

NSRL 储存环相干谐波自由电子激光实验总体布局

陈 念 何多慧 李 格 刘金英 贾启卡 徐宏亮 周银贵 张鹏飞 张善才 李煜辉
(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 国家同步辐射实验室(NSRL)正在开展储存环相干谐波自由电子激光研究,目标是获得266nm相干辐射输出,并且获得较高的相干增强因子。给出实验的总体布局,包括电子束、种子激光及光学速调管的性能,介绍了种子激光扫描聚焦系统、同步系统、光学速调管磁极间隙控制系统、磁场测量系统及辐射测量系统。

关键词 储存环相干谐波自由电子激光,光学速调管,相干辐射,自发辐射

中图分类号 TN122

储存环相干谐波自由电子激光(CHG-SRFEL)是真空紫外波段第四代同步辐射光源的重要发展方向之一^[1,2]。国家同步辐射实验室(NSRL)开展CHG-SRFEL研究的主要目的是验证相干谐波产生的原理,测量相干增强因子,探索获得短波长强相干辐射的途径,用532nm种子激光入射,以获得266nm相干辐射输出。同时研究高增益相干谐波自由电子激光的物理过程。

图1给出CHG-SRFEL整体实验装置。种子激光经过扫描聚焦系统聚焦后从储存环石英窗入口进入储存环,与电子束在光学速调管中作用,经过调制段能量调制和色散段密度调制,在辐射段产生相干辐射(伴随自发辐射)。辐射测量系统能够从每隔 10^6 个自发辐射脉冲1个相干辐射脉冲所形成的脉冲链里选出相干辐射,得到相干增强因子^[3],同步系统完成电子束、种子激光和辐射测量系统的同步。

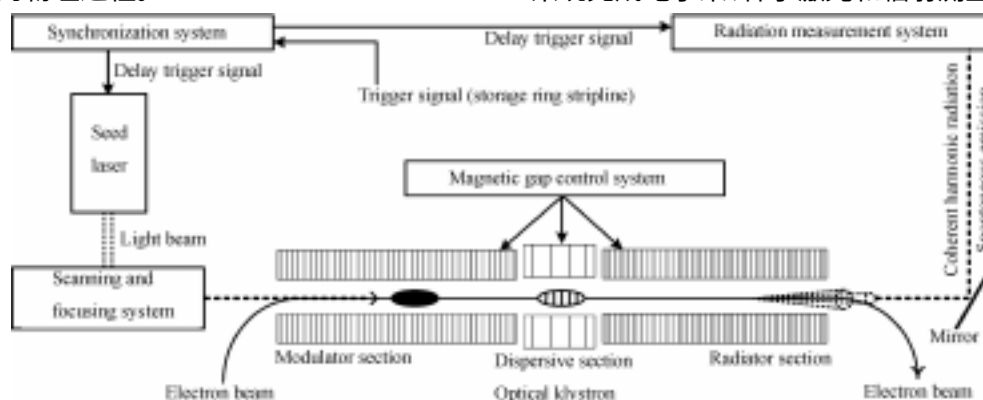


图1 储存环相干谐波自由电子激光实验装置

Fig. 1 Experimental setup of CHG-SRFEL

1 电子束

储存环电子束能量可调范围为200—800 MeV,最大流强300 mA,高频频率204 MHz,谐波数45。

电子束能散对CHG-SRFEL相干增强因子影响很大。低能量可以减小能散,但是能量越低束流不稳定性越大,并将导致电子束团长度和能散的增大,因此电子束能量应选择较大的值。CHG-SRFEL工作时电子束能量范围为200—426 MeV。相干增强

因子与电子数目即流强成正比,但是流强越大束流不稳定性也越大,因此实验中应选择较小流强。

电子束发出相干辐射之后,将增加附加的能散,好在电子储存环本身具有辐射阻尼作用,经过一个能量阻尼时间,附加的能散将减小到 $1/e$,因此选取种子激光的时间间隔与能量阻尼时间差不多。

电子束能散 σ_γ/γ 、能量阻尼时间 τ_ϵ 分别为^[4]:

$$\frac{\sigma_\gamma}{\gamma} = \sqrt{\frac{C_q}{J_\epsilon \rho_0}} \gamma \quad \tau_\epsilon = 1.694 \times 10^{14} \frac{T_0 \rho_0}{J_\epsilon \gamma^3}$$

国家973专项基金(2001CCB01000)、国家自然科学基金(90103010)、国家863计划项目和安徽省自然科学基金(01046202)资助

第一作者:陈念,男,1978年出生,2000年毕业于中国科学技术大学,应用物理专业,现为该校博士研究生

收稿日期:2003-12-21,修回日期:2004-05-20

式中： γ 为电子的相对能量， $\gamma=E/mc^2$ ， E 为电子能量， mc^2 为电子静止能量； $C_q=3.832 \times 10^{-13}$ m 为量子常数； ρ_0 为电子轨道的曲率半径； T_0 为电子回旋周期； J_e 为衰减分配数。对合肥储存环 $\rho_0=2.2221$ m， $T_0=220.6$ ns， $J_e=1.9765$ 。综合考虑以上各种因素及自由电子激光共振关系，给出一组电子束参数，如表 1 所示。

表 1 CHG-SRFEL 电子束参数

Table 1 Parameters of electron beam of CHG-SRFEL	
能量 Energy / MeV	300
能散 Energy spread	1.734×10^{-4}
能量阻尼时间 Energy damping time / s	0.208
流强 Current intensity / mA	5
电子数目 Electron number	6.9×10^9

2 种子激光

种子激光器为美国光谱物理公司生产的脉冲 Nd:YAG 激光器。表 2 给出种子激光基本参数。

为了让电子束与种子激光充分作用，必须使电子束团与种子激光脉冲在时间和空间上同步。其中空间上的同步可通过扫描聚焦系统完成，时间上的同步则通过同步系统完成。

表 2 CHG-SRFEL 种子激光参数
Table 2 Parameters of the seed laser

波长 Wavelength/nm	532
脉冲宽度 Pulse width/ns	10
功率 Power/MW	<650
初始束径 Original beam diameter/mm	8.0
聚焦后束径 Beam diameter after focusing/mm	1.0

2.1 种子激光扫描聚焦系统

扫描聚焦系统的目的是减小光束束径，提高能量调制率的可调范围，完成种子激光与电子束的准直。它由全反射镜、扩束准直系统、聚焦系统组成，图 2 给出了整体结构图。其中全反射镜完成光路的角度变换；扩束准直系统完成光束扩束及光束同电子束的准直；聚焦系统完成对光束的聚焦，通过电动调节聚焦系统可以扫描光束的聚焦位置，使电子束在光学速调管调制段中能够进行最佳能量调制。

电子束与种子激光准直的实现方式：在光学速调管出口放置一小孔光阑，使它的中心位于自发辐射的轴线上，在小孔下游 5—10 m 处放置一面反射镜，通过调节扫描聚焦系统的扩束准直系统，使自发辐射光再经过小孔反射回去，直至种子激光器，从而达到电子束与种子激光在空间上的同步。

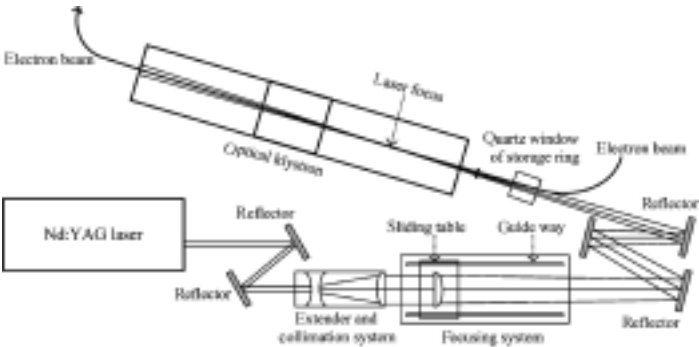


图 2 储存环相干谐波自由电子激光种子激光扫描聚焦系统
Fig. 2 Scanning and focusing system of seed laser of CHG-SRFEL

2.2 同步系统^[5]

同步系统的目标是实现电子束、种子激光和辐射测量系统在时间上的同步。合肥电子储存环多束团运行时电子束团周期为 4.9ns，而种子激光脉冲宽度为 10ns，因此不用采取任何措施，种子激光脉冲肯定能与电子束团作用，但是由于受到没有和种子激光发生作用的束团影响，本底噪声很大，对相干辐射的产生很不利。因此采用单束团进行实验，束团周期为 220.6ns，长度约 300—400 ps，种子激光重复频率选为 5 Hz（与 300 MeV 时的阻尼时间接近）。

图3给出同步系统结构图。通过储存环上的

stripline监测器获得电子束团信号，再经过整形分频转换成5 Hz，作为DG535数字延迟器的外触发信号。DG535的T₀输出脉冲比外触发信号滞后85ns，A、B、C、D四路输出以T₀为起点延迟，调节范围0—1000s。C、D两路形成±C/D脉冲输出(脉冲宽度为C、D两路延迟时间之差)。T₀输出触发种子激光的氙灯，A输出触发种子激光的Q开关，C/D输出触发辐射测量系统中ICCD的门，门宽由C/D的宽度决定。通过计算机控制光谱仪、DG535和ICCD，设定各设备的状态、参数，进行数据采集、处理和储存。

种子激光与电子束同步的实现方式：使用光电二极管将种子激光和电子束自发辐射转换成脉冲电

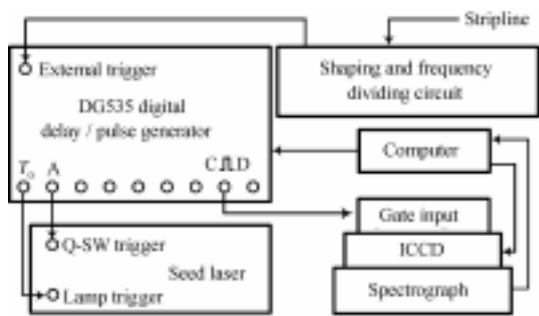


图 3 同步及辐射测量系统

Fig. 3 Synchronization and radiation measurement system

信号，整形后输入示波器，调节 DG535 的 A 输出延迟，使种子激光脉冲覆盖一个自发辐射脉冲，从而达到种子激光与电子束的同步。

种子激光与 ICCD 门脉冲同步的实现方式：种子激光会有少量反射到辐射测量系统，光谱仪设定在 532nm，ICCD 门宽为 5ns。在只有种子激光工作的情

况下，调节 DG535 的 C/D 输出的时间延迟，使 CCD 上读取的信号从无到饱和，饱和时即达到同步。

3 光学速调管

光学速调管(Optical klystron)是 CHG-SRFEL 的核心装置，其结构见图 1。电子束团在调制段中和种子激光作用，由于束团中电子在光场所处相位不同而损失能量或获得能量，产生能量调制（在种子激光波长尺度内能量均匀的电子束变成有规律的正弦分布形式）。能量调制后的电子束团通过色散段，在色散段特强磁场作用下，将在横向产生较大距离的偏转，慢电子走的路程长，快电子走的路程短，使得电子束空间密度调制（电子以种子激光波长为间隔群聚成一系列微束团）。选取辐射段磁场参数，使得电子与光场的高次谐波共振，从而产生种子激光的高次相干谐波辐射。表 3 给出光学速调管基本参数。

表 3 CHG-SRFEL 光学速调管基本参数

Table 3 Basic parameters of optical klystron

	调制段 Modulator section	色散段 Dispersive section	辐射段 Radiator section
周期长度 Length of a period/mm	92	276	72
周期数目 Number of periods	10	1	12
总段长度 Total length/mm	920	276	864
磁极间隙 Magnetic gap/mm	40—140	40—190	40—140
工作间隙 Working magnetic gap/mm	40—70(g_m)	40—190	40—65
磁场强度 Magnetic field/T	0.014—0.437	0.111—0.789	0.004—0.299
特征参数 Parameter	0.13—3.75	4—89(when $g_m=40$)	0.03—2.01
	1.35—3.75(工作模式 working)	18—376(when $g_m=70$)	0.68—2.01(工作模式 working)

3.1 光学速调管磁极间隙控制系统^[6]

光学速调管磁极间隙全闭环控制系统可独立调节光学速调管三段磁极间隙，精度达到 5 μ m。基本思想是动力部分驱动光学速调管磁极间隙变化，同时，位置监测部分获取磁极间隙实际变化量，当实际变化量到达预定目标时，动力部分停止工作。

全闭环控制系统消除了机械空回、非线性传动等机械误差对控制精度的影响，具有目标位置输入限制、软硬件停止功能、硬件限位开关等多重保护，充分保护储存环真空室不被破坏。控制精度取决于位置监测部分的精度，因此通过提高光栅尺的线对数以及光栅尺倍频卡的倍频数可进一步提高精度。

3.2 磁场测量系统^[7]及光学速调管磁场垫补测量

磁场测量系统采用霍尔探头点测法，驱动部分通过 PC 控制伺服电机来完成。“on fly”测量技术(让测量探头连续不停地运动，同时进行数据采集)的使

用可以大大节省测量时间，提高测量效率。

光学速调管磁场修正采用在磁极表面贴坡莫合金垫片的办法来完成^[8]。坡莫合金的磁导率及饱和磁感应强度都很高，坡莫合金垫片垫补后，可视为被该位置原磁场均匀磁化的垫片，产生修正磁场。有三种垫补法：垂直垫补、水平垫补和边缘垫补。目标是优化积分场和位相误差。

4 辐射测量系统^[9]

储存环单束团运行时，电子束每经过一次光学速调管就产生一个自发辐射脉冲，频率为 4.53MHz；只有当电子束与种子激光发生作用时才产生相干辐射脉冲，频率为 5Hz。因此辐射脉冲的时间结构为：每隔 10^6 个自发辐射脉冲出现 1 个相干辐射脉冲。

如图 1 所示，辐射的脉冲经过反射镜进入辐射测量系统，532nm 的基波透射，266nm 谐波被反射进入光谱仪，光谱仪的一个出口窗接 ICCD，另一

个出口窗接光电倍增管, ICCD 的光阴极位于光谱仪的焦平面上, 如图 3 所示。在测量相干辐射时, ICCD 把自发辐射脉冲关断, 取出相干辐射脉冲。

光谱相干增强因子^[1,2]是 CHG-SRFEL 的主要性能指标, 定义为无限小立体角及带宽内相干辐射与自发辐射强度之比。实际辐射测量系统必有一定大小的立体角孔径和波长孔径, 实验测得的相干辐射和自发辐射强度是在这些孔径下的积分, 因此只能得到积分相干增强因子。根据积分相干增强因子以及实验设备的参数可以计算得到光谱相干增强因子, 相关程序已经设计完成。

5 结论

NSRL 储存环相干谐波自由电子实验的总体布局已经设计完毕, 实验装备也建设完成, 其中同步系统、磁场质量、辐射测量系统作为 CHG-SRFEL 实验的三大重要环节在不断优化中。今年下半年开始进行新一轮实验, 努力获得 266nm 强相干辐射。CHG-SRFEL 工作参数选取方法详见文献[10]。

参考文献

- 1 Prazeres R, Ortega J M, Bazin C, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1988, **A272**: 68—72
- 2 Prazeres R, Guyot-Sionnest P, Ortega J M, *et al.* Nucl Instr Meth, 1991, **A304**: 72—76
- 3 刘金英, 徐宏亮, 贾启卡, 等. 强激光与粒子束, 1999, **11**(1): 19—22
LIU Jinying, XU Hongliang, JIA Qikai, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 1999, **11**(1): 19—22
- 4 金玉明. 电子储存环物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
JIN Yuming. The physics of electron storage rings. Hefei: Univ of Sci and Tech of China Press, 2001
- 5 胡焰, 何多慧, 徐宏亮, 等. 强激光与粒子束, 1997, **9**(3): 365—368
HU Yan, HE Duohui, XU Hongliang, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 1997, **9**(3): 365—368
- 6 陈念, 李煜辉, 李格, 等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(9): 923—926
CHEN Nian, LI Yuhui, LI Ge, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(9): 923—926
- 7 陈鹰, 魏衡华, 孙德敏, 等. 核技术, 2002, **25**(8): 637—640
CHEN Ying, WEI Henghua, SUN Demin, *et al.* Nucl Tech, 2002, **25**(8): 637—640
- 8 陈念, 徐宏亮, 刘金英, 等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(4): 401—404
CHEN Nian, XU Hongliang, LIU Jinying, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(4): 401—404
- 9 刘金英, 徐宏亮, 孙葆根, 等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(4): 385—388
LIU Jinying, XU Hongliang, SUN Baogen, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(4): 385—388
- 10 陈念, 徐宏亮, 刘金英, 等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 524—528
CHEN Nian, XU Hongliang, LIU Jinying, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(6): 524—528

General design of coherent harmonic generation storage-ring free-electron laser of NSRL

CHEN Nian HE Duohui LI Ge LIU Jinying JIA Qika XU Hongliang

ZHOU Yingui ZHANG Pengfei ZHANG Shancai LI Yuhui

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract The coherent harmonic generation storage-ring free-electron laser of National Synchrotron Radiation Laboratory is composed of seed laser, optical klystron, radiation measurement system and synchronization system. Its goal is to obtain 266nm coherent harmonic radiation and higher spectral ratio. This paper illustrates the general experimental design, including the performance of electron beam, seed laser and the optical klystron. And it also gives an introduction to the scanning and focusing system of seed laser, synchronization system, magnetic gap control system, magnetic measurement system and radiation measurement system.

Key words Coherent harmonic generation storage-ring free-electron laser (CHG-SRFEL), Optical klystron, Coherent radiation, Spontaneous emission

CLC TN122