

高增益自由电子激光光阴极注入器 驱动激光系统设计考虑

鲁向阳, 向荣, 赵夔, 王莉芳, 全胜文, 郝建奎, 张保澄, 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

摘要:高增益自由电子激光对电子束团提出了高品质要求, 只有光阴极微波电子枪能够达到这一目标。光阴极微波电子枪的驱动激光器是这一系统的关键之一。北京大学重离子物理研究所设计的驱动激光系统的指标是提供 260 nm、6~8 ps 宽、500 μ J 的激光脉冲。系统主要由半导体泵浦的钛蓝宝石振荡器、Nd YAG 调 Q 泵浦源、再生式放大器、倍频器等组成。系统中采用了腔长调整锁模技术以及相位稳定反馈装置, 目的是使激光脉冲的时间抖动小于 1.0 ps。

关键词:光阴极微波电子枪; 驱动激光器; 高增益自由电子激光

中图分类号: TN243; TN248.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2002)06-0527-04

Study on the Drive Laser System of the Photocathode-injector Used in High Gain FEL

LU Xiang-yang, XIANG Rong, ZHAO Kui, WANG Li-fang,
QUAN Sheng-wen, HAO Jian-kui, ZHANG Bao-cheng, CHEN Jia-er

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: High gain FEL requires high quality electron beam which can be provided only by the RF photocathode gun. The drive laser for electron source plays the key role. In Institute of Heavy Ion Physics of Peking University, the laser system is required to deliver a 500 μ J, 6~8 ps pulse of UV photons (260 nm) to the cathode. This system mainly consists of a CW, frequency-doubled, diode-pumped Nd YAG laser, which provides energy to pump a CW mode-locked Ti sapphire oscillator, Q-switched Nd YAG pump lasers, a regenerative amplifier and harmonics crystals. To meet the low jitters of pulses (1.0 ps), cavity length of the oscillator should be adjustable to lock the pulse frequency with external RF reference, and a phase stability feedback system is also used.

Key words: photocathode RF electron gun; drive laser; high gain free electron laser

高增益自由电子激光对电子束的品质有很高的要求。理论分析和实验结果均表明: 强流

收稿日期: 2001-06-06; 修回日期: 2001-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19735004)

作者简介: 鲁向阳(1963—), 男, 四川成都人, 副教授, 加速器物理专业

低发射度的电子束是实现高增益自由电子激光的关键,近十年来发展起来的光阴极微波电子枪是提供这种高品质电子束的保证。驱动激光系统是光阴极微波电子枪的重要组成部分,它的性能直接决定了电子束的品质。驱动激光系统主要包括种子激光发生器、功率放大器、倍频器以及相应的成像与传输组件。另外,为保持光电子脉冲束与加速器的射频信号严格同步,还要具备同步控制装置等。自由电子激光系统对电子束的品质要求很高,除对激光输出功率等指标提出极高的要求外,还对驱动激光系统的稳定性,如激光脉冲的能量稳定性、光阴极上光斑的大小和位置稳定性等提出了极高的要求。此外,还要求脉冲形状介于高斯型和方波之间、脉冲宽度为皮秒量级等。正是由于这些特殊要求与苛刻的指标,目前尚无整套的商业产品可供使用,各实验室均自行或联合开发研制。北京大学重离子物理研究所目前正在进行对光阴极驱动激光系统的研制,本工作对驱动激光系统设计中的一些问题进行研究和讨论。

1 驱动激光系统设计要求^[1,2]

理论分析和实验研究表明:光强的稳定性直接关系到光电子束团的电荷量的稳定性,稳定性较差的束团将导致较大的横向发射度。光斑位置的波动与光斑大小的变化同样会引起发射度的变化。由于光阴极电子枪通常采用强射频场加速的方式,因此,脉冲的时间抖动直接关系到电子束的纵向发射度与能散。对于射频频率在 1~3 GHz 的自由电子激光系统,通常要求用于光阴极电子枪的驱动激光系统满足以下条件:光强不稳定性,1%;时间抖动,1 ps;脉冲宽度变化,<1%的束团长度;光斑位置波动,<1%的光斑直径;光斑大小变化,<1%的光斑直径;长时间漂移,<5%/8h。

同时,为了得到更高的光阴极利用效率,往往还要根据光阴极材料的情况,考虑光束的极化、波长等参数^[2,3]。另外,模拟计算的结果表明:与高斯分布相比,光脉冲的纵向和横向形状分布均匀时,对有效控制发射度增长和提高激光倍频效率更为有利。为了得到更高的激光利用效率,人们还发展了激光对光阴极的掠入射技术,这时需要处理好激光波前^[2]。激光系统

还必须是稳定的和易于控制调节的。

2 光阴极微波电子枪驱动激光的设计考虑

北京大学光阴极微波电子枪驱动激光系统的设计原理图示于图 1,其技术指标为:工作波长,260~280 nm;输出单脉冲能量,约 500 μ J;重复频率,50 Hz;激光与射频之间相位抖动,约 1 ps;脉冲宽度,<8 ps;脉冲间能量抖动,<1%;纵向波形,可调;脉冲横向分布,均匀;光斑直径抖动,<1%;光斑中心位置抖动,<1%。

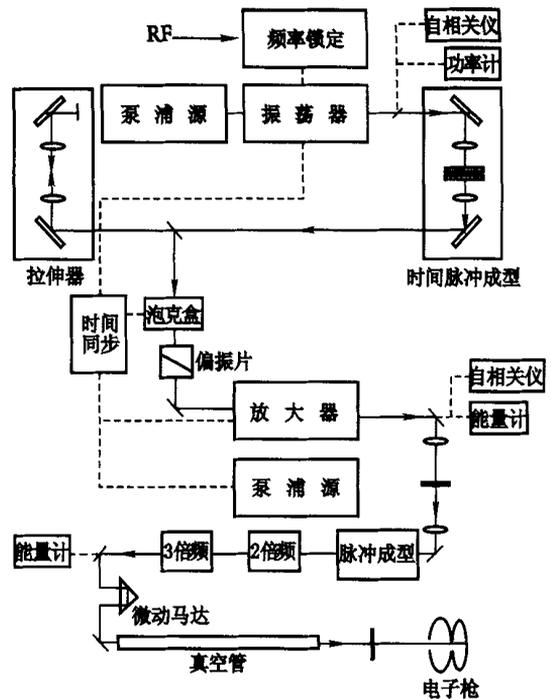


图 1 光阴极微波电子枪激光系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of the drive laser system for the photocathode RF electron gun

为实现上述技术指标,在组建激光驱动系统时,主要考虑以下几个方面。

2.1 种子激光

经验表明:激光的不稳定主要产生于振荡级。因此,选用适当的种子激光发生系统是十分重要的。

种子激光的产生通常采用 Nd:YAG、Nd:YLF和 Ti:Sapphire 振荡器等几种方式^[4]。本工作采用锁模 Ti:Sapphire 振荡器产生种子激光,其主要优点是^[2]:最大输出波长在 800 nm 左右,对于最终的 260~280 nm 工作波长只需要 3

倍频,因此,可以获得较高的转换效率;典型脉冲宽度为 100 fs,为脉冲波形的成形与转换提供了足够的带宽;容易获得商品化的标准产品;Ti Sapphire 晶体的机械强度高,热导率高,适于长期稳定工作,可以获得足够功率输出。本工作采用半导体泵浦的 CW 倍频 Nd YAG 激光器为振荡器提供泵浦。其突出优点在于稳定性明显优于其它方式。半导体泵浦的 Ti Sapphire 振荡器的典型重复频率为 82 MHz,很易调整为 81.6 MHz (为 2 856 MHz 的 35 分频)或 81.25 MHz (为 1.3 GHz 的 16 分频)。

振荡器设计参数为:波长 780 nm;重复频率 80~82 MHz;脉冲宽度 80 fs;单脉冲能量约 10 nJ;激光脉冲的时间分布为高斯形。

2.2 放大系统

在得到上述的种子激光以后,下一步的目标是产生波长为 260 nm、重复频率为 50 Hz、脉冲宽度为 6~8 ps、单脉冲能量约为 500 μ J 且时间分布形状可调的激光脉冲序列。为实现这一目标,通常需要经过以下必要的步骤:1) 激光能量放大;2) 激光时域成型;3) 对激光脉冲的展宽;4) 激光倍频。此外,还有必要的传输与成像、脉冲的展宽与压缩控制等。这里简要讨论激光脉冲的能量需求关系。

首先,种子激光的脉冲宽度非常窄,如果直接放大,会造成放大晶体的损坏。对于超短脉冲的放大,通常要采用啁啾技术进行脉冲的展宽(图 2)。在本设计系统情况下,从振荡器出来的种子激光(单脉冲能量为 10 nJ),经过时域成型和脉冲展宽后的单脉冲能量约为 1 nJ。其次,放大器的输出经过脉冲成型损失能量约为 50%,从 780 nm 转换到 260 nm 两级倍频时的倍频能量转换率为 15%~20%。再者入射到光阴极以前,为了获得锐利的光斑边缘,需要使用光阑对光束的横截面进行修整,这个过程大约损失激光能量的 5%~15%。另外,脉冲的传输与成像、脉冲的再压缩等也造成大于 50%的能量损失。综合以上各种因素,放大器需要提供的单脉冲能量为 15~25 mJ。

根据上面的估算,本工作需要 1 台将单脉冲能量为 1 nJ、波长为 780 nm 的激光放大到单脉冲能量 15~25 mJ、重复频率为 50 Hz、脉冲间的能量稳定性不低于 1%、脉冲纵向波形可

调的激光放大器。目前,这样的放大器国内外没有商品供应。

国际上的其它实验室也遇到同样的问题,大多数实验室是利用现有的器材、设备自行组建。但是,自行组建的放大器在工作可靠性与稳定性方面通常难以与成熟的商业产品相比。另外,放大器操作与维护的复杂性大为增加。

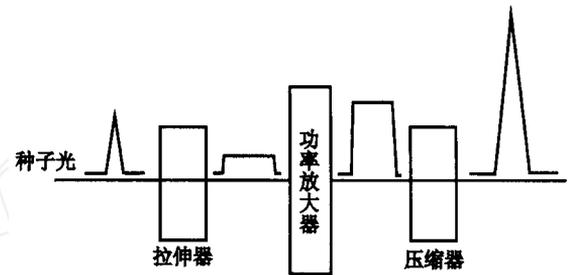


图 2 超短脉冲的啁啾放大原理

Fig. 2 Sketch of the chirped pulse amplification technique

本工作初步选择再生式放大器为放大级的首选方案。与多通道放大器相比,最明显的区别在于再生式放大器中采用了谐振腔,再生式放大器的横模稳定性及方向性等方面明显优于多通道式放大器。

图 3 是一种对激光纵向波形进行调整的空间滤波原理示意图。可以通过对空间滤波器组进行改造^[5],实现对输出脉冲纵向波形的调整。不过,这项技术比较复杂,要求根据电子束流的发射度情况对激光脉冲的纵向波形进行调整。因此,除了需设置可控制的空间滤波器组外,还需采用计算机反馈控制。

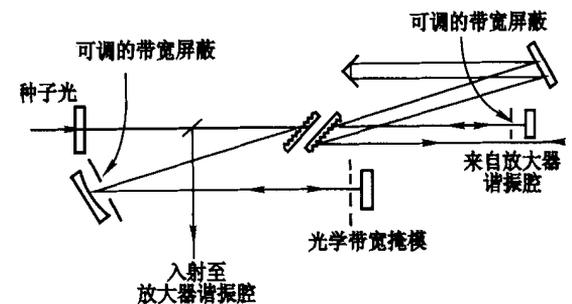


图 3 实现激光纵向波形调整的空间滤波原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of spatial filter used for longitudinal profile adjustment

在放大系统的组建中,另一个重要的问题是放大器选择合适的泵浦源。为使放大器输出 20 mJ 左右的能量,需要提供每脉冲 100 mJ (532 nm) 以上的泵浦能量。虽然目前有许多商业产品(典型的灯泵浦调 Q 的 YAG 激光器)可以达到这项指标,但是,如果要求泵浦脉冲的重复频率达到 50 Hz,工作介质的散热遇到很大的困难。在热效应的影响下,不仅工作介质的荧光谱线变宽和量子效率降低,而且还会出现热透镜效应、热应力双折射等现象,其综合结果是使激光器工作变得不稳定,甚至不能出光。另外,高重复频率下使用,灯的寿命也是一个需要考虑的因素。放大器的泵浦激光的品质对放大器的输出有着直接的影响,尤其是对放大后激光脉冲的能量稳定性影响最为明显。因此,对泵浦激光器的选择需要格外慎重。

2.3 同步控制系统

同步控制的主要目标包括将种子激光的重复频率锁定为射频信号的分频、对种子激光的脉冲选单、泵浦脉冲与选中脉冲的同步以及控制激光脉冲相对于射频信号的抖动。本工作采用图 4 所示的同步装置,它既可以使用其内部信号作基准信号,也可以使用外部同步信号。其工作原理是:通过相位检测确定激光振荡频率与参考信号的频率差,然后将误差信号转换成直流电压控制置于激光振荡器反射镜上的 PTZ 元件,调整谐振腔的长度,从而达到同步的目的。另外,尽管经过上述控制,50 Hz 的激光脉冲序列已经与射频信号同步锁定,但实际使用中其相位仍然需要调整。设计中拟采用由微动马达(如 picomotor)驱动的棱镜组,通过光程的变化来实现对脉冲相位的调整。

2.4 其它

除上述优先考虑的问题外,为达到项目的要求,还需对放大器输出的激光进行倍频。本工作采用 BBO 晶体对 780 nm 激光进行 3 倍频。另外,对于投射到光阴极靶上光斑的横向形状控制、光束的成像与传输、光斑边缘的修整以及采用掠入射时的等时性控制等问题也进行了相应考虑。

3 讨论

激光系统的性能对于光阴极注入器十分重

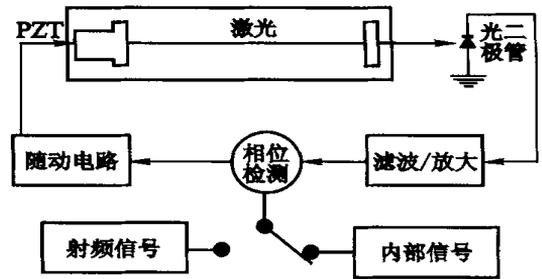


图 4 同步控制系统示意图

Fig. 4 The basic system setup of timing control

要。在北京大学射频光阴极驱动激光系统的设计中,主要考虑了种子激光的产生、激光放大器的实现以及激光脉冲与射频信号的同步问题等。在种子激光系统的选择方面,首先考虑的是激光的稳定性,采用半导体泵浦的 CW 激光器对 Ti Sapphire 振荡器泵浦是目前国际发展趋势。在激光放大器方面,在满足需要的同时,尽可能利用现有的商业产品组成稳定可靠、使用与维护均较简便的系统。但是,由于受市场供应情况的限制,同时实现单脉冲功率为 500 μ J、重复频率达 50 Hz 且纵向波形可调存在一定的困难。对于激光脉冲与射频信号的同步,拟采用国际上较为普遍的方法,即振荡器腔长的控制、脉冲选单与泵浦的同步以及输出脉冲的相位调整。

参考文献:

- [1] Yeremian D. Requirements for RF Guns[A]. Proceedings of the Laser for RF Guns Workshop[C]. US: National Technical Information Service, Department of Commerce, 1994. 123 ~ 124.
- [2] The LCLS Design Study Group. Linac Coherent Light Source (LCLS) Design Study Report: Stanford, CA, 94305[R]. USA: Stanford University, 1998.
- [3] Alley R, Bharadwaj V, Clendenin J, et al. The Design for the LCLS RF Photoinjector[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1999, A429: 324 ~ 331.
- [4] John D. Capabilities of Lasers, Present and Future [A]. Proceedings of the Laser for RF Guns Workshop[C]. US: National Technical Information Service, Department of Commerce, 1994. 23 ~ 39.
- [5] Weiner A, Leaird D, Patel J, et al. Programmable Femtosecond Pulse Shaping by Use of a Multielement Liquid-crystal Phase Modulator [J]. Optics Letters, 1990, 15(6): 326 ~ 328.