

北京自由电子激光光学 谐振腔动态失谐研究*

王言山 谢家麟 畅祥云 王明凯 吴刚 杨学平 李永贵
(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 提出微波系统宏脉冲内相位任意变化的方法,改善自由电子激光功率输出.以自由电子激光功率输出为指示,用计算机控制任意函数发生器改变宏脉冲内微波相位,短的建立时间和大的饱和功率会同时获得.北京红外自由电子激光器进行的实验证明这种方法可以有效地提高自由电子激光的功率输出.

关键词 自由电子激光 光学谐振腔 动态失谐 微波相位

1 引言

为了满足稳定饱和功率输出的需要,自由电子激光的光学谐振腔需失谐运行^[1,2].机械失谐方法不能同时满足高增益和稳定饱和功率输出,线性变化用于驱动自由电子激光的射频直线加速器的工作频率的办法,等效于补偿相应的光学谐振腔的失谐长度,可以同时获得高的小信号增益和强的稳定饱和功率,这样可以提高宏脉冲的自由电子激光光学谐振腔的辐射能量^[3,4].

文中使用一种不同的方法,以获得同样的结果.这个方法由任意函数发生器控制微波系统的相位来逐步调节自由电子激光光学谐振腔的动态失谐,以便获得最佳的激光功率输出.下面首先介绍原理,然后简单描述控制系统,最后给出我们的实验结果证实这种方法是切实可行的。

2 工作原理

众所周知,为了获得快速的建场时间和稳定的饱和功率输出,射频直线加速器驱动的自由电子激光的光学谐振腔必须进行失谐。

完全同步时,光学谐振腔的长度和电子束的频率满足下列关系式:

1999-05-26 收稿

* 863 和 863 青年激光技术资助项目

$$2L = nc/f \quad (1)$$

L 为光学谐振腔的长度, n 为电子束注入光学谐振腔的个数, c 为光速, f 为自由电子激光加速器微波系统的工作频率, 这样可以推出:

$$\Delta L/L = -\Delta f/f = -\Delta[d\varphi(t)/dt]/2\pi f \quad (2)$$

$\varphi(t)$ 为随着时间 t 变化的函数, 代表微波系统的相位. 公式(2)是讨论光学谐振腔动态失谐的谐振腔长度变化与微波系统相位的时间变化率的关系式.

3 动态失谐控制系统简图

北京自由电子激光微波功率系统的信号源是晶振经过倍频锁相后的微波功率源, 具有单一的工作频率, 低相位噪声. 在微波功率源后插入一个电控可变移相器, 这个移相器由带有计算机接口的任意函数发生器控制^[5]. 经过移相器调制的微波信号, 经过前级放大器和速调管放大后, 馈送到微波电子枪和加速管. 由微波电子枪和加速管产生的电子束流注入扭摆器, 产生辐射, 经光学谐振腔放大后, 产生激光. 通过激光探测, 获得激光信号波形, 以此为指示, 用计算机控制任意函数发生器, 改变微波相位, 使光学谐振腔的激光功率输出最佳. 图 1 为实验原理示意图.

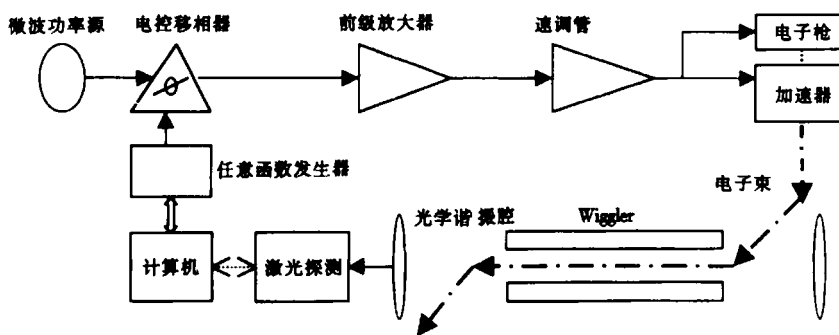


图 1 实验原理图

4 实验结果与讨论

根据北京自由电子激光运行的具体情况^[2,6], 我们设计控制后的微波相位波形如图 2 所示. 这里假定北京自由电子激光的建立时间(T)为 $2\mu\text{s}$. $2-5\mu\text{s}$ 保持平顶波形, 其余时间为零. 由于移相器的相移量随着控制电压的升高而减少, 任意函数发生器的输出波形与微波相位的波形是反相的. 在图 1 所示微波系统中, 微波系统的响应是由微波放大器、微波电子枪和直线加速器的响应决定的. 由于微波系统相位变化较少, 假定微波系统的响应是线性的, 最后, 利用微波相位测量的方法, 通过调整任意函数发生器的延迟, 在速调管的输出, 获得与图 2 一样的测量结果.

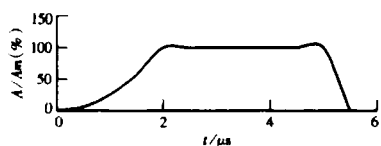


图 2 控制后的微波相位波形

先讨论微波相位在 $0-2\mu\text{s}$ 范围的变化规律,从公式(2)可以推出:

$$\varphi(t) = -\pi f \times (\Delta L/L) \times (t^2/T) = A_m \times (A/A_m) \quad (3)$$

A_m 为 $\varphi(t)$ 的幅值, A/A_m 为 $\varphi(t)$ 的变化规律,是无量纲的。

这里, $f=2856\text{MHz}$; $L=2.52\text{m}$. 对于 $\Delta L=0, -4, -8, -12\mu\text{m}$, 在光波长 $10.8\mu\text{m}$, 通过 HgCdTe 探测器测量的波形(电压 V 与时间的关系)如图 3 所示,波形自右向左对应不同的 ΔL . 通过公式(3),可以计算对应不同 ΔL 的 A_m . 测量的激光单脉冲能量 P 与 A_m 的关系如图 4 所示。

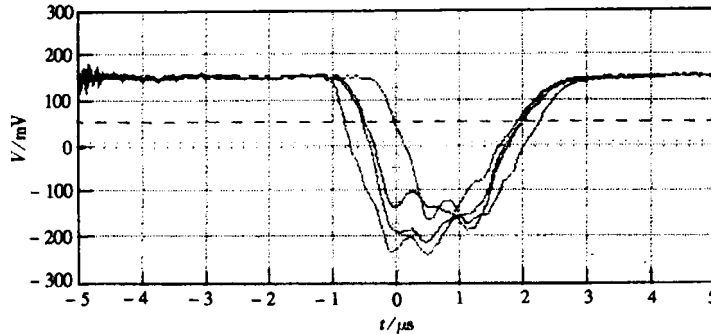


图 3 对应不同 ΔL 的激光功率输出波形

从以上实验结果来看,我们采用动态光腔失谐方法既能提高北京自由电子激光的小信号增益又能提高激光功率输出,这种方法以前仅在长脉冲自由电子激光(FELIX)^[4]应用,它也适应短脉冲的北京自由电子激光.虽然北京自由电子激光的工作状态不是最佳^[2,6],小信号增益变小导致 ΔL 减少^[1],光腔和光路损耗大导致测量的功率小,但实验结果表明:光信号建立时间提前,小信号增益提高;激光功率输出提高约 50%.

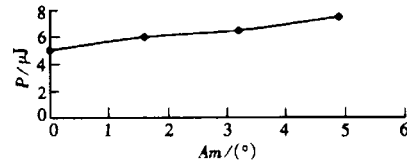


图 4 激光单脉冲能量与 A_m 的关系

感谢应润杰老师对本实验理论上的指导和讨论,感谢北京自由电子激光课题的其他研究人员为本实验提供的帮助。

参考文献(References)

- 1 Dattoli G, Cabrini S, Giannessi L et al. Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res., 1992, **A318**: 495—499
- 2 XIE JiaLin, ZHUANG Jiefia, HUANG YongZhang et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1995, **A358**: 256—259
- 3 Bakker R J, Knippels G M H, van der Meer A F G et al. Phys. Rev., 1993, **E48**(5): R3256—R3258
- 4 Knippels G M H, Lin L, van der Meer A F G et al. Dynamic desynchronization of the FELIX resonator. In: Dattoli G, Renieri A eds. Free Electron Laser 1996. The Netherland: Elsevier Science B. V., 1997. II - 39—II - 40
- 5 LI FengTian, XIE JiaLin, WANG YanShan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics(in Chinese), 1998, **22** (10): 932—936
(李逢天, 谢家麟, 王言山等. 高能物理与核物理, 1998, **22**(10): 932—936)
- 6 XIE J, ZHUANG J, LI Y et al. Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res., 1998, **A407**: 146—150

Dynamic Desynchronization of BFEL Optical Resonator*

WANG YanShan XIE JiaLin CHANG XiangYun WANG MingKai

WU Gang YANG XuePing LI YongGui

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract A new method of arbitrary variation of the phase of RF system during the macropulse to optimize the FEL output is proposed. In this method, the FEL output is used as a tuning indicator to adjust the RF phase in different time intervals of the macro-pulse with computer controlled arbitrary function generator. In this case, shortest build-up time and largest saturated power in a macro-pulse can be simultaneously achieved. Experimental testing of this method has been carried out in Beijing IR-FEL oscillator and proves to be effective in increasing the power output of BFEL facility.

Key words FEL, optical resonator, dynamic desynchronization, microwave phase

Received 26 May 1999

* Supported by 863 and 863 Youth Laser Technology Foundation