波导栅型微孔阵列的自触发瞬时选通成像研究(特邀)

母一宁,郝国印,刘春阳*,刘德兴,曹 喆

(长春理工大学 理学院,吉林 长春 130022)

摘 要:针对传统选通成像面临的诸多技术约束与技术瓶颈,分别从自触发选通与瞬时成像的角度提出了一种波导栅型微孔阵列的自触发瞬时选通成像。文中不但给出了完整的自触发选通成像原理与器件模型,而且还指出钙钛矿量子点薄膜在瞬时选通成像的优势。最后在真空测试系统中分别对波导栅型微孔阵列的空间调制效果、电子束泵浦成像效果以及钙钛矿量子点薄膜瞬时发光的效果加以标定与建模,并通过实验证明了该技术方案的可行性。

关键词:选通成像; 自触发; 距离选通

中图分类号:TN215 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0402002

Study on self-triggered instantaneous gating imaging of waveguide grating microarray(invited)

Mu Yining, Hao Guoyin, Liu Chunyang*, Liu Dexing, Cao Zhe

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of many technical constraints and techcical bottlenecks in traditional gating imaging system, a novel self-triggering instantaneous gating imaging of waveguide grating microarray that considered self-triggered gating and instantaneous imaging was proposed. This article not only showed a complete self-triggered gating imaging principle and device model, but also explained the advantages of quantum dot films based on perovskite in transient gating imaging. In the end, the spatial modulation effect of waveguide gratings microarray, electron beams, electronically pumped imaging and the instantaneous luminescence effect of quantum dot film based on perovskite, were calibrated and modeled in the vacuum test system. The feasibility of the technical scheme was proved by experiments.

Key words: gating imaging; self-triggered; range gating

收稿日期:2019-01-27; **修订日期**:2019-02-13

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51602028);吉林省科技发展计划项目(20180519019JH,20180804009HJ);
吉林省发改委产业创新专项资金(2018C040-3,2019C043-6);
中国科学院天文光学技术重点实验室开发课题(CAS-KLAOT-KF201803);
长春理工大学科技创新基金项目(XJJLG-2017-01);吉林省科技发展计划(20160521003HJ)

作者简介:母一宁(1985-),男,副教授,博士,主要从事空间激光通信等方面的研究。Email:der0403030420@163.com

通讯作者:刘春阳(1984-),男,博士,主要从事半导体光电材料及器件等方面的研究。Email:liucy169@nenu.edu.cn

0 引 言

主动式激光距离选通成像因包含物体信息多、信噪比高、可全天候探测等优点,因而广泛地应用在军事、航天乃至空间探测领域[1-2]。早在 20 世纪 90年代,美国 INTEVAC 公司就已经将其部署于北约盟国的激光主动侦查系统中[3]。同时期,美国科学家提出了利用距离选通的激光器和 ICCD 成像系统对空间碎片进行在轨探测的概念[4]。在国内,基于距离选通的激光主动成像技术亦是目前的研究热点。21 世纪初，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所率先针对主动式激光距离同步选通成像技术进行了系统级别的深入研究[5]。2010 年,哈尔滨工业大学的张繁辉团队就大气信道对选通成像的约束情况进行了较为细致的理论研究[6]。随后 2018 年,中国科学院西安光学精密机械研究所研制的距离选通系统的时间分辨率达到了微秒量级[7]。虽然在选通成像的系统层面、理论层面和信号处理层面的研究工作均取得了巨大成功，但在选通成像器件方面的研究却鲜有报道。选通成像器件在时间分辨率上的限制直接制约了成像信噪比的进一步提高。瞬态选通成像器件既要求 ICCD 荧光层瞬时发光，又要求激光的外部触发脉冲与成像快门严格同步。

微通道板作为一种连续打拿极的真空电子倍增器件,具有亚纳秒的频响特性和极高的增益能力。采用两级微通道板级联的电子倍增系统，其增益能力可以达到 10^7 以上,已经被广泛地应用于复合探测、天文探测等领域[8-9]。高能物理研究所刘术林研究员指出,为了保证微通道孔导电层薄膜的持续供电,通常需要在微通道板两面制作 Ni-Cr 薄膜电极、且在两端施加高压，形成板流用于补偿二次电子发射的能量损失[10]。然而这种供电结构将导致电子束在极间耦合过程中的束流密度衰减，即部分电子束被微通道板输入端 Ni-Cr 供电薄膜电极收集。如果将极间耦合损失的这部分电子作为选通成像的触发信号有效收集，便可以直接实现成像泵浦源与选通成像触发源合二为一,形成自触发选通功能,大幅提升选通成像器件的时间分辨率与成像信噪比。

1 距离选通成像约束分析

选通瞬时成像的原理是利用脉冲激光主动照射目标,通过成像器件(CCD 或 CMOS)对激光脉冲的回波进行瞬时曝光成像，选通成像系统的示意效果如图 1 所示。瞬时选通成像具有探测灵敏度高、成像信噪比高等优点，相比于当前主流的成像手段在目标检测精度、目标探测距离等方面展现出明显优势。可见,距离选通成像系统的外部触发器件(APD)和瞬态成像器件(ICCD)是两个分立元件。在瞬时选通的过程中，脉冲激光回波信号与瞬态成像器件的电子快门很难严格同步。所以通常需要延长快门积分时间实现成像器件对激光回波脉冲的成功捕获，但这会造成噪声长时间积累进而降低成像质量。目前主动照明激光的脉冲宽度已突破了纳秒量级，而大多商用 Gd_2O_2S 或 $Y_3Al_5O_{12}$ 荧光粉的余辉时间仅能达到毫秒量级，即便选用余辉时间更短的 ZnS 与 Ag 共混的荧光粉其瞬时响应仅能达到亚微秒量级[11]。因此，研发具有优异瞬态发光特性的激光光源和兼具自触发选通功能的复合泵浦源是当前瞬态选通成像领域亟待解决的关键问题。

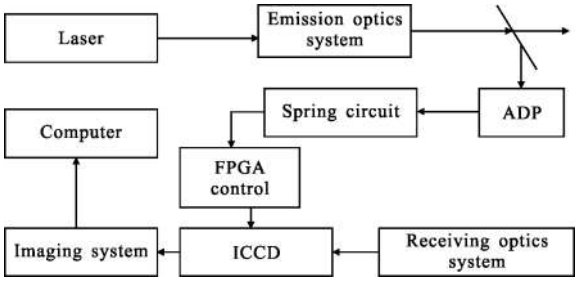

图 1 选通成像同步控制系统

Fig.1 Gating imaging synchronous control system

2 自触发式选通原理

自触发式选通原理见图 2。激光回波脉冲光信号 a 透过光学窗口聚焦于光电阴极 c,光电阴极 c 受到脉冲光信号 a 激发产生光电子，光电子在外加电场作用下入射到微通道板 d,经过连续打拿倍增后形成电子束，在加速电场的作用下继续撞向波导栅型微孔阵列 e，波导栅型微孔阵列为一块未作氢还原的铅玻璃微孔阵列，微孔阵列上表面和微孔内壁镀金属电极，电子束的绝大多数会被波导栅极截获并由其金属层导出。导出电子经过触发电路分路输出脉冲信号,一路作为栅极脉冲电源的触发信号,脉冲电源产生一定门宽的矩形高压脉冲使原栅极反向电

场改变实现栅极选通，另一路为末端 CMOS 控制电路提供定时基准脉冲。在选通的同时，到达栅极电子束的剩余电子将透过微孔阵列入射到微通道板 f 进行二次倍增。由微通道板 f 倍增后的电子束在强电场作用下轰击附着于导电玻璃 h 上的钙钛矿薄膜 g 产生激射，激射出的空间图像光波透过光纤光锥 i 耦合进入 CMOS 传感器 j 成像。用波导栅型微孔阵列 e 从成像电子束中提取触发信号驱动后续的微通道选通与成像系统，实现纳秒量级的瞬时选通成像。

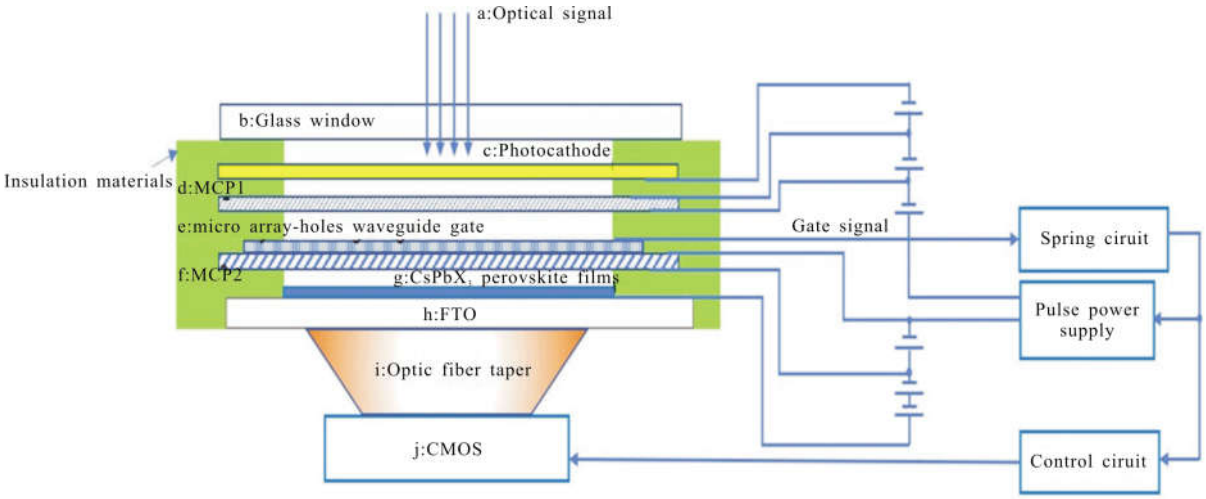

图 2 自触发式选通原理

Fig.2 Self-triggering instantaneous gate imaging principle

3 原理性验证实验

结合上述器件结构原理，进行了以下原理型验证，如图 3 所示，可见波导栅极结构对电子束具有明显的调制效果。

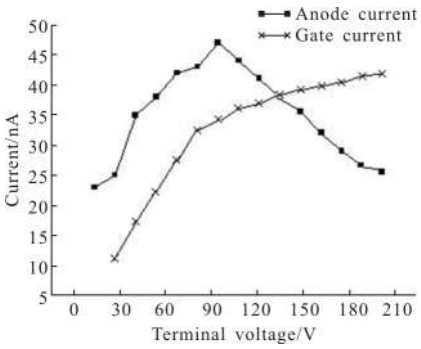

图 3 波导栅型电子束空间调制效果

Fig.3 Spatial modulation effect of waveguide gratings on electron beams

此外，在真空炉中利用金阴极和级联的微通道板，将紫外光子转化为光电子，并进行倍增，在第二块微通道板下表面和钙钛矿薄膜之间加高压，形成高强度电场，给予电子束比较大的能量，利用电子束轰击钙钛矿量子点薄膜使其发光，如图 4 中选取电压为 0、200、600、1 000、1 100、1 200、1 400、1 600 V 下的发光情况，从图中可以看到在 1 600 V 的电压下钙钛矿量子点薄膜已经全部发光，实验中将电压从 1 600 V 继续增加到 3 000 V 的过程中，钙钛矿量子点薄膜的发光强度会越来越大。在钙钛矿下方的窗口处放置一光功率计，探究在不同电场强度条件下，钙钛矿薄膜的发光亮度，如图 5 所示。

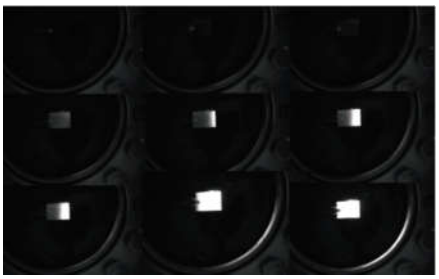

图 4 钙钛矿量子点薄膜电子束泵浦激射效果

Fig.4 Effect of quantum dot film based on perovskite stimulated by electron beam

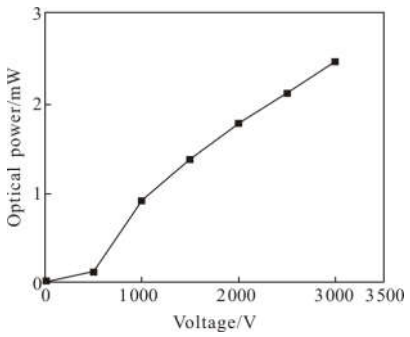

图 5 钙钛矿量子点薄膜电子束泵浦激射特性

Fig.5 Characteristics of quantum dot film based on perovskite stimulated by electron beam

最后，还利用光泵浦的方式来激发钙钛矿量子点薄膜发光，使用飞秒激光器照射钙钛矿量子点薄膜，并利用瞬态光谱仪测量钙钛矿量子点薄膜的荧光寿命，如图 6 所示，从图中可以看出钙钛矿量子点薄膜的余晖时间在 30 ns 左右。在后续的研究工作中可以通过加入贵金属纳米晶的方法进一步降低钙钛矿量子点薄膜的余晖时间。

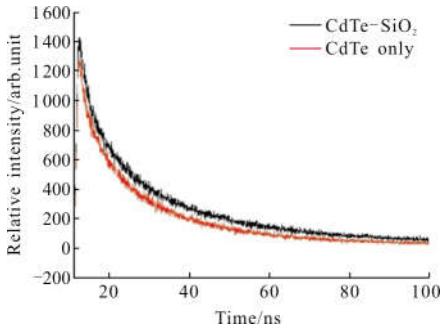

图 6 量子点薄膜的瞬态光学特性

Fig.6 Transient optics characteristics of quantum dot film

4 结 论

文中提出了一种可以有效收集两级微通道板极间耦合损失的电子束功率的波导栅型复合探测器件结构，其特色与优势在于电子快门的选通触发信号与 $CsPbX_3$ 量子点激射成像的泵浦源均来自于同一电子束，电子快门的选通触发信号与 $CsPbX_3$ 量子点激射成像的泵浦源均来自于同一电子束，进而使电子快门与 $CsPbX_3$ 量子点激射光严格同步并且有效降低瞬时成像的信噪比，并且可以使 $CsPbX_3$ 量子点的瞬时成像的优势得以充分体现。

参考文献：

[1] Guo Huichao, Sun Huayuan, Zhao Yun, et al. Long-range range-gated laser active imaging experiments [C]//SPIE, 2011, 8192: 81923Y.

[2] Bai Lianfa, Zhang Yi, Chen Qian, et al. Some questions in the realization of range gated imaging[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(2): 57-61. (in Chinese)

[3] He Huan, Tian Jinshou, Wen Wenlong et al. The design and implementation for a range-gated ICCD [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2015, 44(6): 0611001. (in Chinese)

[4] Da Freiwald, Freiwald J. Range-gated and laser and ICCD camera system for on-orbit detection of small space debris [C]//SPIE, 1994, 2214: 116-123.

[5] Zhao Yan, Zhai Baichen, Wang Jianli. Design and implementation of the laser range-gating imaging synchronization control system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2005, 34(5): 526-529. (in Chinese)

[6] Wang Yue. Effect of gate width of laser range gating imaging on image SNR [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 6(12): 951-956. (in Chinese)

[7] Hu Junyu, Pei Chengquan, Tian Jinshou, et al. Design and experimental study of ICCD gated pulse source [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2018, 47(9): 0911001. (in Chinese)

[8] Mu Yining, Du Yue, Li Ye, et al. Complex waveguide anode micro-channel plate-photomultiplier tube (MCP-PMT) for space optical communication[J]. ***Acta Electronica Sinica***, 2016, 44(11): 2812-2816. (in Chinese)

[9] Ni Qiliang. Study on characteristic performance of a MCP-based photon-counting imaging detector [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2013, 33(11): 1104001. (in Chinese)

[10] Yang Luping, Liu Shulin, Huang Mingju, et al. Technical approach to improve the detective efficiency of microchannel plate for low energy electron[J]. ***Infrared Technology***, 2016, 38(8): 714-718. (in Chinese)

[11] Philipp Rosendahl, Katarzyna Plak, Angela Jacobi, et al. Real-time fluorescence and deformability cytometry [J]. ***Nature Method***, 2018, 15(5): 355-358.