

〈微光技术〉

## 新型微光成像器件及应用

刘智超<sup>1</sup>, 樊桂花<sup>2</sup>, 郭惠超<sup>2</sup>, 范有臣<sup>1</sup>

(1.装备学院研究生院, 北京 101416; 2.装备学院光电装备系, 北京 101416)

**摘要:** 采用全固态微光成像器件是未来微光成像的发展趋势。介绍了2种全固态微光器件 EMCCD、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , 分析了其成像性能, 描述了其研究现状, 对比了传统的真空光电成像与全固态微光成像性能指标, 阐明了微光成像器件向着高灵敏度、低噪声、宽光谱响应和强适应能力方向发展。

**关键词:** 微光成像; 全固态微光成像器件; EMCCD;  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

**中图分类号:** TN223      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2015)08-0701-06

## The New Low Light Level Imaging Devices and It's Applications

LIU Zhi-chao<sup>1</sup>, FAN Gui-hua<sup>2</sup>, GUO Hui-chao<sup>2</sup>, FAN You-chen<sup>1</sup>

(1. Graduate School, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** All-solid-state imaging device is the future trend of low light level imaging. The paper introduces two types of all-solid-state imaging devices, provides an analysis of its imaging performance, description of research status, and comparison with conventional vacuum optical imaging device. It shows the new development direction of all-solid-state low light level imaging device will go towards high sensitivity, low noise, broad spectral response and strong adaptability.

**Key words:** low light level imaging, all-solid-state low light level imaging device, EMCCD,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

### 0 引言

微光成像技术在军事应用<sup>[1]</sup>、天文观测、医用治疗等方面具有重要前景。微光器件是微光成像技术的关键, 其发展经历了以 S20 (Sb-K-Na-Cs) 多碱光阴极与电子倍增微通道板 (MCP) 为核心的第一、二代器件<sup>[2-3]</sup>, 以砷化镓负电子亲和势光阴极和 MCP 为核心的第三代器件, 和以非镀膜电子倍增多通道板、门控高压电源、砷化镓光阴极为关键部件的第四代器件<sup>[4]</sup>, 它们属于真空光电器件, 工艺难度较大, 高压强光下容易损毁, 适用光谱范围较小。

随着半导体工艺的发展, 全固态微光器件问世, 其具有量子效率高、响应速度快、噪声低、光谱响应宽等特点, 优势显著。其中电子倍增 CCD (EMCCD) 微光器件和  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  全固态微光器件具有代表性。

### 1 EMCCD 微光成像器件

EMCCD 由成像区、存储区、读出寄存器、倍增寄存器<sup>[5]</sup>和读出放大器 5 部分构成, 如图 1 所示。与传统 CCD 相比, EMCCD 在电荷输出之前经过了电子倍增寄存器, 使得微小信号电荷在转移过程中得到倍增放大, 实现“片上增益”。其工作过程为: ①积分时间内, 光子入射到成像区, 完成光电转换, 光子转换为信号电荷, 并暂存在势阱中等待转移; ②积分时间结束, 成像区电极加载驱动电压, 信号电荷转移至存储区; ③存储区电极加载驱动电压, 信号电荷按行垂直转移至读出寄存器; ④同时, 行转移信号电荷受到读出寄存器驱动电压作用, 水平转移至倍增寄存器; ⑤在倍增寄存器中, 信号电荷经过强电场加速转移、电荷离子化撞击, 产生新电荷而倍增; ⑥信号电荷最终由低噪声输出放大器以电压信号的形式输出。在⑤过程中, 倍增单元增益一般为 0.010~0.015, 但倍增寄存器中倍增单元有几百甚至上千个, 因而得到的增益相当可观, 并且其量子效率较高, 高增益下读出噪

收稿日期: 2015-03-06; 修订日期: 2015-04-02.

作者简介: 刘智超 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向空间光电测量。

基金项目: 国家 863 计划, 编号: 2014AA7031024H.

声低,制冷工艺使得暗电流噪声低等,使得微光条件下可以获得较高的图像信噪比,因此,在空间应用、生物医学、夜视侦查等领域得到广泛应用。

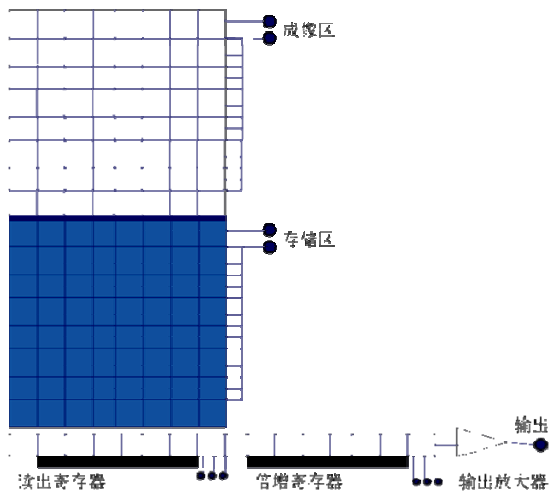


图1 EMCCD 结构图 Fig.1 EMCCD structure

### 1.1 EMCCD 成像性能

影响 EMCCD 成像性能的因素主要有器件噪声、增益、量子效率等,而在微光下,评价其性能的主要指标是成像信噪比。

EMCCD 成像噪声主要有光子散粒噪声、暗电流噪声、时钟感生电荷噪声、读出噪声和倍增噪声。光子散粒噪声<sup>[6-7]</sup>与单位时间内入射至成像区的光敏面上光子产生的信号电荷数目的随机波动相关,是 EMCCD 固有噪声,与时钟频率无关,并且无法通过后续电路的优化去除,决定了 EMCCD 的噪声极限;暗电流噪声的产生是因为当 EMCCD 处于无电信号、无光信号输入时,则所有电极 MOS 电容器处于深耗尽状态,较少的热生载流子被收集在势阱中,致使产生暗电流,与工作温度密切相关,可以通过降低工作温度来抑制暗电流噪声;时钟感生电荷噪声的产生与信号电荷的驱动时钟的作用有关,电荷在成像区、存储区或倍增寄存器转移过程中,当转移电极工作模式转变时,空穴会受到电场作用加速移动至硅衬底,在这个过程中,会出现“碰撞离子效应”,产生新的空穴-电子对,新生的电子形成时钟感生电荷,它会随着驱动时钟电压幅值的增加而增大,而与转移脉冲的频率呈反比,与温度弱相关,低温时稍易产生;读出噪声是在输出放大器输出的信号电荷经历电荷-电压转换的读出过程引入的,可以通过适当增大倍增增益来抑制其影响,一般用等效读出噪声表示。在高增益下,EMCCD 的读出噪声可以忽略不计,同时由于 EMCCD 具有增益可调的性能,其等效读出噪声还与增益的设置有关;倍增噪声的引入是由于倍增的随机性,增益围绕统计期望波动,它是 EMCCD 成像器件中特有的

噪声,其大小与增益  $G$  的设置有关,通常用噪声因子  $F$  来表示,当增益  $G$  足够大时,  $F$  近似等于  $\sqrt{2}$ 。

通过以上分析得知,光子散粒噪声、暗电流噪声和时钟感生电荷噪声等进入倍增寄存器的噪声都会随信号电荷一同倍增大,且需要用噪声因子  $F$  进行修正,通过降温、改变时钟频率等来减小或抑制;而读出噪声则通过调节增益大小来抑制。

最终得到总信噪比模型为:

$$SNR = S_s / N_{total} = \frac{S_s}{\sqrt{F^2(\sigma_{dark}^2 + \sigma_e^2 + \sigma_{shot}^2) + (\frac{\sigma_{read}}{G})^2}} \quad (1)$$

式中:  $S_s$  是输入信号;  $G$  是总倍增增益;  $F$  是噪声因子;  $\sigma_{shot}$  为光子散粒噪声;  $\sigma_{dark}$  为暗电流噪声;  $\sigma_e$  为时钟感生电荷噪声;  $\sigma_{read}$  为读出噪声。

与传统微光成像器件 ICCD、EBCCD 相比,EMCCD 制作工艺先进,性能优越,其峰值量子效率可达 90%以上<sup>[8]</sup>,现有技术增益可达到 5000 倍,读出噪声低于 0.1 个电子,并且当入射光子数目处于较低水平(约 1~100 个光子)时,EMCCD 的性能优势明显,成像信噪比相对更好,而 ICCD 和 EBCCD 会受光阴极探测极限和自身噪声影响而导致信噪比降低。表 1 是 ICCD、EBCCD 和 EMCCD 性能参数对比。国外将 EMCCD 与 ICCD 在极低光子输入下的细胞成像性能进行了比较<sup>[9]</sup>,所使用的 EMCCD 是 Andor Technology iXon DV887 512×512 背照式 EMCCD,像元面积为  $16 \mu m^2$ ,读出帧频为 34 fps;ICCD 是 Stanford Photonics XR Mega 10 ICCD,内部含有 Gen-III 像增强器和分辨率为  $1280 \times 1024$  的 CCD 传感器,读出帧频为 15 fps,有效像元面积为  $10 \mu m^2$ ,实验结果如图 2 所示。

另外,ICCD 动态范围大约 3000:1,无 CCD 模式,强闪光下易饱和损伤,工作噪声较大;EBCCD 的二次激发电子使寄生噪声较高,并易损坏,无 CCD 模式;EMCCD 动态范围为 8500:1,工作方式灵活,可工作于 EMCCD 或 CCD 模式,适合全天时应用。但是,EMCCD 在超高速曝光成像方面无法超越 ICCD,ICCD 门控技术可达皮秒级的高时间分辨率,在高时间分辨率的动态测量方面仍是最佳手段。

### 1.2 EMCCD 发展现状及应用

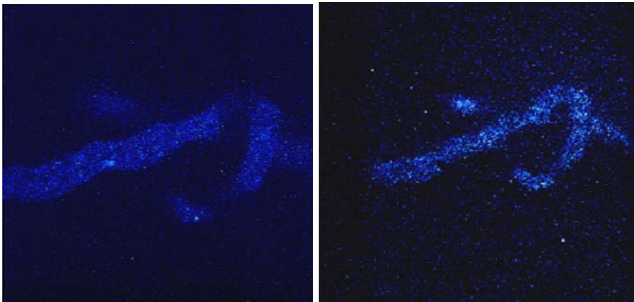
EMCCD 微光成像器件的出现极大地推动了微光成像技术的发展,是近年来国内外研究的热点。

在 1983 年, S. K Madan 发现 Si-CCD 器件内电荷转移过程发生电荷碰撞电离现象,通过提高转移电极的偏置电压会放大电荷信号<sup>[10]</sup>。随后,美国 J. Hyneek 博士提出了基于倍增特性的微弱信号放大的观点,并

表1 ICCD、EBCCD 和 EMCCD 性能参数比较

Table 1 Performance parameters of ICCD, EBCCD and EMCCD

类别	II代 ICCD	III代 ICCD	IV代 ICCD	EBCCD	EMCCD
噪声因子 $F$	2	2.5	1.5	1.09	1.44
信号电荷/ $10^{-8}$ lx	242	343	343	343	487
光子噪声/ $e^{-1}$	15	18	18	18	22
读出噪声/ $e^{-1}$	可以忽略	可以忽略	可以忽略	可以忽略	可以忽略
暗电流噪声/ $e^{-1}$	24	18	18	18	16
总的噪声/ $e^{-1}$	57	65	39	28	38
信噪比	4.3	5.3	8.8	12.3	12.8



(a) EMCCD (b) ICCD

图2 EMCCD 和 ICCD 细胞成像图

Fig.2 Cells imaging of EMCCD and ICCD

通过实验进行验证,对于实验条件的精确控制能够实现几乎零噪声的信号倍增<sup>[11]</sup>,这开启了 EMCCD 的研究热潮。

20 世纪 90 年代俄罗斯圣彼得堡 ELECTRON 公司与莫斯科 Geo2sphaera 公司合作建成“片上增益” CCD 生产线,已有  $532\times 290$ 、 $780\times 290$ 、 $1024\times 1024$  像素分辨率的产品;美国 Scientific Imaging Technologies 公司研制的 SiTeSi502A  $512\times 512$  像素分辨率的 CCD,应用于构成近贴聚焦式“片上增益” CCD<sup>[12]</sup>。

目前,国际上生产的 EMCCD 的核心技术一直被英国 E2V 公司和美国 TI 公司垄断,E2V 公司制造的 CCD65 芯片和 TI 公司制造的 TC253 SPD-30EMCCD 器件最为著名,他们都研制出更适用于高帧频成像技术、低照度下近乎零读出噪音的 CCD,但是两家公司的芯片各有所长,TI 的器件处理速度更好,E2V 则在噪声控制技术方面突出。

在整机研制方面,英国 Andor 公司在 21 世纪初首次将 EMCCD 技术用于其 iXon 系列超高灵敏度相机,实现了高分辨率、低噪声的微光成像<sup>[13-15]</sup>,随后,法国 First Light Advanced Imaging 公司、加拿大 NuVu 公司、英国 Raptor Photonics 公司相继推出自主研发的产品。样机见图 3,依次是 iXon、OCam<sup>2</sup>、NuVu、

Raptor EMCCD 相机,具体参数见表 2。

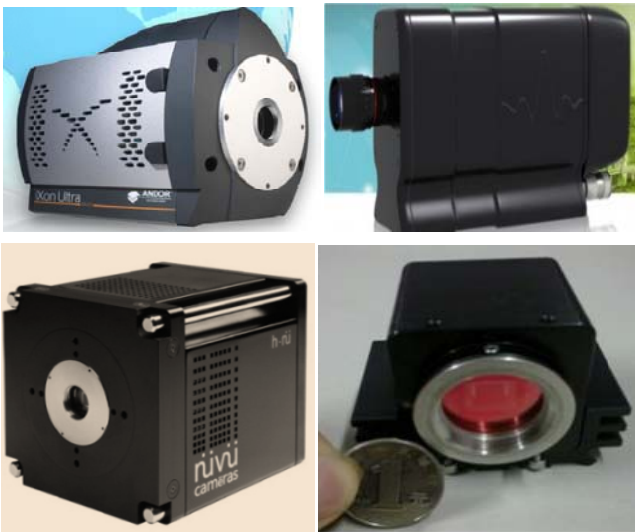


图3 iXon、OCam2、NuVu 和 Raptor EMCCD 相机图

Fig.3 iXon, OCam2, NuVu and Raptor EMCCD camera

EMCCD 凭借其优良的微光成像性能,广泛用于军事夜视、侦查监控、生物科学研究、光谱成像、星光探测,近年来,EMCCD 的空间应用成为热门<sup>[16-21]</sup>。E2V 公司探索了 EMCCD 增益老化的原因,进行了 EMCCD 受到空间辐射、伽马射线辐射和质子放射时连续工作的稳定性研究,表明空间辐射对 EMCCD 的倍增机制无明显影响;自 2010 年,美国宇航局(NASA)在发射的“快速经济可负担科学与技术卫星”(FASTSat),采用 EMCCD 作为遥感成像器件,对地球大气热层进行观测;国际空间站的 AMS-02 设备采用 EMCCD 作为星敏感器;高能 X 射线太空望远镜 NuSTAR 卫星借助 EMCCD 观测宇宙中最高等级的 X 射线;欧洲航天局(ESA)发射的 Gaia 卫星由 106 块 EMCCD 组成规模最大的空间相机,以测绘银河系星体亮度,光谱特征、三维位置<sup>[22]</sup>及运动情况。

2 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 高性能全固态微光成像器件

EMCCD 与 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 微光器件同属于全固态微

表2 iXon、OCam2、NuVu 和 Raptor EMCCD 相机成像系统性能参数表  
Table 2 Performance parameters of iXon, OCam2, NuVu and Raptor EMCCD camera

研究单位	系统名称	主要参数	系统性能	应用领域
英国 Andor	iXon	1~1000 线性增益; 峰值量子效率 96%; 读出噪声小于 $1\text{e}^{-1}$	高分辨率、低噪声; 工作模式: EMCCD、CCD	目标跟踪、弱光探测、天文探测、超分辨率显微成像
法国 First Light Advanced Imaging	OCam2	1~1000 线性增益; 峰值量子效率 95%; 读出噪声小于 $1\text{e}^{-1}$ ; 极高帧频 1500fps	世界上最灵敏、最快速的天文相机	天文, 国防, 航空, 法证, 生物医学成像
加拿大 NuVu	EMCCD NuVu	1~5000 线性增益; 峰值量子效率 96%; 读出噪声小于 $0.1\text{e}^{-1}$	最低制冷-90℃; 高信噪比、低噪声、低暗电流; 读出速率可调	荧光显微成像、光谱成像、寿命成像; 天文观测; 单光子成像
英国 Raptor Photonic	Raptor EMCCD 摄像机	重量 150 g; 工作最低照度 $3\times 10^{-6}\text{lx}$ ; 工作用电 <4 W	高灵敏度; 实时视频, 高分辨率; 重量轻, 体积小	机场、边境安全监控, 适合长距离和恶劣环境的应用

光成像器件, EMCCD 的工作特点主要是输出电子通过片上倍增寄存器放大获得高信噪比成像;  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光器件则是以其对夜天光谱高响应和探测器自身极高的响应灵敏度达到优良微光成像性能。

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光器件通过调节 In 组分值  $x$ , 可以响应夜天辐射的主要波段, 典型  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光成像器件的主要光谱响应如图 4 所示, 其响应的波段为  $0.87\sim 3.5\text{ }\mu\text{m}$ , 对夜天光谱辐射的能量利用率高, 且覆盖两个重要的军事应用激光波段  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  与  $1.5x\text{ }\mu\text{m}$  ( $1.54\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ), 在高性能夜视应用、红外天文探测、高光谱成像、激光通信、激光雷达等领域具有重要应用<sup>[23-25]</sup>, 采用  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件的微光成像系统具有功耗低、体积小、稳定性高等优点, 为高精度的军事探测提供了保障<sup>[26-28]</sup>。

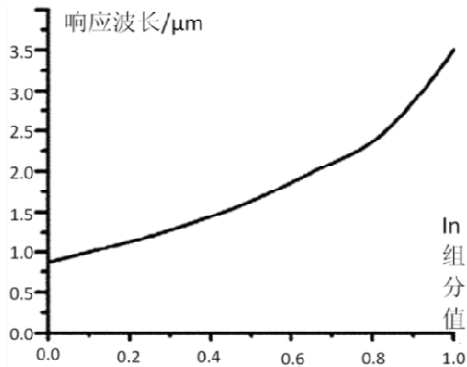


图4  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件响应波长曲线图  
Fig.4 Spectral response of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

2.1  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光成像器件性能分析

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件与常用的传统真空光电器件相比, 在制造工艺、响应机制、光谱范围、等方面优势明显:

1) 工艺难度小。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  全固态微光器件在制备方面采用常规半导体器件工艺, 通过将探测器芯片和读出电路钢柱互连可完大面阵小像元间距器件的

制备或采用侧引互连的方法完成长线列焦平面探测器的制备, 器件封装采用半导体非制冷封装, 勿需封装在超高真空环境。

2) 光谱范围覆盖夜天辐射, 能量利用率高<sup>[29]</sup>。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件通过调节 In 组分含量以调节响应光谱范围, 常用响应范围为  $0.5\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.0\sim 2.2\text{ }\mu\text{m}$ 、如图 5 所示, 夜天光谱范围大致是从  $0.5\sim 2.0\text{ }\mu\text{m}$ , 主要能量集中在  $1.0\sim 2.0\text{ }\mu\text{m}$  内, 第三代微光器件最大只能响应  $0.9\text{ }\mu\text{m}$  的波长, 对夜天辐射能量利用率低,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件能够响应夜天光谱全部波长, 充分利用夜天辐射能量, 成像细节分辨率<sup>[30]</sup>、对比度和亮度比较高, 增强了成像信噪比以及探测距离。

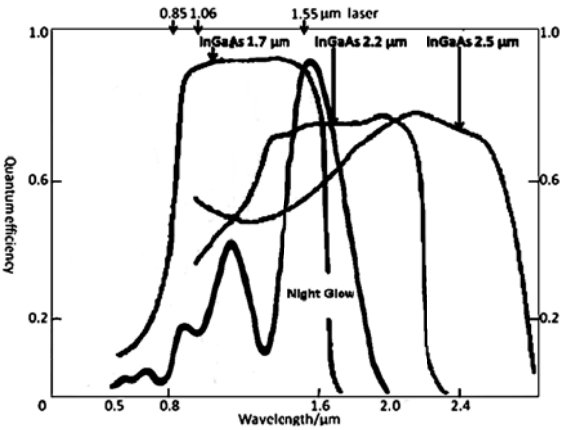


图5 夜天光谱分布以及第三代微光成像器件、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光器件的响应光谱范围和量子效率分布

Fig.5 Spectrum of night sky and response spectrum and quantum efficiency of Gen-III and  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  low light level imaging devices

3) 暗电流小。器件工艺技术优化, 使得  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  得到低至  $10^{-9}$  量级的暗电流, 低压或高温工作过程中, 扩散电流能够抑制暗电流。



4) 响应速度快。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  属于 PIN 器件, 响应快, 且室温下迁移率  $13800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , 用于 APD 阵列探测器中, 响应时间达飞秒级。

5) 工作温度要求低。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  具有很好地高温工作特性, 器件稳定性高, 室温工作探测率达  $10^{14} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ , 这是目前室温工作器件最佳水平, 无需制冷。

## 2.2 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 全固态微光成像器件发展现状及应用

在国外, 对于  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件的研究和应用比较成熟。美国等西方国家在 20 世纪 70 年代就开始对  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料进行研究, 对材料的设计、器件的结构等进行了大量的试验研究。目前已形成  $256 \times 1$ 、 $512 \times 1$ 、 $1024 \times 1$ 、 $6000 \times 1$  等线列产品, 和  $320 \times 256$ 、 $640 \times 512$ 、 $1\text{k} \times 1\text{k}$  等凝视产品,  $1\text{k} \times 1\text{k}$  的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件具有低噪声, 高灵敏度探测, 在  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$  之间量子效率较高, 并且具有高温工作特性。如今, 英国、法国、比利时、以色列、日本以及台湾等具有自主生产能力, 产品在空间探测、安防、自动化检测等领域获得广泛应用。比利时微电子中心研制出  $320 \times 256$  的凝视器件, 对于  $0.9 \sim 2.3 \mu\text{m}$  范围的波长响应速度快, 量子效率高达 80%; Xencis 公司开发的 XS-1.7-640/XS-1.7-320 相机, 能够响应  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$  波段, 像元尺寸为  $20 \mu\text{m}/30 \mu\text{m}$ , 帧频为  $20 \sim 90 \text{ Hz}$ ; FILR 公司利用  $640 \times 480 \text{ In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  FPA 器件研发的 Tau SWIR 具有远距离透雾清晰成像的能力, 可识别弱光下目标细节, 还研制了  $320 \times 256$ 、 $640 \times 512$  的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  FPA, 响应  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$  的波段; 密歇根大学的 Matthew Brown 利用美国 Sensors Unlimited 公司制造的  $1\text{k} \times 1\text{k}$  的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  探测器件展开研究, 其像元尺寸为  $20 \mu\text{m}$ , 工作在  $140 \text{ K}$  下, 其暗电流水平测量为在  $3 \text{ e}^{-1}/\text{s}$  左右, 并且  $1\text{k} \times 1\text{k}$  的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件在温度低于  $140 \text{ K}$  时, 噪声会被最大程度地抑制, 保证了器件的工作稳定性与灵敏度。

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光器件主要应用在军事激光探测、远距离观察与监视以及空间应用等<sup>[31-33]</sup>, 在  $1.06 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  处响应灵敏度高, 能够精确定位激光位置, 图 6 是无月光的低照度下对楼房上的  $1.55 \mu\text{m}$  和  $850 \text{ nm}$  激光光源成像图, 可以清楚看到光源位置点。透雾能力较强, 可实现远距离探测, 图 7 所示为雾天  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光器件成像与普通相机对比图, 前者能够清晰的分辨目标物体; 由于在  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  波长的响应性能很好, 在  $20 \sim 100 \text{ km}$  处的临近空间领域的战略性意义重大, 国内外正不断探索其临近空间应用。

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  微光成像器件的发展趋势基本以波长

扩展、缩小像素间距、提高面阵规模和提高灵敏度为主。器件响应波长向可见光方向扩展和  $2.5 \mu\text{m}$  及以外的波长延伸<sup>[34-37]</sup>。在像素间距方面, 像元中心距离进一步缩小, 单片式器件规格可进一步扩大。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  全固态微光器件以其响应波长与夜天光辐射能量匹配、高性能、低成本、可靠性好、可室温操作等技术优势, 在航天遥感、空间探测、探测与定位等方面已经体现出迫切的应用需求, 也加快了微光成像技术迈入全固态时代的步伐。



图 6 低照度下, 对楼房上的  $1.55 \mu\text{m}$  和  $850 \text{ nm}$  激光光源成像图

Fig.6  $1.55 \mu\text{m}$  and  $850 \text{ nm}$  laser imaging in low level light



图 7 雾天  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  成像器件与普通 CCD 相机成像对比图

Fig.7  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  low level light imaging and normal CCD camera imaging

## 3 结束语

新型微光成像器件 EMCCD、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  器件凭借其高灵敏度、高量子效率、低噪声、宽光谱响应、强适应能力和工艺简单等优势逐渐在微光成像领域占据重要地位, 其应用正从传统的微光监视向航天遥感、空间目标探测、生物医学、军事安防等领域拓展。因此, 研发自主创新、高性能的微光成像器件是国内微光成像技术发展的迫切要求, 也是我国国防军事现代化发展的重要举措之一。

### 参考文献:

- [1] 谭显裕. 微光夜视和红外成像技术的发展及军用前景[J]. 航空兵器, 2001(3): 29-34.
- [2] 王丽, 尚晓星, 王瑛. 微光夜视技术的新进展[J]. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 91-93.
- [3] 艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. 应用光学, 2006, 27(4):

- 303-307.
- [4] Estrera Joseph P, Bender E J, Adriana Giordana, et al. Long lifetime generation IV image intensifiers with unfilmed microchannel plate[C]//*Proc. of SPIE*, 2000, **4128**: 46-53.
- [5] 何伟基, 陈钱, 徐融, 等. 基于 Z 域变换的 CCM 电荷传输模型研究[J]. *电子学报*, 2008, **36**(6): 1140-1143.
- [6] 王明富, 杨世洪, 吴钦章, 等. 电子倍增器件 CCD60 噪声特性分析[J]. *光电工程*, 2011, **38**(7): 145-150.
- [7] 许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 343-346, 357.
- [8] 张灿林, 陈钱, 周蓓蓓. 高灵敏度电子倍增 CCD 的发展现状[J]. *红外技术*, 2007, **29**(4): 192-195.
- [9] Coates C G, Denvira D J, McHale N G, et al. Ultra-sensitivity, speed and resolution: Optimizing low-light microscopy with the back-illuminated electron multiplying CCD[C]//*European Conference on Biomedical Optics. Optical Society of America*, 2003: 5139-5156.
- [10] Madan S K, Bhaumik B, Vasi J M. Experimental observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices[J]. *IEEE TRANSACTION ON ELECTRON DEVICES*, 1983(6): 694-699.
- [11] Jaroslav Hynecek. CCM-a new low-noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors[J]. *IEEE TRANSACTION DEVICES*, 1992(8): 1972-1975.
- [12] Sadygov Z, Olshevski A, Chirikov I, et al. Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiode: their present status, maximum possibilities and limitations[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2003, **567**: 301-303.
- [13] 苏学征. EMCCD 技术-单光子水平的成像探测[J]. *现代科学仪器*, 2005(2): 51-53.
- [14] Andor Technology. iXonEM+ EMCCD Camera:Back-illuminated EMCCD Cameras[EB/OL]. [http://www.andor.com/scientific\\_cameras/ixon/](http://www.andor.com/scientific_cameras/ixon/).
- [15] 陈闽, 杨胜杰. 电子倍增 CCD 微光传感器件性能及其应用分析[J]. *电光与控制*, 2009, **16**(1): 47-50.
- [16] Smith D R, Walton D M, Ingley R, et al. EMCCDs for space applications[C]//*Astronomical Telescopes and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2006, **6276**: 62760K1-12.
- [17] Tulloch S M, Dhillon V S. On the use of electron-multiplying CCDs for astronomical spectroscopy[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, **411**(1): 211-225.
- [18] Holland A. *Observing Photons in Space*[M]. New York: Springer, 2013: 443-453.
- [19] Pool P J, Morris D G, Burt D J, et al. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation[C]//*Optics & Photonics 2005, International Society for Optics and Photonics*, 2005, **5902**: 59020A1-6.
- [20] Ingley R, Smith D R, Holland A D. Life testing of EMCCD gain characteristics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, **600**(2): 460-465.
- [21] Wilkins A N, McElwain M W, Norton T J, et al. Characterization of a photon counting EMCCD for space-based high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets[C]//*SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2014: 91540C-91540C-12.
- [22] 胡晓华, 周晓中, 刘松涛, 等. 星载微光立体成像技术及实现[J]. *中国光学*, 2013, **6**(5): 701-709.
- [23] Martin H Ettenberg, Marshall J Cohen, Robert M Brubaker, et al. Indium Gallium Arsenide imaging with smaller cameras, higher resolution arrays, and greater material sensitivity[C]//*Proc. of SPIE*, 2002, **4721**: 26-36.
- [24] Devon G Turner, Timothy C Bakker, Peter Dixon, et al. The development of, and applications for, extended response (0.7 to 1.7 $\mu$ m) InGaAs focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2008, **6940**: 694037-1-8.
- [25] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 32-38.
- [26] Jesse Battaglia, Robert Brubaker, Martin Ettenberg, et al. High speed short wave infrared (SWIR) imaging and range gating cameras[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6541**: 654106.
- [27] Bora M Onatla, Wei Huang, Navneet Masauna, et al. Ultra low dark current InGaAs technology for focal plane arrays for low-light level visible-shortwave infrared imaging[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 65420L1-L9.
- [28] Michael MacDougall, Andrew Hood, JonGeske, et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8012**: 801221-1-10.
- [29] 史衍丽, 胡锐, 张卫锋, 等. InGaAs 固体微光器件研究进展[J]. *红外技术*, 2014, **36**(2): 81-88.
- [30] Marlon D Enriquez, Michael A Blessinger, Joseph V Groppe, et al. Performance of high resolution visible-for day/night vision[C]//*Proc. of SPIE*, 2008, **6940**: 69400O1-O9.
- [31] Li Xue, Tang Hengjing, Fan Guangyua, et al. 256 $\times$ 1 element linear InGaAs short wavelength near-infrared detector arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6835**: 68350501-08.
- [32] 高新江, 张秀川, 唐遵烈, 等. 320 $\times$ 256 InGaAs 短波红外焦平面阵列探测器[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(2): 178-190.
- [33] 张卫锋, 张若岚, 赵鲁生, 等. InGaAs 短波红外探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2012, **34**(6): 361-365.
- [34] FLIR Systems. FLIR SC70000 NIR/VNIR Series.[EB/OL]. 2009[2014-02-13]. <http://www.flir.com/>.
- [35] Alcatel Thales. III-V lab. Cactus SWIR[EB/OL]. 2009 [2014-02-13]. <http://www.3-5lab.fr/>.
- [36] Xenics Infrared Solutions. Xeva-1.7-320 VisNIR[EB/OL]. 2008 [2014-02-13]. [www.xenics.com](http://www.xenics.com).
- [37] Raptor Photonics. OWL SW1.7CL-320[EB/OL]. 2009[2014-02-13]. <http://www.raptorphotonics.com/>.