

基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究

朱敏 田进寿 温文龙 王俊锋 曹希斌 卢裕 徐向晏 赛小锋 刘虎林 王兴 李伟华

Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD

Zhu Min Tian Jin-Shou Wen Wen-Long Wang Jun-Feng Cao Xi-Bin Lu Yu Xu Xiang-Yan Sai Xiao-Feng Liu Hu-Lin Wang Xing Li Wei-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 098501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.098501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.098501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光声内窥镜系统在人体直肠癌离体组织中的实验研究

The human colorectal cancer tissue in vitro experimental study based on photoacoustic endoscopic system

物理学报.2014, 63(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084204>

全光固体条纹相机的理论及其静态实验研究

Theoretical and static experiment research on all optical solid state streak camera

物理学报.2014, 63(6): 060702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060702>

微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析

Influence analysis of saturation effect of microchannel plate on dynamic range of streak cameras

物理学报.2012, 61(19): 194211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194211>

利用色彩转换法制备高色稳定性的柔性白色有机电致发光器件

Highly color-stability flexible white organic light-emitting devices fabricated by color conversion method

物理学报.2012, 61(17): 178502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.178502>

电荷云尺寸对紫外光子计数成像探测器性能的影响

Influence of charge cloud size on performance of UV photon-counting imaging detector

物理学报.2011, 60(4): 048501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.048501>

基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究*

朱敏^{1)2)†} 田进寿¹⁾ 温文龙¹⁾ 王俊锋¹⁾ 曹希斌¹⁾ 卢裕¹⁾ 徐向晏¹⁾
 赛小锋¹⁾ 刘虎林¹⁾ 王兴¹⁾ 李伟华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, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年9月20日收到; 2014年12月11日收到修改稿)

为了实现对更弱、以及物理量跨度更大的信号探测, 满足材料、生物、信息、半导体物理以及能源等重大科学领域对诊断精密化的进一步需求, 需要提高条纹相机的动态范围、空间分辨率和信噪比. 为此, 本文研制了基于电子轰击式 CCD (EBCCD) 的大动态条纹相机, 条纹变像管采用时间和空间方向分别聚焦的矩形栅电极和电四极透镜结构, 可降低空间电荷效应. 并提高电子加速电压, 减小电子渡越时间以降低空间电荷相互作用时间. 采用基于电子轰击读出技术的背照式 CCD (BCCD) 作为读出器件, 取代传统的像增强 CCD (ICCD) 以缩短图像转换链, 较大地降低了超快诊断设备转换过程中的图像衰减, 从而提高条纹相机图像的信噪比、空间分辨率和动态范围. 实验得到静态空间分辨率高于 35 lp/mm, 动态空间分辨率达到 20 lp/mm, 偏转灵敏度为 60.76 mm/kV, 动态范围达到 2094 : 1, 扫描速度非线性为 5.04%, 条纹相机的电子轰击半导体 (EBS) 增益达到 3000 以上.

关键词: 条纹相机, 电子轰击式 CCD, 空间分辨率, 动态范围

PACS: 85.60.Bt, 42.79.Pw, 07.07.Hj

DOI: 10.7498/aps.64.098501

1 引言

超快现象(持续时间小于 1 μs , 多数在皮秒至飞秒量级, 甚至于阿秒量级)广泛存在于自然科学中. 基于时空映射测量原理的变像管超快诊断技术是超快现象研究领域不可或缺的重要手段, 可实现超快现象高时空精密物理量诊断^[1,2]. 动态范围是衡量条纹相机在一次测量中能够分辨最大和最小输入信号的能力, 动态范围小的条纹相机造成的测量后果是: 弱信号被噪声淹没, 强信号出现饱和, 原始信号的脉冲宽度、脉冲间隔以及强度等严重失真. 随着研究的不断深入, 单次扫描变像管的探测灵敏度以及动态范围已不能满足诊断精密化的需求^[3]. 为了弥补这种不足, 对于微弱重复发光现象通常采用同步扫描模式, 将图像积分输出, 但

噪声信号也被积分, 整个图像的信噪比并无明显提升. 条纹相机中噪声的主要来源有: 莫尔条纹、疵点、光纤阵列不连续性(鸡丝)汇集在成像系统中, 被 CCD 成像为固定图像噪声. 而且, 光在成像系统的界面上以及面板内的散射进一步降低了系统的调制传递函数(modulation transfer function, MTF). 光纤面板的传输损耗、低收集效率以及像管荧光屏近朗伯输出, 荧光屏低的转换效率以及输出波长和 CCD 响应波长的失配等因素降低了系统的增益, 这就要求增强器工作在高增益模式下. 但在高增益模式下又会降低图像的信噪比, 且在低照度下使得闪烁和雪花噪声增大. 微通道板(micro channel plate, MCP)在严重的饱和状态下传递的放大信号, 经荧光屏光学读出后, 形成对比度传递的偏离, 将造成条纹相机沿时间轴和空间轴的分辨率恶化, 也限制了条纹相机的动态范围, 而 MCP 的

* 国家自然科学基金(批准号: 11274377)和国家财政部重大科研仪器研制项目-高性能条纹相机的研制(批准号: ZDY2011-2)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhumin@opt.ac.cn

最大输出电荷也限制了条纹相机的最大可测量信号. 如果增益设置过低, 系统灵敏度不足以实现对微弱信号的探测, 将获得一个低的动态范围. 如果增益过高, 一个单光电子能够产生相对于噪声本底级别要高得多的输出信号数量, 将致使可被线性放大的条纹管光电子的数量降低, 从而产生一个量子限定, 同样会获得一个低值的动态范围. 甚至当输入信号过大时, 会造成MCP硬饱和而失去空间分辨能力, MCP的离子反馈作用也会造成像增强器的空间分辨能力恶化^[4]. MCP像增强器具有低的对比度, 且其本身的非线性动态范围减弱了像增强CCD (intensified CCD, ICCD) 的对比度.

而电子轰击式CCD器件 (electron-bombarded CCD, EBCCD) 通过在变像管中插入减薄的背照式CCD (back-illuminated CCD, BCCD) 替换MCP和荧光屏来简化成像过程中的光电图像传递链. 光电子直接入射到CCD上避免了转换过程的低量子效率以及转换过程中的图像衰减, 从而使图像的信噪比(SNR)大大提高, 能获得更高的动态范围^[5]. 理论和实践证明, EBCCD是一种读出噪声最低的电子倍增预放大器, 其平均读出噪声只有0.07电子/像元, 兼顾了增益高和固有噪声小的双重优点. 在中等微光和所有的光照条件下, EBCCD几乎无噪声的增益和极佳的MTF使其性能全面超过通常的ICCD, 且其高增益足以探测单个光电子.

因为EBCCD不使用MCP, 其信噪比不会因MCP而恶化, 其信噪比一般会标准ICCD的两倍. 日本滨松公司的大动态条纹相机中也避免使用MCP作为图像增强器件^[6], EBCCD的主要技术瓶颈是如何解决CCD与可见光像管阴极制作过程中高温烘烤等除气工艺的兼容问题, 但在X射线波段响应的像管中已经有成功应用的先例. Feng等已经将EBCCD成功应用在X射线飞秒条纹相机中

并取得了阴极上8 μm的空间分辨能力以及233 fs的时间分辨率^[7]. 本文将背照式CCD与变像管耦合直接收集能量为15 keV的光电子, 避免MCP的饱和效应^[4]以及MCP高增益下引入的高噪声, 同时避开了强输入光情况下复杂的空间电荷效应^[8], 在较高增益的前提下提高动态范围.

2 影响条纹相机动态范围的因素

条纹相机的动态范围是指在线性条件下其能够探测到最强输入信号 I_{max} 与最弱输入信号 I_{min} (一般取噪声均方根)之比, 国内用户在此定义的基础上还要求: 最强信号脉冲的宽度不能超过最弱信号脉冲宽度的120%. 图1是条纹相机成像系统图像传递链的示意图, 其总的动态范围和各组成模块的动态范围构成逻辑“与”的关系. 即

$$R_{系统} = R_{光机} \cap R_{条纹管} \cap R_{像增强器} \cap R_{CCD} \cap R_{计算机},$$

其中, $R_{光机}$ 是指输入光学系统的动态范围, 主要由输入透镜的耦合效率、界面反射、杂散背景光和损伤阈值等因素决定, 其动态范围一般大于 10^6 . $R_{条纹管}$ 是指条纹变像管本身的动态范围, 由光电阴极灵敏度、噪声、空间电荷效应、电子脉冲宽度、荧光屏的转化效率等决定, 牛憨笨院士对其有详细的论述^[9]. $R_{像增强器}$ 是指像增强器本身的动态范围, 由光电阴极灵敏度、噪声、空间电荷效应、MCP的增益饱和效应、荧光屏的转化效率等决定, 如图2所示, 法国PHOTONIS公司的低噪声S20阴极及小阻抗单MCP的制冷型像增强器^[10]在设置增益为 10^4 的情况下动态范围可以达到 10^4 — 10^5 , 而MCP本身对条纹相机动态范围的影响潘京生教授也有详细的论述^[4]. R_{CCD} 是指CCD的动态范

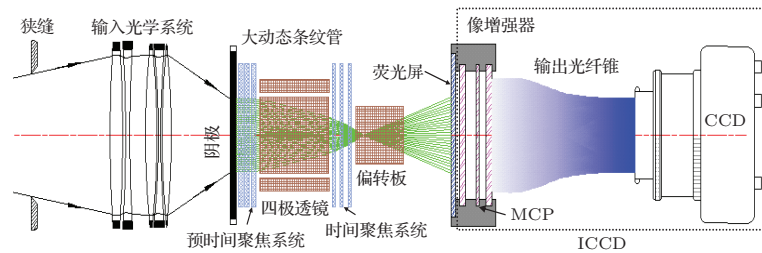


图1 大动态条纹相机光电成像系统图像链示意图

Fig. 1. Image chain schematic of large dynamic streak camera photoelectric imaging system.

围, 由 CCD 每个像元等效噪声 ($4\text{--}5 e^-$) 以及满阱电荷容量决定 ($5 \times 10^5 e^-$), 以 PI 公司 SI 1000CCD 为例, 其动态可以达到 $10^4\text{--}10^5$ 左右. $R_{\text{计算机}}$ 是指计算机图像采集卡的动态范围 (灰度等级), 由图像采集卡位数决定 (16 位 ADC 转换器 65535, 如 SI 1000CCD).

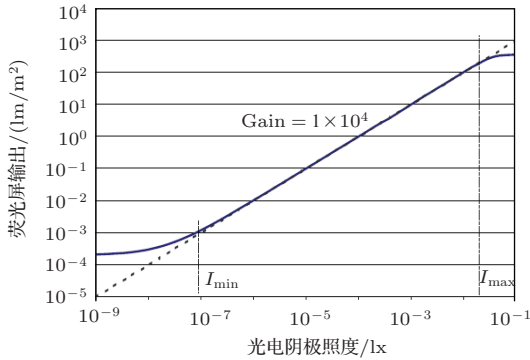


图 2 法国 Photonis 公司像增强器动态范围测试结果图
Fig. 2. The dynamic range test result of image intensifier of French Photonis company.

可见, 在采用低阻抗制冷型像增强器 (如图 2 动态范围 $10^4\text{--}10^5$)、满阱电荷大制冷型 CCD (如 SI 1000 动态范围可以达到 10^5) 以及高位 ADC 图像采集卡 (动态范围 65535) 的情况下, 条纹变像管本身的动态范围是限制条纹相机系统动态范围的主要瓶颈, 同时也与条纹相机系统的各组成模块的状态设置如像增强器的增益、CCD 的制冷温度以及各模块的匹配程度等因素密切相关.

为了提高条纹管的动态范围, 采用时间和空间方向分别聚焦的矩形框电极和电四极透镜的变像管结构, 降低空间电荷效应; 电四极透镜具有二阶像差系数小的特点, 可以提高空间分辨率; 同时加大阴极和栅极之间的加速电压, 减小电子在条纹管内的渡越时间以降低空间电荷相互作用时间. 舍弃传统的微通道板 (MCP) 和荧光屏的成像模式, 采用电子轰击读出技术的背照式 CCD 作为探测器, 使阴极发射出的光电子经过加速聚焦偏转后直接轰击背照式 CCD, 缩短了成像转换链, 减小图像质量的衰减, 有利于提高整机系统的动态范围.

3 基于 EBCCD 大动态条纹变像管

3.1 基于 EBCCD 条纹管的结构设计及基本参数

我们采用课题组最近研制的各向异性聚焦的条纹变像管 (如图 1), 该管型由光电阴极、时间预

聚焦电极、电四极透镜、时间聚焦电极、扫描偏转板以及内增强器组成, 其主要特点是时间和空间方向采用不同的聚焦方式, 增大阳极孔附近电子束斑, 降低最小束斑附近的电荷密度, 减弱空间电荷效应. 和传统的条纹变像管相比: 提高电子加速电压到 15 kV, 减小电子在条纹管内的渡越时间以降低空间电荷相互作用的时间; 采用时间方向和空间方向分别聚焦的矩形框电极和电四极透镜管型来降低空间电荷效应对时空分辨能力的限制; 采用二阶相差系数小的电四极透镜进行空间方向聚焦, 提高空间分辨率. 设计了物理弥散为 0.38 ps, 20 mm 狭缝长度边缘空间分辨率达到 56 lp/mm 条纹变像管. 各向异性聚焦条纹相机经过系统性能测试实验, 测得条纹相机静态空间分辨力为 35 lp/mm, 动态空间分辨力达到 25 lp/mm, 动态范围达到 950:1, 时间分辨力达到 8 ps^[11]. 为了进一步提高条纹相机的动态范围, 我们将原来的内增强器换成背照式 CCD, 其结构图和实物图分别见图 3 和图 4. 采用 ANDOR TECHNOLOGY 公司的 iKon-M DO934P 型相机, 内置的减薄背照式 CCD 芯片采用的是英国 E2V 公司的 CCD 47-10, 有效像素为 1024×1024 , 像面尺寸为 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$, 每个像素大小为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$. 最大读出速率为 5 MHz, 在 50 kHz 的读出速率下的读出噪声为 $2.9 e^-$, 帧转移速率达 4.4 fps. 峰值量子效率达到 95%, 因而探测灵敏度较高. 制冷达到 $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时可以使其暗电流噪声降低到 1 电子/小时.

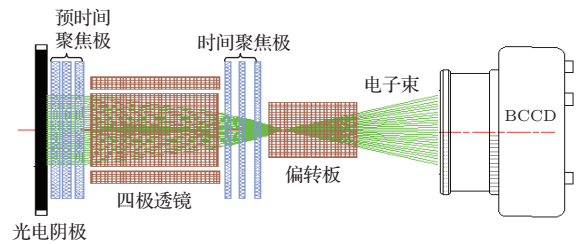


图 3 基于 EBCCD 的大动态条纹变像管结构图
Fig. 3. Structure of large dynamic range streak tube based on EBCCD.



图 4 基于 EBCCD 的大动态条纹相机实物图
Fig. 4. Material object of large dynamic range streak camera based on EBCCD.

3.2 基于EBCCD的条纹管EBS增益及噪声因子

传统条纹相机主要依靠MCP实现图像倍增, 基于EBCCD的条纹管主要依靠光电阴极发出的光电子直接入射到CCD的靶面上, 硅吸收入射光电子能量而产生电子空穴对, 形成电子轰击半导体(EBS)增益. 由于EBCCD的电子增益(EBS增益)与撞击CCD背面的初始电子动能成正比, 因此可通过改变加速电压来控制EBS增益达到最大值. 但对条纹相机来说, 调整加速电压往往意味着改变条纹相机的一些基本参数及工作状态(如时间分辨能力以及工作的真空度等), 因此, 一般是选用对电子收集效率高、半导体中的活跃区(非死区)能将入射电子的能量全部吸收的CCD. 提高CCD像元收集效率的方法有将CCD基片的厚度减薄到8—12 μm左右; 在CCD背面进行适当的钝化处理形成死层, 以减小电子与空穴的复合. 则大动态条纹管对应的EBS增益可表示为

$$G = \frac{(1-b)(V_a - V_d)}{3.64} = \frac{(1-0.16)(15000 - 2.33)}{3.64} = 3461, \quad (1)$$

式中, V_a 是条纹管的加速电压; V_d 是电子穿过CCD背面钝化层的压降; b 是电子的扩散系数.

基于EBCCD的条纹管的噪声因子可表示为

$$NCF = \sqrt{\frac{1 + F/G}{1 - b}} = \sqrt{\frac{1 + 0.2/3461}{1 - 0.16}} = 1.09, \quad (2)$$

其中 F 是法诺因子, 对于硅材料, $F_{\text{硅}} = 0.2$ ^[12], $b_{\text{硅}}$ 约为16%, 可见, 基于EBCCD的条纹管的噪声因子非常小, 远远小于MCP增益噪声因子的典型值2.0^[13], 因此电子轰击半导体过程产生的噪声与微通道板(MCP)电子增益过程的噪声相比是非常小的, 这有利于提高整机系统的信噪比和对弱信号的探测能力, 能获得更高的对比度和动态范围. 而且, 当EBS增益大于10时, 噪声因子主要决定于电子在CCD背面的扩散系数 b .

4 条纹相机系统性能测试

4.1 静态空间分辨率测试

采用带有分辨率的阴极作为标准测试分划板, 分划阴极狭缝方向的分辨率测试光刻条纹设计如

图5所示, 条纹沿阴极狭缝方向周期性重复排列, 布满整个阴极狭缝. 测试分划板的最高分辨为35 lp/mm, 狭缝宽度为0.12 mm. 静态分划阴极是周期性图案, 每个周期含有5 lp/mm, 10 lp/mm, 15 lp/mm, 20 lp/mm, 25 lp/mm, 30 lp/mm, 35 lp/mm共7组分辨率条纹, 每组为由1:1等宽黑白条纹; 每个周期长2.5 mm, 周期性排列至全阴极狭缝长度.

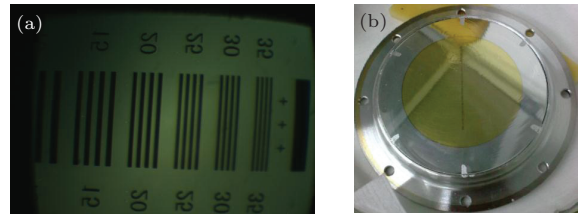


图5 空间分辨率测试用的周期性条纹和分划阴极 (a) 周期性排列的条纹; (b) 分划阴极

Fig. 5. The periodic streak and divided cathode of spatial resolution test. (a) The periodic streak; (b) the divided cathode.



图6 静态空间分辨率实验结果

Fig. 6. Experimental result of the static spatial resolution.

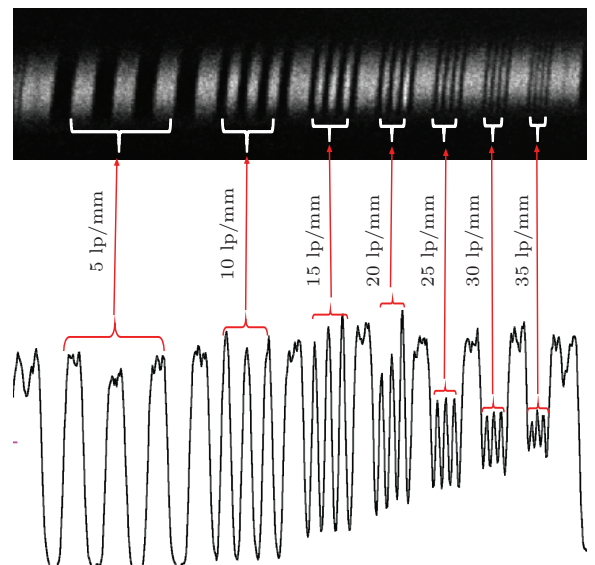


图7 静态空间分辨率局部放大图及其强度分布图
Fig. 7. Partial enlarged picture and intensity distribution curve of the static spatial resolution.

图6为静态空间分辨率实验测试结果, 由图7的局部放大图和强度分布图可以看出条纹相机系统的静态空间分辨率至少达到35 lp/mm, 根据输出图像灰度轮廓数据, 在5—30 lp/mm内对比度高, 在35 lp/mm分辨率条纹处, 根据对比度的计算公式:

$$CTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{3873.21 - 3283.19}{3873.21 + 3283.19} = 8.24\%, \quad (3)$$

其中 I_{max} 为最大强度, I_{min} 为最小强度, 计算出对比度为 $CTF = 8.24\%$, 大于人们公认的5% 评判标准.

4.2 偏转灵敏度测试

偏转灵敏度指的是单位偏转电压下, 电子束在荧光屏上所成像的偏移量. 偏转灵敏度越高, 条纹管的扫描速度越大, 从而技术时间分辨率越高. 偏转灵敏度的实验条件就是在静态空间分辨率的实验条件下给条纹管中的平折偏转板加了偏转电压, 上偏转板接高压电源, 由高压电源提供偏转电压, 下偏转板接地. 偏转电压从0 V到90 V, 每隔10 V取一个值.

由于图像采集显示的是像素位置(pixel number), 所以偏转量必须通过计算获得, 根据采用的CCD相机每个像素的间距为13 μm , 把像素个数乘以像素间距可得到偏转量. 图8为偏转电压与偏转量的关系, 通过线性拟合得到的斜率即为偏转灵敏度为60.76 mm/kV.

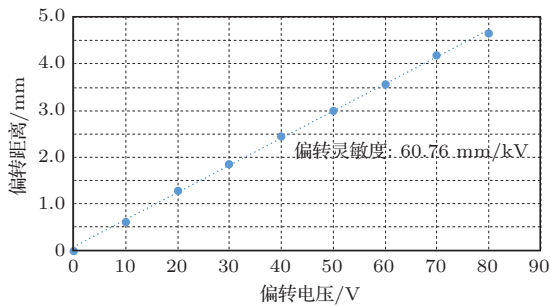


图8 偏转电压和偏转量的关系

Fig. 8. Relationship of deflection voltage and amount of deflection.

4.3 动态空间分辨率测试

动态空间分辨率测试采用Nd:YLF激光器的四倍频光, 光脉冲半高全宽(FWHM)为8 ps, 测试

光路如图9所示, 波长263 nm的紫外光经过透射式标准具后形成大约1/4光强递减序列脉冲, 脉冲间隔由标准具腔长决定, 测定动态空间分辨率采用脉冲间隔为500 ps的标准具.

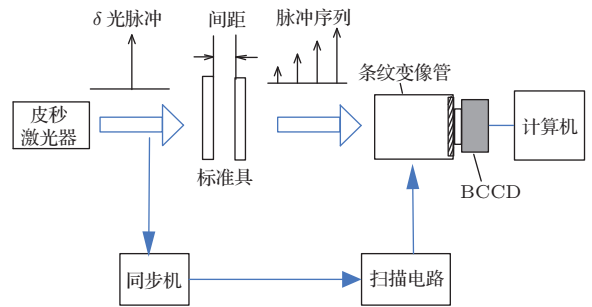


图9 动态空间分辨率标定实验

Fig. 9. Calibration experiment of dynamic spatial resolution.

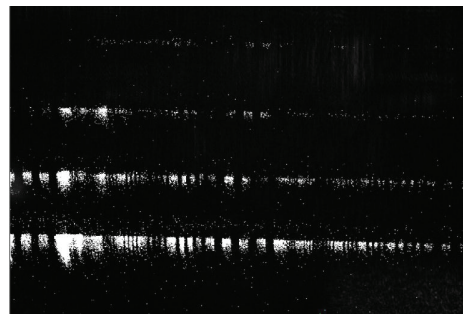


图10 3 ns档动态空间分辨率实验结果

Fig. 10. Experimental result of dynamic spatial resolution at 3 ns gear.

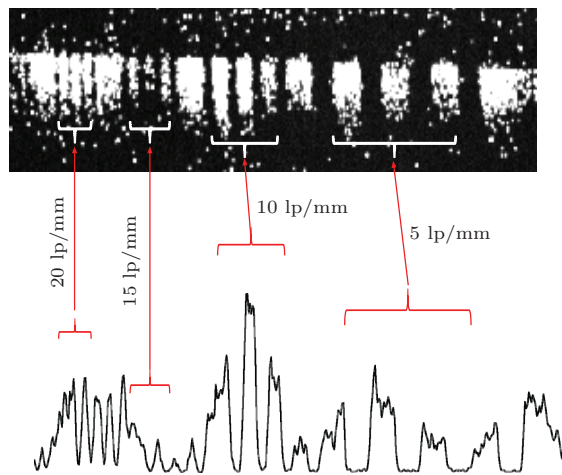


图11 动态空间分辨率局部放大图和强度分布图

Fig. 11. Partial enlarged picture and intensity distribution curve of the dynamic spatial resolution.

在全屏3 ns扫描档得到的动态条纹图像如图10所示, 图11为其局部放大图和强度分布图, 可以看出, 在动态空间分辨率为5—20 lp/mm范围内

其对比度都比较高, 其中分辨率为 20 lp/mm 时对应的对比度 CTF 也高达 22.67%.

4.4 动态范围测试

条纹相机动态范围的定义为, 条纹相机输出的最大强度脉冲的峰值与可分辨最小强度脉冲的峰值之比, 其中最大强度脉冲的宽度不能超过最小强度脉冲宽度的 120%.

在全屏扫描时间为 3 ns, 光脉冲间隔仍为 500 ps 时, 得到的动态范围实验图如图 12 所示,

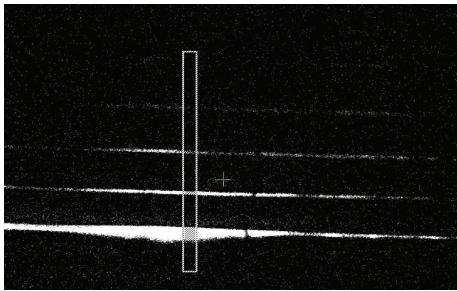


图 12 动态范围测试条纹分布

Fig. 12. Streak distribution of dynamic range.

因构成标准具的两个镜片很难调整到理想的平行状态, 多次反射后脉冲序列难于精确调整至光电阴极狭缝的同一位置, 导致实测脉冲序列强度与按照衰减倍率理论计算的脉冲序列强度有差异, 一般动态范围不依照标准具衰减倍率计算, 而是采用实测最强脉冲强度和可分辨的最弱脉冲强度, 减去背景噪声强度, 以其比值来计算, 图 13 为图 12 中截取适当宽度条纹对应的强度分布.

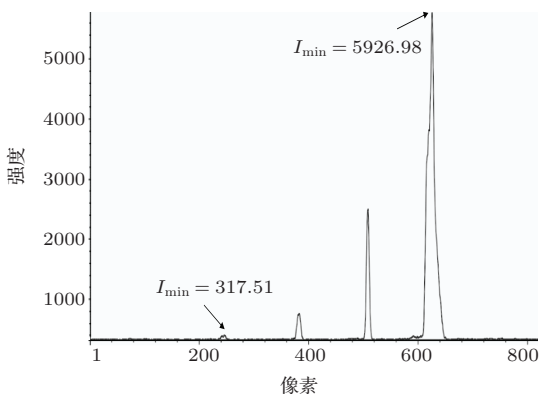


图 13 脉冲强度分布

Fig. 13. Distribution of pulse intensity.

从图 13 中可以得到最强脉冲强度 $I_{\max} = 5926.98$, 最弱脉冲强度 $I_{\min} = 317.51$, 背景噪声

$I_b = 314.83$, 且最强脉冲的宽度未超过最弱脉冲宽度的 120%. 则条纹相机的动态范围计算如下:

$$D = \frac{I_{\max} - I_b}{I_{\min} - I_b} = \frac{5926.98 - 314.83}{317.51 - 314.83} = 2094.09 : 1. \quad (4)$$

4.5 扫描速度非线性确定

理想状态下, 条纹相机扫描后各个条纹之间的时间间隔应该是相等的, 但由于实际扫描斜坡电压的非线性导致条纹之间的时间间隔并非严格相等, 因此准确测量每个条纹峰值之间的距离即可求出扫描速度非线性, 方法如下:

1) 选取所有条纹作为测量对象, 利用相机本身数据处理系统得到一维分布即时间积分曲线. 测量每一个峰值间隔 L 值, 单位可以是像元数或时间值.

2) 测量各个 L 值并计算出它们的平均值 \bar{L} , 则扫描非线性 σ 为

$$\sigma = \frac{1}{\bar{L}} \sqrt{\frac{\sum_i^n (L_i - \bar{L})^2}{n - 1}}. \quad (5)$$

如图 14, 根据软件读出 4 个脉冲横坐标的像素值: $P_1 = 626, P_2 = 509, P_3 = 383, P_4 = 254$, 它们之间的脉冲间隔为 $L_1 = 117, L_2 = 126, L_3 = 129$, 平均值为 $\bar{L} = 124$, 根据扫速非线性的公式可以计算出 $\sigma = 5.04\%$.

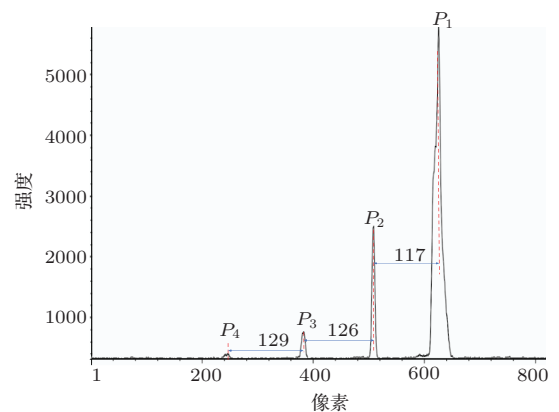


图 14 扫速非线性测试结果

Fig. 14. Test result of nonlinear of scanning speed.

5 结 论

本文根据目前超快诊断技术对条纹相机的大动态范围性能的需求, 将 EBCCD 应用在条纹变像管超快诊断设备中直接收集电子以提高空间分辨

率和动态范围, 研制出了基于EBCCD的大动态条纹相机系统. 经过性能测试结果表明, 该条纹相机的静态空间分辨率优于35 lp/mm, 偏转灵敏度为60.76 mm/kV, 动态空间分辨率达到20 lp/mm, 扫描速度非线性为5.04%, 电子轰击半导体增益达到3000以上, 动态范围达到2094 : 1, 实验结果表明: 各向异性聚焦的大动态条纹变像管结合低噪声背照式CCD读出系统, 有利于提高整机系统的动态范围.

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所条纹相机工程中心的老师们.

参考文献

- [1] Ivo H M van Stokkum, Bart van Oort, Frank van Mourik, Bas Gobets, Herbert van Amerongen 2008 *Bio-physical Techniques in Photosynthesis* **26** 223
- [2] Lu Y Q, Liang W X, Zhang J, Wu J J, Tian J S, Wang J F, Zhao B S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6500 (in Chinese) [刘运全, 梁文锡, 张杰, 吴建军, 田进寿, 王俊峰, 赵宝升 2006 物理学报 **55** 6500]
- [3] Li J, Niu H B 2002 *Journal of Optoelectronics-Laser* **13** 784 (in Chinese) [李冀, 牛憨笨 2002 光电子·激光 **13** 784]
- [4] Pan J S, Qi L, Xiao H L, Zhang R, Zhou J X, Pu D D, Lü J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194211 (in Chinese) [潘京生, 元鲁, 肖洪亮, 张蓉, 周建勋, 蒲冬冬, 吕景文 2012 物理学报 **61** 194211]
- [5] Zou Z F, Lu H S, Bai T Z, Gao Z Y 2001 *Journal of Beijing Institute of Technology* **10** 186
- [6] High Dynamic Range Streak Camera C7700 <http://www.hamamatsu.com>
- [7] Feng J, Engelhorn K, Cho B I, Lee H J, Greaves M, Weber C P, Falcone R W, Padmore H A, Heimann P A. 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 134102
- [8] Yuan Y T, Hao Y D, Zhao Z Q, Hou L F, Miao W Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6963 (in Chinese) [袁永腾, 郝轶聃, 赵宗清, 侯立飞, 缪文勇 2010 物理学报 **59** 6963]
- [9] Niu H B 1989 *Acta Photon. Sin.* **18** 196 (in Chinese) [牛憨笨 1989 光子学报 **18** 196]
- [10] <http://www.photonis.com>
- [11] Liu J, Ding Y K, Tian J S, Liu S Y, Cao X B, Wen W L, Hu X, Xu X Y, Wang J F, Dong G Y, Liu H L, Wang C, Zhang T 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2405 (in Chinese) [刘杰, 丁永坤, 田进寿, 刘慎业, 曹希斌, 温文龙, 胡昕, 徐向晏, 王俊峰, 董改云, 刘虎林, 王超, 张铁 2012 强激光与粒子束 **24** 2405]
- [12] van Roosbroeck W 1965 *Phys. Rev.* **139** A1702
- [13] George M, Williams Jr. 1992 *Electron Tubes and Image Intensifiers SPIE* **1655** 14

Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD*

Zhu Min^{1)2)†} Tian Jin-Shou¹⁾ Wen Wen-Long¹⁾ Wang Jun-Feng¹⁾ Cao Xi-Bin¹⁾ Lu Yu¹⁾
Xu Xiang-Yan¹⁾ Sai Xiao-Feng¹⁾ Liu Hu-Lin¹⁾ Wang Xing¹⁾ Li Wei-Hua¹⁾

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) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 20 September 2014; revised manuscript received 11 December 2014)

Abstract

In order to detect the weaker on greater span of light signals, the dynamic range, spatial resolution, and the signal to noise ratio of the streak camera need to be improved to meet further diagnostic requirements in scientific area of materials, biology, information, semiconductor physics and energy, etc. Therefore, we design a streak camera with a larger dynamic range based on electron-bombarded CCD. Using the rectangle-framed electrode and electric quadruple lens in the streak camera can reduce its space charge effect and shorten the space charge interaction time by improving electron accelerating voltage to minimize the electron transit time. Using a back-illuminated CCD, which is based on the electron bombardment readout technology as image device to replace the traditional intensified CCD can shorten the chain of image conversion and greatly reduce the image degradation in the conversion of ultrafast diagnostic equipment. The signal to noise ratio, spatial resolution and dynamic range of the streak camera may gain improvement. Experimental results show that the static spatial resolution is better than 35 lp/mm and the dynamic spatial resolution is up to 20 lp/mm. Deflection sensitivity is 60.76 mm/kV and dynamic range reaches 2094: 1. Nonlinear scanning speed is 5.04%. EBS gain of the streak camera can be over 3000.

Keywords: streak camera, electron-bombarded CCD, spatial resolution, dynamic range

PACS: 85.60.Bt, 42.79.Pw, 07.07.Hj

DOI: [10.7498/aps.64.098501](https://doi.org/10.7498/aps.64.098501)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11274377), and the Program for Major Research Instrument Development of Ministry of Finance of China - Development of High Performance Streak Cameras (Grant No. ZDY2011-2).

† Corresponding author. E-mail: zhumin@opt.ac.cn