPR. 研究表明, 当电子束能量 $E = 50$ keV, 电子束电流 $I = 10$ A 时, 光栅周期 $L = 0.3$ mm 时, 可以得到功率在 4 000 W 左右、脉冲为 0.25 ns 的 514.643 GHz 的太赫兹辐射.

关键词 太赫兹; 史密斯-帕赛尔辐射; PIC 模拟; 谐振腔; 光栅

中图分类号 O463+.1

文献标识码 A

当一束电子束紧贴金属光栅的表面运动时, 电子束会向各个方向发射电磁辐射. 这种辐射被称为史密斯-帕赛尔辐射 (SPR)^[1,2]. 通常, 自发的 SPR 非常弱而且无法使用, 其检测也非常困难. 为了产生相干的和放大的 SPR, 一般采用开放腔或封闭腔等反馈结构将 SPR 反射回电子束, 使电子束与 SPR 发生注-波相互作用, 该装置被称为史密斯-帕赛尔自由电子激光器 (SP FEL)^[1-3]. 在 THz 类真空电子器件中, SP FEL 是开发紧凑可调 THz 源^[4-11]的一种极有前途的选择. 与其他 THz 源相比, SP FEL 是开发更紧凑、更简单、更低成本 THz 源的理想选择.

本文提出了一种利用 SP FEL 产生高功率脉冲 THz 辐射的方法. 该器件由电子枪、微谐振腔、金属光栅和收集极组成. 与基于其他谐振腔的 SP FEL 相比, 基于微谐振腔的 SP FEL 能够提供高功率脉冲 THz 辐射. 采用三维粒子单元 (PIC) 模拟方法研究了该装置的特性.

1 基于微谐振腔的 SP FEL 的理论分析

根据微波理论, 在真空电子器件中, 注-波转换效率是影响辐射源的输出功率的重要因素, 而注-波转换效率与注-波相互作用结构的尺寸有关. 工作频率越高, 工作波长越短, 注-波相互作用结构的尺寸必须越小. 当注-波相互作用结构的几何尺寸与工作波长相当

时, 注-波相互作用才较强, 功率输出才能获得较高. 即注-波相互作用的几何尺寸和工作频率存在共渡性, 例如, 要获得高功率的 0.1-10 THz 的 THz 辐射, 其注-波相互作用结构应该在 3 mm-30 μ m 数量级. 因此, 要获得 500 GHz 以上的高功率 THz 辐射, 作为 SP FEL 的主要组成部分的谐振腔必须是一个小尺寸的微谐振腔. 为此, 本课题组提出了一种基于微谐振腔的新型 SP FEL. 基于微谐振腔的新型 SP FEL 结构示意图如图 1 所示. 该器件由电子枪、微谐振腔、金属光栅和收集极组成. 根据上述理论, 其谐振腔宽度和高度的最优尺寸应该为 0.6 mm 或数倍 0.6 mm 左右, 这种尺寸目前在制作工艺上是可以实现的, 如果要利用真

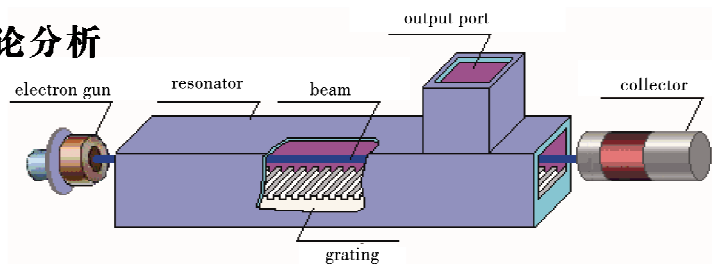


图 1 基于微谐振腔的 SP FEL 示意图

① 收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11275089) 资助

通讯作者: 孟现柱, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 物理电子学, E-mail: mengxz@lccu.edu.cn.

空电子器件获得更高频率的 THz 波(例如 10 THz),器件的谐振腔宽度和高度必须更小,目前在制作工艺上较难实现。

在基于微谐振腔的 SP FEL 技术方案中,在微谐振腔底部的中心设置了一个矩形形状的金属光栅。假设金属光栅表面和微谐振腔表面是由理想导体组成的。金属光栅的凹槽平行于 x 轴方向,电子束沿 z 轴传播。电子束是由位于光栅左边的一个小阴极(电子枪)产生的。当电子束紧贴金属光栅的表面运动时,在光栅表面上会感应出大量电荷,在光栅附近就存在周期性电场,电子束在运动中就会受到周期性电场的作用,于是发出 SPR 和倏逝波。微谐振腔的表面将 SPR 反射回电子束,使电子束与 SPR 进行相互作用,从而对电子束的速度进行调制。在电子束的继续运动过程中,电子束的速度调制会转变为电子束的密度调制,使电子束发生群聚。电子束群聚的条件是

$$v = c \cos\phi, \quad (1)$$

其中 v 是电子的速度, c 是 SPR 的相速度, ϕ 是 SPR 相对于电子束方向的发射角。但在电子束注入初期, SPR 的强度不足以引起电子束群聚,不能起振,这时 SPR 是自发的和不连贯的。当注入时间超过启振时间时,由于 SPR 的强度增强,电子束开始群聚。这时,该装置在微谐振腔中以某一谐振频率建立稳态振荡,当注波互作用达到自激条件时,在微谐振腔中的 SPR 的净增益就开始逐渐增大^[15-17],这时 SPR 是受激的和相干的。

表 1 基于微型谐振腔的 SP FEL 的模拟参数

2 模拟参数

三维 PIC 模拟可以模拟空间电荷与电磁场相互作用的复杂过程^[15-19]。通过三维 PIC

参量名称	参量大小	参量名称	参量大小
光栅周期长度/mm	0.3	光栅槽深/mm	0.15
光栅槽宽/mm	0.2	光栅数	32
谐振器宽度/mm	1.5	谐振器长度/mm	36.9
谐振器高度/mm	0.75	电子束尺寸/mm	0.5
电子束电压/kV	50	电子束电流/A	10

模拟,可以得到 SP FEL 的辐射能量、场分布、电子束相互作用过程等特性。为了与 SPR 进行最优的相互作用,获得强的 THz 辐射,光栅参数(包括槽宽、深度)、谐振腔参数(包括宽度、高度)和电子束的参数必须是最优的。模拟主要参数如表 1 所示。

在 SPR 中,SPR 的波长 λ 取决于 SPR 公式

$$\lambda = \frac{L}{n} \left(\frac{1}{\beta} - \cos\theta \right), \quad (2)$$

其中 $\beta = v/c$ 为电子速度与光速之比。 L 是光栅周期的长度,整数 n 是空间谐波数, θ 是相对于电子束观察方向的发射角。根据公式(2),通过调整光栅周期的长度,调整电子束的电压,调整发射角,可以产生一个 THz 频率范围的 SPR。为了获得 500 GHz 左右的高功率太赫兹,根据 SPR 公式,选取光栅的周期 $L=0.3$ mm,电子束的能量 $E=50$ keV。当光栅的周期 $L=0.3$ mm,电子束的能量 $E=50$ keV,可以产生波长区域在 1.026 9 mm(相应的频率 $\nu \approx 291.94$ GHz)和 0.426 9 mm(相应的频率 $\nu \approx 702.18$ GHz)之间的 SPR。根据共渡性理论和上述频率范围选取微型谐振腔的宽度和高度分别是 1.5 mm 和 0.75 mm;电子束的电流越大,模拟时间越短,为了加快模拟速度,故将电子束的电流选为 10 A。

根据表 1 中的参数,可以得到色散曲线。在频散曲线中,电子束线与色散曲线的交点可以给出工作频率。从电子束线与色散曲线的交点来看,工作频率约为 514 GHz。

3 模拟结果及特性分析

图 2 给出了光栅上方的电子束的快照,以及它在 $T-z$ 相空间中的分布,其中 T 表示电子束的动能。图 2(a)显示了 770.333 ps 发生群聚时的纵向电子密度,图 2(b)显示了同时刻处于群聚状态的电子动能。在图 2(a)和图 2(b)中可以看到强烈的群聚现象。从图 2(a)中可以看出,电子与光栅表面的距离越小,纵向电子密度分布越不均匀,说明电子束与光栅距离越小,群聚现象越明显。通过计算束团间的距离,我们可以估计波长约为 0.59 mm,大约相当于两倍光栅周期。这是由于光栅上感应有大量电荷,光栅附近存在周期性电场,使电子束受到周期性电场的作用形成的。在图 2(b)中,我们可以注意到群聚是明显的。通过计算电子动能的振荡,我们也可以估计波长约 0.59 mm。显然,从图 2(b)可以看出,大部分电子处于能量损耗

状态,通过计算,我们还注意到平均能量损失是 3.5-4.5 keV,或者是电子束能量的 7%-9%.

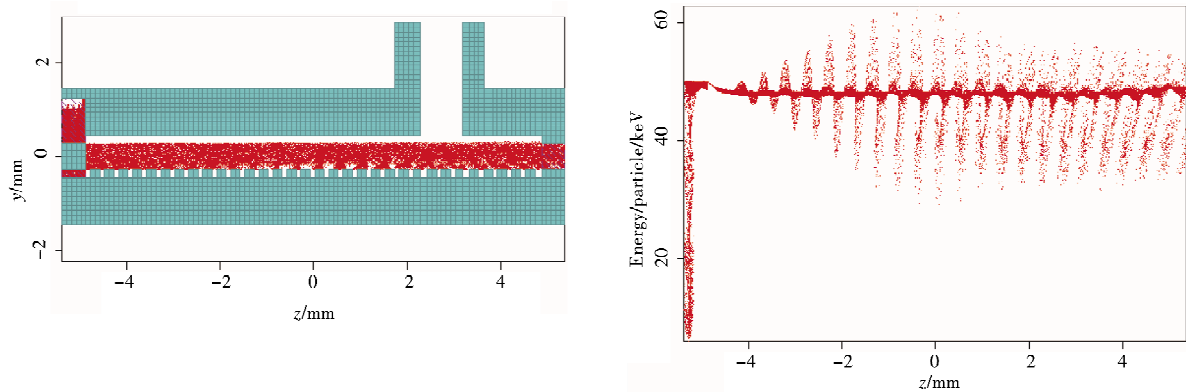


图2 基于微谐振腔的 SP FEL 的相空间分布

(a) 770.333 ps 时 $y-z$ 平面电子密度,明显群聚;(b)电子群聚时的动能

通过三维 PIC 模拟,可以得到场的分布.通过对电磁场分量的等值线图的研究,可以看出,电场分布在 $x-z$ 平面和 $y-x$ 平面呈对称分布.需要指出的是,这种场分布有利于提高注-波相互作用的效率.从场分布的大小可以得出结论,当电子束穿过光栅时,可以在微谐振器的某一谐振频率处建立稳态高频场.通过研究电磁场分量的等值线图,发射角大约是 $\theta \approx 0.999$.根据公式(2),当光栅周期 $L=0.3$ mm,电子束能量 $E=50$ keV,发射角 $\theta \approx 0.999$ 时计算可得相应的频率大约是 530.97 GHz.

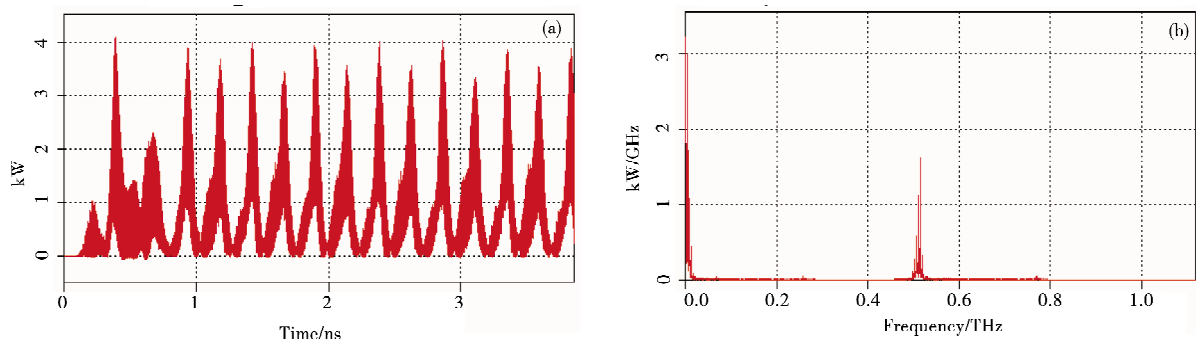


图3 基于微谐振腔的 SP FEL 的输出端口的场功率曲线(a)场功率 S.DA,(b)相应的 FFT

基于微谐振器的 SP FEL 输出端口的场功率 S.DA 的曲线如图 3(a)所示.当注入时间超过启振时间时,SPR 和倏逝波的净增益可以在微谐振器中累积,辐射场开始迅速增大.如图 3(a)所示,启振时间约为 0.2 ns,达到饱和功率时间约为 0.4 ns,功率幅值约为 4 000 W,脉冲周期约为 0.25 ns.模拟结果表明,相干 SPR 的激发强度远大于非相干辐射.图 3(b)给出了相应的 FFT 谱,频率峰值为 257.292 GHz, 514.643 GHz, 761.78 GHz.显然存在两种不同类型的辐射.一个是起源于倏逝波的衍射,并且衍射在光栅的末端,其频率为倏逝波频率并且等于 257.292 GHz.另一个是被电子束微调制增强的相干的 SPR,在某些特殊方向对应倏逝波的二次谐波^[21].通过快速傅里叶分析振幅,占主导地位的是二次谐波辐射(514.643 GHz, 1 700 W/GHz),根据公式(2)它的发射角理论值 $\theta \approx 1.1$.当然,辐射角模拟值 $\theta \approx 0.999$ 和理论值 $\theta \approx 1.1$ 有轻微差异.如果我们考虑平均能量损失(4 keV),根据公式(2),当光栅周期 $L=0.3$ mm,电子束能量 $E=50$ keV,发射角 $\theta=0.999$ 时计算可得实际的 SPR 波长 $\lambda \approx 0.5916$ mm 的发射角 $\theta \approx 0.999$ (相应的频率 $\nu \approx 506.788$ GHz),与占主导地位的辐射的频率非常一致.从三维 PIC 模拟的等高线图中,也很容易理解占主导地位的二次谐波辐射的发射角 $\theta \approx 0.999$.

4 结论

通过理论分析和 PIC 模拟方法研究了一种由电子枪、微谐振腔、金属光栅和集电极组成的新型史密斯-帕赛尔自由电子激光装置的特点.在此基础上,通过合理的电子能量和光栅参数下,可以产生 THz 频率范围内的相干高功率脉冲 SPR.研究结果表明,当电子束能量 $E=50$ keV,电子束电流 $I=10$ A 时,光

栅周期 $L = 0.3$ mm 时,可以得到功率在 4 000 W 左右、脉冲为 0.25 ns 的 514.643 GHz 的太赫兹辐射。

参 考 文 献

- [1] Meng X Z, Wang M H, Zhang L M, et al. Characteristic analysis of a Smith-Purcell terahertz source[J]. *Photon Res*, 2016, 4(5):162-167.
- [2] Wachtel J M. Free-electron lasers using the Smith-Purcell effect[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50:49-56.
- [3] Liu W, Lu Y, Wang L, et al. A multimode terahertz-Orotron with the special Smith-Purcell radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(18):97-105.
- [4] Meng X Z, Wang M H, Zhang L M, et al. The principle and characteristics analysis of a novel terahertz oscillator based on Smith-Purcell effect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4):13-17.
- [5] Zhou Y, Zhang Y, Liu S. Electron-Beam-Driven enhanced terahertz coherent Smith-Purcell radiation within a cylindrical Quasi-Optical cavity[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2016, 6:262-267.
- [6] 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):93301.
- [7] Zhang P, Ang L K, 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):35-40.
- [8] Shi Z J, Tang X P, Lan F. Simulation of terahertz Smith-Purcell radiation from one-dimensional dielectric photonic crystal[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2014, 33:183-187.
- [9] Zhang Y X, Dong L. Enhanced coherent terahertz Smith-Purcell superradiation excited by two electron-beams[J]. *Optics Express*, 2012, 20:22627-22635.
- [10] Liu Wen-xin, Tang Chuan-xiang, Huang Wen-hui. Characteristics of terahertz coherent transition radiation generated from picosecond ultrashort electron bunch[J]. *Chin Phys B*, 2011, 19 (6): 062902.
- [11] Chen Jiayu, Zheng Liang, Zhang Yongchuan, et al. A novel Smith-Purcell free electron laser[J]. *Int J Electron*, 2011, 88:467.
- [12] Smith S J, Purcell E M. Visible light from localized surface charges moving across a grating[J]. *Physical Review*, 1953, 92:1069-1069.
- [13] Li D, Imasaki K, Yang Z. Three-dimensional simulation of super-radiant Smith-Purcell radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88:201501-201502.
- [14] Bei H, Dai D D, Dai Z M. Simulation of Smith-Purcell radiation from compact terahertz source[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2008, 20:2067-2072.
- [15] 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, 18:2452-2458.
- [16] Meng X Z, Wang M H, Ren Z M. Smith-Purcell free electron laser based on the semi-elliptical resonator[J]. *Chin Phys B*, 2011, 20, 215-221.
- [17] Meng X Z. Smith-Purcell free electron laser based on a semi-conical resonator[J]. *Optics Communications*, 2012, 285:975-979.
- [18] 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, 124:3162-3164.
- [19] Meng X Z, Wang M H, Ren Z M. Smith-Purcell radiation in a grating-resonator composite structure[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2016, 35:21-14.

Smith-Purcell Free Electron Laser based on Micro-Resonator

MENG Xian-zhu WANG Ming-hong SUN Gui-fang WU Li-heng

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

Abstract A novel Smith-Purcell free electron laser composed of an electron gun, a micro-resonator, a metallic grating and a collector is investigated. The characteristics of this device are discussed with the help of three-dimensional particle-in-cell simulation. In this device, coherent and high power Smith-Purcell radiation at Terahertz frequency range can be produced for the reasonable parameters of charge energy and grating. Our results indicate that 0.25 ns pulsed Terahertz radiation at 514.643 GHz with a power around 4 000 W can be obtained for a grating of period $l = 0.3$ mm operating at the beam energy $E = 50$ keV, beam current $I = 10$ A.

Key words Terahertz; Smith-Purcell radiation; particle-in-cell simulation; resonator; grating