

高性能条纹相机的研制

中国科学院西安光学精密机械研究所

仪器研发背景

人类在追求突破“衍射极限”空间分辨的同时，也在不遗余力地追求能够实现“分子电影”的时间分辨成像工具。与显微技术是观测微观世界的空间放大和人眼空间分辨能力的延长类似，超高速成像是观测瞬态事件的时间放大和人眼时间分辨能力的延长。

所谓瞬态事件，是指持续时间小于 $1\ \mu\text{s}$ 的超快现象，这种现象广泛存在于自然或科学技术研究中。例如，植物的光合作用过程、超大规模集成电路所产生的电脉冲、半导体材料的载流子寿命、激光材料中的超快光激发态的弛豫过程、化学反应的分子动力学过程、生物材料的荧光发射、激光器产生的超短激光脉冲、强光与物质相互作用物理过程等多在皮秒（ps）、飞秒（fs）甚至阿秒量级范围内。这些超快现象的研究对自然科学、能源、材料、光生

物、光物理、光化学、激光技术、强光物理、高能物理等均具有重要的意义，而观测、记录和分析这些现象又依赖于高时间分辨的诊断仪器。

条纹相机作为当前唯一同时具备超高时间分辨（fs—ps 量级）与高空间分辨（ μm 级）的高端科学测量与诊断仪器，是实现微观和超快过程探测的必要手段，对于基础前沿科学研究和重大原始性创新具有重大意义，更是惯性约束聚变（ICF）等国家战略高技术研究中不可或缺的诊断仪器。

在同步辐射装置以及正负电子对撞机等大型装置中，条纹相机可以诊断粒子束团的长度等关键性能指标，可为重大装置的改进和性能提升提供参考依据；在国防安全及空间领域，条纹相机技术是爆轰物理研究中冲击波速度、自由面速度以及爆轰温度等常规武器性能评估的关键测量手段；基于条纹相机技术的新型激光三



系列化条纹相机

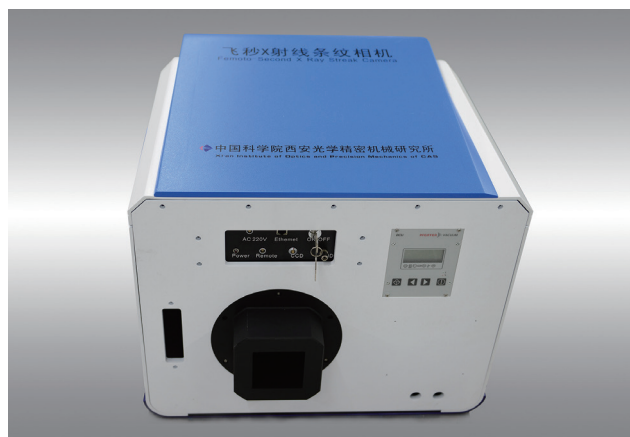
执笔人：王兴，田进寿

维成像雷达在军事和航天领域也有着非常大的需求，是一种可以在探测器和目标物同时高速移动的情况下进行瞬时成像的系统，可用于水雷搜索、海矿探测、地形地貌勘探等；将压缩感知技术和条纹相机的超快时间分辨能力相结合，可实现帧频达 10^8 的二维超快过程成像，使条纹相机的性能和应用领域进一步得到提升和扩展。由于条纹相机应用领域的前瞻性和敏感性，条纹相机及相关技术属于西方国家出口严格管制的领域。

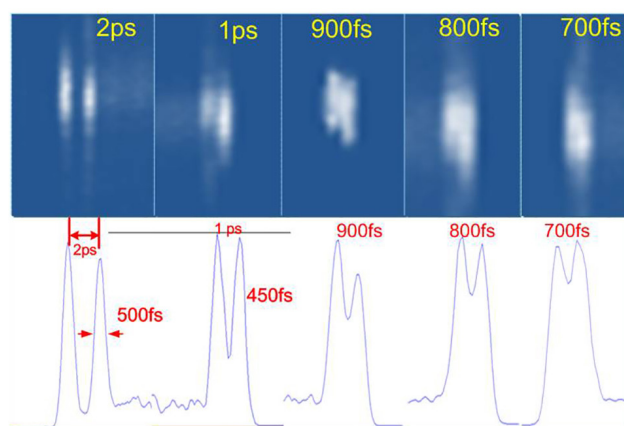
中国科学院西安光学精密机械研究所（以下简称“西安光机所”）在条纹相机领域已经有 50 多年的研究历史，是我国条纹相机专业科研机构代表。建所之初，龚祖同院士（学部委员）高瞻远瞩，确立了超快诊断技术是西安光机所特色学科的地位，在老一辈超快诊断专家如侯洵院士、牛憨笨院士等的发扬和继承下，西安光机所条纹相机技术得到了长足的发展。2012 年，西安光机所承担了“高性能条纹相机的研制”国家重大科研装备项目，旨在进一步提高条纹相机的综合功能和性能指标，发展具有自主知识产权的高性能、高可靠性、实用化条纹相机系统，并形成一定的批量生产能力，满足国家大科学工程和国家重大基础前沿研究不断增长的数量和高性能指标的需求。经过 5 年的艰苦攻关和技术创新，西安光机所在条纹相机的性能提升、种类发展、生产标准等方面都取得了重要的进展。

主要进展

在国家重大科研装备项目的支持下，西安光机所建成了国内唯一的集设计、生产、检测为一体的条纹相机研发基地；解决了条纹相机制备过程中存在的各种工艺问题和工程实施难题，形成了系列化核心器件/系统自主研发的能力，关键性能指标达到或超过国际同等水平；具备了高可靠性、高稳定性的标准化条纹相机批量生产能力；实现了超快诊断技术的可持续发展，成为我国独具特色的超快诊断人才培养重地。西安光机所研制的条纹相机成功打破了国外封锁，使我国相关高精尖技术研究不再受制于人，已为国家大科学工



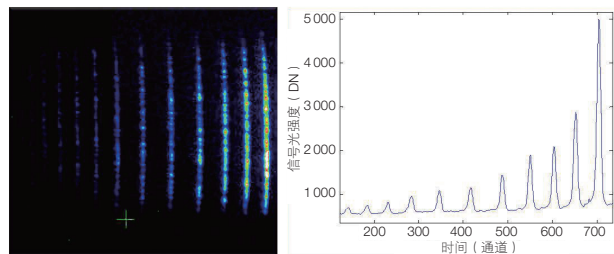
飞秒条纹相机



飞秒条纹相机时间分辨率实验结果



大动态范围条纹相机



大动态范围相机动态范围实验结果

程、基础前沿和国防安全提供了核心技术保障。

目前已成功研制出 8 种类型的条纹相机，满足了不同应用背景和一些特殊应用环境的需求。其中，X 光飞秒条纹相机的时间分辨率达到 450 fs，主要用于飞秒化学反应的动力学过程、飞秒激光特性等的测量；同步扫描条纹相机的同步频率达到 300 MHz，主要用于对极微弱光信号的多次重复扫描测量，如荧光光谱、荧光寿命等；大动态范围条纹相机的动态范围超过了 10000:1@100 ps，主要满足对物理量跨度范围极大信号的探测，如等离子体的发射过程、内爆过程等；皮秒条纹相机的时间分辨率优于 5 ps，主要用于时间分辨的拉曼光谱测量等；长狭缝 X 光条纹相机的狭缝宽度大于 28 mm，可响应能谱范围为 0.1—10 keV 的 X 射线，主要用于 ICF 中激光参数的诊断和多路激光的同步。为了提高条纹相机的亮度增益和边缘部分的空间分辨率，西安光机所采用曲面阴极和曲面荧光屏结构，开发了一类长狭缝条纹相机和两类超小型条纹相机，这使得我国条纹相机的种类更加齐全，应用范围更加广阔。尤其是超小型条纹相机，具有体积小、重量轻、灵敏度高、分辨率高、成像帧频高、视场宽、增益高、可靠性高等优点，可应用于激光三维成像雷达中，有望在航天测绘、空间对抗与攻防和水下探测等领域发挥重要作用。

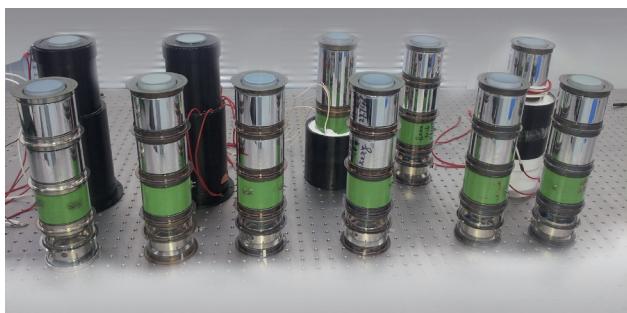
除此之外，西安光机所也在引领着条纹相机技术的发展，在国内首次成功研制全光固体超快相机，该相机基于成熟的半导体工艺和飞秒激光技术，同时具有超快时间分辨（优于 5 ps）和二维超高空间分辨（小于 20 μm ）能力，响应波段从 X 射线到近红外波段，实现了条纹相机技术从真空到固体的跨越式发展。

核心关键技术

高性能条纹相机的研制过程中，西安光机所在电子光学系统设计、高性能光电阴极制作、超快斜坡脉冲产生电路以及电子脉冲时空调制等关键技术上取得了系列突破，获得了数十项国家发明专利，拥有了完全自主知识产

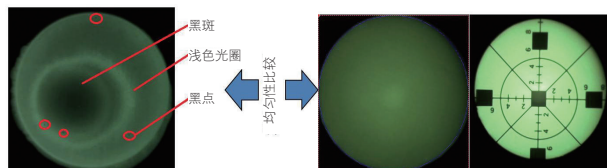


同步扫描条纹相机



条纹相机核心——条纹变像管

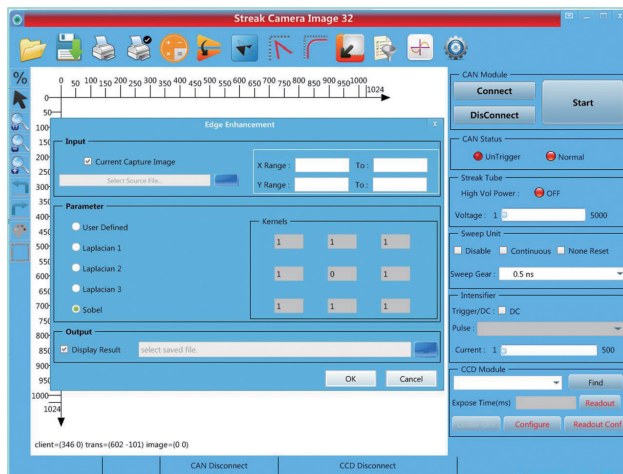
单位	管型	积分灵敏度	波长 (nm)	光谱灵敏度															
				400	450	500	550	600	650	700	750	800	850						
Photek	ST-Y	160 $\mu\text{A}/\text{lm}$		61	64	52	48	33	23	4	2	1	0						
光机所	皮秒管	145 $\mu\text{A}/\text{lm}$	PRS (mW)	62	52	39	36	26	19	13	6	2	0						
光机所	同步管	221 $\mu\text{A}/\text{lm}$		51	51	43	42	34	28	24	18	13	7						
光机所	大动态管	209 $\mu\text{A}/\text{lm}$		49	63	49	46	35	28	21	12	6	2						
光机所	大动态管	258 $\mu\text{A}/\text{lm}$		34	54	59	60	43	32	25	17	12	5						



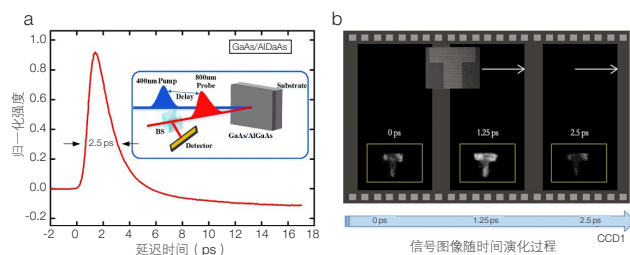
非转移系统制作的条纹管

转移系统制作的条纹管

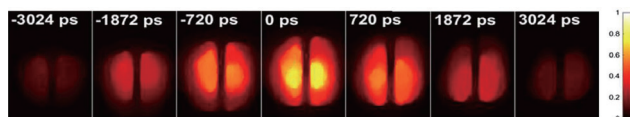
光阴极灵敏度（与英国 Photek 公司对比）及均匀性（与改进前工艺对比）实验结果



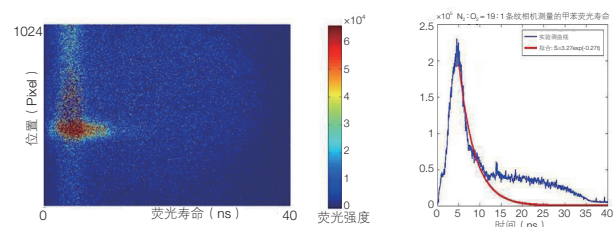
大动态范围相机动态范围实验结果



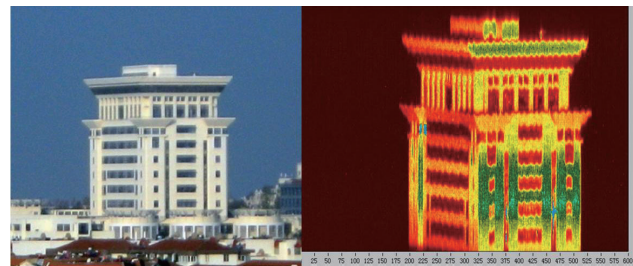
全光固体相机实验结果



高性能条纹相机在压缩感知超快成像实验中测量激光脉冲随时间演化过程的应用实例



高性能条纹相机在超燃发动机荧光成像实验中的应用实例



高性能条纹相机在激光三维成像雷达中的应用实例

权。所突破的核心关键技术包括：行波偏转板前置短磁聚焦技术，实现了相机的飞秒时间分辨；板状电极与电极透镜相结合的各向异性聚焦技术，实现了相机的大动态范围；自稳频锁相技术和谐振腔电子屏蔽技术，实现了国际最高的同步扫描频率；超高真空转移阴极和钢封技术，实现了高灵敏度大面积高均匀性光电阴极的制作。

在满足国家重大需求方面的代表性应用案例

项目研制的条纹相机已经在我国的三个重大专项中得到应用。在中国工程物理研究院激光聚变研究中，研制的飞秒条纹相机实现了对激光打靶产生的超快 X 光脉冲时空参数的精密定标；研制的同步条纹相机在国防科技大学精确测量了甲苯在不同气氛中的荧光寿命，为实现高超发动机燃烧诊断从定性到定量的转化奠定了基础；研制的皮秒条纹相机为哈工大某重大专项研究提供了超高灵敏度的条纹相机探测器，实现了某激光三维测绘系统样机的原理性验证试验。

高性能条纹相机还用于中国工程物理研究院二所、八所、西北核技术物理研究所以及西安交通大学等单位，均取得了良好的实验结果。此外，研制的高性能条纹相机还成功应用于压缩感知超快成像，结果已发表在 *Optica*，为条纹相机实现高时间分辨二维成像奠定了基础。

专家点评

条纹相机是兼具超高时空分辨特性的先进诊断仪器，在基础科研、大科学装置及战略高技术领域均有广泛应用。西安光机所在高性能条纹相机研制过程中发挥着开创者与引领者的重要作用，在国家重大科研仪器项目的支持下，新研制的条纹相机核心指标均达到或领先国际先进水平，打破了美国、日本在高端条纹相机领域的国际垄断，为激光核聚变、激光雷达以及高超发动机燃烧研究等提供了有力保障。并率先提出全光固体超快诊断相机方案，正实现条纹相机从真空向固体的跨越式发展。

创新发展的局面来之不易，有序竞争、保护自主知识产权任重道远。需要管理部门对以条纹相机为代表的高端科学仪器研究给予持续的关注和支持，发展具有创新性、变革性的超快诊断技术及仪器。

——李正宏，中国工程物理研究院研究员，中国工程物理研究院核物理与化学研究所混合堆研究团队首席专家