



·惯性约束聚变物理与技术·

条纹及分幅相机技术发展概述

田进寿^{1,2,3}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710119; 2. 中国科学院 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119;
3. 山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

摘 要: 介绍了超快诊断技术研究的意义, 概述了条纹相机和分幅相机的研究历史及现状, 分析了几种主流条纹管的技术特点及主要应用领域, 比较了国内外超快诊断设备研制单位特点, 分析了我国在超快诊断技术方面所取得的成就、存在的问题并对下一步发展出路进行初步的分析与探讨。

关键词: 条纹相机; 分幅相机; 超快科学; 超快诊断技术

中图分类号: TB872

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200119

Introduction to development of streak and framing cameras

Tian Jinshou^{1,2,3}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. State Key Laboratory of Ultrafast Diagnosis Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
3. Collaborative innovation center of Extreme optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This paper introduces the significance of the research on ultrafast diagnosis technology, summarizes the history and current situation of streak camera and framing camera, analyzes the technical characteristics and main application fields of several mainstream streak tubes, compares the characteristics of domestic and foreign research and development institutions of ultrafast diagnosis equipment. Finally, it presents the achievements and existing problems of ultrafast diagnosis technology in China as well as a preliminary analysis and discussion on further development in this field.

Key words: streak camera; framing camera; ultrafast science; ultrafast diagnostic technology

不可见的事物一直令人着迷。这也难怪在超小的空间和超快的时间尺度直接观察肉眼无法辨别的物质结构及其动力学行为一直是科学研究的重要目标^[1], 也就催生了超快科学的研究。它是人类探索研究宇宙万物超快^[2]($< 1 \mu\text{s}$)变化规律的知识体系的总称, 超快科学发展带动了前沿科技的革命性进步, 超快科学已成为国际研究热点。超快科学研究包括微观化学和生物分子内电子运动过程: 电子离域性、生物能量转换、长距离电子转移、生物信号转导过程; 分子电子学和分子光伏科学研究中分子内部或分子之间高效电子转移机制; 固体超快过程中电子相干、空穴寿命、多体作用、光电效应、集体激发(激子、声子、等离子体)、电子空穴动力学等物质微观特性。所有微观过程几乎都变成了超快过程, 这就需要发展具备“察微捕快”能力的超快诊断技术, 促进人们对物理、化学以及生物学中的超快现象的理解和对客观世界的深入认识。当科学技术发展到近代, 以变像管条纹/分幅相机技术等为代表的超快现象的研究测量技术, 标志着超快诊断技术的自成体系。而超快光学的发展以及飞秒超快光学技术的日臻成熟, 使得人们对具备更高综合性能的超快诊断技术设备的需求更为迫切, 特别是对微观尺度、超快、高能量、高强度等领域的研究更离不开相应探测诊断技术的支持, 而传统的超快诊断技术却不能满足同时具备更高时间、空间分辨率, 大动态范围以及长时间跨度的测量要求。这就使得人们除了对传统的超快诊断技术继续进行优化外, 更要在诊断技术手段的机制创新方面做出相应的探索和努力。于是, 超快诊断技术的发展逐步走向多元化。以下归纳了几种极具代表性的超快诊断技术:

(1) 利用高速光示波器 GHz 以上带宽和超快响应的光电探测器相结合, 例如美国 Tek 公司的采样示波器, 它利

用上升时间小于 30 ps 的光电二极管做采样探头, 实现了对 50 ps 以上周期光脉冲信号的测量;

(2) 基于真空变像管技术的条纹/分幅相机技术(时空转换条纹扫描成像技术、行波选通分幅成像技术、分振幅/分孔径增强器选通分幅成像技术);

(3) 利用“自参考”和非线性效应获取待测超短脉冲的时域、频域信息, 并结合傅里叶变换及迭代算法进行电场重建的方法, 如自相关技术(AC)、互相关技术(CC)、频率分辨光学选通技术(FROG)^[3]、光谱相位电场重建(SPIDER)^[4]等;

(4) 基于时域透镜的超快诊断技术(时间放大分幅相机及光电二极管)^[5];

(5) 利用强激光驱动分子产生的相干电子波包对分子自身结构进行自探测, 通过解析电子波包与母离子相互作用引起的光电子衍射图案, 获得同时具备亚飞秒时间与亚埃空间分辨能力的分子结构及其超快动力学演化信息, 实现分子自成像技术以及改进的自层析成像技术^[6];

(6) 采用泵浦-探测式互相关测量机制和气体分子高次谐波产生阿秒极紫外脉冲技术, 将待测时间信息映射到能量空间阿秒条纹相机技术^[7-8];

(7) 基于泵浦-探测原理以及电子高散射截面特性发展起来的超快电子衍射技术^[9];

(8) 基于固体光折变原理的全光固体条纹/分幅相机技术^[10];

(9) 通过对飞秒激光进行数字编码, 并在时间和光谱维度上进行压缩和解压缩, 从而能够同时实现高速度、高帧数以及高光谱分辨率超快压缩成像技术^[11]。

本文将聚焦于目前达到工程化乃至商品化且具备成像功能的电真空超快诊断仪器上, 基于电真空器件的条纹和分幅相机, 对其发展历史、技术特点等进行分析比较, 以帮助读者理性选择适合自己的一款超快诊断设备。

1 条纹相机发展概述

1.1 国外条纹相机发展概述

英国是研究条纹和分幅相机的先驱。早在 1949 年, 英国 J. S. Courtney-Pratt 研制出了磁聚焦和偏转的 ns 时间分辨条纹变像管^[12]。1969 年, D. J. Bradley 等人率先在条纹变像管光电阴极附近设置加速栅网, 减小了光电子的渡越时间弥散, 将条纹相机的时间分辨率提高到 2 ps^[13]。英国研究条纹相机和分幅相机的机构有伦敦帝国理工学院、贝尔法斯特女王大学、英国原子武器研究中心(AWRE)、卢瑟福实验室、Photek 公司、EMI 公司等^[14]。随着条纹相机研究的热潮减退, 作为核心器件的条纹管最后集中到了英国 Photek 公司, 主要推出两款不带栅网的 ST-Y 和 ST-X 条纹管以及同步条纹管 PHOTRON 5。两种条纹管的主要特点是均不带栅网, 减少光电子被栅网拦截的几率, 有利于提高光电子的利用率, 同时, 从光电阴极到荧光屏, 图像的放大倍率为 0.7 左右, 且光电子轰击荧光屏的能量可以达到 15 keV, 有利于提高条纹管的光增益和对弱小信号的探测能力, 其中 ST-Y 属于国际上为数不多的光电阴极长度可以达到 35 mm 的条纹管。早在 1959 年, 由 Butslav 设计, 在结构设计上采用了球面阴极和球面荧光屏, 有效减小了条纹管电子光学系统的球差, 使得条纹管边缘的静态空间分辨率可以达到 20 lp/mm 左右, 长狭缝有利于提高扫描时间谱仪的光谱分辨和测谱范围, ST-X 的阴极有效面积为 18 mm×3 mm。由于条纹管整体尺寸比较小, 裸管长度只有 150 mm 左右, 在 15 kV 的电压下, 目前容易出现打火, 降低了条纹管的可靠性。由于这两种条纹管均没有配置加速栅网, 其典型电压设置下的时间分辨能力在 30 ps 左右。虽然 Photek 公司在其网站上介绍了通过改变电压设置可以将时间分辨能力提高到 2~5 ps, 但往往以牺牲其他性能指标如空间分辨为代价。从 2012 年起, 为了满足 ICF 实验对高时间分辨及长狭缝条纹相机的需要, 美国激光能量实验室(Laboratory for Laser Energetics)和 Sydor 公司以及英国的 Photek 展开了对该条纹管的改进, 将栅极和阴极之间的距离从 7 mm 减小到 3 mm, 同时减小了栅极上矩形槽的宽度并加大了阴栅极之间的电压差, 将时间分辨率提高到 5 ps 左右^[15]。法国 Photonics 公司的 P510 型条纹管也是在 ST-Y 上改进而成的, 时间分辨率达到 5 ps, 条纹管电子光学系统的放大倍率为 0.5。由于这两款条纹管的偏转灵敏度只有 20 mm/kV 左右, 所以这两款条纹管基本工作在单次或重复扫描模式下。中科院西安光学精密机械研究所(西安光机所)的博士生田丽萍设计并跟课题组一起研制成功了类似的两款条纹管, 编号分别为 6200 型和 7200 型, 如图 1 所示, 为了瞄准我国 ICF 实验对高增益、高时间分辨长狭缝条纹相机的迫切需要, 薛彦华又在 6200 型的基础上设计成了 6200-II 型条纹管, 如图 2



Fig. 1 Picture of Model 6200 and Model 7200 streak tubes

图 1 6200 型和 7200 型条纹管

所示。为了保证条纹管工作的可靠性,并未采取减小阴极和栅极距离的办法,而是在保持最高电压不变的前提下,将阴极和栅极之间的电势差从 135 V 提高到 1470 V,并对后组件进行二次设计,将时间分辨提高到 5 ps 左右,其基本设计参数以及类似管型性能比较分别见表 1 和表 2 所示,可见其是一款时空分辨以及亮度增益俱佳的长狭缝条纹管。为了满足基础研究对同步相机的需求,Photek 公司在 H. Niu, W.

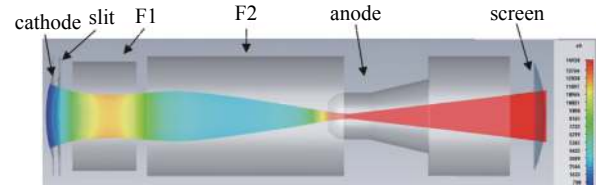


Fig. 2 Long slit tube with high spatial and temporal resolution

图 2 6200-II 型长狭缝高时空分辨条纹管

Sibbett 等人设计的 PHOTRON IV^[16] 型条纹管的基础上,推出了偏转灵敏度达 120 mm/kV 的同步扫描管 PHOTRON 5,使得其工作在几十到几百 MHz 的频率下减小同步扫描电路的功率,其极限时间分辨也可以达到亚 ps。日本 Hamamatsu 公司则是条纹相机商业化做得最成功的企业。1994 年,该公司 A.Takahashi 等人采用短磁聚焦电子光学系统,研制了具有 180 fs 时间分辨率的可见光飞秒条纹相机^[17]。西安光机所常增虎教授^[18]和劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)的冯军^[19]分别于 1999 年和 2007 年报道了其研制的行波偏转短磁聚焦飞秒条纹相机,其时间分辨达到了 540 fs 和 233 fs。西安光机所的薛鸣球院士跟牛憨笨院士合作,设计了正时间弥散的输入光学系统用于补偿条纹管负时间弥散的时间分辨系统,也于 1991 年报道了其研制成功的飞秒条纹相机^[20-21]。美国 Kansas 大学 M. M. Shakya 等人采用双板结构的静电时间聚焦系统并在阳极后设置电子光阑的办法,减小空间电荷效应及抑制取向离散度大的光电子,当狭缝宽度为 5 μm 时,条纹变像管的时间分辨率测试值可以达到 280 fs^[22]。全俄罗斯光学和物理测量研究所(VNII OFI)和俄罗斯科学院普通物理所(GPI)在条纹相机设计和技术方面都属世界一流水平,曾经研制了世界上最大最重的 FER-2 型(体积: 2200 mm \times 450 mm \times 710 mm,重量 250 kg)条纹相机和最小的条纹/分幅相机 k008^[23]。VNII OFI 于 1991 年成立了专门从事变像管设计和研究的商业化公司-BIFO 公司,目前有 K001~K015 共 15 种类型的条纹和分幅相机。俄罗斯原子能工业部脉冲技术研究所也开展条纹相机的研究工作。上述俄罗斯三家单位相互合作又存在竞争的关系,GPI 还开发了一款专业设计软件 ELIM/Dynamic。1955 年, E. K. Zavoiiskii 和 S. D. Fanchenko 对条纹变像管进行了理论研究,指出要提高条纹管的时间分辨能力,提高加速电场强度是必须的,而且采用单色光标定可以得到更清晰的图像,预言可见光条纹管的极限时间分辨率可达 10 fs^[24]。1976 年, W. Friedman 等人首先发现了空间电荷效应,并成为限制条纹相机极限时间分辨和动态范围的重要因素,得到学者们的广泛关注和研究^[25]。2003 年, N. V. Ageeva 等人研发的 PV-FS 系列的条纹相机时间分辨率也可以达到 200 fs^[26],俄罗斯条纹相机的特点是条纹管一般都设置有截止电极(Shutter electrode),确保扫描电路回扫时杂散电子打不到荧光屏上而降低信噪比。日本滨松公司的 K. Kinoshita^[27]为了使行波偏转短磁聚焦型条纹管阴极附近的电场强度达到 30~60 kV/mm,在阴极和加速电极之间的间距仅为 50~100 μm ,而加速电压为 3 kV 的情况下,为了减少场致发射以及提高耐压性,采用脉冲加压的方式减小电子在阴极和加速极之间的时间弥散。全苏光学与物

表 1 6200-II 型条纹管主要性能指标

Table 1 Main specifications of Model 6200-II streak tube

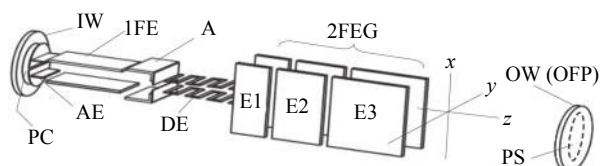
effective working area of cathode	time resolution/ps	spatial resolution/(lp·mm ⁻¹)	magnification	deflection sensitivity/(mm·kV ⁻¹)	streak tube size
$\geq 36 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$	≤ 5	(center) 18 mm: ≥ 40 (sides) 9 mm: ≥ 10	0.8	38.9	$\phi 74 \text{ mm} \times 370 \text{ mm}$

表 2 6200-II 型条纹管性能指标与国际类似长狭缝条纹管比较表

Table 2 Comparison of specifications between Model 6200-II streak tube and internationally similar long-slit streak tubes

No.	tube type	effective working area of cathode	static spatial resolution/(lp·mm ⁻¹)	physical time resolution/ps
#	6200-II, Xi'an Institute of Optics and mechanics(CAS)	36 mm \times 6 mm	> 40	< 5
1	6200	35 mm \times 5 mm	40	50
2	ST-Y, Photek(United Kingdom)	35 mm \times 5 mm	40	50
3	P510/slit, Photonics(France)	35 mm \times 4 mm	10	5
4	PV 400, BIFO(Russia)	35 mm \times 4 mm	20	2
5	N3831, Hamamatsu(Japan)	25 mm \times 15 mm	35	10
6	Shenzhen University Long Slit Streak Tube	$\phi 30 \text{ mm}$	15	8

理研究所的 V. B. Lebedev 也研制了短磁聚焦飞秒条纹相机^[28], 阴极和栅极之间的距离为 1 mm, 两电极之间加 ≥ 10 kV 的脉冲电压。2016 年, 日本 K. Kinoshita 又采用行波偏转板加各向异性时空分别静电聚焦技术、荧光屏二次加速技术以及在采用反射式输入光学系统代替透射式耦合镜头以避免透射光学元件引起的群速度色散造成的额外时间弥散, 其板状加速电极结构、阳极设置狭缝和精准调节进入偏转板的电子束宽度等措施与常增虎采用二次电子光阑的做法有异曲同工之妙, 目的都是限制电子束流以及宽度, 降低空间电荷效应以及偏转散焦, 最终将条纹相机的时间分辨测试值提高到 100 fs^[29], 并于 2017 年底推出了型号为 C11853-1 的商品化飞秒条纹相机。图 3 是这种飞秒条纹管内部电极结构图, 图 4 则是 C11853-1 型飞秒条纹相机(100FSST)和其早期研制的 C6138 型飞秒条纹相机(200FSST)极限时间分辨与每个光电子脉冲中电子数量的关系图。从图中可以看出, 随着输入被测信号通量的增加, 每个光电子脉冲中的电子数量增加, 由空间电荷效应导致的极限时间分辨也随之增大。因此, 极限的时间分辨能力一般都是在条纹相机输入狭缝的宽度及输入信号强度均特别小的情况下测试的。滨松公司研制的 C7700 条纹相机, 主要通过提高相机整体电位、缩短电子飞行时间抑制空间电荷效应, 采用第一代像增强器, 消除了采用二代像增强器时 MCP 的增益饱和和效应, 使得条纹相机的动态范围达到 10000 : 1@100 ps^[30]。法国是研究条纹相机和分幅相机比较早而且很活跃的国家之一, 主要集中在: 法国原子能研究中心、物理电子应用研究实验室、RTC、菲利普光电技术公司、Photonics 等。近年来, 与条纹管相关的技术基本由 Photonics 公司继承, 研制的 P500 系列旋转对称型倒像条纹管, 其显著的特点是荧光屏的有效面积可以达到 $\phi 64$ mm, 使得条纹管在相同时间分辨能力下具有更长记录时间, 采用不同的加速结构(栅孔/栅网)、工作模式(扫描/分幅/同步)、电子光学放大倍率(0.75/1.3)、阴极大小($\phi 12$ m/ $\phi 35$ mm/ 35 mm \times 744 mm)使用户可以根据自己的实际需求, 进一步在亮度增益、信噪比、动态范围和极限时间分辨能力上做出选择。法国 Photonics 公司研制成功的 P800 型(P600 型和 P700 型实际也属于 P800 型, 差别只是用不用截止电极 Blanking Electrode), 其条纹管的显著特点是采用了各向异性聚焦电子光学系统。P600 和 P700 型条纹变像管时间分辨率为 2~3 ps^[31-32], P850X 相机时间分辨率达到 1 ps^[33]。加拿大 AXIS 公司采用法国 P800 型条纹管研制的 FX 型条纹相机, 时间分辨测试值甚至达到 350 fs^[34], 其特点是在电聚焦区引入长的四极透镜, 分别控制四极透镜的电压, 使电子在时间和空间两个方向独立聚焦, 可以对两个方向分别进行优化, 电子在一个方向聚焦时, 另一个方向相对发散, 这样减小了空间电荷效应, 有利于提高条纹管的动态范围。空间聚焦采用电四极透镜, 和传统的旋转对称型电极相比, 其二阶像差系数和时间畸变也小, 有利于提高条纹管的空间分辨率和降低快扫描时造成的图像弯曲。常增虎在研制 280 fs 和日本 Hamamtsu 研制 100 fs 的静电聚焦飞秒条纹相机时均采用了各项异性聚焦电子光学系统, 体现了其对提高条纹管时空分辨能力的优越性。但各向异性聚焦电子光学系统相对复杂, 电极多达 11 个, 要求电压的稳定度达到 $10^{-4}\sim 2\times 10^{-5}$ ^[35], 增加了条纹管装配难度以及相机的成本。和 P500 型条纹管的大输入面和大输出面特点恰好相反, 为了方便耦合有效面积为 $\phi 18$ mm 的双近贴型像增强器, Photonics 公司采用旋转对称型静电聚焦倒像式电子光学系统, 研制了阴极有效面积 $\phi 8$ mm~ $\phi 10$ mm、输出荧光屏有效面积为 $\phi 18$ mm 的 P900 型系列条纹管, 功能和工作模式跟 P500 系列类似, 其中 P930^[36] 型条纹管和 P510^[37] 型条纹管分别对应于英国 Photek 公司的 ST-X 和 ST-Y 型条纹管。



IW: input window; PC: photocathode; AE: accelerating electrode;
1FE: first focusing pole; A: anode; DE: deflection electrode;
2FEG: second focusing pole; PS: fluorescent screen;
OW (OFP): output window (fiber optic panel)

Fig. 3 Inner structure of streak tube C11853-1

图 3 C11853-1 型飞秒条纹管内部电极结构图

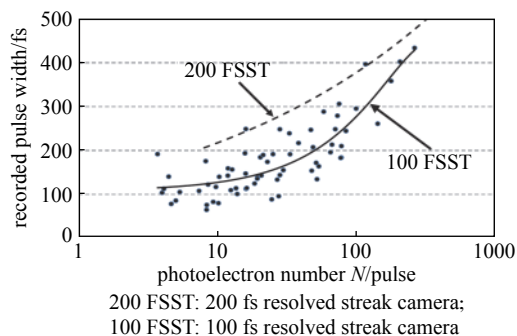


Fig. 4 Temporal resolution vs the amount of electrons

图 4 极限时间分辨与光电子脉冲中电子数量的关系图

1.2 国内条纹相机发展概述

中国科学院西安光学精密机械研究所是中国最早开展超快诊断技术研究的单位, 自从第十八届国际高速摄影会议在中国科学院西安光学精密机械研究所(西安光机所)召开以来, 西安光机所一直是国际高速摄影学会的国家

代表。早在 1970 年,西安光机所就研制了长磁聚焦型条纹管 WS-301,其亮度增益高达 10^4 ,从 1976 到 1982 年,又成功研制了 WS-306 型条纹管,时间分辨能力达到 5 ps。1982 年, H. Niu, W. Sibbett 等人设计了 PHOTOCHRON IV 型变像管^[38]。在设计中,他们引入了空间调制传递函数(MTF)和时间调制函数(TMTF),使得条纹变像管的时空特性评价理论性更加严谨。从 1982 年到 1999 年,牛憨笨院士团队采用旋转对称型等径和不等径六电极电子光学系统,先后成功研制出了皮秒条纹管、同步条纹变像管^[39-40]、飞秒条纹变像管^[41]、长狭缝^[42](30 mm)条纹管,分别集成为单次/重复(时间分辨能力达到 4 ps@2 MHz 重复频率)扫描条纹相机、同步条纹相机(同步频率 250 MHz)、飞秒条纹相机以及工程化条纹相机,其中长狭缝条纹相机成为激光聚变研究的主流相机。2009 年,深圳大学和西安光机所各自为中国工程物理研究院激光聚变中心研制了搭载在公共诊断平台(DIM)上的远程控制 X 射线条纹相机,可以远程控制条纹相机工作,并且该相机系统具有温度、湿度、气压、循环水流量和漏水等自动检测功能。同年,深圳大学研制了一种大动态范围的 X 射线条纹相机,在保证阴极大的工作面积下,优化了电子光学系统,提高整体电位,有效减小空间电荷效应。2011 年,深圳大学廖华、杨勤劳等人通过在条纹相机改进电子光学系统,延长等位区,荧光屏工作直径达 90 mm,依然保证中间空间分辨率 15 lp/mm。在量程为 5 ns 时,时间分辨率达到 5 ps^[43]。西安光机所在牛憨笨院士科研团队调入深圳大学后,超快诊断技术研发进入了 10 年左右的低迷期,随后研究所重新组建团队,中国科学院条件保障财务局先后两次对相关学科给予平台支持,研发团队陆续承研国家自然科学基金、国家高技术发展研究计划项目以及科研仪器项目,尤其在 2012 年抓住承研国家重大科研仪器项目《高性能条纹相机的研制》的大好形势,在科研平台、团队建设、技术进步等方面均有大幅度提升,恢复和发展了西安光机所的优势传统学科,在核心器件开发以及整机系统集成方面均有大幅度提升,单独或合作研制成功了大面积光电倍增管、多阳极极敏型光电倍增管、系列化条纹管及条纹相机、日盲型像增强器、大电流输入型光电倍增管等核心探测器,如图 5 所示。在此基础上研制成功 1200 型飞秒条纹相机、2200 型大动态条纹相机、3200 型同步扫描条纹相机、4200 型长狭缝高时间分辨工程化条纹相机、5200 型通用条纹相机、6200 型高增益长狭缝型条纹相机、7200 型高增益小型条纹相机、8200 型超小型条纹相机、9200 型高偏转灵敏度同步扫描条纹管(如图 6 所示)。其典型的性能指标及国际同类条纹管之间的对应关系见表 3,其中绝大部分已经达到商业化应用程度,图 7 是工程化飞秒条纹相机实物照片,图 8 是部分商业化条纹相机实物照片,图 9 分别是 5200 通用型和 2200 大动态条纹相机实物照片,并已经在激光雷达、钙钛矿受激发光、高压放电、压缩感知成像、汤姆逊散射实验、高能量密度物理 VISAR、特征软 X 射线谱等实验中得到成功应用。图 10 是 4200 型长狭缝和 2200 型大动态条纹相机应用现场照片。综合各个国家的条纹管的结构特点,条纹管大致可以分为以下几种特色鲜明的电子光学结构形式:旋转对称型结构、等径/不等径圆筒型、短磁聚焦型、各向异性聚焦条纹管,如图 11 所示。其余的都是这几种结构的变型或结合体,或者在此基础上加上截至电极,由于旋转对称型结构电极数量少,适合制作冲压模具,进行批量化生产。等径/不等径圆筒型电极结构单一,加工成本低,利用电子光学系统的共轭性,可以按比例放大缩小,制作不同阴极大小的条纹管,缺点是像管的边缘空间分辨率低;短磁聚焦型条纹管利用磁透镜二阶像差系数小的特点,其空间分辨率很容易达到 50 lp/mm 以上,因此,高时空(fs)分辨相机往往采用这种结构,缺点是在制作可见光飞秒条纹变像管时,磁透镜很难接受 400 °C 长时间的高温烘烤,需要将磁靴制成分体式,等条纹管阴极制作完成后再安装磁靴和绕制线圈;各向异性聚焦条纹管时间聚焦和空间聚焦独立调节,有利于减小空间电荷效应而提高整机的动态范围,同时,四极透镜的像差系数也小,容易提高空间分辨率和减小时间畸变,缺点是电极数量多,高精度装配困难,尤其是制作可见光条纹管时,要确保电极在经受室温到 400 °C 烘烤温度冲击时,电极不变形和与装配支架之间不松脱。



Fig. 5 Key detectors developed in XIOPM
图 5 西安光机所研制研制的部分核心探测器



Fig. 6 Picture of synchronization tube 9200
图 6 9200 型同步扫描条纹管

表 3 中国科学院西安光学精密机械研究所研制的系列化条纹相机基本性能表

Table 3 Basic performance table of serialized streak tubes developed by XIOPM

model	gate structure	time resolution/ps	spatial resolution/(lp·mm ⁻¹)	brightness gain	cathode size	magnification	screen area	accelerating voltage/kV	deflection sensitivity/(mm·kV ⁻¹)	operating mode	similar type
1200	rect. hole	≤0.5	≥40	①	φ6 mm	~2.3	φ40 mm	15	23	single	②
2200	grid	≤5	≥30	~0.5	φ17 mm	~2.0	φ40 mm	0.76	60	synchronize	③
3200	rect. hole	≤2	≥40	~1	15 mm×1 mm	~2.3	φ40 mm	15	38	single and repeat	Photonis P800 series
4200	grid	≤5	≥25	~3	φ30 mm	1.3	φ40 mm	15	45	single	④
5200	Grid	≤5	≥30	~0.5	φ17 mm	~2.3	φ40 mm	0.76	60	single and repeat	⑤
6200	rect. hole	≤30⑥	≥25	~10	35 mm×4 mm	0.75	φ40 mm	15	22	single	Photek ST-Y; Photonis P500 series; Bifo PV400
7200	rect. hole	≤30⑥	≥25	~10	18 mm×2 mm	0.75	φ30 mm	15	15	single	Photek ST-X; Photonis P900 series
8200	round hole	≤30	≥25	~5	φ25 mm	1.0	φ30 mm	15	7	single	Bifo PV201
9200	grid	≤2	≥30	~0.5	φ10 mm	2.6	φ40 mm	0.7	120	synchronize	Photek Photron V

Notes:① Presently femtosecond cameras have only X-ray band response, and the brightness gain has not been measured; ② Similar to that by Jun Feng at the National Laboratory of the Livermore, USA and C6183 (FESCA-200) of Hamamatsu Photonics, Japan;③ Early worldwide universal inverted image type streak tubes, as those in the United States, Britain, Japan, France and Russia; ④ The same type as that commonly used in Shenzhen University and Research Center of Laser Fusion of CAEP; ⑤ The temporal resolution can be increased to about 10ps by adjusting the voltage of the image converter, but at the expense of degradatim the spatial resolution.



Fig. 7 Picture of X-ray femtosecond streak camera
图 7 工程化 X 射线飞秒条纹相机



Fig. 8 Partially commercialized streak cameras developed in XIOPM
图 8 是部分商业化条纹相机实物照



Fig. 9 Pictures of streak cameras of Model 5200 and 2200 developed in XIOPM
图 9 西安光机所研制的 5200 型和 2200 型条纹相机实物照片



Fig. 10 Pictures of X ray streak cameras of Model 4200 and 2200 at the experimental site
图 10 西安光机所研制的 4200 型工程化相机和 2200 型 X 光条纹相机在实验现场

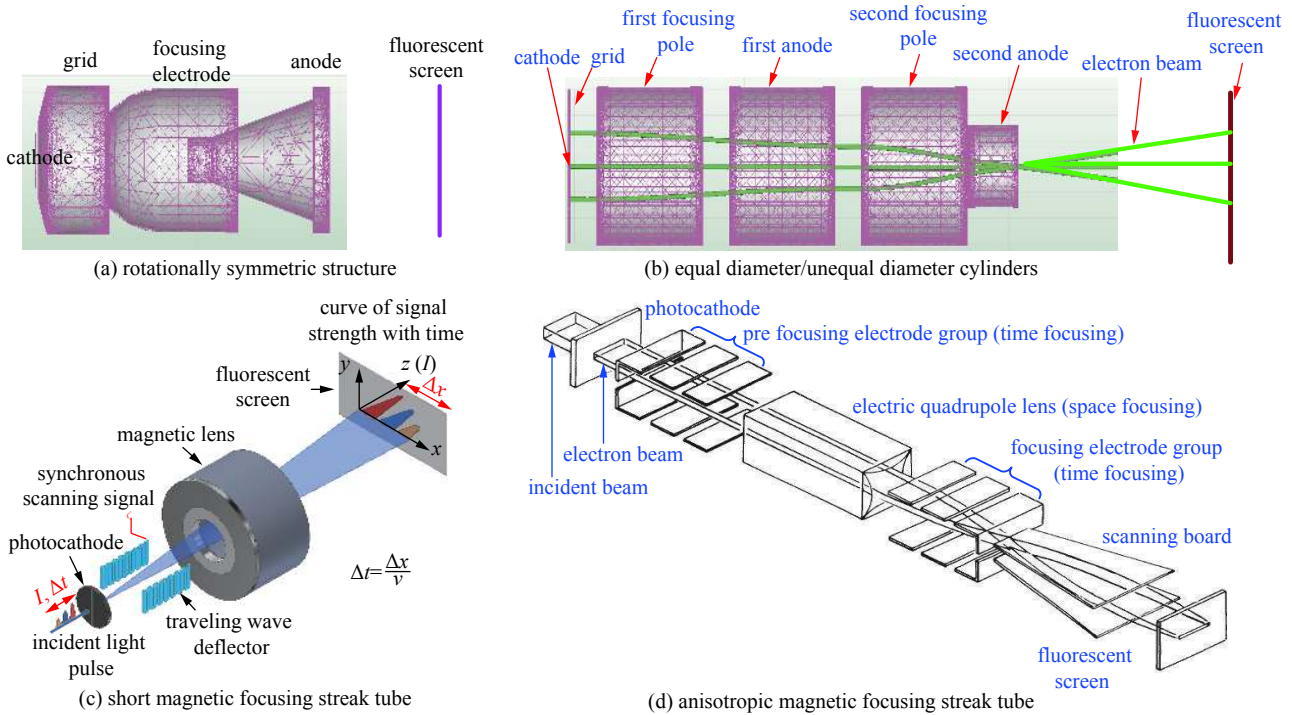


Fig. 11 Four representative opto-electronical structures of streak tube

图 11 条纹管四种代表性的电子光学结构形式

2 分幅相机发展概述

2.1 分幅相机介绍

基于电真空器件的分幅相机从原理上讲大致分三类：像增强器选通型分幅相机、行波选通型分幅相机和扫描分幅型相机。像增强器选通型分幅相机的研究始于 20 世纪 70 年代，由于微通道板 (MCP) 发展和工艺完善，采用 MCP 作为电子倍增器的分幅相机诊断技术也随之发展起来。1968 年，L. Gavganen^[44] 报道了单个双近贴像增强器选通型分幅相机，在光电阴极和 MCP 输入面之间加矩形高压正脉冲，即只有脉冲持续时间内才有光电子通过 MCP 倍增后轰击荧光屏成像，图像时间分辨率就是矩形脉冲的宽度。由于 MCP 的输入端面电阻较大，光电阴极和 MCP 之间的电容较大，因此这种管型的曝光时间一般为 2 ~ 10 ns。它的优点是画幅尺寸大，空间分辨率高，响应波段范围大，缺点是单幅成像。1971 年，J. Albert 等人研制了 ns 级高分辨分幅相机^[45-46]，该相机采用双近贴方式，光电阴极、MCP、荧光屏两两近贴，获得了直流工作方式下时间分辨率小于 1 ns、空间分辨率 9 lp/mm 的图像。1976 年，Nahrath 等人采用选通的方式，利用半高宽为 7 ns、峰值为 8 kV 的电脉冲选通直径 75 mm、微通道孔径 14 μm 的 MCP，获得曝光时间为 3 ns 的图像^[47]。1986~1988 年，美国利弗莫尔实验室 (LLNL) J. D. Kilkenny 等人研制了在 MCP 上实现选通成像的相机^[48-49]，其结构是在 MCP 输入面上镀制金或碘化铯电极作为光电阴极，并加 1.5 ns, 3 kV 的选通脉冲电压，获得时间分辨小于 100 ps。每一条微带上得到一幅图像，无针孔分幅，因此获得的图像数就是微带数目，为了获得更多幅图像，而且多幅图像之间的时间间隔以及每幅图像的曝光时间均可调，现在一般采用分光棱镜，将来自目标的信号光分成多束 (比如四束)，每一束后面耦合一个 ICCD，这样就可以实现四分幅图像了，根据每个 ICCD 选用的像增强器荧光屏余辉时间的长短，每个 ICCD 均可以采用双曝光模式工作，那么四个 ICCD 就可以实现 8 分幅了。图 12 为增强器选通型分幅相机组成框架图，其曝光时间主要由光电阴极电子补充的速度及选通快门的宽度决定。镀导电基底像增强器的响应时间可以达到百 ps，而脉冲宽度连续可调的选通快门目前可以做到 2 ns~直流可调，四路选通脉冲之间的调节精度一般可以保持在 10 ps 左右，因此，在这种工作模式下，四分幅相机的最佳曝光时间可以达到 2 ns，可以实现最短间隔时间为 10 ps 左右的四幅图像，用户可以根据实际需要，实现曝光时间 (2 ns~ms) 和分幅时间间隔 (10 ps~ms) 的调整。如果需要进一步提高曝光时间，目前的电子技术，百 ps 宽度、幅值 200 V 以上的选通脉冲已经很成熟，只是很难实现脉宽的连续可调，因此，增强器选通型分幅相机目前可以实现百 ps 曝光时间和 10 ps 左右分幅间隔时间精度的多分幅成像。

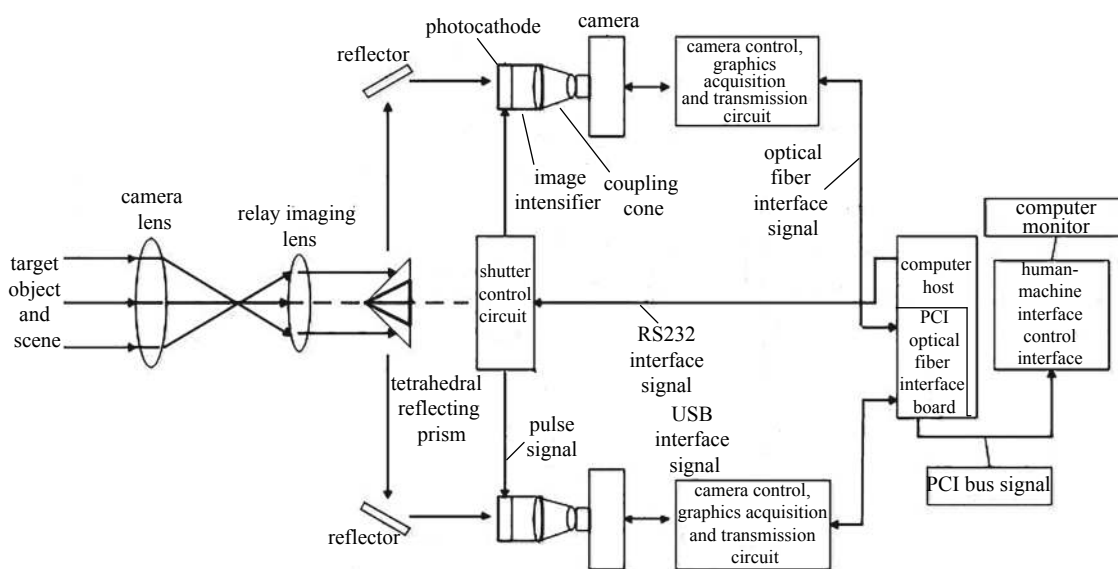


Fig. 12 Frame diagram of intensifier gated framing camera

图 12 增强器选通型分幅相机组成框架图

2.2 国外分幅相机发展概述

为了获得分幅相机更高的时间分辨率,随着皮秒高压电脉冲技术的突破和发展,行波选通型分幅相机也发展起来,其基本原理和实物照片如图 13 所示:目标信号经针孔分成多幅(比如 3×4 幅),当宽度为百 ps 的快门电脉冲在 MCP 微带上以大约 $0.6c$ (c 为光速)传输时,经过针孔在选通区域的 X 射线成像区域时,该区域内的光电子将获得倍增,并成像到荧光屏上。当电脉冲依次传输到后续针孔所成的 X 射线像区域,这些针孔所成的像依次被选通。每一幅像的曝光时间由选通电脉冲的半宽度、选通脉冲沿微带线传输速度及光电子在 MCP 中渡越时间弥散等因素共同决定。1988 年,美国 LLNL 将微带选通型 X 射线相机成功地应用在 NOVA 装置上进行 ICF 研究^[50-52]。

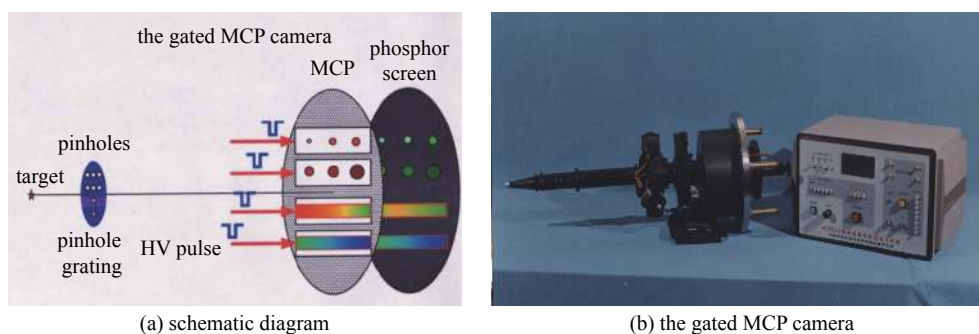


Fig. 13 Schematic diagram and picture of travelling wave gated framing camera

图 13 行波选通型分幅相机原理图及实物照片

1989 年便获得 14 幅激光聚变内爆 X 光辐射图像,其中每幅曝光时间为 100 ps^[53]。1989 年,英国苏格兰圣安德鲁斯(St Andrews)大学等也获得四分幅图像,每幅曝光时间为 100 ps,空间分辨 8 lp/mm ^[54]。1990 年,美国 LLNL 的 P. M. Bell 和 J. D. Killkenny 等发布了一种厚仅为 0.2 mm、长径比为 20 : 1 的 MCP 分幅相机,旨在通过减小电子渡越时间弥散来提高分幅相机的曝光时间,其曝光时间可以达到 35 ps,但由于 X 射线透过率高导致成像背景太大而在实际中未得到广泛使用^[55]。1991 年,美国 B. H. Failor 等人为了获得更高的探测增益,设计了双 MCP 结构的 BrightCamTMIII 探测器^[56],在 KMS 聚变装置上进行等离子体研究。1992 年,LLNL 实验室发展了一种大成像面短脉冲的 16 分幅相机,该相机的快门时间小于 40 ps,采用了低失真电脉冲(3kV 负脉冲)和长径比为 20 的超薄 MCP 板(厚度为 0.2 mm,板直径为 100 mm 左右)以及两块近贴式 V 型叠加 MCP 来满足增益要求:前级采用 20 : 1 的 MCP 作为选通快门,后级采用 40 : 1 的 MCP,其曝光时间、增益和信噪比明显改善,但其空间分辨率则有所降低^[57]。2000 年,英国 Kentech 公司研制的 X-射线分幅相机(SLIX)^[58],选用 100 ps 选通脉冲,最短曝光时间达到了 40 ps。2002 年,英国 Kentech 公司研制了四微带 X 射线分幅相机(GXD),如图 14 所示,选用 0.5 mm 厚的 MCP,微带的阻抗为 12.5Ω ,将

相机包括电控部分、CCD、环境传感器等均放在与空气隔绝的真空盒里内,实现了分幅相机远程控制^[59]。2004年,美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室(LANL)研制成功一种大尺寸的选通X射线分幅相机,其探测面达到了 $105\text{ mm}\times 105\text{ mm}$,拼接三块 $35\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ 的MCP,共镀制六条 13 mm 的微带线,提高了相机对目标的空间分辨能力以及持续记录时间长度。2012年,美国LLNL国家实验室L. R. Benedetti等人研究了微带线之间的电磁串扰对相机增益及选通脉冲到达时间的影响,认为当选通脉冲之间的时间间隔小于 1 ns 时,微带线之间的串扰可以造成相机不同微带上对应增益差别达一个数量级以上,也会造成选通脉冲到达时刻几十ps的差别,如图15所示。2014年,美国LLNL国家实验室N. Izumi等人为了满足点火装置对硬X射线背照成像的需求,研制了双MCP型分幅相机,其中第一块低增益MCP作为第二块高增益MCP的光电阴极,对能量为 59 keV 的X射线的量子效率高达 4.5% ,其量子效率是单MCP量子效率的3倍。2015年,J. B. Lugten等人为了减少选通脉冲在微带线之间的串扰并能够实时监控微带线输出脉冲的波形展宽及衰减情况,专门设计了脉冲信号输入匹配板和输出及监控板,在输入板上采用 2200 pF 耐压 1500 V 的隔直流电容、 $45.2\ \Omega$ 跳线以及克洛佩芬斯坦(Klopfenstein)阻抗匹配线,同时在输入板弯曲的曲率半径 R 和微带线的宽度 w 满足 $R/w > 30$ 的情况下,实现了 $50\ \Omega$ 传输线与 $10\ \Omega$ 微带线阻抗的良好匹配。反射脉冲与入射脉冲的幅值比小于 -20 dB ,输入选通脉冲的幅值只要 -2300 V 时就可以在微带线实现 -1000 V 的脉冲高效输出,同时输出脉冲可以实时监控。在整个 210 mm 长的输出渐变线上,在最大反射率为 -20 dB 时,带宽超过 0.39 GHz 。2017年,日本东京大学的H. Shiraga^[60]研究了X射线分幅相机增益衰减与辐射通量之间的关系,并给出了增益衰减理论模型,该理论模型与实验结果吻合得很好,为相机进一步量化标定做了有益的探索。2018年,美国LLNL的S. R. Nagel^[61]等人在实验室演示了采用时间放大技术和CMOS相机的脉冲工作(burst)模式,研制的单视线分幅相机(SLOS)在 300 ps 的时间窗口内,可以成 $2\sim 4$ 幅图像,并将应用到晶体背照成像试验中。

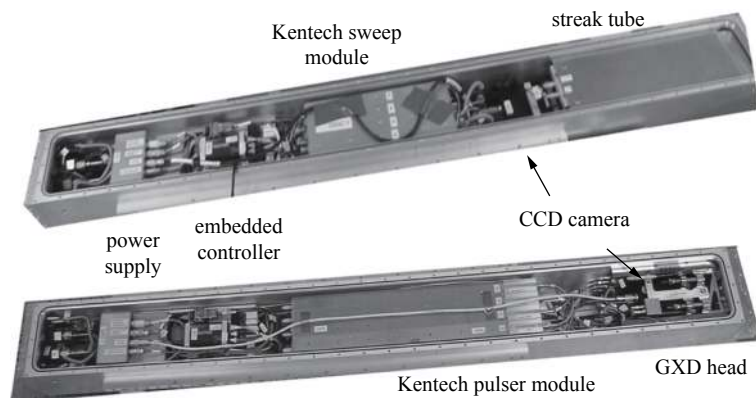


Fig. 14 Kentech's engineering framing camera

图 14 Kentech 公司工程化分幅相机

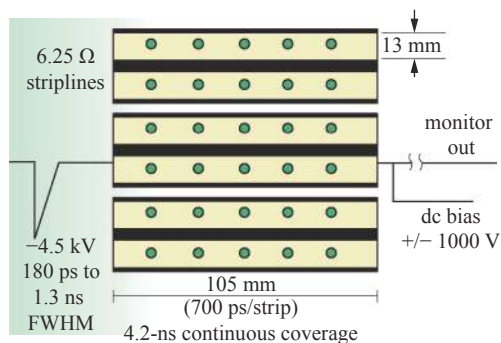


Fig. 15 Large size gated X-ray framing camera at Los Alamos National Laboratory(LANL)

图 15 美国 Los Alamos 国家实验室(LANL)大尺寸选通X射线分幅相机



2.3 国内分幅相机发展概述

中科院西安光机所很早就致力于行波选通分幅相机的研制工作^[62-64],并在星光、强光、神光等装置开展了大量的实验工作,取得一系列重要的实验数据。1994年2月,单条弯曲微带单路脉冲选通的X射线皮秒分幅相机通过了中国科学院鉴定。由于脉冲在单微带上传输时间长、损失大,紧接着又研制出由4路选通脉冲分别选通4条独

立微带的分幅相机^[65]。与单条弯曲微带相机相比,这种相机具有增益均匀性好、测量时间范围大以及各幅图像之间时间间隔灵活可调等优点,因而具有更高的实用性。四微带分幅相机时间分辨为 100 ps,空间分辨为 20~25 lp/mm,获得了清晰的内爆压缩时空图像,为激光核聚变实验研究提供了重要的物理数据,是研究临界面运动规律、界面不稳定性以及辐射场均匀性不可缺少的诊断设备,为我国 ICF 大科学工程研究提供了关键诊断技术和手段。1995 年常增虎等提出了双门控 MCP 结构的分幅相机^[66],两块 MCP 直径为 56 mm,厚 0.5 mm,均加载选通脉冲,通过对电子脉冲在时间域进行掐头去尾的方式让电子脉冲时间宽度变窄以获得短曝光时间。数值模拟结果表明,通过加 75 ps 的选通电脉冲时,可获曝光时间为 10 ps。近年来,西安光机所采用“恒流导通”和“渐变波导”脉冲产生方法,实现抖动 10 ps、脉宽 80 ps,3.3 kV 高压脉冲输出,脉冲输出效率提升 50%,同时采用宽带渐变低损无反射耦合传输技术,分幅相机动态增益均匀性由原来“马鞍形畸变”损耗 50%@40 mm 提高至现在线性衰减 30%@80 mm,如图 16 所示,将相关的技术应用到大画幅分幅相机以及工程化分幅相机的研制中,如图 17 所示,使行波选通分幅相机性能指标及集成控制等方面得到明显提高。表 4 是西安光机所与美国 LLNL 研制的工程化大画幅分幅相机的性能比较。

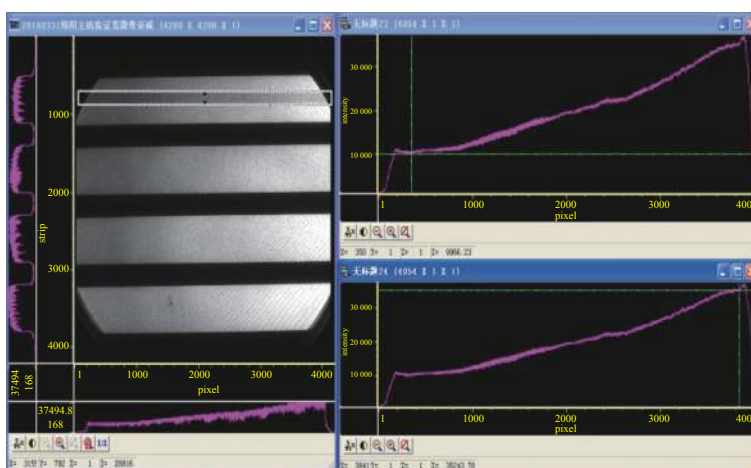


Fig. 16 (30%@80 mm) Improved of dynamic gain uniformity of framing camera
图 16 分幅相机动态增益均匀性改善, 30%@80 mm

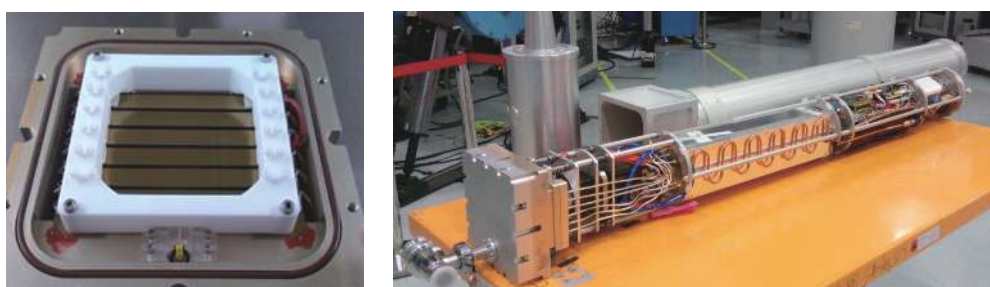


Fig. 17 Microstrip line of large frame framing camera and photos of engineering framing camera
图 17 大画幅分幅相机微带线以及工程化分幅相机

表 4 利弗莫尔国家实验室和西安光机所分幅相机对比

Table 4 Comparison of framing camera parameters between Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) and XIOPM

	time resolution/ps	spatial resolution/(lp-mm)	number of frames	sensitive surface	synchronization accuracy/ps
LLNL	60	20	16	105 mm×105 mm	20
XIOPM	60	20	16	105 mm×105 mm	20

目前国内外广泛使用的基于 MCP 行波选通技术的分幅成像系统,由于时间分辨率受 MCP 渡越时间弥散等因素的限制,难以突破 60 ps。在靶丸聚变点火阶段只能获得三幅图像,远远无法满足 ICF 研究需要。针对上述问题,近些年来,LLNL 的 S. R. Nagel 等又将时间展宽技术和 MCP 行波选通技术相结合,在光电阴极和栅网之间引入动态电场实现对电子群的“速度色散”,通过漂移区对电子群“速度色散”效应进行放大,从而实现电子群“空间展宽”,最终研制出时间分辨率优于 5 ps 的新一代分幅相机,如图 18 所示。该实验室联合美国通用原子公司和英国

Kentech 公司于 2011 年研制成功原理演示系统, 利用钛宝石激光器测试后其时空分辨率分别达到 5 ps 和 3 lp/mm, 随后于 2014 年研制成功可在 NIF 装置上使用的工程样机, 并通过 NIF 系统打靶验收, 其时间分辨率达到 6.6 ps^[67]。后来在美国普通原子能研究院、LLNL 等 5 家研究团队研制的单视线 X 射线成像系统 (Single Line-of-Sight, SLOS) 得到成功应用, 如图 19 所示。国内深圳大学 J. Liu^[68-69] 等人在国家高技术发展研究计划项目的支持下采用短磁聚焦系统研制了时间放大分幅相机, 并在实验室测得时间分辨率达到 7 ps, 其静态和动态空间分辨率分别达到了 5 lp/mm 和 2 lp/mm, 如图 20 所示。

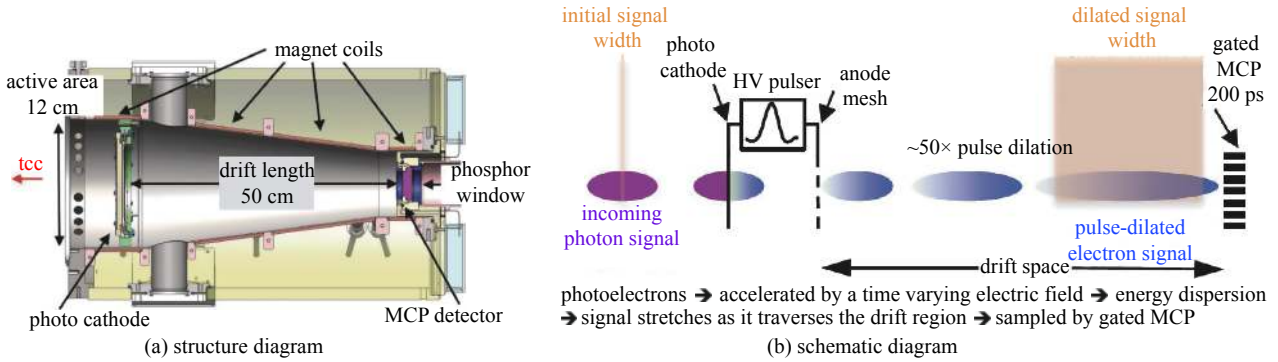


Fig. 18 Structure diagram and schematic diagram of dilation X-ray imager(DIXI)

图 18 时间展宽分幅相机的结构图和原理图

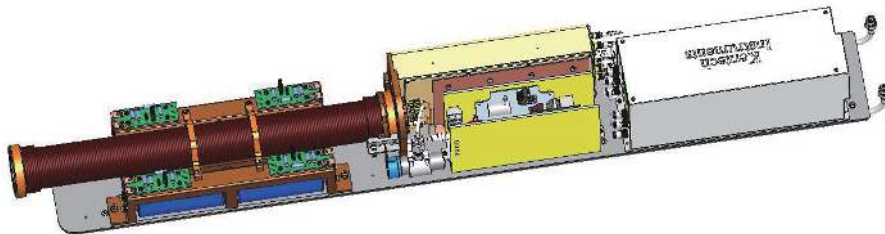


Fig. 19 Single line of sight(SLOS)of X-ray imaging system

图 19 单视线 X 射线成像系统

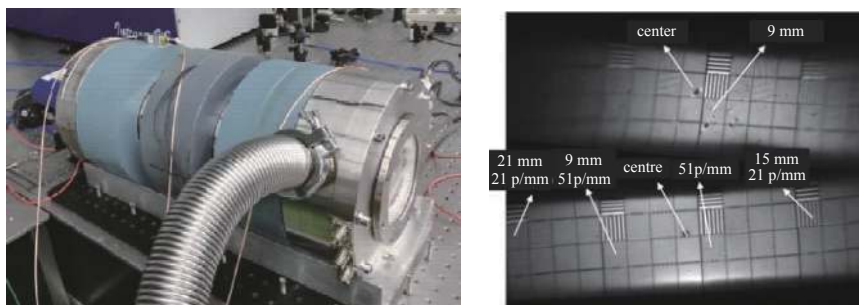


Fig. 20 DIXI developed by Shenzhen University and its static resolution test

图 20 深圳大学研制的时间展宽分幅相机及静态分辨测试

西安光机所超快诊断课题组于 2016 年采用长磁聚焦系统提高漂移管动态空间分辨率, 解决了阴极电压、漂移距离等对系统时间放大倍数的影响等技术问题。在对漂移管成像过程和聚焦方法进行充分研究和仿真基础上, 于 2018 年 11 月制作了多碱阴极可见光响应的长磁聚焦漂移管分幅相机, 对其成像效果进行了初步测试, 该漂移管静态空间分辨率可达 20 lp/mm, 准动态空间分辨率可达 14 lp/mm, 时间分辨可达到 3.3 ps, 如图 21 所示。

2.4 分幅相机发展趋势

虽然行波选通型分幅相机具备高的二维时空分辨能力, 但由于微带线兼具光电阴极和传输线的双层功能, 很难实现可见光波段二维时空超快成像, 于是扫描分幅成像技术应运而生。美国从 20 世纪 70 年代中期就开始扫描分幅相机的研制, 差不多在同时, 英国、俄罗斯等也先后开展了扫描分幅相机的研制。美国 LLNL 的 Ralph Kalibjian 早在 1978 就实现了 3 分幅的扫描分幅相机^[70], 其时间分辨能力达到了 100 ps。俄罗斯的普通物理研究所以及全俄罗斯物理光学测量研究所分别于 1988 年和 1992 展示了三分幅的扫描分幅相机^[71-72]。国内西安光机所牛

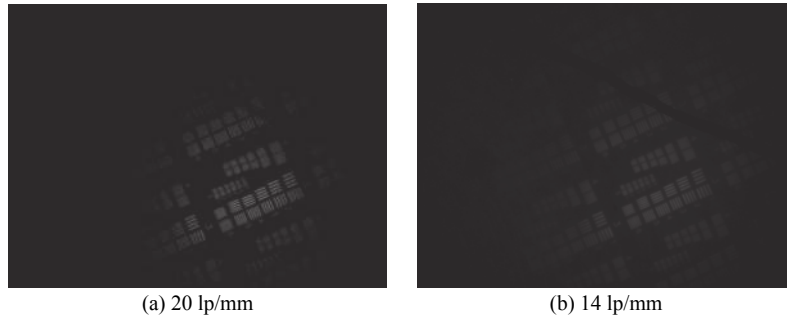


Fig. 21 Static spatial resolution information, indicated in the fourth component partition (corresponding to 20 lp/mm), and quasi-dynamic spatial resolution, indicated in the third component partition (corresponding to 14 lp/mm)

图 21 静态空间分辨率可见第四组分划板信息(对应 20 lp/mm)和准动态空间分辨率可见第三组分划板信息(对应 14 lp/mm)

慈笨院士在 1991 年就研制成功了 3 分幅扫描分幅相机并得到成功应用^[73-74], 扫描分幅相机的基本原理如图 22 所示, 诊断目标产生的信号光通过针孔相机成像在光阴极上, 发出的光电子经加速聚焦成为一条很细的电子束, 通过阳极孔进入扫描板, 扫描板上快速上升的斜坡电压使聚焦光电子束沿多缝光阑扫描, 并通过每个光阑缝实现曝光, 如果采用的多缝光阑有 3 条缝, 那么就可以得到 3 幅图像, 电子束在通过扫描板时, 获得了横向速度, 这样物面上同一点不同时刻产生的光电子将落在屏上不同点上, 使得物点与像点不能一一对应, 造成了图像模糊。为了获得清晰图像, 在多缝光阑的每条缝之后加补偿板, 补偿板上的波形与扫描板完全相同但极性相反, 实现反向加速, 从而抵消了电子束的横向速度。如果要实现更多的分幅数, 可以再加一对垂直扫描的偏转板, 实现分幅数的翻倍。扫描分幅的难点是在两对扫描板上要加时序严格控制且顶部平整的台阶波。日本 Hamamatsu 公司的 C4187 就是一款典型的商业化扫描分幅相机, 可以实现 1~8 分幅, 曝光时间 50 ns~1 ms 可调, 幅间隔 300 ns 到 10 ms 可调, 空间分辨能力 13 lp/mm。但这种相机随着时间放大分幅相机、增强器选通型分幅相机技术以及超快 CMOS 相机的发展, 有逐步被取代的趋势。基于扫描分幅技术的原理, 后来又出现了变像管图像分解复原技术(包括多重成像 X 射线扫描式分幅成像技术和无视差倾斜透镜阵列单曝光超快成像技术等)^[75-76]、变像管交叉点扫描多光栏分幅技术^[77]、光学取样分幅技术^[78-79]、转镜辅助飞秒摄影技术^[80]、压缩感知超快成像技术^[81]以及上述技术的某些组合, 其代表性的分幅数和时间分辨能力见表 5^[82]。

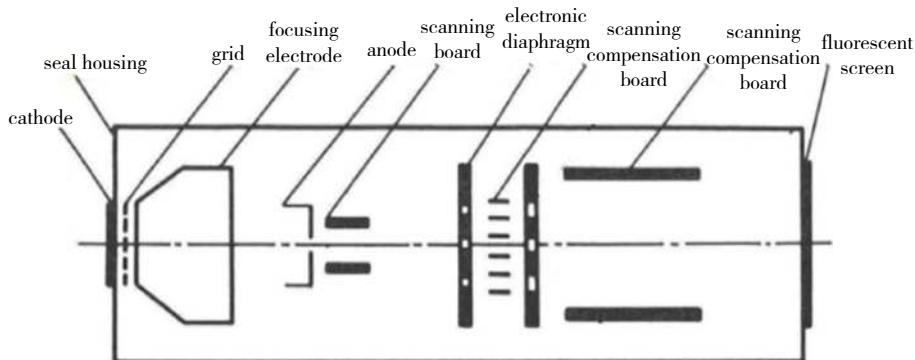


Fig. 22 Schematic diagram of scanning framing tube^[71-72]

图 22 扫描分幅管的原理图

3 国际超快诊断技术的发展态势及我国超快技术发展思考

基于电真空器件的超快诊断技术是一个重资产、重平台、重工艺的多学科交叉融合研究领域, 很多指标如时间分辨、动态范围等都是在追求物理极限, 且对工艺环境要求苛刻、制作工艺环节复杂繁多、往往需要千级甚至百级环境中才能完成, 同时又严重依赖于基础工业, 如材料的纯度、碱源的标准化以及关键元器件如微通道板本身的性能以及电子元器件的一致性。尽管如此, 由于相关的技术往往跟核武器的研究紧密相关, 在其发展鼎盛时期的 20 世纪 70 年代到 90 年代, 有各国政府资金的大力支持, 几乎每个西方发达国家都有多家科研院所从事超快诊断技术的研究, 也是超快诊断技术蓬勃发展的黄金时期。进入 21 世纪随着电真空超快诊断技术发展的日臻成熟以及政府资金投入的逐渐减少, 很多从事电真空超快诊断技术的研究机构适时调整了其研究方向和研究重

表 5 基于条纹相机的二维超快成像技术及其基本参数表

Table 5 Basic parameters of two-dimensional ultrafast imaging technology based on streak camera

scanning framing imaging	time resolution (time of exposure)/ps	number of frames	camera operation mode	single exposure
multi imaging X-ray scanning framing imaging technology ^①	11.7	≥15	single scanning	yes
Single exposure ultrafast imaging technology with non-parallax tilt lens array ^②	2	512	single scanning	yes
sampling imaging scanning framing technology ^③	2		single scanning	yes
rotating mirror assisted femtosecond photography ^④	1.71	≤480	synchronous scanning	no
compression sensing imaging ^⑤	35	≤350	single scanning	yes

Notes: ① Shiraga H, et al. Laser-imploded core structure observed by using two-dimensional x-ray imaging with 10-ps temporal resolution[J]. Rev. of Sci. Instrum. 1995, 66: 722-724. ② Heshmat B, et al. Single-shot ultrafast imaging using parallax-free alignment with a tilted lenslet array, CLEO Sci. Innov. http://dx.doi.org/10.1364/CLEO_SI.2014.STu3E.7(2014). ③ Li Ji, Qu Junle, Niu Hanben. Sampling-image streak framing technique, 2004, 13(4): 461-466. ④ Velten A, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging [J]. Nature Commun. 2012, 3, 745. ⑤ Gao L, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second [J]. Nature, 2014, 516: 74-77

点。作为超快诊断技术发源地和人才培养摇篮的英国帝国理工大学近年来就很少有相关研究的报道。美国 LLNL 将研究重点放在了如何实现超快诊断技术的集成创新方面、使得整个西方发达国家的超快诊断技术更好地为 NIF 服务,同时发展如全光固体超快诊断、时间放大分幅成像等新方法和新技术,甚至整个欧美国国家都进行了资源的有效整合。因为单靠出售条纹相机、分幅相机的这种纯商业化的模式很难支撑一个研究单元从器件设计、单元技术攻关、核心器件制作到系统集成甚至商品化的良性发展,大多数的条纹管制作都集中在英国的 Photek 公司和法国的 Photonics 公司,借助于其像增强器和光电倍增管批量化生产的研发平台和完善的工艺检测管理规范,制作同属电真空器件的条纹管是不需要投入太多额外的工艺设备和技术人员,从而降低了条纹管研制的成本。条纹相机的市场容量不大,且仅占有 Photonis 公司很少一部分业务,因此 Photonics 公司并不做相机的整机集成,随后便出现了像德国的 Optronis 公司、加拿大的 AXIS 公司以及美国 Sydor 等公司,它们不需要投巨资建造电真空器件的研发平台,只要从上述公司采购条纹管,配置输入光学系统、扫描电路模块、ICCD 以及工控和软件,就成为了条纹相机整机集成和个性化定制的公司,这无疑是一条经济划算的捷径,但这种合作方式的成功是建立在各合作方无技术壁垒以及当事国之间战略互信的基础上。美国的 Cordin 公司自 1953 年成立家族式企业以来,主要致力于转镜式以及增强器选通型分幅相机的研制,其产品远销世界多个国家,后来也从事条纹相机的研制,推出了两款条纹相机 Model 164 和 Model 174^[83]。日本 Hamamatsu 公司则是条纹相机商业化做得最成功的企业,借助于其完善的光电倍增管、像增强器等类似电真空器件批量化研发生产平台以及强大的经济实力的支持,具备核心条纹管的设计、制管、整机集成能力。其条纹相机的整体性能指标属于国际上最高水平,且具备从条纹管、微通道板、像增强器、CCD、光纤面板等核心器件及原材料的自主可控能力。归功于其持续的改进和完善,其条纹相机的稳定性、可靠性、性能指标以及软件的界面友好程度都做得非常好,条纹相机的上位机软件已经更新到第十四版。全俄罗斯光学和物理测量研究所(VNIIOFI)和俄罗斯科学院普通物理所(GPI)目前超快诊断技术的发展跟中国一样,没有绑定像增强器及光电倍增管批量化研发及生产平台,面临着研制成本高、产品单一、国内需求萎缩、市场化生存困难的问题,虽然 VNIIOFI 早在 1990 年就成立了 Bifo 公司,推进条纹和分幅相机的市场化,但降低相机的研制成本和持续推进技术更新还存在资金上的困难。

国内超快诊断技术的发展经历了一波三折。西安光机所是国内从事超快诊断技术研究最早的机构,在 20 世纪 80 年代超快诊断技术的发展曾经达到国际先进水平,也出现了龚祖同、侯洵、牛憨笨以及常增虎等国际知名的超快诊断技术专家。但随着国家以经济建设为核心的主导思想的提出,原来从事超快诊断技术人员纷纷转换研究方向,甚至调离原单位或者到国外发展,西安光机所曾面临着要不要继续保留超快诊断技术学科的困惑,在经历了十年左右低迷期后,在中国科学院大力支持下,西安光机所超快诊断技术又恢复了昔日的辉煌,但仍然没有摆脱研制成本高、产品单一、存在技术壁垒、市场化程度有待进一步提高等难题,而且国内现在又出现了深圳大学、北方夜视、中电 55 所、中国工程物理研究院激光聚变研究中心和中国工程物理研究院流体物理研究所这些从事超快诊断技术的研制单位。一方面,研制单位的增加有利于增强研究队伍和研究能力,但同时又分散了有限的研究资源,不利于集中资源解决技术问题,进一步提高了超快诊断设备的平均成本。表 6 为现存国内外条纹相机的 16 个主要研究单位,从条纹管的设计、条纹管的制作尤其是光电阴极制作技术、制作方法以及系统集成等方面看,国内

表 6 国内外条纹管/条纹相机整机研制情况一览表
 Table 6 Capacity of developing streak tube/camera of the manufactors on the world

No.	country	manufactor	design of streak tube	photocathode of streak tube									remarks	
				X-ray	solar blind ultraviolet	visible(muti alkali)		infrared			streak camera			
						non-transfer	transfer	S1(Ag-O-Cs)	InGaAs/InP/Ag(Au)	single	repeated	synchron-ized		
1	Japan	Hamamatsu	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
2	Russia	VNIIOFI(Bifo)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
3		GPI	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
4	France	Photonis	√	√	√	√	√	√	√					
5	Germany	Optronis								√	√	√		
6	UK	Photek	√	√	√	√	√			√	√	√		
7		Kentech	√											
8	Canada	AXIS		√								√		
9		Cordin	√	√		√	√		√	√	√	√		
10	USA	LLNL	√							√	√	√		
11		Sydor								√	√	√		
12		XIOPM	√	√	√	√	√			√	√	√		
13		Shenzhen University	√	√		√				√	√	√		
14		CETC55		√	√	√								
15	China	NNVT		√	√	√	√							
16		Institute of Fluid Physics, CAEP Laser fusion		√						√				
17		research center, CAEP		√						√				

在相机的性能提升以及相机的商品化方面还需继续努力,比如在红外波段响应的 III-V 光电阴极研制方面还需要有所突破。

发展国内超快诊断技术,我国必须走自主研发的道路。我国没有像美国、法国以及英国那样合作研究的国际政治环境,引进组装的道路不是长久之计。从表 6 可以看出,国内在超快诊断方面取得长足进展的同时,还存在技术的短板。由于超快诊断技术有可能应用于国防领域,西方国家会对相关技术继续采取限制出口措施,因此国家需要持续支持相关技术的研究,同时,国内各超快诊断技术研究单位,也要加强合作,取长补短,但合作的前提是加强知识产权保护,只有树立知识产权保护意识,才能促进创新和在信任的基础上加强合作。同时,电真空器件生产单位也要承担应有的国家责任,在生产国家装备体量大、经济价值高的产品的基础上,主动培养超快诊断技术研发团队,走 Hamamatsu 滨松全面发展的模式以降低超快诊断设备的研发成本。同时,传统的超快诊断技术研发优势单位,虽然面临着几乎所有国产科研仪器普遍认可度不高的困境,但也要努力提高相机的稳定性和可靠性,主动拓宽超快诊断设备的应用领域、培植多阳极探测器、快响应像增强器以及快响应光电倍增管等的小批量化生产能力,丰富超快诊断器件和设备的产品类型,增强超快诊断技术的可持续发展能力和用户对国产仪器的认可度。

致 谢 感谢中国工程物理研究院丁永坤研究员的约稿,同时也非常抱歉,由于对超快诊断技术的认识不足和掌握的资料有限,文章中的说法和数据难免有些偏颇,请批评指正。

参考文献:

- [1] Peplow M. The next big hit in molecule Hollywood[J]. *Nature News*, 2017, 544(7651): 408.
- [2] Johnson C B. Photoelectronic streak-tube technology review[C]//Proc of SPIE. 1977, 94: 13-18.
- [3] Trebino R, Daniel J K. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency resolved optical gating[J]. *J of Opt Soc Am A*, 1993, 10(5): 1101-1111.

- [4] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(10): 792-794.
- [5] Sabrina R Nagela, Hilsabeck T J, Ayers M J, et al. 2D magnetic field warp reversal in images taken with DIXI (dilation X-ray imager)[C]//Proc of SPIE. 2016: 88500I.
- [6] Sun RenPing, Lai XuanYang, Liu Xiaojun, et al. Tomographic extraction of the internuclear separation based on two-center interference with aligned diatomic molecules[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 193202.
- [7] Itatani J, Quéré F, Corkum P B, et al. Attosecond streak camera[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 173903.
- [8] Zhao Kun, Zhang Qi, Chang Zenghu, et al. Multiphoton processes and attosecond physics[M]//Route to One Atomic Unit of Time: Development of a Broadband Attosecond Streak Camera.2012.
- [9] Yurtsever A, Zewail A H. 4D nanoscale diffraction observed by convergent-beam ultrafast electron microscopy[J]. *Science*, 209, 326: 708-712.
- [10] Nakagawa K, Iwasaki A, Sakuma I, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)[J]. *Nature Photon*, 2014, 8: 695-700.
- [11] Yu Lu, Chen Feng, Wang Lidai. Compressed ultrafast spectral-temporal photography[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 193904.
- [12] Conrtney-Pratt J S. A new method for the photographic study of fast transient phenomena[J]. *Research Supply*, 1949, 2(6): 287-295.
- [13] Bradley D J, Liddy B, Sleat W E. Direct linear measurement of ultrashort light pulses with a picosecond streak camera[J]. *Optics Communication*, 1971, 8(2): 391-395.
- [14] 顾礼. X射线飞秒条纹变像管设计与性能提高研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015, 10-13. (Gu Li. Research on X-ray femtosecond streak tube design and performance improvement[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015: 10-13.)
- [15] Howorth J, Milnes J, Fisher Y, et al. The development of a streak tube with improved time and spatial resolution [C]//Proc of SPIE. 2017: 103280Q.
- [16] Sibbett W, Niu H, Baggs M R. Femtosecond streak image tube[C]//Proc of SPIE. 1983, 348: 271-275.
- [17] Katsuyuki K, Motohiro S, Yoshinori I, et al. Femtosecond streak tube[C]//Proc of SPIE. 1993, 1982: 180-185.
- [18] Chang Zenghu, Rundquist A, Kapteyn H, et al. Demonstration of a 0.54-ps X-ray streak camera[C]//Proc of SPIE. 1997, 2869: 971-976.
- [19] Feng J, Shin H J, Young A T, et al. An X-ray streak camera with high spatio-temporal resolution[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 134102.
- [20] 牛慈笨. 变像管诊断技术[J]. *光子学报*, 1988, 18(1): 196-205. (Niu Hanben. Technique of image tube diagnostics[J]. *Acta Photonics*, 1988, 18(1): 196-205)
- [21] 薛鸣球, 黄玉金, 赵葆常, 等. 光学系统时间畸变和色时间滞后的研究[J]. *光子学报*, 1995, 24(6): 481-483. (Xue Mingqiu, Huang Yujin, Zhao Baochang, et al. Research on the aberration and spectral lag off of optical system[J]. *Acta Photonics*, 1995, 24(6): 481-483)
- [22] Shakya M M, Chang Zenghu. An accumulative X-ray streak camera with 280-fs resolution[C]//Proc of SPIE. 2004, 5534: 125-131.
- [23] Danilenko K N, Zyuzin L N, Slavnov Yu K, et al. High-speed image converter instrument engineering of VNIIOFI is 40 years old[C]//Proc of SPIE. 2007: 627908.
- [24] Zavoijsky E K, Fanchenko S D. Image converter high-speed photography with $10^{-9}\sim 10^{-14}$ sec time resolution[J]. *Appl Opt*, 1965, 4(9): 1155-1167.
- [25] Friedman W, Jackel S. Dynamic range and spatial resolution of picoseconds streak cameras[C] // Proc of SPIE. 1976, 97: 544-547.
- [26] Ageeva N V, Andreev S V, Schelev M, et al. Sub-100 fs streak tube: computer-aided design, manufacturing, and testing[C]//Proc of SPIE. 2009: 71261B.
- [27] Kinoshita K, Suyama M, Ito M, et al, Femtosecond streak tube[C]//Proc of SPIE. 1990, 1358: 490-491.
- [28] Lebedev V B, Feldman G G, Veinbein P, et al. Development and testing of subpicosecond streak camera for soft X-ray measurements[C]//Proc of SPIE. 1999, 3516: 74-84.
- [29] Kinoshita K, Ishihara Y, Abe S, et al. Development of a single-shot streak tube with 100 fs time resolution[C]//The 31st International Congress on High-speed Imaging and Photonics. 2016: 305-310.
- [30] <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/photometry-systems/streak-camera/index.html>.
- [31] Girard A, Loty C, Allamargot J L, et al, P 700 : A new high speed streak tube with lamellar electron optics[C] // Proc of SPIE. 1984, 491: 58-62.
- [32] Alain Mens, Dominique Gontier, Huilizen J C, et al. High-spatiotemporal-resolution X-ray streak cameras with bilamellar tubes: experimental confirmation of the performance[C]//Proc of SPIE. 1993, 1801: 502-513.
- [33] Mens A, Dalmaso J M, Sauneuf R, et al. C 850X picosecond high-resolution streak camera[C]// Proc of SPIE. 1993, 1358: 315-328.
- [34] Gallant P, Forget P, Kieffer J C, et al. Characterization of a subpicosecond X-ray streak camera for ultrashort laser-produced plasmas experiments[J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, 71(10): 3627-3633.
- [35] De Mascureau J, Mens A, Mexmain J M, et al, C 850 X-ray streak camera with optimized spatio-temporal resolution[C]//Proc of SPIE. 1988, 981: 86-92.
- [36] <https://www.photonis.com/products/streak-tubes/index.html>.
- [37] Rebuffie J C, Mens A, New streak tubes of the P500 series: features and experimental results[C]// Proc of SPIE. 1990, 1358: 511-523.
- [38] Niu H, Sibbett W. Theoretical analysis of space charge effects in photochron streak camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 1981, 52(12): 1830-1836.
- [39] Niu H, Zhang H, Wang X H, et al. A new picosecond synchroscan streak image tube [C]//Proc of SPIE. 1988, 1032: 468-471.
- [40] Guo Baoping, Niu Hanben. Synchroscan streak camera with fixed frequency for diagnosing light pulses with arbitrary repetition rates[C]//Proc of SPIE. 1997, 2869: 149-153.
- [41] Niu Hanben, Zhang Hai, Yang Qinlao, et al. Experimental study of femtosecond streak image tube[C]//Proc of SPIE. 1992, 1801: 1035-1041.
- [42] Qu Junle, Niu Hanben. A soft X-ray streak camera with slit length of 30mm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, B7(2): 120-125.
- [43] 廖华, 胡昕, 杨勤劳, 等. 宽量程高时间分辨扫描变像管[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(1): 79-82. (Liao Hua, Hu Xin, Yang Qinglao, et al. Wide range and

- high temporal resolution streak tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(1): 79-82)
- [44] Gavagan L, Diamant L, Fedorov V, et al. Nanosecond frame cameras based upon proximity focused image intensifiers[C]//Proc of SPIE. 1968, 41: 232-236.
- [45] Lieber A J, Sutphin H D. Nanosecond gating of proximity focused channel plate intensifiers[J]. *Rev Sci Instr*, 1972, 43(1): 104-109.
- [46] Lieber A J, Sutphin H D. Nanosecond high resolution framing camera[J]. *Rev Sci Instr*, 1971, 42(11): 1663-1667.
- [47] Nahrath B, Shakhatre M, Decker G. Nanosecond X-ray pictures recorded with a pulsed channel plate[J]. *Rev Sci Instrum*, 1976, 1: 88-92.
- [48] Eckart M J, Hanks R I, Kilkenny J D, et al. Large-area 200-ps gated microchannel plate detector[J]. *Rev Sci Instrum*, 1986, 57(8): 2046-2048.
- [49] Kilkenny J D, Bell P, Hanks R, et al. High speed gated X ray imagers[J]. *Rev Sci Instr*, 1988, 59(8): 1793-1796.
- [50] Ladislav J. Microchannel plate detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, 162: 587-601.
- [51] Lieber A J. Picosecond framing camera using a passive microchannel plate[J]. *App Opt*, 1979, 18(6): 745-746.
- [52] Fehl D L, Chang J, Mendel CW, et al. Five-frame X-ray camera for charged particle inertial confinement fusion studies[J]. *Rev Sci Instrum*, 1980, 3: 292-296.
- [53] Arvid S, Lundy. Ultrafast gating of proximity focused microchannel-plate intensifiers[C]//15th Inter Congr on High Speed Photograph and Photonics.1982,348: 178-189.
- [54] Young B K F, Stewartand R E, Woodworth J G. Experiment demonstration of a 100-ps microchannel plate framing camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 1986, 11: 2729-2733.
- [55] Bell P M, Killkenny J D, Hanks R, et al. Measurements with a 35 ps gate time microchannel plate camera[C]//Proc of SPIE. 1990, 456: 1346.
- [56] Benedetti L R, Bell P M, Bradley D K, et al. Crosstalk in X-ray framing cameras: Effect on voltage, gain, and timing[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 10E135.
- [57] Izumi N, Hall G N, Bell P M, et al. Development of a dual MCP framing camera for high energy X-rays[J]. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11D623.
- [58] Lugten J B, Brown C G Jr, Piston K W, et al. Optimizing the input and output transmission lines that gate the microchannel plate in a high-speed framing camera[C]//Proc of SPIE. 2015: 95910L.
- [59] Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, et al. Standard design for National Ignition Facility X-ray streak and framing cameras[J]. *Rev of Sci Instrum*, 2010, 81: 10E530.
- [60] Koga M, Shiraga H. Gain depletion of X-ray framing camera[J]. *Rev of Sci Instrum*, 2017, 88: 083514.
- [61] Nagel S R, Carpenter A C, Park J. The dilation aided single-line-of-sight X-ray camera for the National Ignition Facility: Characterization and fielding[J]. *Rev of Sci Instrum*, 2018, 89: 10G125.
- [62] 常增虎, 山冰. 微通道板选通X射线皮秒分幅相机[J]. 光子学报, 1995, 24(6): 501-508. (Chang Zenghu, Shan Bing. MCP gated of X-ray framing camera[J]. *Acta Photonics*, 1995, 24(6): 501-508)
- [63] 成金秀, 温天舒, 朱宗元, 等. MCP选通X射线皮秒分幅相机在ICF中的应用[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(1): 73-77. (Cheng Jinxiu, Wen Tianshu, Zhu Zongyuan, et al. Multiframe gated microchannel-Rlate X-ray camera used in inertial confinement on ICF faculty[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(1): 73-77)
- [64] 成金秀, 杨存榜, 温天舒, 等. 门控MCP软X射线皮秒多分幅相机[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(5): 596-600. (Cheng Jinxiu, Yang Cunbang, Wen Tianshu, et al. MCP gated of soft X-ray multi-frame camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(5): 596-600)
- [65] Shan Bing, Yanagidaira T, Shimoda K, et al. Quantitative measurement of X-ray images with a gated microchannel plate system in a Z-pinch plasma experiment[J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, 70(3): 1688-1693.
- [66] Chang Zenghu. Two MCPs gated in cascade for picosecond framing photography[C]//Proc of SPIE. 1995, 2513: 119-124.
- [67] Nagel S R, Hilsabeck T J, Dymoke-Bradshaw A K L, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11E504.
- [68] Cai Houzhi, Fu Wenyong, Liu Jinyuan, et al. Dilation X-ray framing camera and its temporal resolution uniformity[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 2817-2827.
- [69] Cai Houzhi, Fu Wenyong, Liu Jinyuan, et al. Synchronous gating in dilation X-ray detector without 1: 1 image ratio[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 12470-12482.
- [70] Kalibjian R. 100-ps framing-camera tube[J]. *Rev of Sci Instrum*, 1978, 49(7): 891-896.
- [71] Ludikov V V, Prokhorov A M, Chevokin V K. A subnanosecond multi-framing camera[J]. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 1998, 74: 239-246.
- [72] Lebedev V B, Feldman G G, Kolesov G V, et al. Tests and further development of universal image-converter picosecond camera[C]//Proc of SPIE. 1993, 1801: 528-535.
- [73] 牛慈笨, 张焕文, 杨勤劳, 等. 变像管皮秒分幅和飞秒扫描相机的实验研究[J]. 光子学报, 1991, 21(1): 11-20. (Niu Hanben, Zhang Huanwen, Yang Qinlao, et al. Experimental study of picosecond framing and femtosecond streak camera[J]. *Acta Photonics*, 1991, 21(1): 11-20)
- [74] Feng Jie, Ding Yongkun, Niu Hanben, et al. Improvements of UV/X-ray framing image tube cameras [C]//Proc of SPIE. 1997, 2869: 664-667.
- [75] Shiraga H, Heya M, Fujishima A, et al. Laser-imploded core structure observed by using two-dimensional X - ray imaging with 10 ps temporal resolution[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(1): 722-724.
- [76] Heshmat B, Satat G, Barsi C, et al. Single-shot ultrafast imaging using parallax-free alignment with a tilted lenslet array[C]//IEEE, Lasers & Electro-Optics. 2014.
- [77] 常增虎, 侯询, 张小秋, 等. X射线皮秒变象管分幅相机研究[J]. 光子学报, 1987, 17(1): 1-6. (Chang Zenghu, Hou Xun, Zhang Xiaoqiu, et al. Primary investigation of X ray picosecond frame camera[J]. *Acta Photonics*, 1987, 17(1): 1-6)
- [78] 李冀, 屈军乐, 牛慈笨, 等. 取样成像扫描式分幅技术[J]. 强激光与粒子束, 2004, 13(4): 461-466. (Li Ji, Qu Junle, Niu Hanben, et al. Sampling-image streak

- framing technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 13(4): 461-466)
- [79] Shiraga H, Miyanaga N, Heya M, et al. Ultrafast two-dimensional X-ray imaging with X-ray streak cameras for laser fusion research[J]. *Rev Sci Instrum*, 1997, 68(1): 745-749.
- [80] Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(3): 745.
- [81] Gao Liang, Liang Jinyang, Li Chiye, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. *Nature*, 2014, 516: 74-77.
- [82] Shiraga H. Review of concepts and applications of image sampling on high-speed streak cameras[C]//Proc of SPIE. 2016: 103280R.
- [83] <https://www.cordin.com/streak.html>.