

腔式束流位置探测器的设计与实验研究

王洪涛^{1,3} 戴建枰² 陈永忠¹ 赵振堂¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 束流位置探测器对自由电子激光装置的研制和运行具有重要的意义。其中,腔式束流位置探测器(腔式 BPM)又以其高精度、高分辨率的特点而得到广泛的应用。本文对应用于上海深紫外自由电子激光装置上的腔式 BPM 进行了理论分析、模拟计算和 BPM 腔的测量等方面的研究。

关键词 腔式束流位置探测器,自由电子激光,分辨率

中图分类号 O572.21

电子束与光子束的精确重合对基于自放大自发辐射(SASE)基本原理的自由电子激光装置的运行具有极为重要的意义,为此需要对电子束团位置进行精确的测量和控制。在各种类型的束流位置探测器(BPM)中,腔式 BPM 以其极高的分辨率和测量精度等优点而得到了广泛的应用^[1-8]。在腔式 BPM 中,由偏轴束流激发的 TM₁₁₀ 模信号的幅度与束流的偏移量和束团的电荷量呈正比,并且,根据其相对于外部参考信号的相移还可以给出束团的偏移方向。本文研究了由两个圆形谐振腔构成的腔式 BPM。其中一个腔工作在谐振频率为 2856 MHz 的 TM₁₁₀ 模上,用于测量束流 X 与 Y 方向的位置;另一个腔工作在谐振频率为 2856 MHz 的 TM₀₁₀ 模,用于测量束流的流强并提供相位的参考。本文主要讨论 BPM 腔的激励与耦合等微波特性。

1 腔式束流位置探测器的基本原理

图 1 为一个腔式 BPM 原理示意图,其中 R_{res} 为谐振腔半径, l 为腔长。当一束偏轴束流经过谐振腔后,由它激发的 TM₁₁₀ 模信号的幅度与束流的偏移量 y 和束团的电荷量 q 呈正比。为进行位置测量,使用两个拾取天线提取信号,其中的共模信号可由魔 T 装置消除,而其泄漏部分也可用带通滤波器去掉。BPM 信号还可以使用混频器在同步探测器中进行修正。这个信号与从参考腔中出来的相位信号进行混频,并通过相位的调整而使 BPM 信号最大。在这个过程中可以进一步消除共模信号与束流发射角有关的信号等,然后可以将这个信号数字化,

并进行进一步处理。

在腔式 BPM 中,束流激励的 TM₁₁₀ 模可以由贝塞尔函数描述为^[4]:

$$E_z = AJ_1(k_{11}r) \cos \phi \quad (1)$$

$$H_r = -\frac{jA}{\omega\mu} \times \frac{J_1(k_{11}r)}{r} \sin \phi \quad (2)$$

$$H_\phi = -\frac{jA}{\omega\mu} k_{11} J_1'(k_{11}r) \cos \phi \quad (3)$$

其中, $A = \frac{E_1}{J_1(k_{11}r_1)} = \frac{E_1}{J_{1,\text{max}}}$; k_{11} 为 TM₁₁₀ 谐振频率的

波数, $k_{11} = \frac{\rho_{11}}{R_{\text{res}}}$; $\rho_{11}=3.832$, 为贝塞尔函数的一个

根; E_1 为 $r=r_1$ 处的最大电场强度; $k_{11}r_1 \approx 1.9$;

$J_{1,\text{max}} \approx 0.58$, 为贝塞尔函数的极值。谐振频率由

$$f_{11} = \frac{\rho_{11}c}{2\pi R_{\text{res}}} = \frac{0.61c}{R_{\text{res}}} \text{ 给出, } c \text{ 为光速。}$$

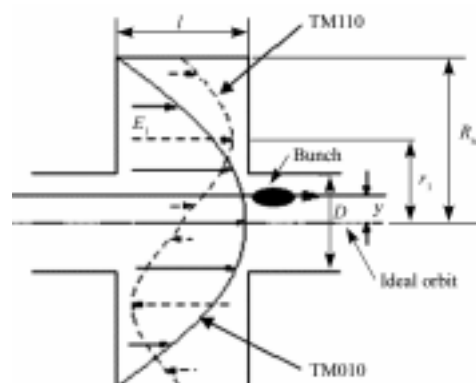


图 1 腔式 BPM 原理示意图^[4]

Fig.1 Schematic diagram of cavity BPM

国家 973 专项基金 (2002CB713600) 资助

第一作者:王洪涛,男,1979 年出生,2004 年于中国科学院上海应用物理研究所获硕士学位,核技术及其应用专业

收稿日期:2004-04-28,修回日期:2004-06-14

一偏轴距离为 y 的束流通过腔后, 所激发的信号电压为^[4]:

$$\begin{aligned}\Delta V_{11}(y) &= q\omega(R/Q)_{11}^{\text{cir}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_z e^{jkz} dz / V_1 \\ &= q\omega(R/Q)_{11}^{\text{cir}} T(\theta_e) \frac{J_1(k_{11}y)}{J_{1,\max}} \propto y\end{aligned}\quad (4)$$

其中 $V_1 = E_1 l$, $J_1(k_{11}y) \approx \frac{1}{2} k_{11}y$ 。

分流阻抗定义为:

$$\begin{aligned}(R/Q)_{11}^{\text{cir}} &= \frac{V_1^2}{2\omega W} \\ &= \frac{2Z_0}{\pi\rho_{11}} \left(\frac{J_{1,\max}}{J_0(\rho_{11})} \right)^2 \times \frac{l}{R_{\text{res}}} \\ &= 130l / R_{\text{res}}\end{aligned}\quad (5)$$

渡越时间因子为 $T(\theta_e) = \frac{\sin(\theta_e/2)}{\theta_e/2}$, 其中

$\theta_e = k_{11}l_e$, $l_e = l + D$ 。通过 $50\ \Omega$ 负载输出的电压信号为^[4]:

$$\Delta V_{50} = \sqrt{\frac{Z_{50}}{(R/Q)_{11}^{\text{cir}} Q_e}} \Delta V_{11}(y) e^{-t/T} \cos(\omega t) \quad (6)$$

其中 $Z_{50} = 50\Omega$, Q_e 为外部耦合的 Q 值。

2 BPM 腔设计与主要的实验结果

本文研究的 BPM 腔腔型结构如图 2 所示, 选用铝作为腔体的加工材料。由于加速器装置的工作频率是 2856 MHz, 因此选用这个频率作为 BPM 谐振腔 TM₁₁₀ 模的频率。其主要的设计参数见表 1。通过 MAFIA 模拟计算的结果见表 2。

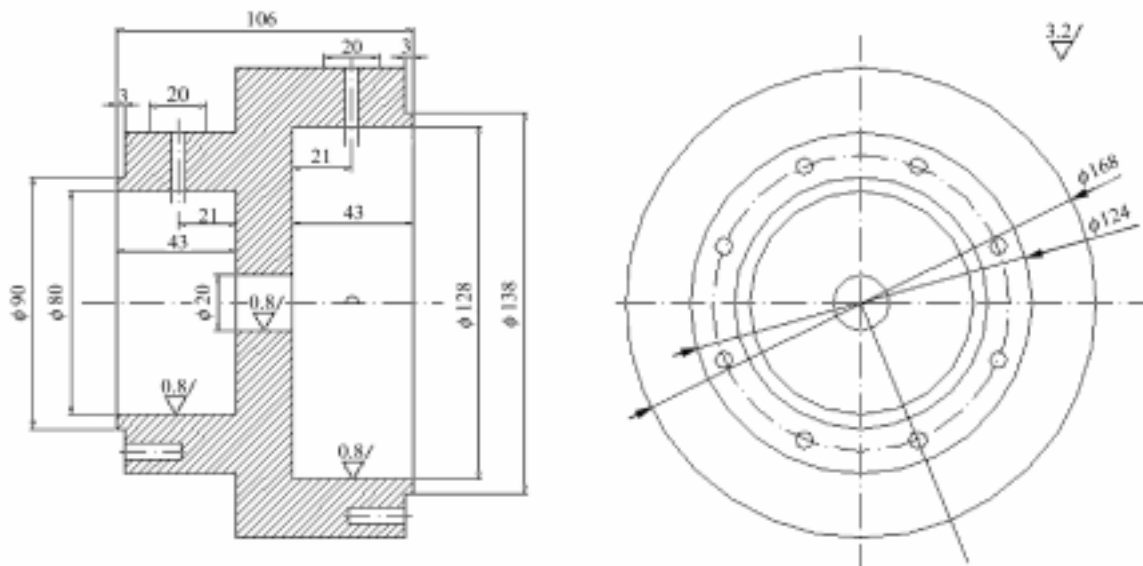


图 2 BPM 腔的结构形状

Fig.2 BPM cavity geometry

表 1 BPM 谐振腔的设计参数

Table1 Design parameters of BPM cavity

参数 Parameters	参考腔 Reference cavity	BPM-腔 BPM cavity
腔体半径 Cavity radius/mm	40	64
腔体长度 Cavity length/mm	43	43
束孔直径 Beam hole diameter/mm	20	20
腔与腔之间的距离 Cavity-to-cavity distance/mm	20	

表 2 MAFIA 的模拟计算结果

Table 2 Simulation results of MAFIA

参数 Parameters	参考腔 Reference cavity	BPM-腔 BPM cavity
频率 Frequency/MHz	2840.7(TM010)	2842.9(TM110)
Q_0	6400	7600
$(R/Q)_{110}^{\text{cir}}/\Omega$	-	13

实验测量是把实验腔固定在光具座上，而把天线安装在精密 X-Y 平台上。通过平台的移动比较精确地调整天线的位置，同时由矢量网络分析仪读取测量结果。实验测量示意图 3。BPM 腔及其实验台见图 4。BPM 腔的测量结果见表 3。

图 5 给出了天线在 -1 mm、0 mm、+1 mm 等不同径向位置处 BPM 腔的频谱。其中 TM110 模的谐振频率为 2848.9MHz，与设计值有 7.1MHz 的偏差，这主要是由 MAFIA 的计算精度和机械加工误差造成的。TM010 模的频率为 2817.1MHz，随着天线偏离轴线，其共模成分几乎不发生变化，而其 BPM 信号确有大约 20dB 的变化量。另外，我们测量了 BPM 腔中 TM110 模的幅值与激励位置的关系，得到了以天线位置为函数的频谱响应，其中每个点的

测量值都是多次测量平均的结果，如图 6 所示。

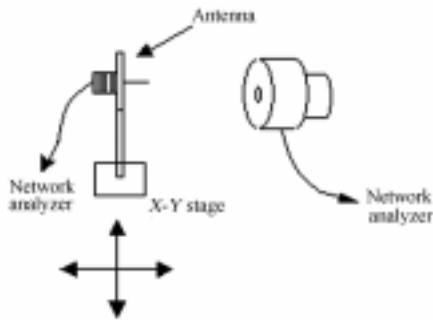


图 3 实验测量示意图

Fig.3 Simplified measurement diagram

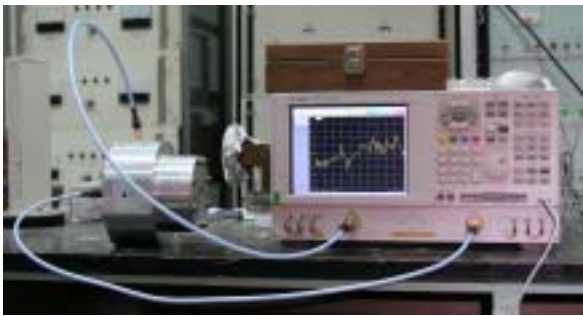


图 4 BPM 腔及其实验台

Fig.4 BPM cavity and the measurement bench

表 3 BPM 谐振腔的测量参数

Table 3 BPM cavity parameters

腔 Cavity	频率 Frequency /GHz	带宽 Bandwidth /kHz	Q_L	信号强度 Signal level /mV
TM ₁₁₀ 腔 TM ₁₁₀ cavity	1.7956	268.8	6681	118
	2.8489	342.4	8322	3.9
	3.7117	5718	649.0	9
参考腔 Reference cavity	2.8171	4525	622.6	233
	4.0328	6483	622.1	15

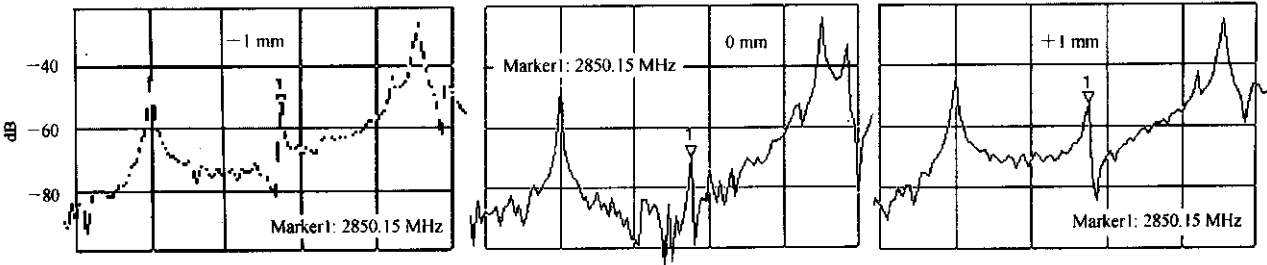


图 5 天线在不同径向位置激励的 BPM 腔频谱 (-1、0、+1 mm)

Fig.5 BPM cavity frequency spectra excited by the antenna at different radial positions (-1, 0, +1 mm)

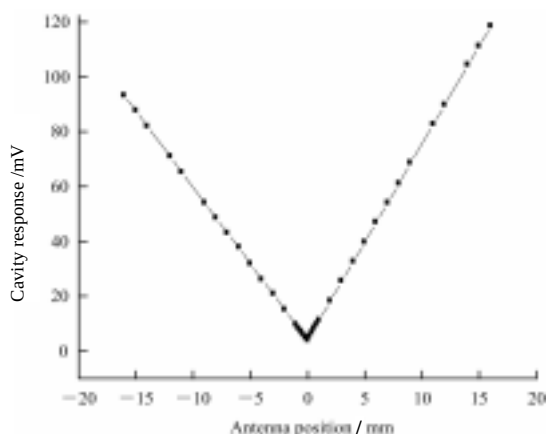


图 6 腔式 BPM 响应与天线的位置关系

Fig.6 Response of cavity BPM versus antenna position offset

3 结论

我们针对上海深紫外自由电子激光的需要开展了对腔式束流位置探测器的研究工作,完成了 BPM 腔的设计和实验腔的加工并对它进行了初步测量,

测量结果表明腔式束流位置探测器具有较高的位置分辨率。下一步我们将完成 BPM 的组装,并将它安装在加速器上进行测试。

参考文献

- 1 Lorenz R. Proc of AIP Conf. **212**: 26—58
- 2 Johnson R, Li Z H, Naito T, *et al.* SLAC-PUB-9771
- 3 McKeown J. IEEE Trans Nucl Sci, 1979, **26**(3): 3423—3425
- 4 Shintake T. Proc of HEACC'98, Dubuna, 1998. 1—5
- 5 Lorenz R, Sachwitz M, Castellano M, *et al.* Proc of PAC97, Vancouver, 1997. 2137—2139
- 6 Slaton T, Mazaheri G, Shintake T. Proc of LINAC98, Chicago, 1998. 911—913
- 7 Balakin V, Bazhan A, Lunev P, *et al.* Proc of PAC99, New York, 1999. 461—464
- 8 Brunken M, Genz H, Gopych M, *et al.* Proc of LINAC2000, California, 2000. 152—154

Study of cavity beam position monitor

WANG Hongtao^{1,3} DAI Jianping² CHEN Yongzhong¹ ZHAO Zhentang¹

¹ (Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

² (Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

³ (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract BPM system is essential for the operation of SASE FEL facilities. Among various types of BPMs, such as the button-type BPM or the stripline-type BPM, only the cavity BPM has the potential to achieve a higher beam position resolution. The amplitude of the TM₁₁₀-mode excited by an off-center beam in the BPM cavity yields a signal proportional to the beam displacement and to the bunch charge; and the signal phase gives the direction of the displacement. This paper discusses the fundamental characteristics of cavity BPM, and reports our MAFIA simulations and RF measurement of an BPM cavity.

Key words Cavity beam position monitor (Cavity -BPM), Free electron lasers, Resolution

CLC O572.21