

文章编号:1001-5078(2014)06-0600-05

· 综述与评论 ·

## 基于人眼安全激光的 SWIR 选通成像技术研究

宋岩峰, 孙卫平, 张西京, 刘 灏, 马恩财  
(中国兵器工业第203研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 阐述了基于人眼安全激光的短波红外(SWIR)选通成像技术的基本原理;依据选通成像系统对接收成像探测器的要求,对满足选通成像条件的三种 SWIR 焦平面器件,即 HgCdTe APD FPA、InGaAs/InP TE EBCMOS 和 InGaAs FPA 进行了性能介绍;结合基于这三种探测器的典型选通相机以及人眼安全激光选通成像系统,对这三种探测器进行了简要性能分析和对比,并给出了系统及探测器选择的建议。

**关键词:** 短波红外;距离选通;焦平面探测器;人眼安全激光

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.06.002

## Research on range gated eye-safety SWIR laser imaging technique

SONG Yan-feng, SUN Wei-ping, ZHANG Xi-jing, LIU Hao, MA En-cai  
(No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The basic principle of the eye-safety SWIR laser range gated imaging technique is presented. Based on the range-gated imaging system's requirements, the performance of three typical SWIR FPA sensors (InGaAs FPA, InGaAs/InP TE EBCMOS and HgCdTe APD FPA) is introduced. Tests with the typical SWIR gated cameras with three sensors are made. Three sensors' performance is analyzed and compared. Finally the suggestion for sensor selection is given.

**Key words:** SWIR; range gated; focal plane array; eye-safety laser

### 1 引言

短波红外(SWIR)成像由于可以提供可见光成像、微光夜视和红外热成像等常规方式所不能提供的特有目标图像信息,在填补微光夜视和中波红外成像之间的光谱空缺,实现在三个大气红外传输窗口的“无缝隙探测”,获取远距离目标的全面红外图像信息等方面有着重要意义<sup>[1]</sup>。

与可见光成像相似,被动 SWIR 成像利用的是目标的反射光而不是目标的热辐射。在夜间,由于目标反射光在 SWIR 波段的减弱,对远距离目标进行探测和识别就变得非常困难,故被动 SWIR 成像并不具备全天候工作的能力。基于人眼安全激光的 SWIR 选通成像系统,采用工作波长在人眼安全波段的短脉冲激光作为主动照明光源,具有高速选通功能的 SWIR 焦平面相机作为成像接收单元,解决

SWIR 成像系统的全天候工作问题。与可见光和近红外激光辐射相比,人眼安全激光具有对人眼安全、大气传输性能好、对雾霾和战场烟雾有较强穿透能力、太阳光谱辐照度低和有一定的光电对抗能力等优势;相对红外热成像系统,在相同口径条件下,SWIR 成像系统的分辨率更高,能够提供更多的目标细节信息;通过选通成像的方法,可以消除位于选通距离之外的背景干扰,将目标从复杂背景中提取出来,提高系统的抗干扰能力。因此,基于人眼安全激光的 SWIR 选通成像技术在复杂环境条件下对远距离目标的全天候侦察、精密跟踪和目标识别等领域具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

作者简介:宋岩峰(1978-),男,硕士,主要研究方向为光学设计及光电成像测试。E-mail:song19781220@sina.com

收稿日期:2013-09-27

## 2 基本原理

基于人眼安全激光的 SWIR 选通成像系统,通常采用工作波长为  $1.5 \mu\text{m}$  的高能量脉冲激光器作为照射光源,对目标区域发射激光脉冲进行照射;采用 SWIR 高速选通相机作为成像接收设备,在极短的时间内完成快门的开启和关闭工作;通过高精度的延时同步控制技术,严格控制激光脉冲的发射和选通相机快门开启成像之间的时间延迟,使得需要观察目标场景反射回来的脉冲信号刚好在相机选通工作的时间内到达相机并成像,从而将不同距离上的散射光和目标的场景反射光分开,获得目标区域的清晰图像。图 1 给出的是基于人眼安全激光的 SWIR 选通成像系统穿透烟雾对一定距离处坦克目标进行成像的原理图<sup>[4]</sup>。

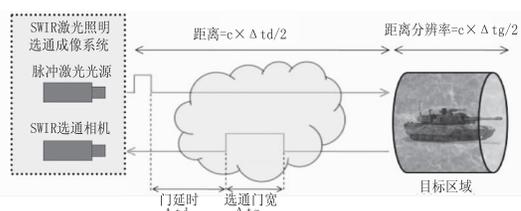


图 1 SWIR 选通成像系统原理图

Fig. 1 SWIR range gated active imaging principle

## 3 SWIR 选通相机及系统

相对于传统的被动热成像系统,激光照明选通成像系统接收探测器的灵敏度要高 100 倍以上,响应时间则要缩短 10000 倍以上。原因是选通成像系统对其距离分辨率有着较高的要求,对应着很窄的选通门宽,而选通门宽则由探测器读出电路的频带宽度所决定。假设系统的距离分辨率为  $10 \text{ m}$ ,那么要求探测器的选通门限宽度约为  $66 \text{ ns}$ ,频带宽则大约为  $50 \sim 100 \text{ MHz}$ ;不仅如此,由于人眼安全激光的效率非常低,很难获取高重频、高能量的激光脉冲,这就对接收成像探测器的灵敏度提出了更高的要求,通常要求其等效噪声不大于 10 个光子,信噪比 SNR 不小于  $5 \sim 10$  (输入信号为  $100 \sim 200$  光子/脉冲/像素时)。从目前来看,适合人眼安全激光的 SWIR 选通成像焦平面探测器主要有三种,即 HgCdTe APD FPA、InGaAs/InP TE EBCMOS 和 InGaAs FPA<sup>[5]</sup>。

### 3.1 InGaAs FPA 选通相机及系统

InGaAs 材料在被应用到成像系统中之前,已经被广泛应用在  $1.55 \mu\text{m}$  高速通信设备中,其较高的技术成熟度以及在  $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$  光谱范围内较高的量子效率,使得 InGaAs 焦平面阵列探测器成为 SWIR 成像系统的可靠选择器件。从实际应用情况

来看,InGaAs 焦平面阵列在  $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$  处的量子效率可以达到  $70\% \sim 80\%$ ,响应率可以达到  $1\text{A/W}$ 。InGaAs 材料具有很好的材料稳定性,采用成熟的 MBE 和 MOVCD 生长方法,可以获得大面积高质量的外延材料。在室温和近室温的工作条件下,InGaAs 材料芯片的各个性能参数均高出 HgCdTe 一到两个量级,对应同一截止波长,其品质因子比 HgCdTe 也高出一到两个量级。但是,InGaAs FPA 雪崩模式下材料增益能力差,相对其他有雪崩增益的探测器,其信噪比要低  $3 \sim 6$  倍。然而,InGaAs 分离吸收电荷倍增异质结结构 (SACM) 允许在吸收和倍增层之间插入 P 参杂,通过调节电荷层分配电场,可以获取约 20 倍的增益以及  $4 \sim 7$  的低溢出噪声因子;通过 I<sup>2</sup>E 结构可进一步降低噪声,其溢出噪声因子可到 3.5。因此,InGaAs/InAlAs FPA 仍然非常有竞争力。

在实际应用中,2003 年 Sensors Unlimited 获得开发第一个全固态 SWIR InGaAs 选通相机的合同,主要参数如下:像素数  $320 \times 256$ ,光谱范围  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ,选通门宽要求小于  $200\text{ns}$ 。2005 年,Sensors Unlimited 对该相机进行了报道,通过其设计的电容跨阻抗放大器 CTIA 读出电路,该相机不仅可以实现门宽小于  $200\text{ns}$  的选通成像,同时也允许积分时间大于  $16 \text{ ms}$  的凝视视频成像。2006 年,Sensors Unlimited 报道了像素数为  $640 \times 512$  的选通 InGaAs FPA 相机,光谱范围  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ , $25 \mu\text{m}$  的像元间距。相机同样采用了 CTIA 读出电路,像素时钟  $10.89 \text{ MHz}$ ,时钟周期为  $91 \text{ ns}$ ,门宽为 5 个时钟周期,即  $455 \text{ ns}$ ,对应的距离分辨率为  $68 \text{ m}$ ,通过控制延时得到几百米处不同选通距离内的目标图像,试验图像如图 2 所示<sup>[6]</sup>。试验激光光源输出激光波长为  $1.57 \mu\text{m}$ ,能量  $8 \text{ mJ}$ ,脉冲宽度  $5 \text{ ns}$ 。

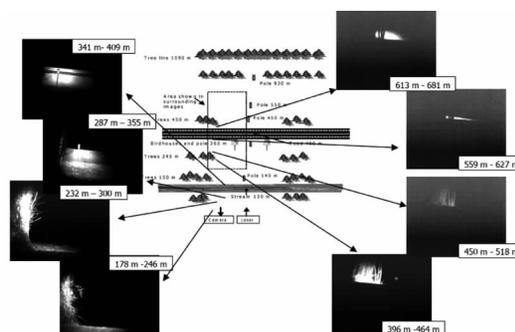


图 2 InGaAs FPA 不同选通距离内的目标图像

Fig. 2 A sketch of the area used for the range-gated field test surrounded by a sequence of images taken during the field test

比利时 Xenics 作为一家知名的红外探测器生产厂家,其在 2012 年推出的 Bobcat-320-gated 紧凑型非制冷 InGaAs 相机,其光谱范围  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ,最小曝光时间  $80 \text{ ns}$ ,  $20 \mu\text{m}$  像元间距,分辨率  $320 \times 256$ ,相机如图 3 所示。

2010 年,意大利报道的激光主动成像系统 ATI(Active Laser Imaging),采用工作波长在  $1.5 \mu\text{m}$  的人眼安全脉冲激光作为照射光源,输出激光脉冲能量  $5 \text{ mJ}$ ,重复频率  $5 \text{ Hz}$ ,脉冲宽度  $9 \text{ ns}$ ;采用 InGaAs FPA 相机作为探测接收设备,相机最小门宽  $500 \text{ ns}$ ,对应的距离分辨率  $75 \text{ m}$ ,像素数为  $640 \times 512$ 。成功实现了对  $5 \text{ km}$  外人的识别,他们认为通过进一步提高激光光源的输出能量以及接收系统的镜头口径,识别距离可以进一步提高,从而达到  $10 \text{ km}$ <sup>[7]</sup>。



图 3 Bobcat-320-gated 非制冷相机

Fig. 3 Bobcat-320-Gated uncooled InGaAs camera

### 3.2 InGaAs/InP TE EBCMOS 选通相机及系统

InGaAs/InP TE EBCMOS 是第一个投入商业应用的距离选通主动成像探测器。探测器为管状结构,耦合了 InGaAs/InP TE 光电阴极探测器和背照 CMOS 探测器。通过高电压电子管产生超过 200 的准雪崩增益,而且增益过程无噪声。溢出噪声因子低于 1.1,这点甚至比 HgCdTe APD 更好。这种探测器的主要缺点是量子效率相对较低,通常不超过 30%。

美国 INTEVAC 公司专门研制工作在 SWIR 波段的高速选通相机,如 LIVAR M506 型 SWIR 距离选通相机。该相机采用 TE-EBCMOS InGaAs 探测器,像素数  $1280\text{H} \times 1024\text{V}$ ,分辨率为  $640 \times 480$  ( $2 \times 2$  的像素合并),像元尺寸  $13.4 \mu\text{m} \times 13.4 \mu\text{m}$  ( $2 \times 2$  的像素合并),响应波长范围为  $950 \sim 1650 \text{ nm}$ ,  $1.55 \mu\text{m}$  波长处量子效率大于 20%,暗电流约  $1\text{e}/\mu\text{s}/\text{pixel}$ ,选通门宽最小可达  $70\text{ns}$ 。图 4 给出了  $2 \text{ km}$  外目标区域的红外热图像和通过 LIVAR 获取

的激光照明选通图像。LIVAR M506 型相机的外形如图 5 所示。



图 4  $2 \text{ km}$  公里远处的红外热图像(左)和 LIVAR 获取的目标识别图像(右)

Fig. 4 IR image(left) and targets identified image(right) with livar at  $2 \text{ km}$



图 5 LIVAR M506

Fig. 5 LIVAR M506

INTEVAC 公司在其 SWIR 选通相机的基础上,推出了 LIVAR4000 型激光照明选通成像系统,如图 6 所示。照射光源输出波长  $1.57 \mu\text{m}$  脉冲激光,脉冲能量大于  $10 \text{ mJ}$ ,重复频率  $2 \text{ Hz}$ ,束散角  $1.5 \sim 15 \text{ mrad}$  内可调;选通相机像素数为  $640 \times 480$ ,像元尺寸  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ,选通门宽最小  $150 \text{ ns}$ ,分辨率大于  $28 \text{ lp/mm}$ ,信噪比大于 5。



图 6 LIVAR 4000

Fig. 6 LIVAR 4000

瑞典 FOI 在激光照明选通成像系统的研究非常深入,其采用 INTEVAC 公司的 SWIR 选通相机作为接收成像设备,搭建了  $1.5 \mu\text{m}$  人眼安全激光照明跟踪成像系统,如图 7 所示。系统安装在一个随动平台上,采用 LWIR 热成像系统作为探测跟踪设备,  $1.5 \mu\text{m}$  人眼安全激光器作为照射光源,输出的激光脉冲能量约  $20 \text{ mJ}$ ,重复频率  $10 \text{ Hz}$ ,脉冲宽度约  $20 \text{ ns}$ ,发散角约  $5.5 \text{ mrad}$ ,成功完成了对

远距离飞行目标的跟踪和选通成像工作,如图 8 所示。

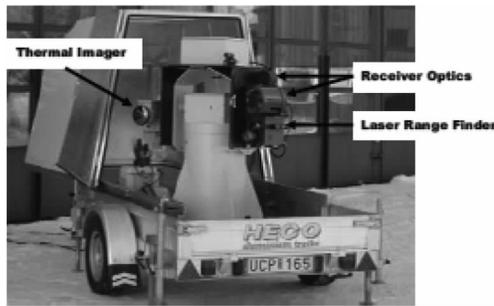


图 7 FOI 的  $1.5\mu\text{m}$  激光照明选通跟踪成像系统

Fig. 7  $1.5\mu\text{m}$  laser illuminating gated imaging system of FOI

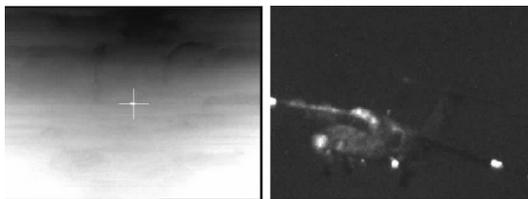


图 8 飞行目标的热跟踪图像(左)和距离选通图像(右)

Fig. 8 Left tracking with a high resolution IR camera and right a gated image of the tracked aircraft

### 3.3 HgCdTe APD FPA 选通相机及系统

HgCdTe APD 器件有着特有的单载流子工作机制,这也决定了其具有极低的噪声;HgCdTe 材料的高效光学吸收和高碰撞电离率,决定着这种器件具有非常高的雪崩增益;器件在单电子工作下具有极高的响应速度。试验表明,当噪声因数小于 1.3 时,器件增益可以高达 5300 以上;HgCdTe 材料在  $1.5 \sim 1.6\mu\text{m}$  波长范围内具有 75% 以上的量子效率,这与 InGaAs 基本相当;HgCdTe 材料像素间距较小,适合制造大面阵的 SWIR 焦平面器件,非选通 HgCdTe APD FPA 像素数已经达到  $2048 \times 2048$ 。以上诸多优点,使得 HgCdTe APD 具有了下一代 SWIR 选通成像焦平面探测器阵列(FPA)所要求的高灵敏度、高增益、高带宽、低噪声因数、高分辨率和极高响应速度等诸多理想特性。同时,同一个 HgCdTe APD 器件,通过加不同的工作偏压,可在 APD 工作模式和红外焦平面探测器模式之间切换,从而形成主动 SWIR 和被动 MWIR 双模探测系统,这是目前国际上的研究热点。HgCdTe APD FPA 的主要缺点是其工作时需要制冷,品质因子随着温度升高而降低,成本相对较高<sup>[8]</sup>。

2004 年,英国的 SELEX 公司采用  $1.57\mu\text{m}$  激光器和  $320 \times 256$  的 HgCdTe FPA 选通相机研制了用于远距离目标的识别的 SWIR 选通成像系统,可

对 10 km 距离的目标进行主动成像。激光器采用 Nd:YAG 激光器,通过 OPO 转换输出  $1571\text{ nm}$  激光,脉冲宽度 20 ns,重复频率 15 Hz。探测器(SWIFT)增益可以达到 100 以上,其灵敏度可以达到 10 个光子,等效噪声不大于 10 个,有着很小的溢出噪声。相机选通门宽可以到 50 ns,距离选通相机的距离分辨率为  $9\text{ m}$ <sup>[9]</sup>。现在,SELEX 采用高能量的激光光源和高性能选通 HgCdTe FPA 相机组成先进的机载激光雷达(BIL(BURST ILLUMINATION LADAR))系统,获取目标的 2D 和 3D 图像。采用  $26\mu\text{m}$  像元间隔的 HgCdTe APD FPA 制冷探测器,增益可达 800 以上,可在被动 MWIR/ $3 \sim 5\mu\text{m}$  和主动 SWIR/ $1.57\mu\text{m}$  双模式下工作,其获得的图像如图 9 所示<sup>[10]</sup>。

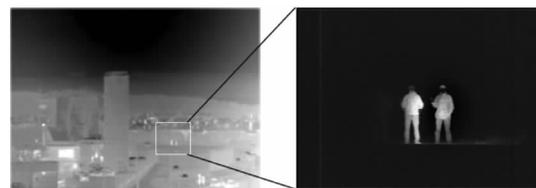


图 9 BIL 获得的 MWIR(左)和 SWIR 选通图像(右)

Fig. 9 MWIR image(left) and gated SWIR image(right) with BIL

### 3.4 分析比较

单就探测器的综合性能来看,HgCdTe APD FPA 由于具有较高的灵敏度、高增益、高带宽、低噪声因数、高分辨率和极高响应速度,从而很好地满足了选通成像系统的要求;InGaAs/InP TE EBCMOS 作为另一种较好的解决方案,探测器具有较高的增益和灵敏度,但是其量子效率相对较低;InGaAs FPA 的工艺简单,具有更高的成本优势,更重要的是其工作过程不需要制冷。但是,从激光照明选通成像系统来看,InGaAs FPA 相对较低的灵敏度和信噪比,则要通过提高照明激光光源的性能要求来进行补偿,从而抵消了探测器的成本优势。因此,在选通成像系统探测器的选择上,需要综合系统总体技术指标、激光光源的技术指标以及系统总体成本等多种因素。例如,2005 年,SELEX 公司开发的 LCTS (Low Cost Targeting System) 低成本目标探测跟踪系统,其中的 SWIR 选通成像相机采用的是 Intevac 公司的 InGaAs/InP TE EBCMOS 探测器<sup>[11]</sup>;然而,在其开发的 BIL 系统中,采用的是 HgCdTe FPA 选通探测器(见 3.3 节)。

## 4 结束语

基于人眼安全激光的 SWIR 选通成像技术是最具潜力的复杂背景下远距离目标的全天候探测和识

别模式,非常适合激光成像雷达、制导和引信等武器系统的应用,在填补微光夜视和中波红外成像之间的光谱空缺,获取远距离目标的全面红外图像信息等方面有着重要意义。美国、英国、德国、瑞典和法国等军事强国都非常重视 SWIR 波段选通相机和系统的开发,而且已经研制出了不少样机和装备。在国内,虽然也有不少单位在开展研究,但是尚有多项关键技术未突破,能够成功工程化应用的产品还很少。因此,我国应加快 SWIR 波段选通相机和装备的研制和开发,积极开展人眼安全激光的 SWIR 选通成像技术研究,这对我国的军用和民用红外事业都具有非常重要的战略意义。

#### 参考文献:

- [1] CAI Yi, HU Xu. Short wave infrared imaging technology and its defence application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(12): 643 - 647. (in Chinese)  
蔡毅, 胡旭. SWIR 成像技术及其军事应用[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(12): 643 - 647.
- [2] SONG Yanfeng, SUN Weping, LIU Hao. Research on long-range laser illuminating gated imaging technique[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 9 - 13. (in Chinese)  
宋岩峰, 孙卫平, 刘灏. 远距离激光照明选通成像技术的研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(1): 9 - 13.
- [3] CAO Yang, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. Development in shortwave infrared focal plane array and application[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(2): 63 - 68. (in Chinese)  
曹扬, 金伟其, 王霞, 等. SWIR 焦平面探测器及其应用进展[J]. *红外技术*, 2009, 31(2): 63 - 68.
- [4] David Oxford, Richard L Espinola. Simulation of a laser range-gated SWIR imaging system in weak turbulence conditions[C]//SPIE, 2011, 80140T: 1 - 12.
- [5] Stephane Demiguel. Theoretical analysis and comparison of SWIR active imaging detectors [C]//SPIE, 2009, 29836: 1 - 10.
- [6] Tara J Martin, Dr Bora. Develop multipurpose InGaAs focal plane array visible/SWIR camera for staring and range gated applications[C]//SPIE, 2007, 657201: 1 - 11.
- [7] Andrea R, Andrea P, Alessandro R, et al. High resolution active laser imaging and range gating at 1.5  $\mu\text{m}$  up to 10 km [C]//SPIE, 2010, 7838 - 0k: 1 - 10.
- [8] LIU Xingxin. Status of HgCdTe avalanche photodiode arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 909 - 913. (in Chinese)  
刘兴新. 碲镉汞雪崩光电二极管发展现状[J]. *激光与红外*, 2009, 39(9): 909 - 913.
- [9] Ian B, Stuart D, Jeremy C. A low noise laser-gated imaging system for long range target Identification [C]//SPIE, 2004, 5406: 133 - 144.
- [10] Ian B, Peter T. Advanced multifunctional detectors for laser gated imaging applications [C]//SPIE, 2006, 620608: 1 - 10.
- [11] Robert J, Jefferson E, John C, et al. A novel low cost targeting system (LCTS) based upon a high-resolution 2D imaging laser radar [C]//SPIE, 2005, 59880L - 1: 1 - 6.