

In_xGa_{1-x}As 高性能全固态数字化微光器件

史衍丽^{1,2}, 吕玉增³, 赵鲁生¹, 张卫锋¹, 胡锐¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650023; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
3. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

摘要: 作为全固态微光器件, In_xGa_{1-x}As 器件通过调节材料组分 x 值, 其响应波段覆盖夜天光辐射的主要波段, 对夜天光的能量利用率高。加之材料量子效率高, 器件性能好, 可望显著提高夜视系统作战距离; 另外, 采用半导体常规工艺制作, 可完成大面阵、长线列器件制备, 无需封装在(超)高真空系统, 制备简单; 采用 CMOS 读出电路进行信号数据的读取、传输与放大, 有利于进行数据的处理和优化改善。由于具备的以上技术优势, In_xGa_{1-x}As 器件成为一种新型的高性能全固态数字化微光器件。In_xGa_{1-x}As 器件与传统的微光器件在光电转换原理以及器件制备方面存在不同, 决定了两者在性能上存在的差异。文中对此进行了对比分析, 分析结果体现了 In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件的技术优势和特点, 以及 In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件存在的重要应用和发展需求。

关键词: In_xGa_{1-x}As; 微光器件; 全固态; 数字化; 真空微光器件

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3367-06

High performance solid-state and digitalized In_xGa_{1-x}As low-light night vision devices

Shi YanLi^{1,2}, Lv Yuzeng³, Zhao Lusheng¹, Zhang Weifeng¹, Hu Rui¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kuming 6500232, China; 2. Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China; 3. 63961 Uint, PLA, Beijing 100012, China)

Abstract: As full solid-state low-light night vision devices, In_xGa_{1-x}As could adjust the composition x to vary the response wavelength, which can cover the main wavelength of the night sky radiation. In addition to this, the quantum efficiency of the In_xGa_{1-x}As material is high, and the device dark current is low, so performance of the In_xGa_{1-x}As devices is high for the night vision system, as consequence the longer detecting distance for the system. Besides, the In_xGa_{1-x}As arrays are made from the conventional semiconductor process without sealed in the ultrahigh vacuum. CMOS ROIC is adopted to read, transport and amplify the signal, then the signal datum is easy to handle and improve for the In_xGa_{1-x}As low-light devices comparing the vacuum devices. The above advantages made the In_xGa_{1-x}As devices a novel low-light device. There are lots of differences concerning the working mechanism, fabrication method, as well as the performance between In_xGa_{1-x}As devices and vacuum one. Based on the comparison results the

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1037602)

作者简介: 史衍丽(1969-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为探测器物理与器件研究。Email: ylishikm@hotmail.com

technique feature and the important application requirement for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ solid-state low-light night vision devices were analyzed.

Key words: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; low-light night vision device; full solid-state; digitalized; vacuum low-light night vision device

0 引言

与红外热成像利用目标自身辐射的成像原理不同,微光夜视仪或可见光成像是利用目标对星光、辉光或可见光等外来光照反射形成的图像,星光、辉光等夜天光辐射能量对应的波长包含了可见光和近红外从 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$,为了充分利用夜天光的能量,微光夜视仪的响应波长需要尽可能覆盖夜天光的辐射波长范围。目前,可用于微光夜视仪的传感器包含了基于多碱阴极、GaAs 光阴极的二代、三代微光像增强器,基于硅材料的 EMCCD (Electron-Bombarded-Charge Coupled Device)、CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 成像器件等,以上微光器件的响应波长受光敏材料的限制,其最长的响应波长只到 $1.1\ \mu\text{m}$ 。为了获得与夜天光辐射波长相匹配的器件响应,需要发展一种新的微光器件,响应波长比传统的微光器件长,并具有高的器件灵敏度。

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 固态微光器件通过调节材料组分 x 值,其响应波段 $0.87\sim 3.5\ \mu\text{m}$,覆盖夜天光辐射的主要波段。通过去除 InP 衬底,响应波段能够进一步扩展到 $0.4\ \mu\text{m}$ 。另外,在器件制作技术以及器件特性等方面具有特有的技术优势,能满足宽响应、高灵敏度、长寿命、低成本等应用需求,可作为新一代微光器件,在常用军事人眼安全激光跟踪与探测、激光制导、临近空间探测、高性能军用夜视、航天遥感等方面应用广泛。

与常用的二代、三代微光像增强器以及硅器件相比, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 固体微光器件在所用的光敏材料、工作原理以及制作方式等方面存在不同,文中对此进行了分析和比较,总结了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 固体微光器件的特点以及应用,为新一代固体微光器件探明发展方向。

1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 全固态数字化微光器件存在的技术优势

与传统的二代、三代微光器件,以及采用本征硅材料为光敏感材料制备的 EMCCD 等器件相比,

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 全固态数字化微光器件具有以下技术优势。

1.1 响应波长,器件响应范围覆盖夜天光主要能量

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 全固态数字化微光器件以三元合金 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料作为光敏感材料,其响应波段可通过调节 In 组分 x 值获得 $0.87\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 的响应,其工作波段范围覆盖可见光和夜天光能量。图 1 给出了

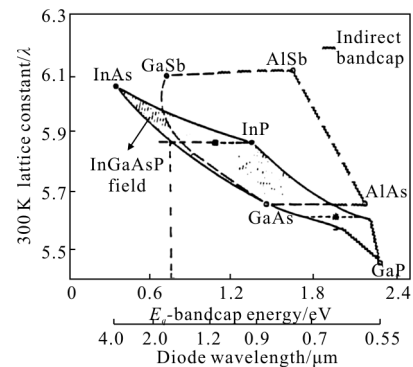


图 1 InAs、GaAs、InP 等材料晶格常数和材料禁带宽度、器件响应波长的对应关系

Fig.1 Lattice constant of InAs, GaAs, InP material versus bandgap and response wavelength

InAs、GaAs 的晶格常数和材料禁带宽度、器件响应波长的对应关系,从图中可见当 In 含量值 $x=0.53$,InGaAs 材料与 InP 材料晶格匹配,此时器件响应波长截止为 $1.7\ \mu\text{m}$,因此采用 InP 材料作为衬底材料,可生长获得大面积、晶体质量好的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料称之为标准 InGaAs 材料,标示为 InGaAs,文中关于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料及器件性能的比较主要是基于标准 InGaAs 材料,对此皆标示为 InGaAs。当 In 含量值 $x=0.82$,此时器件响应波长可延长到 $2.6\ \mu\text{m}$,由于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料与 InP 材料晶格不匹配,材料生长存在晶格失配以及缺陷密度高的问题,目前正在通过改变制备工艺或制备多层组分缓变的过渡层进行改进。图 2 为计算得到的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料响应波长和组分 x 的对应关系。

图 3 给出了对于完全无月光,其可见光部分来自于微弱的辉光条件下,夜天光能量分布情况^[1],从

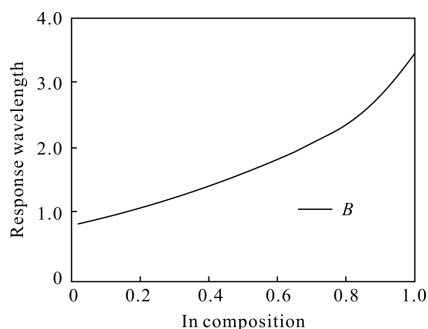


图 2 In_xGa_{1-x}As 器件响应波长与组分的对应关系
Fig.2 Dependence of device response wavelength on In_xGa_{1-x}As composition

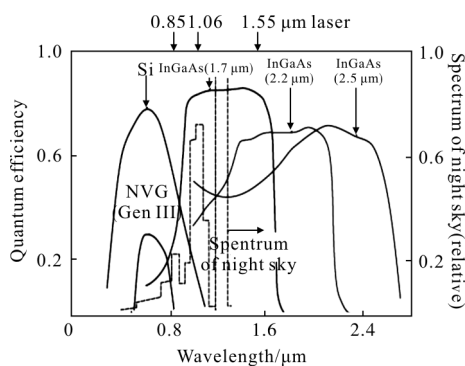


图 3 Si、InGaAs 与三代夜视器件量子效率比较，以及夜天光能量分布示意图

Fig.3 Comparison of quantum efficiency between Si、InGaAs and GaAs Gen-III, the spectrum of night sky is also displayed in the figure as reference

图 3 可见，夜天光能量分布在 0.5~2 μm 的范围，而且能量主要分布在 1~2 μm 范围。在这个能量区间，三代传统的微光像增强器响应波长最长到 0.9 μm，对微光能量的利用率非常低。与此不同，In_xGa_{1-x}As 材料的响应波段却覆盖了夜天光能 p 量的主要部分 1~2 μm，能量利用率高，可望大大提高夜视系统的作战距离和性能。

1.2 量子效率高、灵敏度高

In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件的第二个技术优势在于量子效率高、灵敏度高。In_xGa_{1-x}As 材料吸收系数大，对于 InGaAs 材料约 7 000 cm⁻¹；加之 In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件属于内光电器件，光生载流子损失小，决定了 In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件的量子效率高，对于截止波长为 1.7 μm 的器件量子效率接近 90%。图 3 中给出了截止波长为 1.7 μm、2.2 μm 以及 2.5 μm 的 In_xGa_{1-x}As 短波红外

探测器光谱响应以及量子效率，作为对比，图中同时给出了三代夜视器件的光谱响应与量子效率。从比较结果可看到，与传统的三代微光器件相比，InGaAs 全固态数字化微光器件的响应波段长，量子效率高（大约三倍），因此可明显提高夜视器材的灵敏度和作用距离。

Goodrich 公司曾计算了对于 100 m 处的人进行识别和辨别，采用三代微光器件 Omni V 和 InGaAs 器件所需要的光照度，从中比较两者的灵敏度大小^[2]。表 1 给出比较结果。

表 1 三代微光器件 Omni V 和 InGaAs 器件对于 100 m 处的人进行识别和辨别所需的光照度
Tab.1 Irradiation required for the third-generation low-light devices and InGaAs devices in order to indentify and recognize a man in 100 m

| | InGaAs | Omin V |
|----------------------|---------|--------|
| 100 m Recognition | 0.3 mlx | >1 mlx |
| 100 m Identification | 1 mlx | 20 lx |

以上计算结果采用的条件为：目标对比度 0.3，f/#=1.4，30 Hz 的帧频，视场反射=0.2，观察时间 0.1s，两个器件的性能设定为典型值，InGaAs:85 mA/lumen，Omni V :2.6 mA/lm，分辨率:64 lp/mm。计算结果显示了 InGaAs 器件对于 100 m 处人的识别能力远远好于 Omni V，其辨识能力高于 Omni V 三代微光器件一个量级。

1.3 低暗电流、低噪声

通过对器件结构和器件工艺的优化，InGaAs 器件可获得非常低的暗电流密度，达到 10⁻⁹A/cm²[2]。在小偏压工作条件以及高温操作，器件的暗电流由扩散电流限制。由于器件暗电流小，器件的噪声电流小。

1.4 高速响应

从器件物理可知，PIN 器件与 PN 结器件相比，可以获得更快的器件响应速度。InGaAs 材料室温下迁移率高达 13 800 cm²/Vs，通过器件结构的优化设计，InGaAs PIN 器件可以获得高速应用。另外，通过采用雪崩放大原理制备 InGaAs 雪崩二极管焦平面探测器(APD)响应时间可到 fs 量级。

1.5 室温或近室温工作

In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件具有较好的

高温工作特性,随着温度升高,器件性能衰变比较慢,可在半导体热电制冷条件或室温下工作,目前报道的标准 InGaAs 探测器探测率高达 $10^{14} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$,这是目前近室温工作器件(工作温度大于 250K)可以达到的最好水平。由于工作在近室温或非制冷条件下,系统体积缩小,成本降低,可靠性以及寿命显著提高。图 4 给出了比利时 Xenics 公司 InGaAs 320×256 以及 640×512 规格的热像仪,由于没有斯特林等低温制冷系统,体积大大缩小。

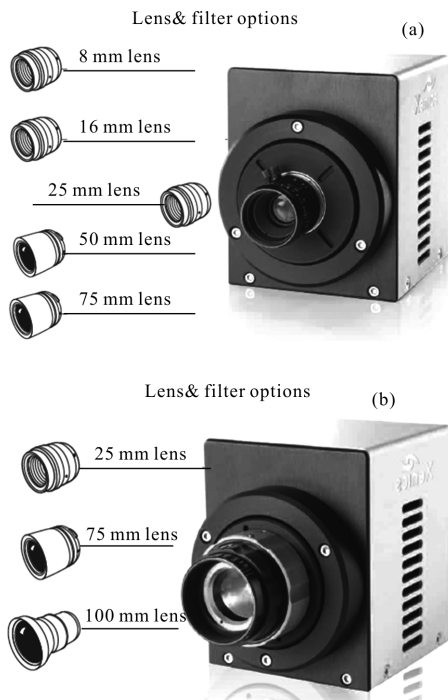


图 4 比利时 Xenics 公司 320×256 以及 640×512 InGaAs 规格的热像仪

Fig.4 320×256 and 640×512 InGaAs image system from Xenics company

2 InGaAs 器件的特点

2.1 全固态

与传统的一代、二代和三代真空微光像增强器制备与工作模式相比,In_xGa_{1-x}As 全固态微光像增强器存在显著的差异。在制备方法方面,与真空微光器件采用的超高真空钢封工艺不同,In_xGa_{1-x}As 固态微光器件采用常规半导体器件工艺,按照目前钢柱互连制备红外焦平面探测器的方法,通过将探测器芯片和读出电路钢柱互连,可完成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^[3],如图 5 所示。器件封装采用半导体非制冷封装,无需封装在超高真空环境。由此带来的优势在于工艺简单、寿命长、稳定性好。

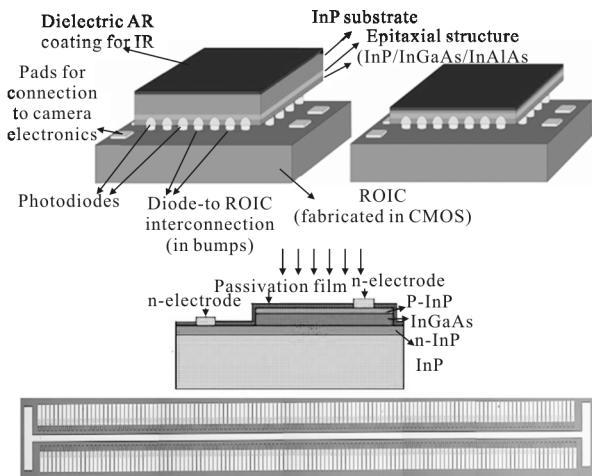


图 5 In_xGa_{1-x}As 凝视焦平面和线列焦平面阵列结构示意图

Fig.5 Schematic Structure of InGaAs staring and linear focal plane arrays

2.2 数字化

采用 CMOS 读出电路,完成光电信号的读出、传输与放大,具有数字化读出和存贮的功能,方便图像的传递、处理与分析。通过对信号数据进行数字化处理和改善,还能进一步提高器件性能。

2.3 反射成像,细节更清晰

短波红外主要利用目标对夜天光或人眼安全激光的反射形成的图像,具有反射的本质,能复现目标表面的绝大部分细节,细节更清晰。短波红外图像与可见光图像很相似,更符合人眼的观察习惯,有利于部队使用;同时,对环境温场的变化或漂移不敏感,辐射对比量大,信号更加稳定。

2.4 与可见光共光路成像

透可见光的光学材料石英玻璃同时透短波红外波段,因此采用一套光学系统即能很方便地完成可见、短波红外的双色成像,系统简单、成本低、性能好。通过去除衬底,InGaAs 器件的响应波长能延伸到 0.4 μm 可见光部分,图 6 给出了截止到 1.7 μm 同时吸收可见光的标准 InGaAs 器件成像效果,从中可见成像效果与可见光成像非常接近,成像细节清晰^[4]。



图 6 截止到 1.7 μm 同时吸收可见光的标准 InGaAs 器件成像效果

Fig.6 Image from InGaAs devices with response wavelength from 0.4 μm to 1.77 μm

3 主要应用

In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件充分利用红外“大气窗口”的短波频谱资源,探测范围覆盖大多目前常用的军用激光波段,而且易与可见光 CCD/CMOS 图像传感器、1.06 μm 激光测距机/照射器、1.55 μm 激光测距机/照射器集成,具有构建新一代红外、夜视光电系统的能力,可广泛应用于常用军事激光武器的跟踪和定位,激光通讯系统、夜视、侦查与监视、遥感、制导、光电对抗等领域^[5],是我军信息化装备不可缺少的技术,对实现我军装备信息化具有重要的作用和地位。

3.1 常用军事激光探测

In_xGa_{1-x}As 全固态数字化微光器件可用于军事上常用的 1.06 μm 和 1.55 μm 的短波红外激光探测,通过高灵敏度、大面阵 InGaAs 芯片,能够大范围精确地探测短波红外激光光源的位置。图 7 给出了短波红外焦平面探测器在没有月光的夜间对建筑物上的 850 nm 和 1.55 μm 红外激光参考点的成像图,可以清楚看到明亮的激光光源位置。

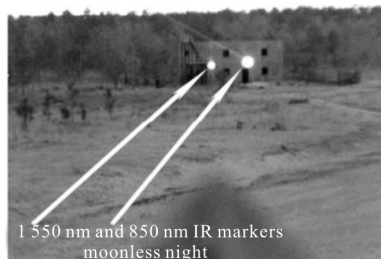


图 7 短波红外激光的 InGaAs 焦平面探测成像

Fig.7 Image of the eye-safe laser spot by InGaAs focal plane arrays

3.2 更高灵敏度和分辨率的夜视应用

InGaAs 全固态微光器件具有高灵敏度和分辨率,能够获得更低光照度的探测与识别,可作为新一代的夜视器材,应用于夜视头盔、枪瞄、机动部队驾驶仪器等领域。

3.3 三维主被动探测成像

利用 InGaAs 雪崩效应可制备高速响应的全固态微光器件,通过与激光测距仪集成在一起,能够获得目标的距离和红外图像信息,即能获得具有距离信息的目标红外图像,实现三维成像,这是未来红外探测器的一个重要发展方向和应用领域。

3.4 远距离侦察、监视

可见光成像相比,InGaAs 全固态微光器件能穿透烟雾、尘土等恶劣空气环境,穿透能力强,探测距离远,实现对目标的远距离探测与识别,如图 8 所示。图 8(a)为利用成熟的商业化可见光相机拍摄的雾天物体照片,从中无法辨别远处的轮船。图 8(b)为同样条件下利用短波红外探测的焦平面探测器拍摄的物体图像,从中可以清晰辨别出远处的轮船。



图 8 可见光与短波红外成像比较

Fig.8 Comparison of image between visible and short wavelength infrared camera

3.5 可见光/短波红外共口径双波段成像

光学材料石英玻璃同时透可见光和短波红外,因此 InGaAs 全固态数字化微光器件可方便实现共口径、共光路的可见光/短波红外的双波段成像,以及电视/短波红外的双制式探测等,系统性能提高,

同时成本大大降低。

3.6 激光通讯、激光制导

将激光通信与短波红外成像系统集成后,可实现视距内的点对点观察与通信。另外,与激光源配合,实现远距离的激光制导。

3.7 伪装识别

由于绿色植物反射近红外和短波光的能力很强,而人造绿色涂料却很弱,因此可以用于识别军用迷彩伪装,将极大提高战场侦察能力和监视能力。

3.8 空间应用

InGaAs 在 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的高性能探测为临近空间探测提供了很好的探测器,临近空间为海拔高度 $20\sim 100\ \text{km}$ 的空间,具有重要的军事应用价值。另外,与 InSb 中波器件合成,作为中短波双色红外探测器,可用于红外制导、预警,能够显著提高制导精度及其预警率。作为航天遥感应用,可完成大气资源分布、土壤水分监测、大气成分分析等空间对地探测,在空间应用中有着重要的作用。

4 结 论

为了在夜晚低照度条件下(如 $10^{-3}\ \text{lx}$)获得对目标清晰的图像,目前主要有两个技术途径,一是提高现有夜视器件的灵敏度,如专门应用在低照度条件下的高灵敏度硅 CCD 或硅 CMOS 成像器件;二是延长现有夜视器件的响应波长,使夜视器件的响应波段覆盖夜天光的辐射波长范围,最大化地接受并

利用夜天光的辐射能量,从而提高夜视器件对夜天光能量的响应灵敏度。InGaAs 全固态数字化微光器件具有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,目前在航天遥感、临近空间探测,人眼安全激光探测与定位、激光雷达、三维成像等方面已经体现出迫切的应用需求。作为一种新型微光器件,可望显著提高夜视系统的作战距离和作战能力,对于我军现代化装备具有重要的提升作用。

参考文献:

- [1] Antoni Rogalski. Infrared Detector [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [2] 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]// SPIE, 2007, 6542: 65420L-1-L9.
- [3] Li Xue' a, Tang Hengjing, Fan Guangyu, et al. 256×1 element linear InGaAs short wavelength near-infrared detector arrays [C]//SPIE, 2007, 6835: 68350501-08.
- [4] Marlon D Enriquez, Michael A Blessinger, Joseph V Groppe, et al. Performance of high resolution visible-for day/night vision[C]//SPIE, 2008, 6940: 69400O1-O9.
- [5] Devon G Turner, Timothy C Bakker, Peter Dixon, et al. Development of, and applications for, extended response (0.7 to $1.7\ \mu\text{m}$) InGaAs focal plane arrays[C]//SPIE, 2008, 6940: 694037-1-8.