

基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测方法研究

朱炳利^{1,3}, 白永林^{2*}, 王 博², 刘百玉², 欧阳娴², 杨文正²,
白晓红², 秦君军², 赵军平², 缙永胜², 卢 凯^{1,3}

1. 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119
2. 中国科学院超快诊断技术重点实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 针对瞬态光谱检测中对 CCD 线扫描速度要求高的特点, 提出一种基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测方法。该方法通过改变面阵 CCD 的电荷转移方式, 以实现基于面阵 CCD 的高速线扫描。为了探究此方法的可行性, 初步通过改变线阵 CCD 的电荷转移方式, 建立了基于线阵 CCD 的单点超快探测系统。在发光二极管(light emitting diode, LED)光脉冲探测实验中, 系统分别工作在单点超快探测模式和正常模式下。测试结果表明, 基于线阵 CCD 的单点超快探测方法是可行的, 单点探测速率可达 20 MHz。从而在理论上证明, 通过改变 CCD 电荷转移方式以实现基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测也是切实可行的。

关键词 线阵 CCD; 面阵 CCD; CCD 高速成像; 瞬态光谱检测

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)04-1028-04

引 言

科学研究中, 经常需要对一些瞬态物理过程, 如爆炸、激波和高压放电等进行高速探测。光谱信息获取是分析、研究这些瞬态过程的重要手段, 然而这些过程光谱辐射存在时间短、瞬时性高, 所以研究、发展高速瞬态光谱检测方法对工业需求和国防建设有着重大的意义^[1, 2]。

CCD 成像器件是把光学图像转化成一维时序输出电子信号的阵列器件。CCD 具有灵敏度好、信噪比高、动态范围大等优点, 已被应用于众多检测领域, 特别在光谱检测方面更是以结构简单、易操作、精度高等优势得到广泛应用^[3, 4]。随着 CCD 技术的进一步成熟, 各种高速 CCD 被研制出来。目前, 普通的高速线阵 CCD 线扫描速率可达 70 kHz 以上, 使其在一些瞬态光谱检测领域得到应用^[5]。然而, 由于自身结构的限制, 传统技术的高速 CCD 仍不能满足某些超快、瞬态过程, 如微秒及亚微秒范围的光谱探测需求。

如何把 CCD 用于高速、瞬态检测领域一直是人们探索的课题。经过不断的发展, 各种用于高速成像的特殊 CCD 被研制出来。林肯实验室采用分幅技术研制的面阵 CCD 帧频可达兆赫兹^[6, 7]。另外, 利用 CCD 器件的(in situ storage im-

age sensor, ISIS)技术研制的超高速成像仪帧频最高可达 16 Mega-frames per second(Mfps)^[8, 9]。但是, 这些产品的工艺复杂, 价格昂贵, 难以被广泛使用。

为了扩展 CCD 在瞬态光谱检测方面的进一步应用, 且克服特殊 CCD 成本高, 驱动复杂等缺点, 本文在分析 CCD 结构及工作原理的基础上, 提出了基于改变面阵 CCD 电荷转移方式的瞬态光谱检测方法。通过建立基于改变线阵 CCD 电荷转移方式的单点超快探测系统, 对该方法的可行性进行了验证, 从而为进一步实现面阵 CCD 高速线扫描的改造打下基础, 对扩展 CCD 在瞬态光谱检测领域的应用意义重大。

1 基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测方法原理

如图 1(a)所示为基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测方法原理图。对于行间转移 CCD 只让一行(顶行)光敏元曝光, 而其他光敏元遮光处理。那么, 在每次曝光中只有顶行光敏元采集到有效光信息并将其转移到对应垂直移位寄存器。其他光敏元没有接受光照, 其对应寄存器没有积分电荷则处于空闲状态。利用空闲寄存器对顶行光敏元采集的光信息进行高速缓存, 从而实现单行高速扫描。该方法的基本思想是利用面阵 CCD 的一行(顶行)光敏元进行光电积分, 并使用所有垂

收稿日期: 2011-08-23, 修订日期: 2011-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10905090)资助

作者简介: 朱炳利, 1985 年生, 中国科学院西安光学精密机械研究所硕士研究生 e-mail: zhubing_2006@163.com

* 通讯联系人 e-mail: baiyonglin@opt.ac.cn

直移位寄存器对积分电荷进行高速缓存，这样就不必每次曝光后将光信息读出，从而实现基于面阵 CCD 的单行高速扫描。

如图 1(b)所示为基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测方法等效图。由图可知单行高速扫描的具体工作过程为：(1) 顶行光敏元完成一次光电积分，并将积分电荷水平转移到对应的顶行寄存器；(2) 顶行光敏元进行第二次光电积分，同时，顶行寄存器里的电荷垂直移到第二行，接着第二次积分的电荷再次被水平转移到顶行寄存器里；(3) 依次进行下去，直到所有垂直移位寄存器被积分电荷占据，然后信号电荷被依次读出。如果面阵 CCD 有 512 行，采用该方法可实现 512 次连续高速线扫描。

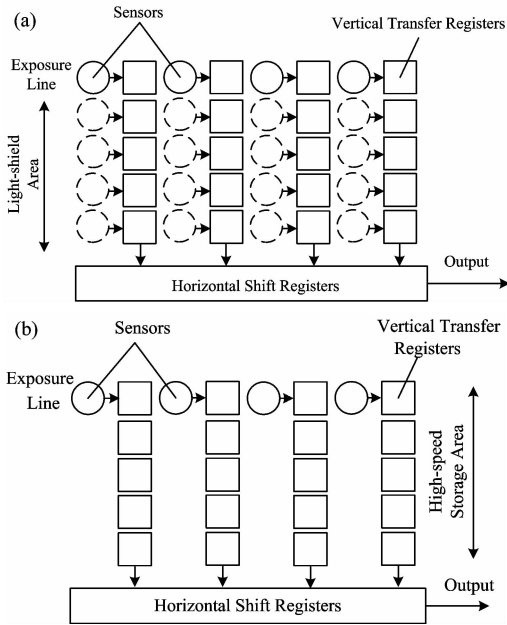


Fig. 1 (a) Principle diagram of operation and (b) equivalent structure diagram of the transient spectrum detection

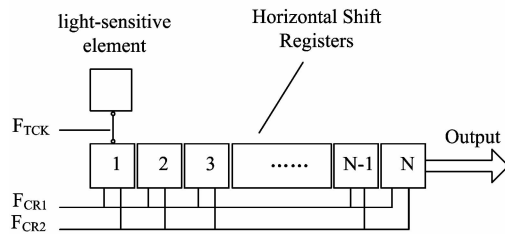


Fig. 3 Equivalent structure diagram and work timing diagram of ultrafast detection of single-point

2.2 单点超快探测系统结构

本系统主要由 FPGA，光源，光学系统，线阵 CCD，A/D 转换芯片和 ISA 总线接口构成。系统框图如图 4 所示，FPGA 为整个系统的主控芯片，主要功能包括：光同步控制，CCD 驱动时序控制，A/D 配置与时序控制，数据缓存，ISA 接口控制。具体工作过程如下：在 FPGA 的控制下，光源开启，同时 CCD 开始工作，CCD 采集到的数据经过 A/D 芯片处理，然后高速缓存到 FPGA 内部 FIFO 存储器中，最后通

2 基于线阵 CCD 的单点超快探测系统设计

基于面阵 CCD 的高速线扫描是通过改变面阵 CCD 电荷转移方式实现的。同样，改变线阵 CCD 的电荷转移方式便可实现基于线阵 CCD 的单点超快探测。为了探究通过改变 CCD 电荷转移方式以实现 CCD 的高速探测的可行性，首先从线阵 CCD 入手，建立了基于线阵 CCD 的单点超快探测系统。

2.1 单点超快探测原理

与实现面阵 CCD 的高速线扫描类似，对于线阵 CCD，如图 2 所示，只让一个光敏元曝光，而其他光敏元遮光处理。这样，只有一个光敏元完成光电转换，并将积分电荷转移到对应移位寄存器，其他光敏元没有接受光照，其对应寄存器处于空闲状态，从而可以利用这些空闲的移位寄存器对曝光像元积分的电荷进行高速缓存，最终实现单点高速探测。

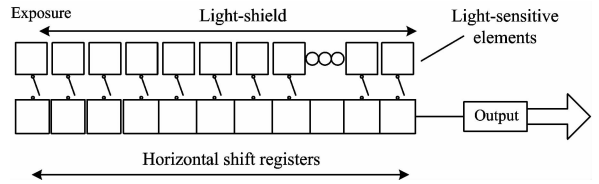
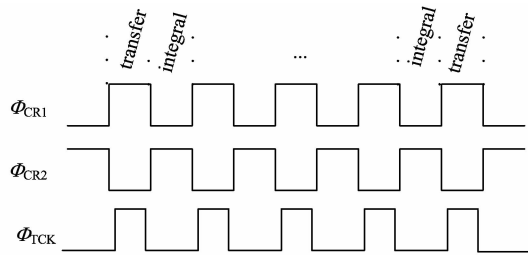


Fig. 2 Principle diagram of operation of ultrafast detection of single-point

要实现基于线阵 CCD 的单点超快探测，就要改变线阵 CCD 的电荷转移方式，而电荷转移方式的改变要通过设计合理的 CCD 驱动时序。如图 3 所示为单点超快探测等效结构及其工作波形图。图中 Φ_{TCK} 为垂直转移时钟， Φ_{CR1} 和 Φ_{CR2} 为两相水平移位时钟。由工作波形可知，单点超快探测模式下 CCD 光电积分和信号转移交替进行，单点探测速率等于水平信号移位速率。



过 ISA 总线传输到上位机进行后续处理。

3 LED 光脉冲探测实验

系统选用 DALSA 公司的一款有 512 个像元的高速线阵 CCD，该线阵 CCD 具有两相水平移位时钟，最高频率可达 40 MHz，且为单路读出结构，适合于单点超快探测的实现。系统测试中，以 LED 为光源，通过 FPGA 进行同步控制并

设定脉冲宽度。如图 5 所示为实验光路图, LED 在 FPGA 的控制下发出光脉冲, 光线经过透镜聚焦到 CCD 的光敏元上, CCD 光敏元对光脉冲进行光电转换, 将光信号转换成电信号。为了验证单点超快探测的可行性, 进行了两组实验。一组实验, 让 CCD 工作在单点超快探测模式下, 对七个不同时间宽度的 LED 光脉冲进行连续探测; 另一组, 让 CCD 工作在正常模式下, 对上述七个 LED 光脉冲分别探测。

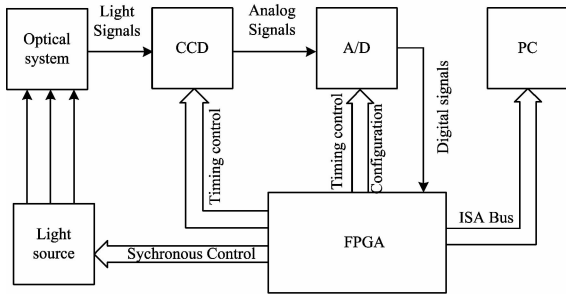


Fig. 4 Block diagram of ultrafast detection system of single-point

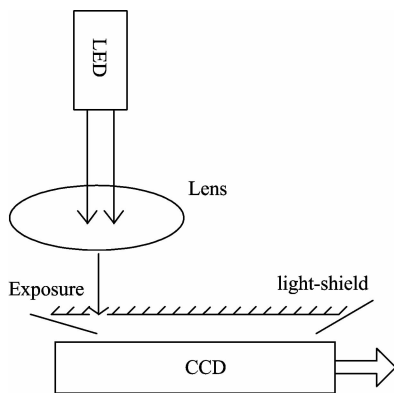


Fig. 5 Structure diagram of optical system

图 6 所示, 为设计的 LED 光脉冲示意图, 由于实验中 LED 光脉冲的强度比较低, 为了提高 CCD 灵敏度, 强化单点探测效果, 设定的 LED 脉冲宽度分别为 200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200, 1 400 ns。另外, 由于实际曝光的光敏元远不止一个, 为了区分开各个光脉冲, 使得新的光脉冲到来前, 曝光区所对寄存器的电荷被全部移走, 脉冲间隔时间应足够长。在单点连续探测中, LED 光脉冲间隔设定为 2 500 ns, 符合实验要求。

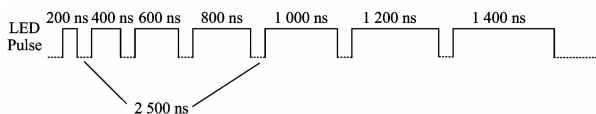


Fig. 6 Sketch map of the LED pulses

4 结果与分析

单点探测实验中, 因为有多像元曝光, 且 LED 光脉冲的持续时间大于水平移位周期, 所以信号电荷在移位寄存器中会发生迭加。若 LED 光脉冲强度不变, 则脉冲持续时间越

长, 信号迭加的就越多, 而且在一定范围内迭加的最大电荷值与脉冲持续时间成正比。如图 7(a) 所示, 当单点探测速率为 20 MHz 时, 系统采集到的 LED 光脉冲信号图。由上面分析可知, 不同长度的光脉冲经 CCD 光电转换将得到不同大小的电荷包, 图中 7 个不同高度的尖峰与所设计的 7 个光脉冲一一对应。

如图 7(b) 所示, 当线阵 CCD 工作在正常模式下, 水平移位时钟频率为 20 MHz 时, 分别得到的七个 LED 光脉冲信号图。两组结果对比可知, 信号强度分布趋势基本一致, 从而进一步证实了单点超快探测模式下采集到数据的正确性。但相比正常模式, 单点超快探测得到的信号信噪比较小, 造成这种结果主要有两方面的原因, 其一, 为了实现单点的超快探测, 光电转换得到的信号电荷要及时、高速的从光敏区转移到对应的寄存器, 一方面, 转移次数的增加, 用来光电积分的时间就会减少; 另一方面, 转移时间减少, 转移效率便会降低, 从而导致信号强度减弱, 这在高速 CCD 成像中是不可避免的。其二, 每次信号电荷从光敏区向寄存器转移, 所有光敏元都会参与, 虽然遮光区光敏元没有收集到有效光电信号, 但也会引入一定噪声, 这可通过后续信号处理进行改善。

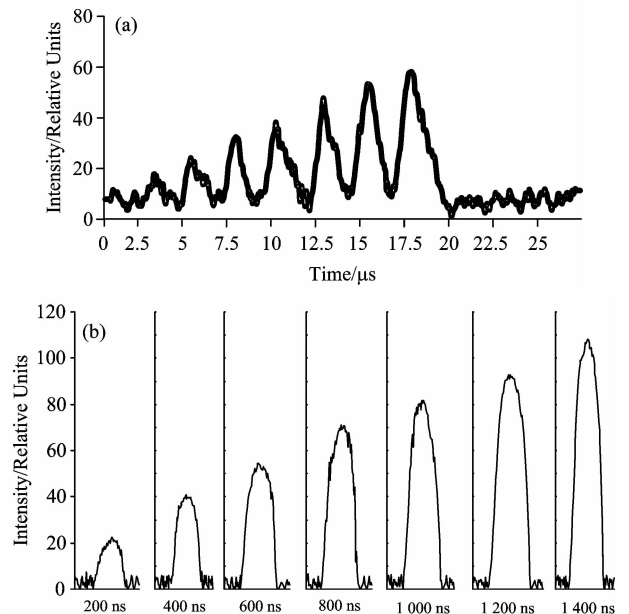


Fig. 7 LED pulse signal diagram of ultrafast detection mode of single-point (a) and normal mode (b)

5 结论

提出了基于面阵 CCD 的瞬态光谱检测方法, 并建立了单点超快探测系统, 通过 LED 光脉冲探测实验, 成功验证了基于线阵 CCD 的单点超快探测的可行性, 单点探测速率达 20 MHz。由于基于线阵 CCD 的单点超快探测和基于面阵 CCD 的高速线扫描在原理上都是通过改变 CCD 电荷转移方式而实现的, 所以, 选取合适的面阵 CCD 便可实现基于面阵 CCD 的高速线扫描, 线扫描速率估计可达兆赫兹以上。基于

线阵 CCD 的单点超快探测的成功实现, 为 CCD 的超快探测 光谱检测中的应用得到极大的推广。
技术开辟一条新的、简单有效的途径, 使得普通 CCD 在瞬态

References

- [1] LI Jing-zhen(李景镇). Science in China Ser. E Technological Sciences(中国科学 E 辑 技术科学), 2009, 39(12): 1887.
- [2] SU Hong-yu, ZHOU Yan, YU De-ping, et al(苏红雨, 周 彦, 余德萍, 等). China Measurement Technology(中国测试技术), 2005, 31(4): 5.
- [3] DENG Xing-kai, YANG Yong-jun(邓兴凯, 杨永军). Metrology & Measurement Technology(计测技术), 2011, 31(1): 45.
- [4] SHI Bao-song, SUN Shou-hong, ZHANG Wei(石宝松, 孙守红, 张 伟). Electronic Measurement Technology(电子测量技术), 2010, 33(11): 84.
- [5] WANG Bo, BAI Yong-lin, OUYANG Xian, et al(王 博, 白永林, 欧阳娴, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2010, 39(3): 441.
- [6] Reich R K, Rathman D D, O'Mara D M, et al. 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 2007, 6279: 1K1.
- [7] Reich R K, Rathman D D, O'Mara D M, et al. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 2027.
- [8] Kosonocky W F, Yang G, Kabra R K, et al. IEEE Transactions on Electron Devices, 1997, 44(10): 1617.
- [9] Goji T Etoh, Poggemann Dirk, Kreider Greg, et al. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(1): 144.

Research on the Method of Transient Spectrum Detection Based on Array CCD

ZHU Bing-li^{1, 3}, BAI Yong-lin^{2*}, WANG Bo², LIU Bai-yu², OUYANG Xian², YANG Wen-zheng², BAI Xiao-hong²,
QIN Jun-jun², ZHAO Jun-ping², GOU Yong-sheng², LU Kai^{1, 3}

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. Key Laboratory of Ultrafast Photoelectric Diagnostic Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the characteristic of high speed line scanning for CCD in transient spectrum detection, a method of transient spectrum detection with array CCD is presented. The high speed line scanning with array CCD was realized by changing the mode of charge transfer. In order to explore the feasibility of this method, a fast detection system of single point based on linear CCD was designed and fabricated. Seven different LED pulses were measured when the system worked at fast detection mode of single point and normal mode respectively. The results demonstrate that the method of fast detection of single point based on linear CCD is feasible, and the rate of single point detection reaches up to 20 MHz. Thus, in theory, it was proved that transient spectrum detection with array CCD by changing the mode of charge transfer is also feasible.

Keywords Linear CCD; Array CCD; CCD high speed imaging; Transient spectrum detection

(Received Aug. 23, 2011; accepted Nov. 20, 2011)

* Corresponding author