

文章编号: 0258-7025(2004)11-1289-04

新型史密斯-帕塞尔效应可调辐射源研究

陈嘉钰, 王明红, 杨梓强, 兰峰, 梁正

(电子科技大学高能电子学研究所, 四川 成都 610054)

摘要 提出采用中等能量的相对论环状电子注激励轴对称三曲面反射镜、绕射光栅系统,产生毫米波、远红外波段辐射的新型准光学可调辐射源实验方案,这是一种基于史密斯-帕塞尔效应的自由电子激光。由于引入新型准光学谐振腔系统,可以改变能量输出方向的角度,从原理上讲,可制造一系列模型,产生可调频率的短毫米波、远红外波段相干辐射。采用环状电子注比带状电子注稳定性高,便于成型和聚焦;采用新腔体后增长了电子注与高频场的相互作用范围;新型准光腔具有较小的绕射损耗。新方案的这些特点,进一步提高器件的输出功率,改善了高频特性。介绍这种新辐射源在3 mm波段的粒子模拟计算初步结果,其输出功率达数百千瓦以上;同时给出准光学谐振腔高频系统的模拟计算和冷测实验的典型曲线。

关键词 光电子学;相对论电子注;准光学谐振腔;史密斯-帕塞尔效应;自由电子激光

中图分类号 TN 248.6 **文献标识码** A

Novel Smith-Purcell Tunable Radiation Source

CHEN Jia-yu, WANG Ming-hong, YANG Zi-qiang, LAN Feng, LIANG Zheng

(*Institute of High Energy Electronics, University of Electronic Science
and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*)

Abstract A novel Smith-Purcell tunable radiation source with relativistic electron beam of middle energy and a quasi-optical resonator composed of diffraction grating and three-mirror reflector is reported. The well-known Smith-Purcell free electronic laser (FEL) experiment takes on a good future for developing submillimeter and far-infrared wave source. The novel scheme has considerable advantages as follows: ring beam enable more high beam current to transmit steadily and to be taken shape easily; axial-symmetrical quasi-optical cavity has a small loss, so the output power and efficiency can be improved evidently. The developments of spectrum source based on Smith-Purcell effect have attracted one's much attention. Theoretical analyses and numerical simulation results indicate that coherent radiation with peak power of a few hundred of kW can be achieved from this experimental model. The typical curve of quasi-optical cavity simulation and cool testing experiment are also given.

Key words optoelectronics; relativistic electron beam; quasi-optical cavity; Smith-Purcell effect; free electronic laser

1 引言

电子注紧贴着周期结构上方飞过,将激励起毫米波、远红外波段的辐射,然而这种称为史密斯-帕塞尔效应(S-P)^[1]的辐射通常是强度很弱的非相干辐射,不易检测和应用。为了制造毫米波段,可调频率的中、大功率相干波源,基于史密斯-帕塞尔效应的研究工作一直没有间断过,被称为史密斯-帕塞

尔效应自由电子激光(S-P FEL)^[2~6]的实验为开发短毫米波远红外波段波谱呈现出美好前景,已成为国内外波谱开发研究的热点之一。

本文提出一种新型的实验方案;采用中等能量的相对论环状电子注激励轴对称三反射镜、绕射光栅系统,产生毫米波、远红外波段的辐射。由于引入新型三反射镜准光学谐振腔系统,可以改变能量输出方向的角度,同时提高了工作电压,使得绕射光栅

收稿日期:2003-06-30;收到修改稿日期:2003-09-08

作者简介:陈嘉钰(1940—),男,昆明人,电子科技大学高能电子学研究所教授,主要从事真空电子学、毫米波、准光学技术和自由电子激光器的教学和研究工作。E-mail:cjy@uestc.edu.cn

的周期尺寸比同波段的绕射辐射振荡器的光栅周期尺寸增大一个数量级以上。

2 工作原理和模拟计算

图 1 给出新型实验系统的原理图, M_1, M_2 是曲率半径为 R 的两个空心曲面型反射镜, M_3 是一个半径为 r , 其表面刻有光栅的圆柱反射镜, M_1, M_2 和 M_3 共同构成新型轴对称三反射镜准光学谐振腔系统。利用一束中等能量的相对论环状电子注激励轴对称三反射镜、绕射光栅构成的高频系统; 当改变电子注的加速电压, 改变电子运动速度; 调整两个曲面反射镜的距离, 改变准光腔场的纵向模式; 改变信号检测方向与电子注运动方向的夹角, 可以激励起毫米波、远红外波段的可调频率的辐射。下面给出在 3 mm 波段的典型模拟计算结果。采用的计算参量如下: 电子注电压 400~500 kV, 电压脉冲宽度 70

ns; 电子注电流 1.0 kA; 同步脉冲磁场强度 1.2 T, 磁场脉冲持续时间 10 ms; 环状电子注由冷阴极产生, 阴极尺寸 $\phi 16 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$; 带有光栅的圆柱反射镜直径 $\phi_0 = 15 \text{ mm}$; 信号检测的方向夹角为 $\theta = 35^\circ$; 图 2 给出粒子模拟计算的不同时刻电子群聚典型曲线。

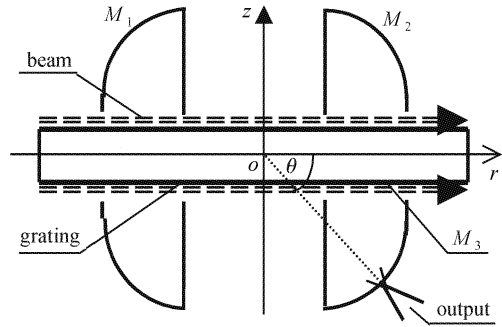


图 1 新型 S-P 可调辐射源示意图
Fig. 1 Novel S-P tunable radiation source

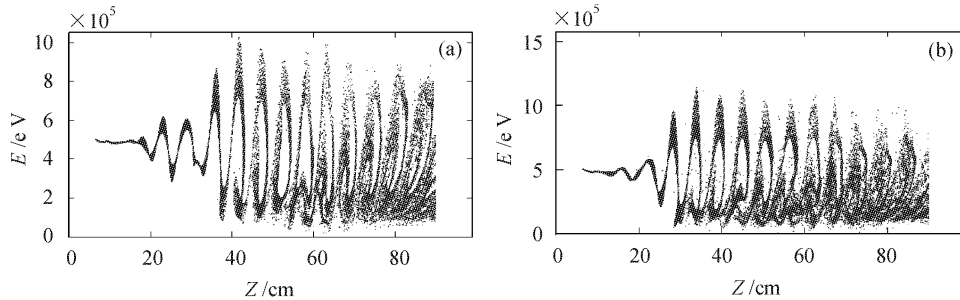


图 2 粒子模拟计算的电子群聚典型曲线
Fig. 2 Simulation electron bunch profile
(a) $t = 10.26 \text{ ns}$; (b) $t = 16.434 \text{ ns}$

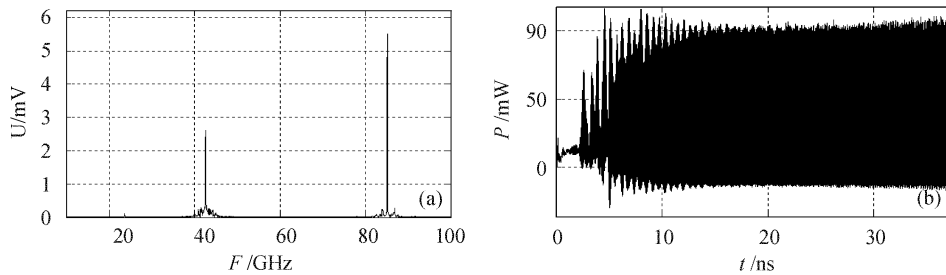


图 3 辐射夹角为 35° 谐振腔中 (a) 电场的频谱分布图和 (b) 功率变化图
Fig. 3 Spectra (a) and output power evolution (b) of open cavity of $\theta = 35^\circ$

图 3(a) 给出了辐射夹角为 35° 时的电场频谱分布, 辐射频率为 85 GHz, 42.4 GHz, 其中主频为 85 GHz。图 3(b) 为辐射场的输出功率随时间的演化曲线, 饱和功率为 86 MW, 效率计算值为 14.2%。通过模拟计算看出, 利用新型系统可以成功地产生 3 mm 波段频率可调的高频信号, 其峰值功率达到

数百千瓦至兆瓦量级。

3 新型三反射镜准光学谐振腔系统

图 4 给出作为反馈元件的三反射镜准光腔系统的示意图。这种系统十分复杂, 无法得到精确解, 从图看出, 整个系统是以镜面 M_3 的轴线为对称轴的,

对于特定的对称分布的场型 TEM_{p0q} 模, 仿照文献 [7] 类似的分析方法处理可以得到近似解。假定轴对称三反射镜系统的场, 是由 zor 平面上的场绕 r 轴回转得到的, 根据波的传输特性, 入射角与反射角相

等, $\theta = \theta_1 = \theta_2$, 合成系统的场就是两组曲面镜开放腔高频场的线性组合, 从而得出柱坐标系下空间任意点高频场的近似表达式

$$\begin{aligned} \psi_{p0q}(r, \varphi, z) = & \psi(r_1, \varphi, z_1) + \psi(r_2, \varphi, z_2) = \\ & C_{p1} \frac{1}{a_1} \left(\sqrt{\frac{2\pi}{l\lambda}} \beta_1 r_1 \right)^l L_p \left(\sqrt{\frac{\pi}{l\lambda}} \frac{\beta_1^2}{\alpha_1^2} r_1^2 \right) e^{-\frac{2\pi\beta_1^2}{l\alpha_1^2} r_1^2} \cos(l\varphi) e^{-i \left[kl(1+z_1) + \frac{\pi}{l\lambda} \left(\frac{1}{1-z_1} + \frac{\eta_1}{\alpha_1^2} \right) (\cos\varphi^2 + \sin\varphi^2) - (2p+l+1) \right]} \left(\frac{\pi}{2} + \Phi_1 \right) + \\ & C_{p2} \frac{1}{a_2} \left(\sqrt{\frac{2\pi}{l\lambda}} \beta_2 r_2 \right)^l L_p \left(\sqrt{\frac{\pi}{l\lambda}} \frac{\beta_2^2}{\alpha_2^2} r_2^2 \right) e^{-\frac{2\pi\beta_2^2}{l\alpha_2^2} r_2^2} \cos(l\varphi) e^{-i \left[kl(1+z_2) + \frac{\pi}{l\lambda} \left(\frac{1}{1-z_2} + \frac{\eta_2}{\alpha_2^2} \right) (\cos\varphi^2 + \sin\varphi^2) - (2p+l+1) \right]} \left(\frac{\pi}{2} + \Phi_2 \right) \end{aligned}$$

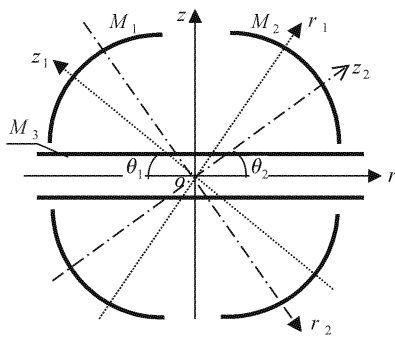


图 4 三反射镜准光学谐振腔示意图
Fig. 4 Three-mirrors quasi-optical resonator

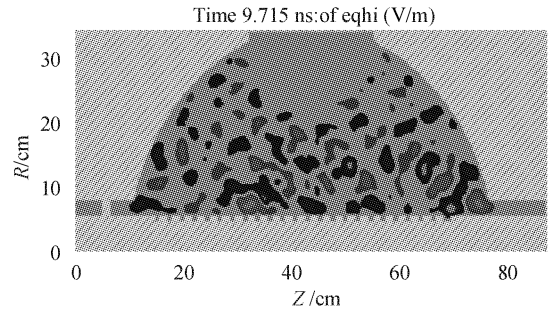


图 6 准光腔中能量分布图(模拟计算)
Fig. 6 Energy profile of the quasi-optical cavity

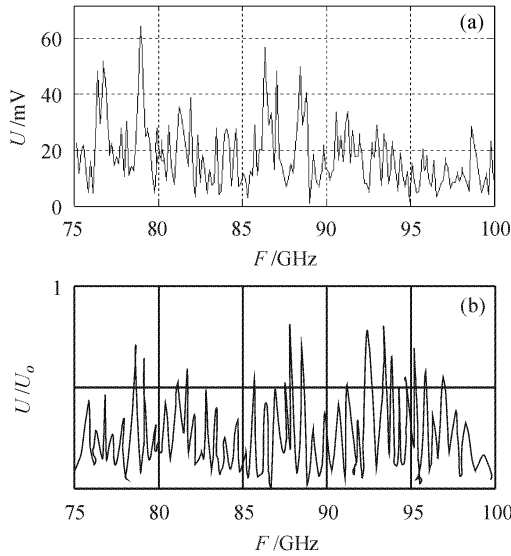


图 5 准光腔的模式分布图((a) 模拟计算;(b) 测试图)
Fig. 5 Model profile of quasi-optical cavity
(a) analog calculation; (b) measurement result

注意到, z_1 或 r_1 及 z_2 或 r_2 坐标系正向、反向转动 θ 角就与 zor 坐标系重合, 计算时根据坐标系转动的法则将 r_1, r_2, z_1, z_2 坐标换算成 r, z 坐标。

图 5(a) 为 $F = 85 \sim 100$ GHz 频带范围内准光腔模式分布图, 这种分立的波形与实际测量得到的

结果相类似。实际测量结果由图 5(b) 给出。图 6 为某一状态下准光腔中能量分布情况, 可以看出, 高频场呈高斯分布, 并被约束于准光腔内。在 $85 \sim 105$ GHz 频率范围内, 对带有光栅的三反射镜准光学谐振腔实验模型进行了测量, 得到有载品质因数为 $Q = 2500 \sim 3500$ 。

图 7 为准光腔中高频场分布的单模计算结果, (a) 为基模 TEM_{00q} 高频场分布, (b) 为 TEM_{01q} 模的曲线, 其中虚线表示单组反射镜计算值, 实线为合成计算的结果。右边是相应模式的三维计算曲线。实验时利用微扰方法判定模式后, 可以测出这些典型的曲线, 实验方法参见文献 [7]。

4 结 论

新型准光学可调辐射源实验方案, 通过在 3 mm 波段进行粒子模拟, 其输出功率可达数百千瓦量级以上, 和电子科技大学已经成功完成的 3 mm 波段相关实验方案 [6] 相比较有如下优点: 由于采用环状电子注比带状电子注稳定性高, 便于成型和聚焦; 采用新腔体后增长了电子注与高频场的互作用范围, 加多了参与高频互作用的电子数量, 从而提高了效率; 新型轴对称三反射镜准光腔系统, 具有较小

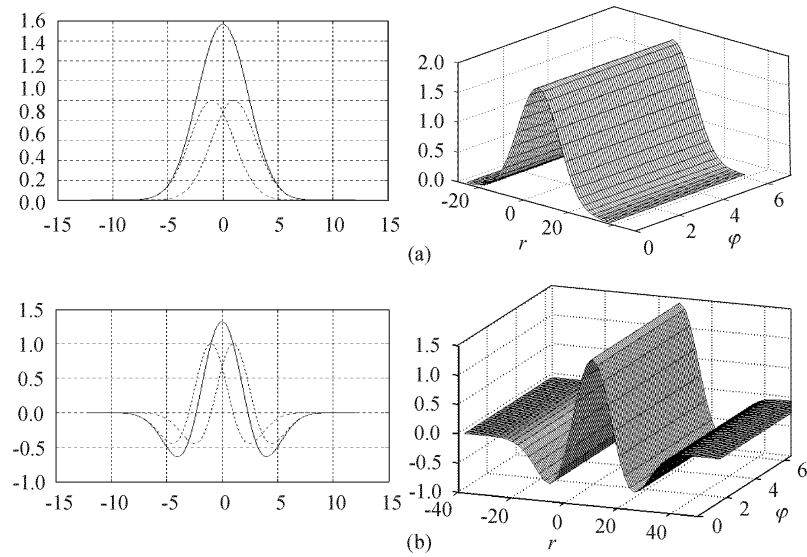


图 7 准光腔中 TEM 单模计算结果

Fig.7 TEM model profile of quasi-optical cavity

(a) TEM_{00q} ; (b) TEM_{01q}

的绕射损耗。准光腔系统的数值计算和冷测,也得到比较接近的结果。得出的初步结果表明这些模拟和分析方法可以用于设计新型的史密斯-帕塞尔自由电子激光,制造结构简单、加工要求不太苛刻、价格低廉的系统产生短毫米波,远红外波段的可调辐射信号。可以预计,在完成这项新方案的热测实验之后,将会检测得到比文献[6]给出的结果更高的效率和更大的输出功率。

参 考 文 献

- 1 S. J. Smith, E. M. Purcell. Visible light from localized surface charges moving across a grating [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1953, **92**:1069~107
- 2 T. C. Masher. FEL Device [M]. Beijing: Science Press, 1993
T. C. 马歇尔. 自由电子激光器[M]. 北京:科学出版社, 1993
- 3 B. P. Shtetobalov. Diffraction Radiation Oscillator [M]. Jiev: Science Publishing House, 1991
- 4 K. J. Woods, J. E. Walsh, R. E. Stoner *et al.*. Forward directed Smith-Purcell radiation from relativistic electrons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(19):3808~3811
- 5 I. Boscolo, M. Valentini. Physics and consideration on millimeter wave FEL with low energy electron beam [C]. 25th IR/MMW 2000, Beijing, 2000. 9; Tu-C1
- 6 Chen Jiayu, Liang Zheng. A novel Smith Purcell free electron laser [J]. *Int. J. Electronics*, 2001, **88**(4):467~471
- 7 Chen Jiayu, Liang Zheng, Zhang Yongchuan *et al.*. Investigation of quasi-optical open resonator with three mirrors on S-P FEL [J]. *University of Electronic Science and Technology of China*, 1999, **28**(2):156~159
陈嘉钰,梁正,张永川等. S-P FEL 用三反射镜准光腔系统的研究[J]. 电子科技大学学报, 1999, **28**(2):156~159