

文章编号 1004-924X(2011)10-2379-07

超快电子脉冲的时域压缩

田进寿¹,雷晓红^{1,2*},温文龙¹,徐向晏¹,王俊锋¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:实现电子脉冲在时域上的压缩是提高条纹相机以及超快电子衍射仪等超快诊断仪器时间分辨能力的关键,本文提出用时间聚焦的方法来改善超快诊断技术的时间分辨能力。通过在时间聚焦电极上加随时间线性增加的电场来补偿光电子在光电阴极和阳极之间的时间弥散,从而使快电子相对变慢,慢电子相对变快,达到在时域压缩电子脉冲的目的。用 Monte Carlo 方法和有限差分法对大量光电子的追踪模拟显示,这种利用随时间变化的电场对电子脉冲速度进行调制的方法可以将初始时间宽度为 300 fs 的电子脉冲压缩到 50 fs,为研制时间分辨能力高于 100 fs 的条纹相机和超快电子衍射仪等超快诊断技术提供了一种思路。

关键词:超快诊断;时间聚焦;时间分辨力;Monte Carlo 法;有限差分法

中图分类号:O463;TB872 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2379

Compression of electron pulses in temporal domain

TIAN Jin-shou¹, LEI Xiao-hong^{1,2*}, WEN Wen-long¹, XU Xiang-yan¹, Wang Jun-feng¹

(1. *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: lxh2009206@163.com*

Abstract: The compression of electron pulses in the temporal domain is a core technique to improve the temporal resolution of ultrafast diagnosis instruments, such as streak cameras and ultrafast electron diffraction systems. In this paper, a time focusing technique is adopted to potentially improve the physical temporal resolutions of streak cameras and ultrafast electron diffraction systems. This method uses a time-dependent acceleration field to greatly compensate the temporal dispersion between photocathode and anode to accelerate the slow electrons and decelerate the fast electrons, relatively. As a result, the temporal dispersion due to an initial energy spread can be compensated to a large extent at the output of time focusing region. Tracing and simulating a large number of photoelectrons through Monte-Carlo and finite difference methods shows that the electron pulse with a 300 fs can be compressed to 50 fs, which lays a powerful foundation for developing the streak cameras and ultrafast e-

收稿日期:2011-03-01;修订日期:2011-04-06.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 60901036);国家自然科学基金面上基金资助项目(No. 60777027);中科院创新实验室基金资助项目(No. CXJJ-10-S13)

electron diffraction systems with better than 100 fs temporal resolution.

Key words: ultrafast diagnosis; time focusing; temporal resolution; Monte-Carlo method; finite difference method

1 引言

超快诊断技术是惯性约束核聚变、Z-箍缩、同步辐射、光生物学、光化学、超快光谱以及 X 光激光等尖端科学研究领域中的核心技术手段^[1-5]。限制超快诊断技术时间分辨能力的因素主要有：电子初时间弥散、空间电荷效应、电子运行路径等。E. K. Zavoiski 和 S. D. Fanchenko 在 50 年代就预言变像管时间分辨率极限可以达到 10 fs^[6]，多年来人们一直在向这个方向努力，并且取得了显著进展：其中 Z. H. Chang^[7] 等人在条纹变像管阳极后面设置宽度为 5 μm 的狭缝，将同步扫描条纹相机的时间分辨能力提高到 280 fs；P. A. Janimagi^[8] 和 J. Feng^[9] 等人分别设计了“S”型和环型条纹变像管，通过缩小阴极不同位置发射出来的光电子到达偏转入口处的光程差，分别将电子脉冲的物理时间弥散减小到 40 fs 和 50 fs；Peter Baum 和 Ahmed H. Zewail 将宽度为皮秒量级电子脉冲注入到强飞秒激光驻波场中，利用有质动力学原理分离出 10 fs 的电子脉冲^[10]，而将宽度为皮秒量级的电子脉冲注入到两束频率和强度不同且相向传播的飞秒激光共同作用的区域时，同样利用有质动力学技术能够分离出 15 as 电子脉冲^[11]可见，人们在提高超快诊断技术的时间分辨能力方面取得了长足的进展。本文通过在超快诊断设备中运用时间聚焦技术，对电子脉冲进行波前矫正，使快电子相对变慢，慢电子相对加速，以减小电子束的时间弥散，从而减小电子脉冲的时间弥散，最终达到提高超快诊断技术整体时间分辨力的效果，为超快诊断设备的时间分辨力突破 100 fs 提供了强有力的理论支持。

2 超快电子枪结构

超快电子枪结构的截面结构如图 1 所示：整管由光阴极、阳极、时间聚焦极和空间聚焦极组成。其中阳极、时间聚焦极和空间聚焦极都为膜

孔透镜，空间聚焦透镜由 3 片单膜孔透镜组成，膜孔的半径为 1.5 mm。阴极与阳极间距为 1 mm，电场强度为 10 kV/mm，阳极电压为 0 V，它也是时间聚焦区的入口。光电子进入时间聚焦区域时，将按照进入的时间先后顺序被加速，较早进入到时间聚焦区域的快电子由于受到的加速场较弱，获得的加速度相对较小，随着时间的推移，加在时间聚焦电极上的电压逐渐增大，那么后续进入到时间聚焦区域的慢电子得到较大的加速度，使原来的快电子相对变慢，而慢电子相对变快，在经过时间聚焦区后可以补偿由阴极和阳极之间的场强所引起的时间弥散。空间聚焦区的入口作为时间聚焦区的出口，这在整个设计中具有很重要的作用。

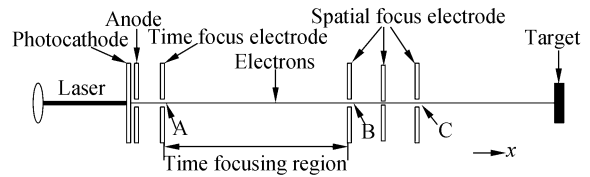


图 1 新型超快电子枪结构的横截面图

Fig. 1 Cross-sectional drawing of new ultrafast electron gun

3 时间聚焦技术对电子脉冲的压缩

在超快电子枪中，由于同一时刻从光阴极上发出的光电子初始状态（初能量、发射角度以及初始位置等）及光电子之间库仑相互作用和路径的不同，都会造成光电子的渡越时间弥散，这些物理原因所决定的时间弥散一般称为超快诊断技术的物理时间弥散 Δt_{phys} ，可以表示为：

$$\Delta t_{\text{phys}} = \sqrt{\Delta t_{\text{pa}}^2 + \Delta t_{\text{tf}}^2 + \Delta t_{\text{sf}}^2}$$

其中 Δt_{pa} 、 Δt_{tf} 、 Δt_{sf} 分别是阴极与阳极之间、时间聚焦区、空间聚焦区的时间弥散。

3.1 阴极与阳极之间的时间弥散

由实践可知影响物理时间分辨率最重要的因

素是不同初能量和初角度的光电子经过阴极与阳极而引起的渡越时间弥散,其经验公式如下^[12]:

$$\Delta t_{pa} = 2.36 \sqrt{\delta_e} / E,$$

其中 δ_e 为光电子初始能量峰值半高宽度, E 为阴极附近场强。电子的初能量主要由光阴极物质的特性和工艺水平所决定。

3.2 时间聚焦区的时间弥散

时间聚焦技术就是在时间聚焦区域的时间聚焦电极上加线性增加的斜坡电压,这样速度较快的电子将会得到较小的加速度,速度较慢的电子可以得到较大的加速度,即对电子脉冲进行波前矫正,使电子脉冲在通过时间聚焦区域后快电子相对被减速而变慢,慢电子相对被加速变快,当全部电子到达时间聚焦区域出口位置时,电子束的时间弥散变小(阴阳电极之间的时间弥散得到了抵消),从而提高超快诊断设备的物理时间分辨力。

在不考虑空间电荷效应时,电子在随时间增加的电场中的轴向运动方程式如下:

$$E_x = E_0 + Kt, \tag{1}$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -eE_x, \tag{2}$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x(t), \tag{3}$$

其中 x 是光电子离开阴极的轴向距离, E_0 是时间聚焦电极上的初始预偏电压, K 是加在时间聚焦区上电压的斜率, v_x 是电子沿轴向的速度, m 是电子的质量, e 是电子的电量。从以上三式可以得到:

$$v_x(t) = -\frac{e}{m}(E_0 t + \frac{1}{2} K t^2) + v_0, \tag{4}$$

其中 v_0 为电子的初速度。为了讨论简单,假设所有电子的初速度是相同的。

从光阴极上发射出来的电子,其初能量、方位角、仰角、初位置都满足一定的统计分布。利用 Monte-Carlo 方法对其统计分析进行抽样。在追踪电子轨迹的时候,既存在稳定的电场、也存在随时间变化的电场。在计算过程中,主要用到如下一些方法:当给定飞秒电子衍射系统的电(磁)极结构参数时,所有电场(静电或变化场)均采用有限差分法计算,电子轨迹追踪则用四阶 Runge-

Kutta 法计算。

电子的初位置分布可以是均匀分布(均匀光照射时)或近似于高斯分布(激光近距离照射),光电子的初能量一般认为服从 β 分布。仰角服从余弦分布,方位角服从均匀分布。当给定光电子的初能量,作为比较,图 2 为不加斜坡电压时,2 000 个高斯分布的电子在脉冲时间分布的峰值半宽度 FWHM 取 300 fs 时,到达 A 点的时间弥散。

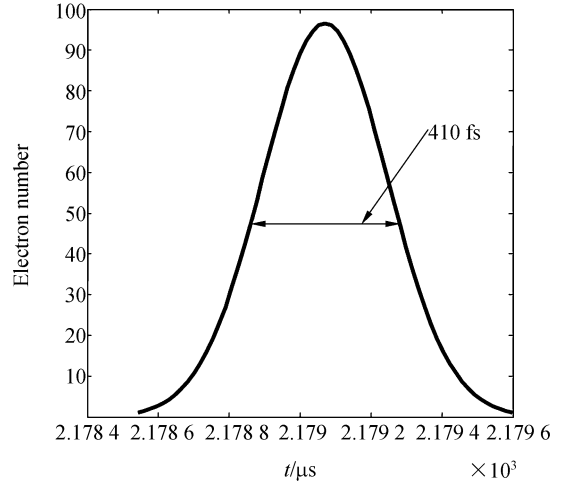
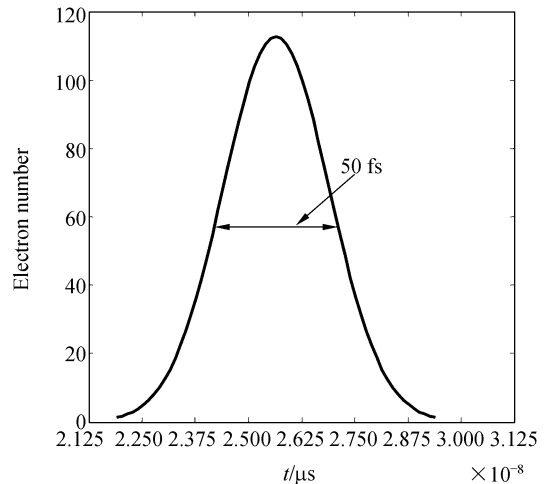


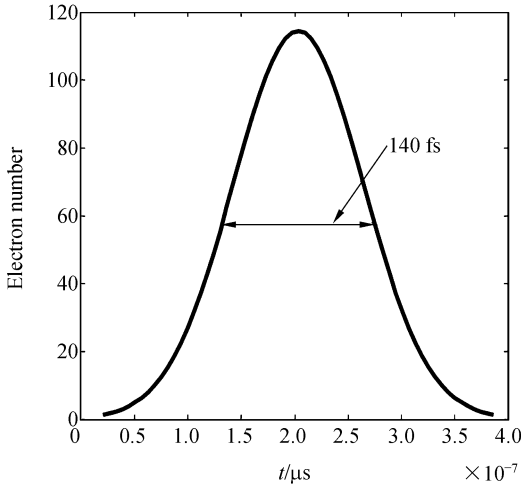
图 2 初始电子脉宽为 300 fs,电子脉冲到达 A 点的峰值半宽度(不加斜坡电压)

Fig. 2 FWHM of the electron pulse with initial pulse width of 300 fs at point A (without ramp voltage)



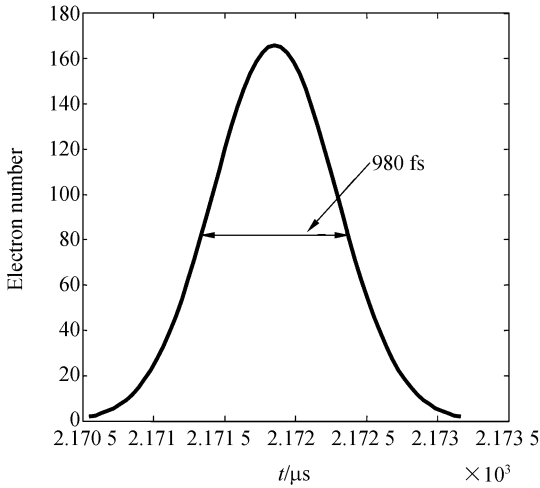
(a)初始电子脉冲宽度为 300 fs,电子脉冲到达 B 点的峰值半宽度

(a) FWHM of the electron pulse with initial pulse width of 300 fs at point B



(b) 初始电子脉冲宽度为 800 fs, 电子脉冲到达 B 点的峰值半宽度

(b) FWHM of the electron pulse with initial pulse width of 800 fs at point B



(c) 初始电子脉冲宽度为 3 ps, 电子脉冲到达 B 点的峰值半宽度

(c) FWHM of the electron pulse with initial pulse width of 3 ps at point B

图 3 初始电子脉冲宽不同, 电子脉冲到 B 点的峰值半宽度(加斜坡电压)

Fig. 3 FWHM of the electron pulse with different initial pulses widths at point B (with ramp voltage)

当取 E_0 为 10 V, K 为 8×10^7 V/ μ s 时, 在时间聚焦极上的斜坡电压从 10 V 逐渐增大到 4 kV 时, 时间峰值半宽度分别为 300 fs、800 fs 和 3 ps 的电子脉冲经过电子加速区和时间聚焦区达到 B

点的峰值半宽度分别压缩到 50, 140 和 980 fs, 如图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)所示。

由上图可以看出, 在聚焦电极上加适当斜率变化的电场, 并且经过一段合适距离以后, 电子脉冲的时间弥散可以得到很好的补偿, 这正是改善物理时间分辨力的根本所在, 证明时间聚焦技术在改善物理时间分辨力方面效果十分明显。

当 E_0 为 10 V, 2 000 个的时间按高斯分布的电子形成电子脉冲的峰值半宽度为 1 ps 的电子脉冲时, K 取 0.8×10^6 , 8×10^7 , 4×10^8 , 8×10^8 V/ μ s 时, 电子脉冲在 B 的脉冲峰值半宽度分别如图 4 所示。

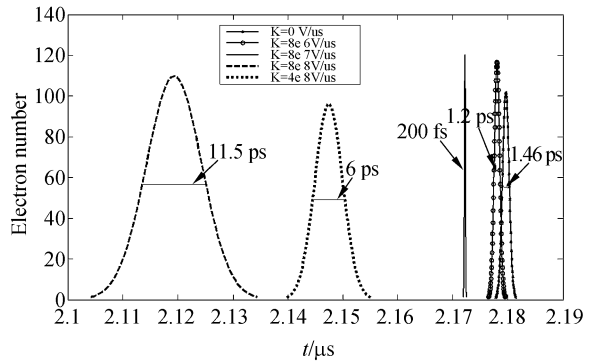


图 4 电压斜率不同时电子脉冲在 B 点的峰值半宽度

Fig. 4 Electron pulse distribution at point B with ramp voltage in different slopes

图 4 表明随着电压斜率的增加, 电子的速度是不断变大的, 即电子到达 B 点的渡越时间不断减少。从图 4 还可以看出, 当斜坡电压的斜率小于 8×10^7 V/ μ s 时, 随着斜率的变大, 脉冲压缩效果越来越明显, 即物理时间分辨力可以不断得到改善。然而当斜坡电压的斜率大于 8×10^7 V/ μ s 后, 随着斜率的增大, 电子脉冲的物理时间弥散不但得不到压缩, 反而被放大了, 这种现象表明出现了过补偿^[13-14]。过补偿就是后到的电子加速度过大, 在经过一段距离后会超过先到的电子。可见在采用时间聚焦技术过程中, 斜坡电压斜率的选择十分重要, 只有对既定模型选择合适的值, 这个值既要最大限度地改善时间分辨力, 又要避免过补偿现象的发生, 才可以最大限度地改善物理时间分辨力的效果。在所设计的模型中, 经过多次模拟计算, 认为 K 取 8×10^7 V/ μ s 是一个比较合

适的值,所以取这个值作为斜坡电压的斜率来最大限度地改善超快电子枪的物理时间弥散。同时,使在电子束经过时间聚焦区之后,其能量随着斜坡电压发生变化^[15]。

3.3 空间聚焦区的时间弥散

空间聚焦区是由 3 个单膜片组成的单透镜区域,电子主要受到垂直于轴向力的作用,对轴向的速度影响不大,由于这个区域很短,只有 2 cm,在此造成的时间弥散可以不用考虑。

作为物理时间分辨力的一个整体评价,计算了时间峰值半宽度为 300 fs 的脉冲在 C 点的时间调制传递函数^[16],如图 5 所示。由图可以看出,加了斜坡电压之后,物理时间分辨力可以达到 43 fs,而不加斜坡电压时为 266 fs,可以看出运用了时间聚焦技术后物理时间分辨力得到了很大程度的改善,证明时间聚焦技术在改善超快电子枪物理时间分辨力方面是十分有用的。

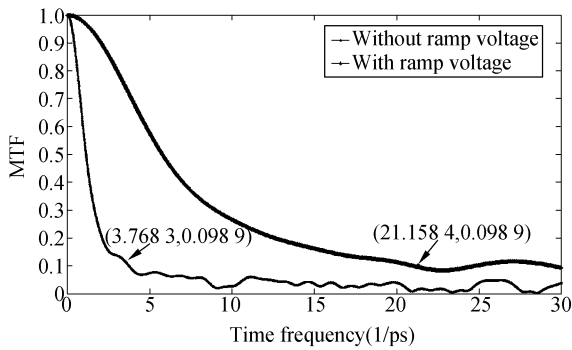


图 5 在超快电子枪的时间聚焦电极上加/不加斜坡电压时,在目标处电子脉冲的 MTF

Fig. 5 MTF of electron pulse at the target with/without ramp voltage added on time focus electrode

3.4 超快诊断设备的时间分辨率

众所周知,超快诊断设备的时间分辨力是由物理时间分辨力和技术时间分辨力共同决定的。技术时间分辨力取决于扫描速度和扫描方向的空间分辨力,如下式

$$\Delta t_{\text{tech}} = \omega / v .$$

ω 为扫描方向空间分辨力, v 为偏转板的扫描速度。相机空间分辨力可以达到 10 lp/mm,扫描速度可以达到 8.4×10^{-5} mm/fs,因此,可以得到 $\Delta t_{\text{tech}} \approx 59$ fs。取 300 fs 高斯脉冲为例,可以得到条纹变像管的时间分辨力 $\Delta t = \sqrt{\Delta t_{\text{tech}}^2 + \Delta t_{\text{phys}}^2} \approx 73$ fs,可见,将电子脉冲压缩技术应用到飞秒条纹相机的设计中,有望研制时间分辨能力高于 100 fs 的条纹相机。

4 结 论

本文介绍了一种电子脉冲时域压缩技术,通过在时间聚焦电极上加合适的斜坡电压,可以补偿光电子在光电阴极和阳极之间的时间弥散,从而达到改善物理时间分辨力的目的。但在采用时间聚焦技术过程中,斜坡电压斜率的选择是十分重要的,只有对既定的模型选择合适的值,使其既能最大限度地改善时间分辨力,又可以避免过补偿现象的发生,才可以达到最大限度改善物理时间分辨力的效果。通过 Monte Carlo 方法和有限差分法对大量光电子的追踪模拟表明:这种利用随时间变化的电场实现电子脉冲速度调制的方法将初时间弥散为 300 fs 的电子脉冲压缩到 43 fs,为研制时间分辨能力高于 100 fs 的条纹相机和超快电子衍射仪等超快诊断技术提供了一种思路。

参考文献:

[1] BONTE C, HARMAND M, DORCHIES F, et al. . High dynamic range streak camera for subpicosecond time-resolved X-ray spectroscopy[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, 78: 043503.
 [2] MALONE R M, CAPELLE G A, CELESTE J R, et al. . Overview of the line-imaging VISAR diagnostic

at the National Ignition Facility (NIF) [J]. *SPIE*, 2006, 6342:634220-1.
 [3] BARWICK B, FLANNIGAN D J, ZEWAIL A H. Photon-induced near-field electron microscopy[J]. *Nature*, 2009, 462:902-906.
 [4] SUN K X, NISHIMURA W, NEVADA B, et al. . A second-generation X-ray streak camera with true large format, high dynamic range, and high reliabil-

- ity[J]. *SPIE*, 2005, 5920: 592008-1-592008-16.
- [5] DWYER J R, HEBEISEN C T, MILLER R J D, *et al.*. Femtosecond electron diffraction: 'making the molecular movie' [J]. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2006, 364(1840): 741-778.
- [6] ZAVOISKII E K, FANCHENKO S D. Image converter high speed photography with $10^{-9} \sim 10^{-14}$ s time resolution[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(6): 1155-1167.
- [7] SHAKYA M M, CHANG Z H. An accumulative X-ray streak camera with 280 fs resolution[J]. *SPIE*, 2004, 5534: 125-131.
- [8] JAANIMAGI P A. Breaking the 100-fs barrier with a streak camera[J]. *SPIE*, 2004, 5194: 171-182.
- [9] FENG J, WAN W, QIANG J, *et al.*. An ultra-fast X-ray streak camera for the study of magnetization dynamics [J]. *SPIE*, 2005, 5920: 592009-1-592009-8.
- [10] BAUM P, ZEWEIL A H. Breaking resolution limits in ultrafast electron diffraction and microscopy [J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2006, 103(44): 16105-16110.
- [11] BAUM P, ZEWEIL A H. Attosecond electron pulses for 4D diffraction and microscopy [C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(47): 18409-18414.
- [12] TAKAHASHI A, NISHIZAWA M, INAGAKI Y, *et al.*. New femtosecond streak camera with temporal resolution of 180 fs [J]. *SPIE*, 2001, 2116: 275-283.
- [13] QIANG J, FENG J, HUANG G, *et al.*. Streak camera time resolution improvement using a time-dependent field [C]. *Proceedings of PAC07, 2007, FRPMS025*: 3973-3975.
- [14] QIANG J, BYRD J M, FENG J, *et al.*. X-ray streak camera temporal resolution improvement using a longitudinal time-dependent field[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 598: 465-469.
- [15] LIU J, NIU L H, LI J, *et al.*. Theoretical analysis of a time focus and time amplifier cavity in streak tube[J]. *SPIE*, 2007, 6279: 62792I-1.
- [16] 田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 飞秒电子衍射系统中调制传递函数的理论计算[J]. *物理学报*, 2006, 55(7): 3368-3374.
- TIAN J SH, ZHAO B SH, WU J J, *et al.*. Theoretical calculation of the modulation transfer function in a femto-second electron diffraction system [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2006, 55(7): 3368-3374. (in Chinese)

作者简介:



田进寿(1970—),男,甘肃人,博士,研究员,博士生导师,1993年于西北师范大学获得学士学位,1999年、2003年于中科院西安光学精密机械研究所分别获得硕士以及博士学位,主要从事超快诊断(条纹相机,超快电子衍射仪等)等方面的研究。E-mail: tianjns@opt.ac.cn



雷晓红(1985—),女,陕西人,硕士研究生,2008年于西安邮电学院获得学士学位。主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: lxh2009206@163.com



温文龙(1977—),男,陕西人,助理研究员,2000年于桂林电子科技大学获得工学学士学位,2005年于西北大学获得硕士学位,主要从事超快诊断系统与条纹相机系统的设计及相关电路的研究。E-mail: romber@opt. ac. cn



王俊锋(1963—),男,陕西西安人,高级工程师。主要从事超快诊断高压电路的研制工作。E-mail: kwjf@opt. ac. cn



徐向晏(1975—),男,甘肃人,博士后,副研究员,1995年于西北师范大学物理系获得理学学士学位,2001年于中科院西安光学精密机械研究所获物理电子学硕士学位,2007年在上海技术物理研究所做博士后,从事红外探测器及微电子学方面的研究,现在主要从事物理电子学、光电子学和超快诊断技术的研究。E-mail: xiangyanxu@opt. ac. cn

● 下期预告

Y 型腔正交偏振氩氦激光器及其基本特征

肖光宗,龙兴武,张 斌

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院 光电工程系,湖南 长沙 410073)

研制了基于 Y 型腔结构的新型正交偏振氩氦激光器。介绍了该激光器的基本结构和基本原理;通过实验研究了该激光器的输出光模式、输出光功率、输出光频差调谐特性和频差闭锁特性等。通过改变共用段反射镜上的压电陶瓷电压,观察了闭锁状态时,随着总腔长调谐两偏振光的光强变化规律,分析了闭锁状态下不同偏振态纵模之间的相互作用机理。与以往产生双频激光的方案进行对比,分析了 Y 型腔正交偏振氩氦激光器的特点及其在频差稳定性方面的优势和制约因素。实验结果表明,利用 Y 型腔结构可以实现氩氦激光器的频率分裂;激光器最大输出功率约为 $235.2 \mu\text{W}$;通过调节共用段反射镜上的压电陶瓷电压可以线性调节激光器的输出频差;实验中激光器的频差为 $22 \sim 1\ 018 \text{ MHz}$,闭锁阈值频差约 22 MHz 。