

〈综述与评论〉

InGaAs 固体微光器件研究进展

史衍丽, 胡锐, 张卫锋, 冯云祥, 邓功荣, 褚祝军, 李燕红, 郭骞, 陆强

(北方夜视科技集团, 云南 昆明 650023)

摘要: InGaAs 器件具有光谱响应宽、量子效率高、响应速度快、数字化读出、高温工作、可靠性好以及寿命长等优点, 符合新一代微光器件的发展需求, 在国际上成为固体微光器件的一种新选择, 获得了重要的发展和应用。文章就 InGaAs 固体微光器件材料属性、器件性能以及成像特点等几方面进行了详细分析, 介绍了当前 InGaAs 器件的发展趋势, 以及研制 320×256 InGaAs 阵列的最新进展。研究结果表明 InGaAs 材料生长及器件工艺具有较好的可控性和稳定性, 为实现高性能、实用化的 InGaAs 固体微光器件提供了技术支撑。

关键词: InGaAs; 固体微光器件; 量子效率; 高温器件; 雪崩二极管

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)02-0081-08

Progress of InGaAs Solid-State Low-Light Devices

SHI Yan-li, HU Rui, ZHANG Wei-feng, FENG Yun-xiang, DENG Gong-rong,
CHU Zhu-jun, LI Yan-hong, GUO Qian, LU Qiang

(North Night-Vision Science and Technology Group CORP. LTD, Kunming 650023, China)

Abstract: InGaAs devices has been chosen as new candidate of solid-state low-light devices because of advantages such as wide response wavelength, high quantum efficiency, high device performance, digitalized readout, high temperature operation, high reliability and long lifetime etc., it has gained vital development and application in the world. The InGaAs material properties, devices performance and imagery characterization was analyzed in detail, InGaAs devices development trend was introduced, the new advancement of 320×256 InGaAs arrays was depicted. The results of study showed both material growth and devices fabrication technology of InGaAs devices were easy to control and have excellent stability, providing technical support for realizing high performance and practical devices.

Key words: InGaAs, solid-state low-light devices, quantum efficiency, high temperature operation, avalanche diode

0 引言

InGaAs 器件的响应波长具有重要的军事应用价值, 一方面, 其响应波段范围覆盖了夜天光辐射的光谱范围, 可用于高性能的夜视应用, 如头盔、无人机侦查等; 另外一方面, 两个重要的军事激光波段 $1.06 \mu\text{m}$ 以及 $1.5x \mu\text{m}$ ($1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$) 都处于其响应范围之内, 为目前军事上常用的激光测距、定位与跟踪, 激光预警, 激光成像制导, 激光三维成像以及激光照明主动探测系统等应用提供

了有力的探测手段^[1-3]。

从器件性能而言, InGaAs 材料具备高量子效率以及较好的材料稳定性, 适宜在室温和近室温 ($-40^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$) 下高温工作, 且性能超越了相同波段的碲镉汞器件^[4], 目前报道的标准 InGaAs 探测器 (响应波长为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 以下定义相同) 在室温下探测率高达 $10^{14} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 这是目前室温工作器件可以达到的最好水平^[1]。高性能 InGaAs 器件的高温工作特性大大降低了对制冷的要求, 半导体制冷或小型制冷机即能满足其工作要求, 使 InGaAs

收稿日期: 2014-02-10

作者简介: 史衍丽 (1969-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为探测器研究与制备。

基金项目: 国家自然基金重点项目, 编号 U1037602。

器件具有低功耗、小体积、低成本以及高可靠性等优点,为高性能、高精度探测的军事应用提供了保障^[5-7]。

以美国为代表的西方先进国家早在20世纪70年代就开始了对InGaAs器件的研究,对材料设计、材料生长、器件结构以及器件工艺等进行了大量的研究,研制出1k×1k的单片大规格探测器芯片,形成了以256×1、512×1、1024×1、6000×1等为代表的线列产品,以及320×256、640×512、1k×1k等不同规格的凝视产品,目前包括美国、英国、法国、比利时、以色列、日本以及台湾的多个机构具有InGaAs器件产品的生产能力,其生产产品在高性能夜视(含被动或主被动双模探测)、临近空间探测、海面安防、生产自动化检测等领域获得广泛应用。

国内InGaAs器件的研制之前主要集中在标准器件或更长响应波长(到2.6μm)的器件研制,以满足航天航空遥感探测、常用军事激光应用等^[8-10]。为了获得更好的夜视功能,InGaAs固体微光器件的研究侧重于将响应波长扩展到可见光波长,以获得目标对可见光部分的反射信号,提高对目标的识别率,这在国际上已成为一个发展趋势。当前国际上进行InGaAs器件生产的厂家,包括美国Goodrich SUI(传感无限公司)和FLIR,法国III-V实验室,以色列SCD、比利时Xenics、英国Raptor^[11-16]等都进行了响应波长短至可见光0.4μm的研制和生产,具备提供可见光和近红外同时响应的宽光谱响应器件产品的能力。

为了提高器件在可见光部分的响应,需要对材料以及器件结构进行特殊的设计,同时通过对器件衬底进行减薄,把InP衬底彻底去除,降低衬底对可见光部分的吸收^[17-19]。为了尽快研制出高性能InGaAs固体微光器件,验证其对可见光的响应,安

排了320×256规格的InGaAs阵列的设计和研制,通过对测试配管的测试研究表明,研制的320×256InGaAs阵列具备可见光响应,从而验证了器件设计思路、材料生长以及器件工艺的可行性,为下一步器件性能的提高奠定了研究基础。

在介绍320×256InGaAs阵列研制进展之前,结合近期对InGaAs器件的思考,以及采用InGaAs器件进行成像实验的一些结果,首先分析了为什么选择InGaAs器件,之后对InGaAs器件成像应用存在的两个问题进行了探讨,最后总结了当前国际上InGaAs器件的发展趋势及研究工作。

1 InGaAs器件的选择

1) 光谱响应特性

In_xGa_{1-x}As器件响应波段可通过调节In组分x值获得0.87~3.5μm的响应,如图1所示,同时通过材料设计和器件工艺等途径还能够完成向可见光的扩展^[17-19],其响应光谱范围覆盖夜天光的辐射光谱范围。夜天光辐射光谱分布在0.5~2μm,主要分布范围为1~2μm,如图2^[5]所示。在这个能量区间,传统的微光像增强器响应波长最长到0.9μm,对夜天光能量的利用率低。与此不同,InGaAs材料的响应波段却能覆盖夜天光全部光谱范围,能量利用率高,可望大大提高夜视系统的作战距离和性能。

2) 高量子效率,高探测率,高器件性能

InGaAs材料吸收系数大,对于InGaAs材料约7000cm⁻¹;加之InGaAs固体微光器件属于内光电器件,光生载流子损失小,决定了InGaAs固体微光器件的量子效率高,对于截止波长为1.7μm的标准InGaAs器件在1.2~1.6μm范围的量子效率接近90%,如图3^[3]所示,该图中同时给出了三代微光像增强器的光谱响应以及量子效率。

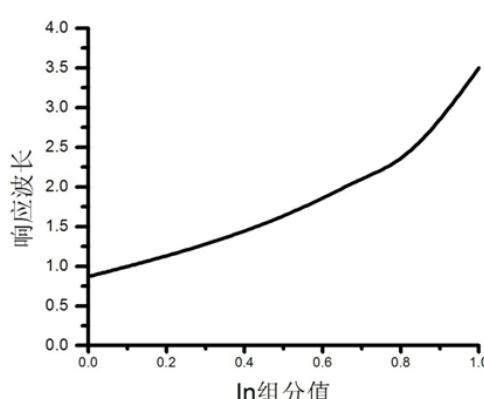


图1 InGaAs器件响应波长随In组分变化的关系
Fig.1 Response wavelength of InGaAs devices with In composition

In组分值	响应波长/μm
0	0.87
0.53	1.7
0.6	1.86
0.7	2.10
0.74	2.2
0.8	2.36
0.82	2.50
1	3.5

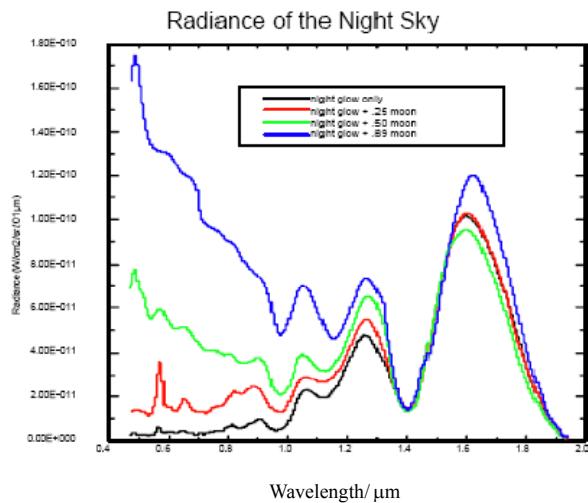


图2 不同天气下夜天光辐射波长与辐射能量曲线

Fig.2 Radiance wavelength and energy of night glow under different weather condition

3) 高温工作特性,低功耗、长寿命,高性价比
InGaAs 全固态数字化微光器件具有较好的高温工作特性,可在半导体热电制冷条件或室温下工作,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。常规应用的 320×256 规格的 InGaAs 固体微光器件组件(包含封装)研制成本可望控制在人民币 1.5 万以内,随着大面积 InGaAs 材料的应用以及生产产量的进一步提高,成本还可望进一步降低。图 4 给出了法国 III-V 实验室研制的 InGaAs 320×256 组件及其紧凑型像机, InGaAs 320×256 组件带有 1 级半导体热电制冷,大小与 1 欧元硬币相当^[17]。

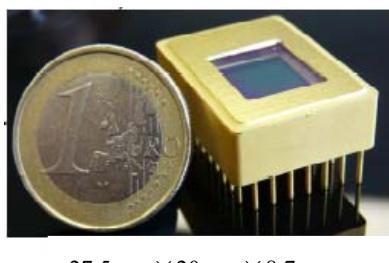


图4 法国 III-V 实验室研制的 InGaAs 320×256 组件(上)及其紧凑的像机(下)

Fig.4 InGaAs 320×256 module(upper) and compact camera(lower) at III-V Lab

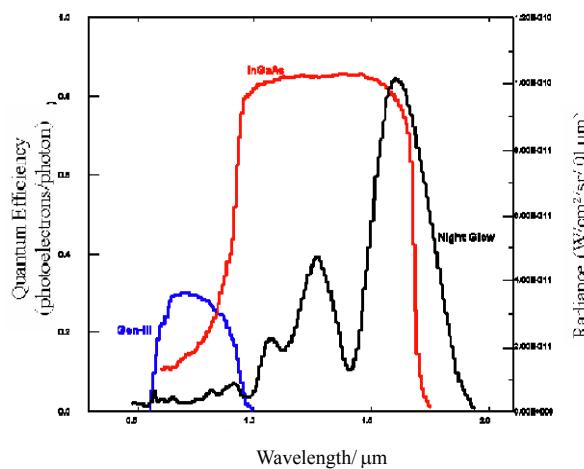


图3 三代微光像增强器、标准 InGaAs 器件的响应光谱范围和量子效率分布

Fig.3 Response spectrum and quantum efficiency of Gen-III low-light image intensifier and standard InGaAs devices

4) 数字化读出

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。同时,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。

5) 高速响应

InGaAs 材料室温下迁移率高达 $13800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,是一种高迁移率器件;另外,采用 PIN 器件结构,与 PN 结器件相比可以获得更快的器件响应速度。通过对器件结构参数的优化设计, InGaAs PIN 器件可实现高速应用。如果采用雪崩放大原理制备 InGaAs 雪崩二极管探测器(APD),响应时间可达到 ns 量级^[20-23]。

6) 成熟稳定的材料和器件生产工艺,批产优势明显

采用 InP 衬底,基于薄膜材料生长方式 MOCVD (金属有机化学汽相沉积系统) 或 MBE (分子束外延系统) 进行 InGaAs 固体微光器件材料的生长,其生长方式和生长工艺参数可控性好,可获得大面积均匀的薄膜材料。加之 InP 衬底与标准 InGaAs 晶格完美匹配,材料生长质量好;对于截止波长更长的 InGaAs 材料,与 InP 衬底存在一定的晶格失配,则可通过材料组分递变的方式降低晶格失配以及相应的材料缺陷。目前成熟的 InP 市售衬底直径有 2 in、3 in、4 in,在 4 in 材料上直接进行 640×480 规格的 InGaAs 器件研制,一次性可完成 24 个芯片的生产,如图 5^[1] 所示。InGaAs 固体材料生长工艺技术可控性好,器件工艺像 GaAs III-V 器件工艺稳定性好,批产优势明显。



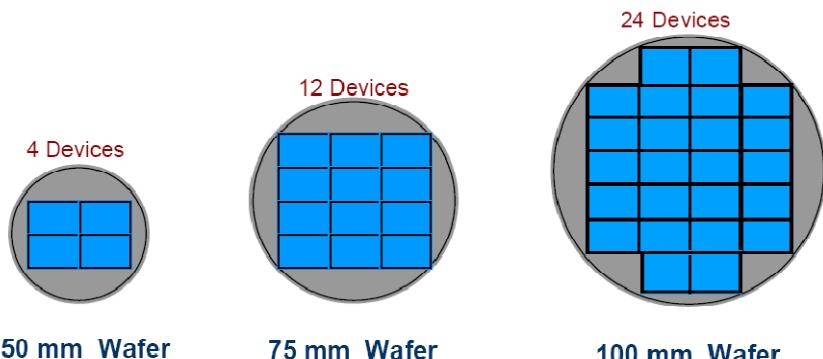


图5 在2 in、3 in、4 in材料上直接进行 640×480 规格的InGaAs器件研制的芯片数量，材料尺寸越大，产量越高，成本更低
Fig.5 Chip number of 640×480 InGaAs array in 2 in, 3 in, 4 in InP/InGaAs wafer, larger wafers will lead to higher yield and thus lower costs on 1D and 2D arrays

2 两个成像应用问题

1) 成像特性

InGaAs 器件的成像方式可以是反射成像，也可以是热辐射成像，决定的因素主要由目标的温度确定。常温下目标的成像主要是来自于目标对日光、月光、星光或辉光等各种辐射的反射成像。当目标的温度很高，其辐射波长处于 InGaAs 器件响应波段范围之内，InGaAs 器件也能用于目标的热辐射成像。

由黑体辐射的维恩位移定理，峰值辐射波长与目标温度的关系为：

$$\lambda_m T = 2897 \text{ } \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

由此可确定目标辐射的中心波长处于 $1\sim2 \text{ } \mu\text{m}$ 时，其目标的温度至少为 $1500\sim2897 \text{ K}$ 高温。当巡航导弹以大约 $2\sim5 \text{ Ma}$ 的速度在临近空间（海拔高度 $20\sim100 \text{ km}$ ）飞行时，由于飞行速度过快，其尾烟产生的温度高达 2000 K ，辐射波长处于 $1\sim2 \text{ } \mu\text{m}$ ，采用 InGaAs 探测器就能为其提供一种适宜的高性能的探测，称之为临近空间探测，在巡航导弹预警探测方面有着重要的应用。另外，由于 InGaAs 器件具有较高的探测灵敏度，当物体温度到达一定高度时，InGaAs 探测器即能探测到其热辐射形成的热成像。经过实验测定，当黑体温度为 70°C 时，InGaAs 器件就能清楚地检测到黑体的热辐射成像，当黑体温度升高到 150°C ，其热辐射成像更清晰，如图 6 所示。图 7 同时给出了电烙铁由头部到跟部逐渐升温过程中的热辐射成像，成像也非常清晰。

常温下 InGaAs 器件检测目标的反射成像方式，与可见光成像方式相同，因此非常适宜人眼观察；另外，反射成像细节清晰，对背景温度场的漂移不敏感，器件具有较高的灵敏度。其波长比可见光长，穿雾能力更强。图 8 给出了在相同的大雾天气条件下，采用 320×256 InGaAs 器件像机与可见光成像的效果，图 8 左边的可见光图像显示了在大雾的气象条件下，对景物的模糊成像。图 8 右边的 InGaAs 器件的成像则显示了在大雾天气下对景物清晰的成

像，尤其是远处山上的树木以及山后的两个山峰，天空的云彩都清晰可见。

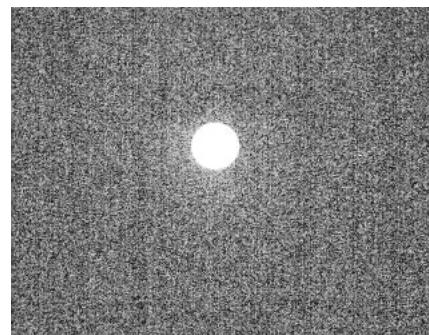
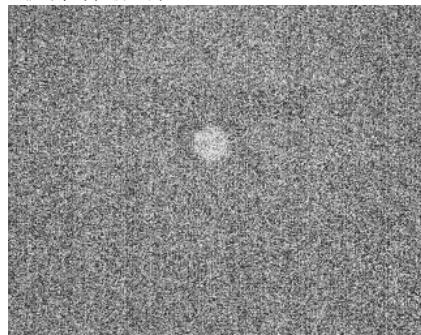


图6 采用 320×256 InGaAs 像机测试得到的黑体在 70°C （上）和 150°C （下）的热辐射成像

Fig.6 Hot radiation image of blackbody under 70 degree (upper) and 150 degree (bottom) temperature taken by 320×256 InGaAs camera



图7 采用 320×256 InGaAs 像机测试得到的电烙铁加热过程的热辐射成像

Fig.7 Hot radiation image of hot iron during warming process taken by 320×256 InGaAs camera

另外, InGaAs 器件成像和可见光成像采用的光学窗口材料相同, 两者都可以采用玻璃, 这为可见光与近红外的双波段成像, 以及包含两个波段的宽光谱探测和成像提供了很好的技术基础。

2) 夜晚较低照度下的夜视功能

在夜晚较低照度如低于 10^{-3} lx 条件下, InGaAs 器件能否还能探测或具有夜视能力? 这主要取决于 InGaAs 器件的灵敏度。美国 Goodrich 公司通过把标准 InGaAs 器件的暗电流降低到 10^{-9} A/cm², 采用 1280×1024 器件规格, 光学镜头 F#=1.4, 在完全无月光、与周围青草的对比度为 11% 的条件下能看到 25 m 处的人, 如图 9^[3] 所示。另外, 美国 Goodrich 公司通过理论计算, 对 1280×1024 InGaAs 标准器

件与典型的三代微光器件进行了比较, 在相同条件下对 100 m 以外的人, InGaAs 器件具有更好的识别和辨识能力。如果进一步加入雪崩放大, 或者工作在盖格模式, InGaAs 器件具备单光子探测能力, 进行夜晚低照度的探测和识别是完全可行的。

3 三个发展趋势

1) 波长扩展

InGaAs 器件通过调整 In 的组分或进行工艺处理, 器件的响应波长可以向短波或长波方向扩展, 短的波长方向可扩展到可见光, 长的波长方向可延伸到 2.5 μm, 如图 10 和图 11 所示^[6,11-16]。



图 8 采用可见光像机(左)和 320×256 InGaAs 像机(右)在有雾条件下的成像效果
Fig.8 Pictures of the same scene taken with a visible camera (left) and 320×256 InGaAs camera (right)



图 9 采用 InGaAs 像机在无月亮条件下对人的成像效果
Fig.9 Image capture on a dark, moonless night using the MANTIS digital camera operating at a 30 Hz frame rate with a f/1.4 lens

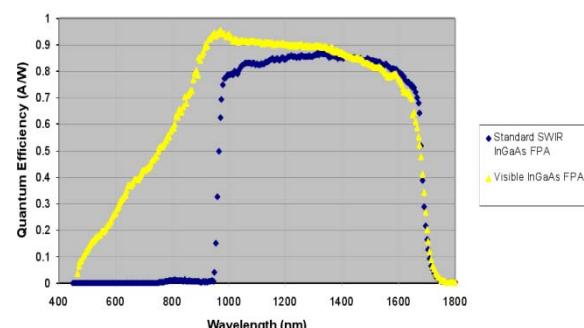


图 10 InGaAs 器件响应波长到 0.4 μm
Fig.10 Spectral response to 0.4 μm for InGaAs devices

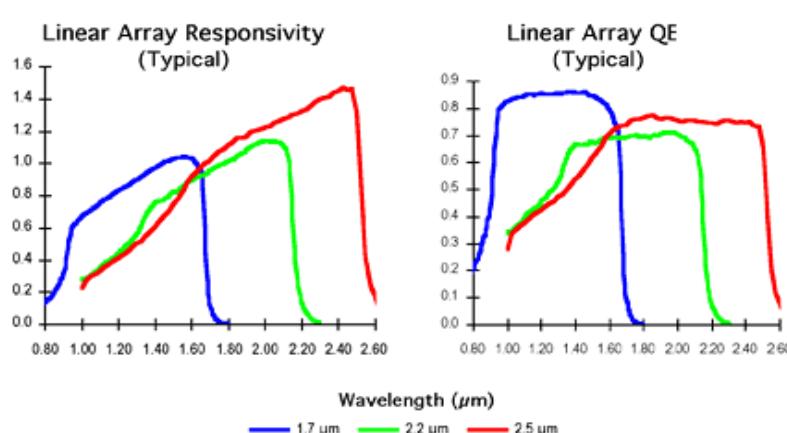


图 11 InGaAs 器件响应波长到 2.5 μm
Fig.11 Spectral response to 2.5 μm for InGaAs devices

向可见光扩展，能同时把目标对可见光部分的反射信息包含其中，增加了对目标检测的信息量，提高了对目标的识别率。对分别采用可见光探测($0.4\sim0.7\text{ }\mu\text{m}$)、近红外探测($0.9\sim1.7\text{ }\mu\text{m}$)以及包含两种光谱探测($0.4\sim1.7\text{ }\mu\text{m}$)的3种像机对相同目标的成像结果进行了比较，如图12^[17]所示，在上部的可见光图像中能看到白光LED光斑、红色激光光斑、以及带有颜色的字迹。在左边短波红外的图像中能看到 1550 nm 的LED光斑以及发热的电烙铁。而在向可见光扩展的InGaAs固体微光器件图像里能把可见光和短波红外两部分呈现的图像同时显示出来。由3幅图像的比较结果看到，对于标准的InGaAs近红外器件，加入可见光部分的信息后，InGaAs固体微光器件具备了类似于可见光和近红外双光谱成像的能力，能够获得了关于目标更全面的信息，提高了对复杂、伪装目标的识别力。

除了自身波长的扩展，InGaAs器件还能与可见光CCD像机、长波红外、中波红外、紫外等进行组合，对目标实现多个波段探测和识别，如利用中波或长波红外在海面或地面等不同场合的探测发现能力，利用InGaAs器件进行高精度的识别，提高战场的精确打击能力。

2) 像素间距进一步缩小，面阵规模提高

InGaAs材料基于InP衬底能够获得完美的晶格匹配，同时采用MOCVD或MBE高精度薄膜材料生长方式可实现大尺寸、均匀性好的材料生长，为

大面阵单片式器件研制提高了材料基础。目前器件最大规格达到 $1\text{k}\times1\text{k}$ ，如图13所示^[3]。由于InGaAs器件波长短，像元中心距离相对于中波与长波器件而言可望进一步缩小，单片式器件规格还能进一步扩大。像元面积在缩小的同时，光敏面也在缩小，为了提高器件的响应率，可考虑通过增加微透镜等方法，在保障小中心距离的同时，保持较大的光敏面和响应率。

3) 发展雪崩器件，提高灵敏度

通过利用半导体器件雪崩效应，使InGaAs器件具有自身增益功能，能够显著提高器件的灵敏度，提高器件的夜视能力。若利用盖格模式，InGaAs器件甚至具有单光子的探测能力^[20-23]。发展雪崩器件，除了提高灵敏度，同时使器件具有ns量级的高速响应能力，为三维激光成像、主动式探测提供了器件选择。

4 320×256 器件研制进展

设计了能够扩展到可见光响应的InGaAs固体微光器件材料，在2英寸InP衬底上采用MOCVD完成了材料生长，采用大片工艺在2 in材料上直接进行 320×256 规格的芯片制备， 320×256 阵列的特征尺寸是：中心距 $30\text{ }\mu\text{m}\times30\text{ }\mu\text{m}$ ，像素之间距离 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。在现有的工艺条件下，选择台面结构的器件工艺制备方式，以完成对材料以及器件工艺的验证。制备的部分阵列像元照片如图14所示。

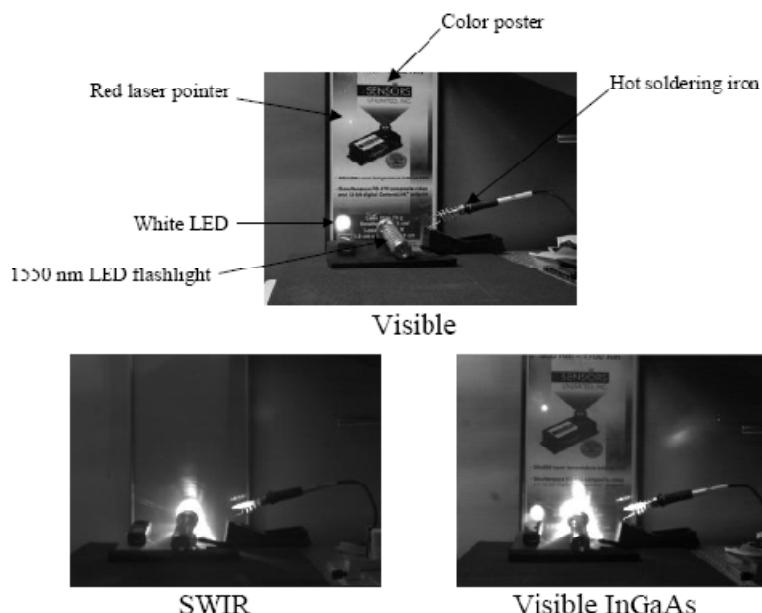


图12 采用可见光探测($0.4\sim0.7\text{ }\mu\text{m}$)、近红外探测($0.9\sim1.7\text{ }\mu\text{m}$)以及包含两种光谱探测($0.4\sim1.7\text{ }\mu\text{m}$)的3种像机对同一景物目标的成像效果

Fig.12 Pictures of the same scene taken with a visible camera (top), an InGaAs SWIR camera (bottom left), a Visible InGaAs (visible and SWIR) camera (bottom right)

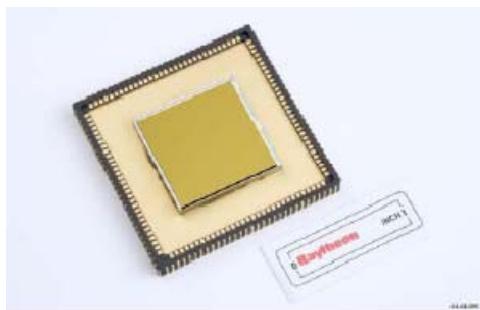


图 13 1 k×1 k InGaAs 器件组件

Fig.13 1 k×1 k InGaAs module

在每一个 320×256 阵列芯片的周边都设计有用于中间工艺或性能检测的测试图像，其中也包含了特征尺寸是中心距 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ，像素距离 $2 \mu\text{m}$ 的检测单元，通过对这些检测单元的测试能准确地反映 320×256 阵列芯片的性能。采用直接用探针接触和示波器观测的方式，对测试配管的性能进行了检测，如图 15 和图 16 所示，在图 15 中左边可见光光源被书挡住，起到的作用是挡住白光对芯片的照射，能观察到右边显示屏上的电流显著地降低；

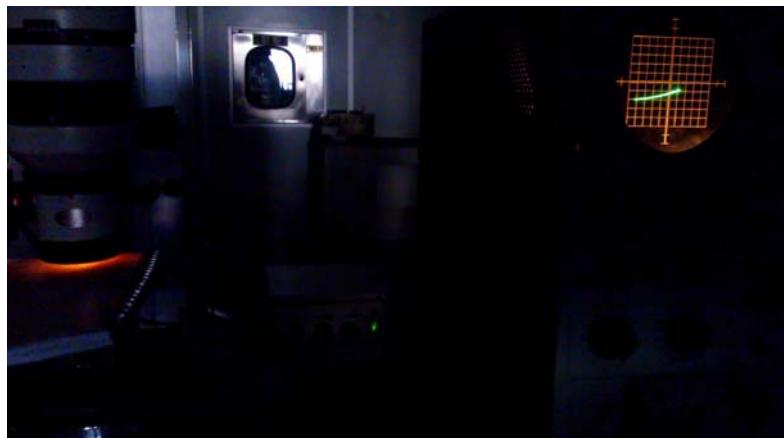


图 15 研制的 320×256 InGaAs 阵列测试配管在没有光照时的电流，见右边显示屏上的曲线

Fig.15 Current of test diodes on 320×256 InGaAs arrays without visible-light radiation, the current is shown on right display screen

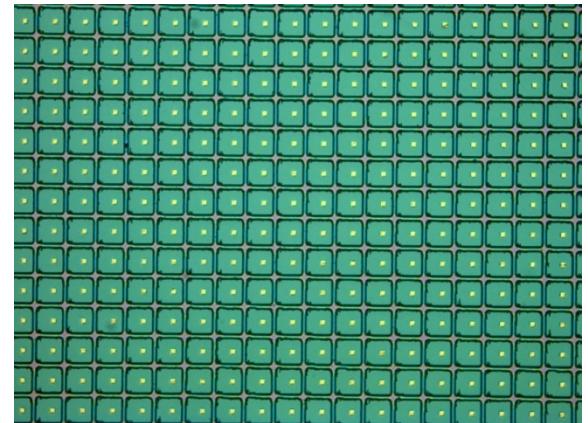


图 14 研制的 320×256 InGaAs 阵列部分像元

Fig.14 Some pixels of prepared 320×256 InGaAs arrays



图 16 研制的 320×256 InGaAs 阵列测试配管有光照时的光电流，见右边显示屏上的曲线

Fig.16 Photo-current of test diodes on 320×256 InGaAs arrays with visible-light radiation, the current is shown on right display screen

5 结语

InGaAs 固体微光器件的响应波长覆盖夜天光的辐射能量, 同时涵盖了两个常用激光 ($1.06\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.5x\text{ }\mu\text{m}$) 波段, 具有重要的军事应用价值。其材料生长方式可控性好, 器件工艺稳定, 为之后的大批量生产提供了技术保障。近室温的高温工作方式决定了其简单廉价的封装, 使之成为一种具有高性能、低成本和较好性价比的器件选择。近期 320×256 InGaAs 阵列的研究结果充分验证了以上思路, 显示了材料设计、材料生长以及器件工艺的可行性, 为尽快实现高性能的 InGaAs 固体微光器件建立了技术积累。

致谢

感谢北京工业大学光电子技术实验室邓军博士提供的 InGaAs 材料, 以及邹德恕老师、牛晓晨在器件研制过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 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]//Proceedings of SPIE, 2002, 4721: 26-36.
- [2] Devon G Turner, Timothy C Bakker, Peter Dixon, et al. The development of, and applications for, extended response (0.7 to $1.7\mu\text{m}$) InGaAs focal plane arrays s[C]//Proc. of SPIE, 2008, 6940: 694037-1-8.
- [3] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//Proc. of SPIE, 2005, 5783: 32- 38
- [4] 潘建旋, 以善珍, 周航宇. InGaAs 短波红外探测器[J]. 红外与激光工程, 2007(4): 202-205.
- [5] 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.
- [6] 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: 65420L-1-L9
- [7] Michael MacDougal, Andrew Hood, JonGeske, et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging[C]//Proc. of SPIE, 2011, 8012: 801221-1-10.
- [8] Li Xue, Tang Hengjinga, Fan Guangyua, et al. 256×1 element linear InGaAs short wavelength near-infrared detector arrays[C]//Proc. of SPIE, 2007, 6835: 68350501-08.
- [9] 高新江, 张秀川, 唐遵烈, 等. 320×256 InGaAs 短波红外焦平面阵列探测器[J]. 半导体光电, 2009, 30(2): 178-190
- [10] 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.
- [11] Sensors Unlimited Inc. SU320KTVis-1.7RT[EB/OL]. 2009 [2014-02-13]. <http://www.sensorsinc.com/>.
- [12] FLIR Systems. FLIR SC70000 NIR/VNIR Series.[EB/OL]. 2009 [2014-02-13]. <http://www.flir.com/>.
- [13] Alcatel Thales. III-V lab. Cactus SWIR [EB/OL]. 2009 [2014-02-13]. <http://www.3-5lab.fr/>.
- [14] Xenics Infrared Solutions. Xeva-1.7-320 VisNIR[EB/OL]. 2008 [2014-02-13]. www.xenics.com.
- [15] Raptor Photonics. OWL SW1.7CL-320[EB/OL]. 2009 [2014-02-13]. <http://www.raptorphotonics.com/>.
- [16] SCD Semiconductor Devices. Cardinal 640[EB/OL]. 2009[2014-02-13]. <https://www.scd.co.il>.
- [17] Tara Martin, Robert Brubaker, Peter Dixon, et al. 640×512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging[C]//Proc. of SPIE, 2005, 5783: 12-20.
- [18] Anne Rouvié, Jean-Luc Reverchon, Odile Huet, et al. InGaAs focal plane arrays developments at III-VLab[C]//Proc. of SPIE, 2012, 8353: 835308.
- [19] Tara J Martin, Marshall J Cohen, J Christopher Dries, et al. InGaAs/InP focal plane arrays for visible light imaging[C]//Proc. of SPIE, 2004, 5406: 38-44
- [20] Mark A Itzler, Rafael Ben-Michael, Jiang Xudong, et al. Geiger-Mode avalanche photodiodes for near- infrared photon counting [C/OL]/in Conference on Lasers and Electro -Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, 2007, <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=CLEO-2007-CMII1>.
- [21] Wu X, Gu Y, Yan F, et al. High Uniformity, Stability, and Reliability Large-Format InGaAs APD Arrays[C/OL]/in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Optical Society of America, 2007, <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=CLEO-2007-CMII2>.
- [22] Liu Mingguo, Hu Chong, Bai Xiaogang, et al. High-performance InGaAs/InP single-photon avalanche photodiode[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4): 887-894.
- [23] Kyung-Sook Hyun, Youngmi Paek, Yong-Hwan Kwona, et al. High speed and high reliability InP/InGaAs avalanche photodiode for optical communications[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4999: 130-137.