引用格式：TAN Xiaobo, YAN Xin, YI Tao, et al. Experimental Study on the Spatial Performance of Photorefractive X-ray Semiconductor Ultrafast Response Chip[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2):0251215
谭小波,闫欣,易涛,等. 光折变X射线半导体超快响应芯片空间性能的实验研究[J]. 光子学报,2022,51(2):0251215

光折变X射线半导体超快响应芯片空间性能的实验研究

谭小波[1],闫欣[2],易涛[3],何凯[2],邵铮铮[1],周凯凯[1],高贵龙[2],汪韬[2],张军[1],庄钊文[1]

(1 国防科技大学 电子科学学院,长沙 410073)
(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室,西安 710119)
(3 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘　要:利用高能量纳秒激光轰击Al靶材产生的X射线作为信号源,对光折变X射线半导体响应芯片的空间性能进行实验研究。结果表明,低温生长AlGaAs芯片具备在X射线入射能量120:1的动态范围内进行高空间分辨的大画幅成像能力,最优空间分辨率≥35 lp/mm @MTF=0.1,成像画幅可达6.7 mm×6.7 mm。该研究对于光折变X射线超快成像系统的研制具有参考意义。

关键词:光折变效应;X射线成像;超快成像;空间分辨率;动态范围
中图分类号:TB872　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/gzxb20225102.0251215

0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)是将高能短脉冲激光注入黑腔对靶丸加热压缩以实现聚变点火的方法,超快诊断技术在ICF研究中不可或缺[1-2]。ICF发生在极小的空间(0.1～1 mm),极短的时间(～ns),且部分过程如内爆热斑的持续时间只有100～200 ps,这需要诊断技术具备ps级甚至百fs级的超高时间分辨能力以及μm级的高空间分辨能力[3]。传统电真空超快探测技术通常基于光电转换原理,其性能受到材料响应、空间电荷效应等因素的制约,比如,采用微通道板(Microchannel Plate, MCP)技术可以将分幅相机的时间分辨率提升到～30 ps,但MCP带来的空间电荷效应限制了其空间分辨率(～50 μm)[4-6];DIXI(DIlation X-ray Imager)利用电子脉冲时间放大技术以获得更短的选通时间,实现了较高时间分辨的成像(～10 ps),但DIXI中会产生大量次生电子,影响成像的信噪比和空间分辨率(～100 μm)[7-8];条纹相机虽能够达到200 fs的超高时间分辨率,但其本身不具备二维成像能力,较大地限制了其应用[9-10]。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室提出了基于半导体光折变效应的超快探测技术,时间响应可达ps～百fs,还具有全光全固态抗强辐射能力等优势[11-12]。LONDON R A等对GaAs材料的能量沉积时空特性进行了理论分析和数值计算,研究表明GaAs的时间响应低至百fs级,空间分辨优于5 μm,光折变材料可用于高时空分辨超快成像研究[13]。BAKER K L等采用硒化镉(CdSe)作为响应材料实现了时间分辨率为5 ps的两分幅X射线成像,而CdSe非平衡载流子复合时间较长,需要采用差分方式获得较高时间分辨的图像,其成像的空间分辨率达到30 lp/mm,画幅约为2.5 mm×1.5 mm[12]。

国内,中国工程物理研究院对CdSe的超快动力学开展了研究,得到其载流子复合时间为470±20 ps[14]。西北核技术研究所将光折变材料应用于Z箍缩,采用磷化铟(InP)实现了时间分辨率约为1.5 ns、空间分辨率

基金项目:国家自然科学基金(No. 51302316)
第一作者:谭小波(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为超快信息获取技术。Email: xiaobo_tan@hotmail.com
导师(通讯作者):庄钊文(1958—),男,教授,博士,主要研究方向为智能信号处理、自动目标识别、卫星导航定位等。Email: zhaowenzhuang@nudt.edu.cn
收稿日期:2021-09-02;**录用日期**:2021-10-27

约为140 μm的成像，并分析了其在5 eV～100 keV范围内的光谱响应[15]。中科院西安光机所等单位利用砷化镓/铝镓砷（GaAs/AlGaAs）多量子阱结构半导体材料得到了3 ps高时间分辨的六分幅可见光成像，该材料的非平衡载流子寿命低至2.5 ps，响应时间远小于CdSe，无需进行差分即可实现高时间分辨成像[16-17]。王博等以低温GaAs为响应材料，实现了10 ps时间分辨X射线探测，但未进行二维成像[18]。钟梓源等对低温生长铝镓砷（Low-Temperature grown AlGaAs，LT-AlGaAs）的光折变效应进行了理论和实验研究，得到LT-AlGaAs的非平衡载流子的复合时间低至2.08 ps，适用于超快响应芯片的研制[19]，但未开展X射线成像研究。目前为止，尚未出现报道基于光折变超快响应芯片的大画幅X射线成像实验研究。

因此，本文采用LT-AlGaAs为材料研制的超快响应芯片进行X射线成像实验，利用高能量纳秒激光打靶产生X射线，以此为信号源对LT-AlGaAs光折变X射线响应芯片的空间性能开展实验研究。实验结果验证了利用LT-AlGaAs超快芯片进行高空间分辨、大动态范围、大画幅X射线成像的可行性，为光折变超快X射线成像系统的研制及应用提供了实验和数据支撑。

1 原理

半导体的光折变效应是光折变X射线半导体响应芯片的研制基础，当X射线信号的光子能量大于半导体带隙时，材料将吸收能量并在内部产生非平衡载流子。由于半导体的带收缩、带填充以及自由载流子吸收等效应，这些载流子会在极短的时间尺度（fs～ps）减速并导致材料的介电常数和折射率发生变化[13,18]。折射率变化量Δn与信号强度I在一定条件下成近似线性关系$\Delta n=\alpha I$，其中α为常系数[13]。当探针光同时入射到材料内时，其相位将会随着材料折射率的变化而改变[13]，相位改变量为

$$\Delta\Phi=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\Delta n\cdot d=\frac{2\pi\alpha d}{\lambda}\cdot I \tag{1}$$

式中，d为半导体材料的厚度，λ为探针光波长。因此，通过材料的光折变效应，信号光的信息被调制成探针光的相位变化量，其大小和信号光的强度成线性关系，通过进一步的相位提取可恢复出目标信号。

本文采用相位光栅编码进行衍射的方法实现相位信息的提取、设计，研制了对应的光折变响应芯片，其主要由光折变材料LT-AlGaAs、光学镀膜（探针光高反膜），金属掩膜（一维光栅，70 lp/mm）组成。其工作原理如图1所示，当X射线信号入射到芯片正面时，首先被金属光栅调制成一维周期性结构，透过光栅的信号光将到达光折变材料内部，导致材料折射率发生周期性变化，形成一维瞬态相位光栅。另一侧，探针光同步入射到芯片背面，经高反膜反射，探针光的相位将会随材料折射率的改变而发生变化，并被产生的一维相位光栅衍射。

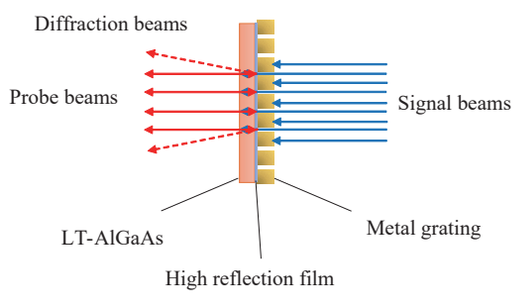


图1 光折变响应芯片的工作原理示意图

Fig.1 Principle diagram of the photorefractive chip

探针光经一维相位光栅衍射后，再通过光学4f滤波系统进行相位信息提取，如图2所示，在频谱面上放

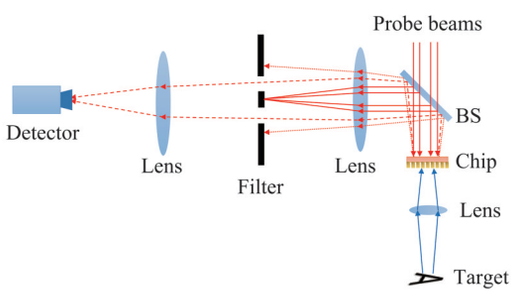


图2 相位光栅编码提取相位原理图

Fig.2 Schematic diagram of phase extraction by phase grating coding

置滤波器，设置小孔只让±1级光通过，最终到达像面进行成像。根据相位光栅的衍射理论[20]，各个级次的衍射效率

$$\varepsilon(m)=\begin{cases}\cos^2(\Delta\Phi) & m=0\\ \dfrac{4}{(m\pi)^2}\sin^2(\Delta\Phi) & m\neq 0\end{cases} \tag{2}$$

因此，滤波让+1或−1级通过，最后到达探测器的光强度

$$I_{\text{detect}}=I_{\text{probe}}\cdot\frac{4}{\pi^2}\sin^2(\Delta\Phi) \tag{3}$$

式中，I_{probe}表示探针光的强度。由此，将相位变化量转为探针光光强的变化，实现了相位信息的提取。

2 实验

2.1 实验装置布局

测量实验利用高能量激光脉冲轰击金属靶材产生的X射线，以此作为信号来激发超快芯片的响应。装置布局如图3所示，高能量纳秒激光器发射出打靶激光脉冲（脉冲宽度2 ns，能量从5～155 J分段调节），通过抛物面镜（Off-Axis Parabolic Mirror，OAP）汇聚到靶点（Al靶），产生X射线。X射线从靶点入射到芯片的正面，通过金属掩膜调制后诱发芯片内半导体折射率的变化。另一侧，由探针光激光器发射出探针光（785 nm），途经反射镜和分光镜后入射到芯片的背面，而后经过时变的折射率调制再反射进入4f系统（由两个焦距为30 cm，口径为5 cm的透镜组成），滤波器只允许+1级通过，最后被增强型电荷耦合器件（Intensified CCD，ICCD）接收。实验中，配有一套X射线二极管探测器（X-Ray Diode，XRD）对X射线的能量进行实时在线监测。

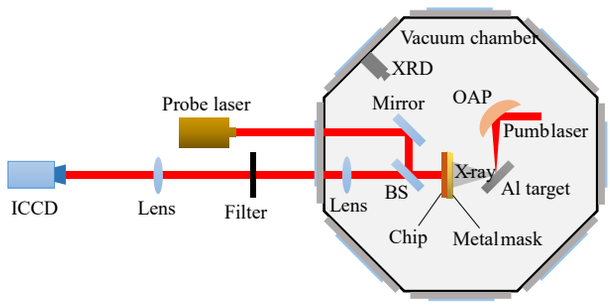


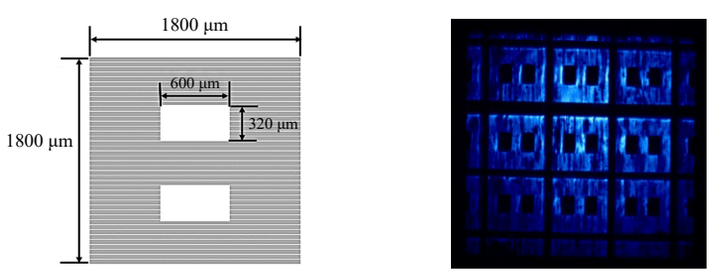
图3 实验装置布局图

Fig.3 Layout of the experimental setups

2.2 实验结果

在芯片正面添加多个“8”字图案的金属掩膜对X射线信号进行调制，以此作为实验的目标场景，如图4所示。ICCD的参数设置为增益80，门宽150 ns。实验中通过调节打靶激光脉冲的能量，分析不同X射线总能量条件下成像系统的空间分辨能力。X射线成像结果如图5所示，分别为打靶激光能量为5 J、23 J、46 J和155 J的实验结果，对应的XRD测量值换算为X射线能量并归一化后分别为0.008 3、0.17、0.57和1。成像的单幅画幅尺寸达到6.7 mm×6.7 mm，在实验所采用的激光能量下，均能较好成像，能够清晰展示目标的细节，随着能量的增强，成像整体的灰度值也随之增加。图像右半部分有数个亮点，这是由芯片加工出现瑕疵带来的强散射光，可以通过进一步的工艺迭代优化进行改善。

进一步对图5进行分析，利用数字“8”左下角（图5右下图中的红实线）的水平强度变化曲线作为边缘扩



(a) Schematic diagram of the mask (b) Imaging result of the mask using ICCD

图4 芯片表面金属掩膜示意图和ICCD直接拍摄掩膜的结果

Fig.4 Schematic diagram of the mask on chip surface and imaging result of the mask using ICCD

散函数(Edge Spread Function,ESF),以此来计算成像系统的调制传递函数 $\mathrm{MTF}=\left|F\left[\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\mathrm{ESF}(x)\right]\right|$[12]。为了减少误差,对图像进行适当的旋转后,再对其沿竖直方向合理范围内进行平均,计算得到的MTF如图6所示。

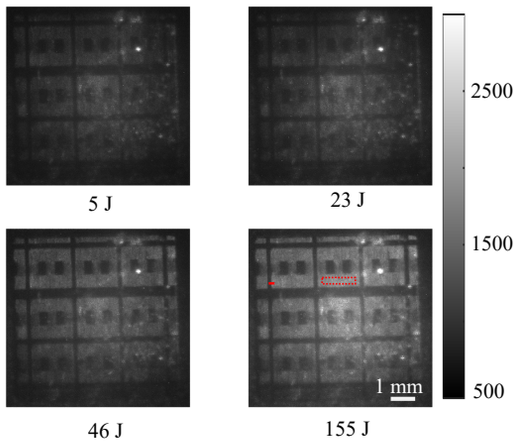


图5 不同打靶激光能量下的成像结果

Fig.5 Results under different pump laser energy

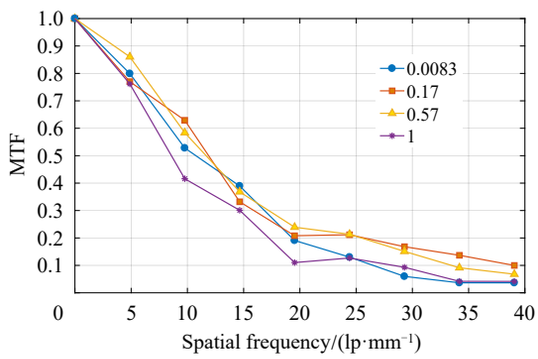


图6 不同X射线能量(归一化)下成像调制传递函数计算结果

Fig.6 Calculation results of MTF under different normalized X-ray energy

根据成像质量评价理论,通常将MTF为0.1时的空间频率作为系统的最大空间分辨率,由图6可得该成像系统的最优空间分辨率可达35 lp/mm,优于LLNL公开报道的结果[12]。受限于实验条件,实验中杂散光控制、系统的稳定性等因素未能进一步优化,成像系统的空间分辨能力在不同X射线能量下有一定的波动,但均能达到25 lp/mm @MTF=0.1的空间分辨率。

对不同能量下的成像选定相同的ROI区域(图5右下图中红虚框内的区域),对区域内的所有像素的灰度求平均,得到像素平均灰度值与X射线归一化能量的关系,如图7所示。对实验数据进行线性拟合(图7

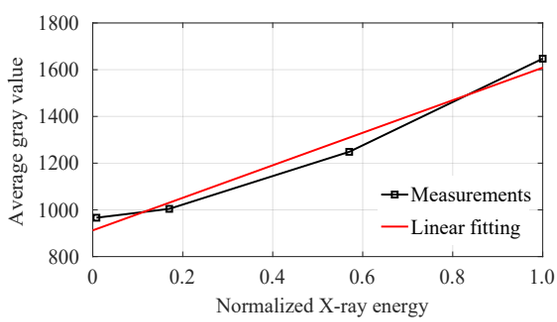


图7 ROI区域平均灰度值与X射线归一化能量的关系

Fig.7 Relationship between average gray value of ROI and normalized X-ray energy

中红线），拟合的R-square值（确定系数）为0.97，说明像素平均灰度值和X射线归一化能量基本满足线性关系。针对图像传感器，动态范围一般定义为信号饱和值与绝对灵敏度阈值之比[21]。受实验打靶发次限制，未能采集到信号饱和值。但在最强X射线能量下能够清晰成像，也就是低于信号饱和值。另外，绝对灵敏度阈值一般是图像中信噪比为1时的信号值[21]。由实验结果图5可知，最弱X射线能量下的信噪比也是大于1的。因此，本实验中的X射线响应芯片的线性动态范围应当优于$\frac{1}{0.0083}\approx 120:1$。

3 分析与讨论

分析系统的MTF要考虑以下四方面因素的影响：1）半导体内X射线能量沉积带来的空间弥散足够小[13]，允许成像系统优于5 μm的分辨率；2）金属光栅的调制会影响成像的空间分辨率，本文采用的芯片表面刻蚀的光栅为70 lp/mm；3）探测器像元的尺寸为12.8 μm，本成像系统的放大率为1，则探测器能表示的最大空间频率约为39 lp/mm；4）光学4*f*系统的衍射受限效应也会影响空间分辨，当频谱面不加滤波器时，可由透镜焦距及口径计算出光学系统可通过的最大空间频率约为106 lp/mm[22]，加滤波器后，由于通光孔的直径需小于衍射零级和一级的间距，其截止作用将大大较低光学系统的空间分辨率。因此，当前系统的MTF主要受到滤波器上小孔尺寸和探测器像元尺寸的限制，通过增大调制光栅的线对数，使得频谱面零级和±1级的间距增大，这样可以在屏蔽掉零级光的同时可一定程度增大小孔的尺寸，同时减小探测器像元尺寸或增大成像放大率，系统的空间分辨率会得到进一步提升。

当前系统的MTF结果表示响应芯片及后端相位提取系统的组合分辨能力，在实际应用中，目标场景要先通过一定放大倍率的成像系统（如针孔成像系统、KB显微镜等）后成像到芯片上，这样可以进一步提升整系统的物方空间分辨[3]。对于观测相同的目标区域，大画幅可搭配更大的放大率，从而获得更高的物方空间分辨。当前系统中的超快响应芯片实现了6.7 mm×6.7 mm的大画幅成像，相比于LLNL研究中约为2.5 mm×1.5 mm的成像画幅[12]，本系统具备更佳的空间分辨能力。

本文实验验证了在120∶1的X射线能量动态范围内的大画幅高空间分辨成像的能力，基于LT-AlGaAs材料本身具备的2.08 ps的超短非平衡载流子复合时间，可综合得出LT-AlGaAs超快响应芯片可用于大动态范围（≥120∶1）、高时间分辨（~ps）、高空间分辨（~20 μm）的大画幅（≥6.7 mm×6.7 mm）成像。结合先进的超快分幅技术，例如色散分幅[23]、偏振调啾分幅[16]等技术，可基于LT-AlGaAs超快响应芯片研制具有高时空分辨的大画幅成像系统，这是下一步研究的重点方向。

4 结论

基于光折变效应的超快成像技术是一种新型诊断技术，具有高时空分辨、全光全固态抗辐射等优点。本文对LT-AlGaAs超快响应芯片的空间性能进行研究，验证了成像系统在X射线谱段大画幅（6.7 mm×6.7 mm）高空间分辨的成像能力，在120∶1的X射线入射能量动态范围内，X射线成像的空间分辨率的最优空间分辨≥35 lp/mm @MTF=0.1。本文的研究结果进一步验证了基于光折变材料的超快X射线诊断技术的可行性，未来将通过与超快分幅技术相结合，实现多分幅高时空分辨的二维X射线成像，着力推进ICF超快诊断的研究进展。

参考文献

[1] GLENZER S H, MACGOWAN B J, MEEZAN N B, et al. Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums.[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(8):085004.

[2] MA T, PATEL P K, IZUMI N, et al. Onset of hydrodynamic mix in high-velocity, highly compressed inertial confinement fusion implosions[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(8):085004.

[3] WANG Feng, ZHANG Xing, LI Yulong, et al. Progress in high time- and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion[J], High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112002.
王峰，张兴，理玉龙，等. 激光惯性约束聚变研究中高时空诊断技术研究进展[J]. 强激光与粒子束，2020，32(11)：112002.

[4] BRADLEY D K, BELL P M, LANDEN O L, et al. Development and characterization of a pair of 30--40 ps X-ray framing cameras[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1):716-718.

[5] BAI Xiaohong, BAI Yonglin, LIU Baiyu, et al. A kind of 30~40 ps cascade gating X-ray framing camera with chevron MCPs[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(7):1351-1355.

白晓红，白永林，刘百玉，等. 一种双MCP选通型30～40 ps软X射线分幅相机[J]. 光子学报，2008，37(7)：1351-1355.
[6] OERTEL J A，ARCHULETA T，BAKEMAN M，et al. A large-format gated X-ray framing camera[C]. SPIE，2004，5194：217-222.
[7] NAGEL S R，HILSABECK T J，BELL P M，et al. Dilation x-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. Review of Scientific Instruments，2012，83(10)：10E317.
[8] NAGEL S R，HILSABECK T J，BELL P M，et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation x-ray imager (invited).[J]. Review of Scientific Instruments，2014，85(11)：195001.
[9] SHAKYA M M，CHANG Z. An accumulative X-ray streak camera with 280-fs resolution[C]. SPIE，2004，5534：125-131.
[10] LOSOVOI V，USHKOV I A，PROKHORENKO E A，et al. 200-femtosecond streak camera：development and dynamic measurements[C]. SPIE，2003：4948.
[11] BAKER K L，STEWART R E，STEELE P T，et al. Ultrafast semiconductor x-ray detector[J]. Applied Physics Letters，2012，101(3)：10F301.
[12] BAKER K L，STEWART R E，STEELE P T，et al. Solid-state framing camera with multiple time frames[J]. Applied Physics Letters，2013，103(15)：151111.
[13] LONDON R A，LOWRY M E，VERNON S P，et al. Electron cascades in sensors for optical detection of ionizing radiation[J]. Journal of Applied Physics，2013，114(15)：031107.
[14] ZHANG Jian，YI Tao，LIU Shenye，et al. Ultrafast dynamics of carriers in cadmium selenide[J]. High Power Laser and Particle Beams，2015，27(8)：35-39.
张健，易涛，刘慎业，等. 硒化镉载流子的超快动力学研究[J]. 强激光与粒子束，2015，27(8)：35-39.
[15] SONG Yan，PENG Bodong，WANG Hongxing，et al. Development of an all-optical framing camera and its application on the Z-pinch[J]. Optics Express，2017，25(25)：32074.
[16] GAO Guilong，HE Kai，TIAN Jinshou，et al. Ultrafast all-optical solid-state framing camera with picosecond temporal resolution[J]. Optics Express. 2017，25：8721.
[17] GAO Guilong，TIAN Jinshou，WANG Tao，et al. Ultrafast all-optical imaging technique using low-temperature grown GaAs/AlxGa1-xAs multiple-quantum-well semiconductor[J]. Physics Letters A，2017：S0375960117308381.
[18] WANG Bo，BAI Yonglin，CAO Weiwei，et al. Picosecond resolving detection method and experiment for ultrafast X-ray by modulation of an optical probe[J]. Acta Physica Sinica，2015，64(20)：200701.
王博，白永林，曹伟伟，等. 基于探针光调制的皮秒分辨X-ray探测方法与实验[J]. 物理学报，2015，64(20)：200701.
[19] ZHONG Ziyuan，HE Kai，YUAN Yun，et al. Photorefractive effect of low-temperature-grown aluminum gallium arsenide[J]. Acta Physica Sinica，2019，68(16)：167801.
钟梓源，何凯，苑云，等. 低温生长铝镓砷光折变效应的研究[J]. 物理学报，2019，68(16)：167801.
[20] HETTRICK M C，CUNEO M E，PORTER J L，et al. Profiled bar transmission gratings：soft-X-ray calibration of new Kirchoff solutions[J]. Applied Optics，2004，43(25)：3772-3796.
[21] EMVA Standard 1288. Standard for Characterization of image Sensors and Cameras. Release 3.1[DB/OL]. https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.1a.pdf.
[22] SU Xianyu，LI Jitao. Information optics [M]. The Science Publishing Company，1999.
苏显渝，李继陶. 信息光学[M]. 科学出版社，1999.
[23] NAKAGAWA K，IWASAKI A，OISHI Y，et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)[J]. Optics Express，2015，8(9)：30512-30522.

Experimental Study on the Spatial Performance of Photorefractive X-ray Semiconductor Ultrafast Response Chip

TAN Xiaobo[1]，YAN Xin[2]，YI Tao[3]，HE Kai[2]，SHAO Zhengzheng[1]，ZHOU Kaikai[1]，GAO Guilong[2]，WANG Tao[2]，ZHANG Jun[1]，ZHUANG Zhaowen[1]

(1 *College of Electronic Science and Technology*，*National University of Defense Technology*，*Changsha* 410073，*China*)

(2 *Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology*，*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Xi'an* 710119，*China*)

(3 *Research Center of Laser Fusion*，*China Academy of Engineering Physics*，*Mianyang*，*Sichuan* 621900，*China*)

Abstract：The traditional ultrafast electric vacuum devices are usually based on the mechanism of photoelectric conversion，and their performance is restricted by factors such as material response and

space-charge effect. It is difficult for the devices like microchannel plate framing cameras, DIlation X-ray Imager (DIXI), streak cameras to achieve high temporal resolution (100 fs~1 ps) and spatial resolution (~μm) two-dimensional imaging. Ultrafast imaging technology based on photorefractive effect is a new ultrafast diagnostic technology, which has the advantages of high spatiotemporal resolution, all-optical, all-solid-state, and anti-radiation. The nonequilibrium carrier lifetime of low-temperature grown AlGaAs (LT-AlGaAs) can reach ps-level. The Ultrafast Response Chip (URC) made of LT-AlGaAs has the characteristics of high temporal resolution, meanwhile, good spatial performance is the other key factor for its application. In this paper, the spatial performance of LT-AlGaAs URC is experimentally studied using X-ray, generated by high-energy nanosecond pulsed laser-produced plasma, as the signal. The results show that the URC has the ability of high spatial resolution and large-scale imaging in the X-ray energy dynamic range of 120∶1. The optimal spatial resolution is ≥ 35 lp/mm @ MTF = 0.1, and the imaging frame can reach 6.7 mm × 6.7 mm. The results further verify the feasibility of ultrafast diagnostic technology based on photorefractive materials. In the future, LT-AlGaAs URC will be combined with ultrafast framing technologies such as dispersion framing and polarization chirp framing to realize multi-frames and high spatiotemporal resolution two-dimensional imaging.

Key words: Photorefractive effect; X-ray imaging; Ultrafast imaging; Spatial resolution; Dynamic range

OCIS Codes: 320.7100; 110.7440; 310.6845; 230.0040; 070.7145

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51302316)