

文章编号 : 0258-7025(2001)10-0893-03

新型史密斯-帕塞尔自由电子激光实验^{*}

陈嘉钰 梁 正 张永川 杨梓强

(电子科技大学高能电子学研究所 成都 610054)

摘要 介绍一种新型的 Smith-Purcell FEL 实验, 实验中利用中等能量级的相对论电子束激励, 由衍射光栅和三反射镜组成的新型准光学系统, 可以产生可调短毫米波、远红外波段的辐射。主要实验参数为: 电子注能量为 400 ~ 500 keV, 电压脉冲宽度 70 ns, 同步脉冲磁场强度 1.2 T, 成功地检测到 3 mm 波段的毫米波信号, 其峰值功率达到数十千瓦。

关键词 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

Experiment of a Novel Smith-Purcell Free Electron Laser

CHEN Jia-yu LIANG Zheng ZHANG Yong-chuan Yang Zi-qiang

(Inst. of High Energy Electronics, UESTC, Chengdu 610054)

Abstract This paper describes a novel Smith-Purcell FEL experiment with a relativistic electron beam of middle energy and a quasi-optical resonator composed of diffraction grating and three-mirrors reflector. Coherent radiation with peak power of a few tens of kW at 3 mm waveband is successfully detected from the experimental facility characterized by beam energy of 400 ~ 500 keV, pulse length of 70 ns, pulse beam current of 0.2 kA, and pulse magnetic field of up to 1.2 T.

Key words relativistic electron beam, quasi-optical resonator, Smith-Purcell effect, FEL

当电子注紧贴着周期结构上方飞过, 将激励毫米波远红外波段的辐射, 这就是有名的史密斯-帕塞尔效应^[1], 然而这种非相干的辐射强度很弱, 不易检测和应用。基于 Smith-Purcell 效应, 利用开放式谐振腔或封闭式谐振腔作为反馈元件, 连同衍射光栅组成高频相互作用系统, 引入电子注构成各种实验结构, 成功地在毫米波亚毫米波段进行了实验, 由此研制的器件又被称为史密斯-帕塞尔效应慢波自由电子激光(S-P FEL)^[2-4]。Smith-Purcell 效应的实验使开发短毫米波远红外波段波谱, 制造可调频率的波源呈现出美好前景, 引起广泛的兴趣, 这一方面的研究已成为国内外波谱开发研究的热点之一。

被称为衍射辐射振荡器(Orotron)的器件^[2,3], 它可以看作是 S-P FEL 在波矢与电子注运动方向的夹角为 90°的一种特例。这种器件在数千伏电子束电压下

工作, 获得毫米波中小功率的辐射。如果研究工作向更短波长以及远红外波段过渡, 光栅的加工问题已无法解决。为此我们提出一种新型的实验装置, 采用中等能量的相对论电子束激励面对称三反射镜及光栅系统, 产生毫米波、远红外波段的辐射。从原理上讲, 可以在不太苛刻的加工条件下, 制造一系列的模型, 产生可调频率的短毫米波段以及远红外波段相干辐射。

1 工作原理

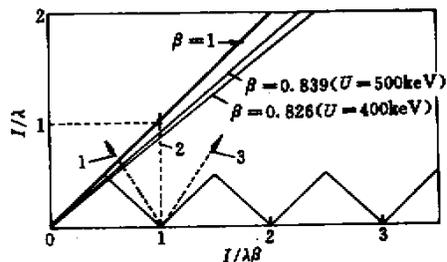


图 1 S-P 效应相互作用图

Fig. 1 Graph of interaction of S-P effect

^{*} 国家自然科学基金(批准号 69671020)资助项目。

收稿日期 2000-07-24; 收到修改稿日期 2000-10-16

图 1 为新型 S-P FEL 工作原理图,一束相对论电子束在衍射光栅上方运动时,当其运动速度与某一空间谐波的相速同步,波和电子束彼此产生相互作用,从而激励起高频振荡,振荡的频率取决于电子运动速度、光栅的周期及尺寸、同步波的空间谐波次数。高频振荡反馈或输出方向与电子运动方向的夹角,各种参量满足史密斯-帕塞尔辐射公式

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

根据辐射公式,我们可以给出 S-P 效应相互作用图。由图 1 可以看出,纵坐标和 $\beta = 1$ 粗直线以上的区域,以及三角波折线和横坐标围成的三角形区域为不工作区域。 $U = 400 \text{ keV}$ 和 $U = 500 \text{ keV}$ 为两条不同电子速度的直线,带箭头虚线 1 为大于 90° 辐射方向的工作方式,带箭头虚线 3 为小于 90° 辐射方向的另一种工作方式

$$\psi(x, y, z) = \psi(x, y_1, z_1) + \psi(x, y_2, z_2) =$$

$$C_{mn} \frac{1}{\alpha_1} H_m \left(\sqrt{\frac{\pi}{l\lambda}} \frac{\beta_1}{\alpha_1} x \right) H_n \left(\sqrt{\frac{\pi}{l\lambda}} \frac{\beta_1}{\alpha_1} y_1 \right) e^{-\frac{2\pi\beta_1^2}{l\alpha_1}(x^2+y_1^2)} e^{-i \left[k(1+Z_1) + \frac{\pi}{l\lambda} \left(\frac{1}{1-Z_1} + \frac{\eta_1}{\alpha_1} \right) (x+y_1^2) - (m+n+1) \right] \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)} +$$

$$C_{mn} \frac{1}{\alpha_2} H_m \left(\sqrt{\frac{\pi}{l\lambda}} \frac{\beta_2}{\alpha_2} x \right) H_n \left(\sqrt{\frac{\pi}{l\lambda}} \frac{\beta_2}{\alpha_2} y_2 \right) e^{-\frac{2\pi\beta_2^2}{l\alpha_2}(x^2+y_2^2)} e^{-i \left[k(1+Z_2) + \frac{\pi}{l\lambda} \left(\frac{1}{1-Z_2} + \frac{\eta_2}{\alpha_2} \right) (x+y_2^2) - (m+n+1) \right] \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)}$$

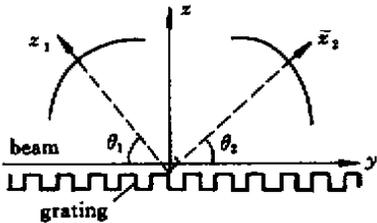


图 2 三反射镜准光腔系统

Fig.2 Three-mirrors quasi-optical resonator

注意到, x_1oy_1 及 x_2oy_2 坐标系正向、反向转动 θ 角度就与 xoy 坐标系重合,计算时根据坐标系转动的法则将 y_1, y_2, z_1, z_2 坐标换算成 y, z 坐标。

3 实验系统及测试参数

图 3 给出新型 S-P FEL 实验系统图:脉冲线加速器 1 提供脉冲宽度 70 ns,峰值电压为 0.4~0.5 MeV,峰值电流达到千安级的单次脉冲。脉冲磁场 2 提供与电压脉冲同步触发,脉冲持续时间 10 ms,磁场强度为 0~2 T 的脉冲磁场。阴极 3 是场致发射阴极,可产生能量为 0.4~0.65 MeV 电子束。电子束在通过可调尺寸的阳极 4 后,得到所需形状的

式,带箭头虚线 2 为等于 90° 辐射方向的情况,这就是衍射辐射振荡器的工作状态。利用不同参量组合的工作方式,就可以得到不同频率的辐射信号。

2 三反射镜准光学谐振腔系统

本实验使用的高频相互作用系统由面对称三反射镜准光腔及光栅构成^[5],采用这种实验模型工作时,上反射镜轴线与电子束方向的夹角,可以从 0° 到 180° 之间调整。从图 2 看出,因为高频场离开衍射光栅表面呈指数规律减小、电子束的宽度远大于它的厚度、整个系统以衍射光栅表面为对称面,按照平面对称原理,三反射镜系统可以看作两组矩形口径球面镜构成的开放腔的组合。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球面镜开放腔场的线性组合,其表示式为

带状电子束。高频相互作用系统由面对称三反射镜准光腔以及光栅构成^[5]。衍射光栅 5 嵌于柱面下反射镜 6 沿母线的槽中,球面镜 7,8 对称地放置在下反射镜上方,两球面镜轴线与电子束运动方向的夹角可以调整。高频能量由反射镜 7 中部的耦合装置,经标准波导 (BJ900) 从输出窗 9,通过喇叭 10 输出。送入空间的信号由另一喇叭接收,经过滤器 11 和检波器 12,得到的中频检波信号送入记忆示波器 13,进行检测分析记录。利用这种实验模型还可以调整反射镜 7,8 顶部到柱面镜的距离,使得三镜准光腔满足共振条件,构成一个最佳的反馈系统,从而提高相互作用效率。

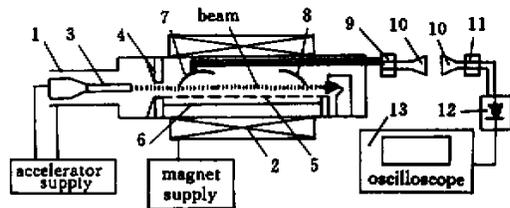


图 3 S-P FEL 实验系统图

Fig.3 Experimental setup of S-P FEL

- 1 : pulse line accelerator ; 2 : magnetic field solenoid ; 3 : field emission cathode ; 4 : anode ; 5 : diffraction grating ; 6 : lower reflector mirror ; 7, 8 : spherical mirrors ; 9 : sapphire window ; 10 : horn antenna ; 11 : filter ; 12 : detector ; 13 : oscilloscope

实验中采用脉冲线加速器,产生单次超短周期的电压脉冲,图4给出加速器典型的电压波形。为了减少磁场的尺寸和造价,实验中采用周期为10ms的脉冲磁场。为了与加速器同步工作,可以调整触发脉冲的开启时间,使加速器工作在脉冲磁场场强分布的平直部分。超短周期脉冲信号检测及参量的定量分析相当困难,限于已有的实验条件功率、频率的检测以及标定还比较粗糙,我们利用检波信号对比校准方法,估计功率值;利用接入不同的高通滤波器、带通滤波器确定工作频率范围。图5给出典型的高频信号检波波形。此外加速器性能不稳定,波形不规范也使测量数值产生大的误差。实验系统参量及初步的测试结果为:电子束电压400~500kV;电压脉宽70ns;磁场脉宽10ms;磁场强度0~2T;光栅周期2.2mm;光栅深度0.7mm;电子束电流0.2kA;上反射镜曲率半径80mm;下反射镜曲率半径110mm;输出频带73.8~112GHz;输出波导BJ900;输出功率数十千瓦。从原理上讲,利用给出的方案选用合适的准光腔、光栅系统和调整各种实验参数,可以进行远红外波段的实验。

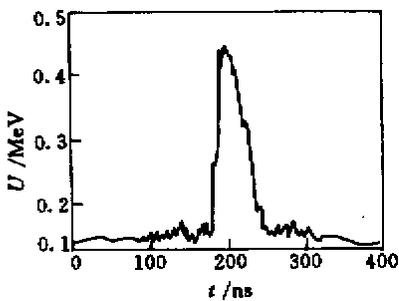


图4 加速器典型的电压波形

Fig.4 Typical accelerator voltage

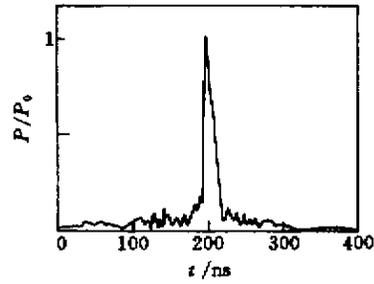


图5 高频信号检波波形

Fig.5 Detected waveform of RF signal

4 结 论

S-P FEL是一种新型的慢波自由电子激光,采用中等能量的相对论电子束激励面对称三反射镜准光腔及光栅系统,获得了突破性实验结果。表明这种构想可用于建造结构简单,加工条件不苛刻,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。

参 考 文 献

- 1 S. J. Smith, E. M. Purcell. Visible light from Localized surface charges moving across a grating. *Phys. Rev.*, 1953, **92**:1069~1073
- 2 B. P. Shectobalov. Diffraction Radiation Oscillator. Jiev: Science Publishing House, 1991 (in Russia)
- 3 J. Chen, Y. Zhang *et al.*. Free electron maser on the Smith-Purcell. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 1998, **407**:172~174
- 4 K. J. Woods, J. E. Walsh. Forward directed Smith-Purcell radiation from relativistic electrons. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(19):3808~3811
- 5 Chen Jiayu, Liang Zheng, *et al.*. Investigation of quasi-optical open resonator with three mirrors on S-P FEL. *J. UEST China* (电子科技大学学报), 1999, **28**(2):156~159 (in Chinese)